



Fraunhofer

ISE

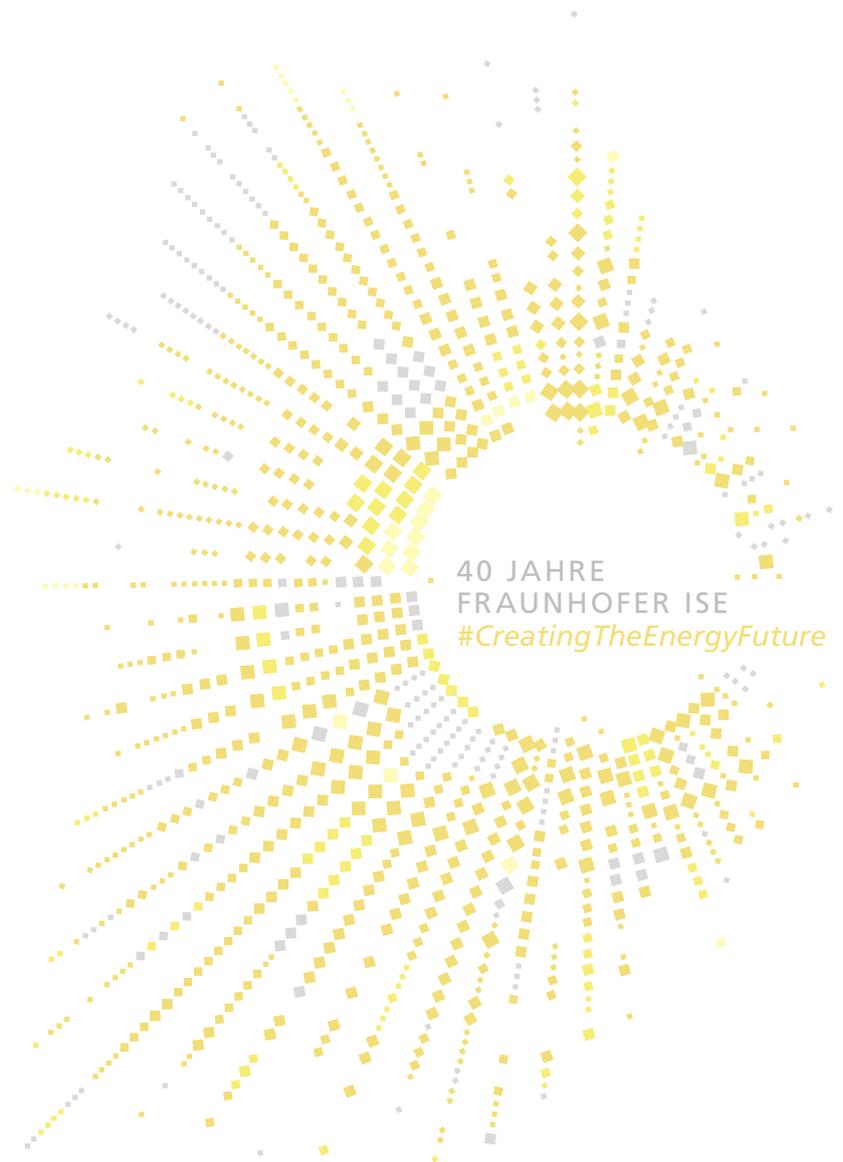
FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

Jahresbericht 2020/21

40 JAHRE
FRAUNHOFER ISE
#CreatingTheEnergyFuture

Die Energie der Sonnenstrahlung ist Voraussetzung für das Leben auf der Erde und kann in Form von Wärme, elektrischem Strom oder chemischer Energie genutzt werden. Seit vierzig Jahren forscht das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE als größtes europäisches Solarforschungsinstitut daran, die Sonnenenergie für eine Energieversorgung zu nutzen, die ohne fossile Energieträger auskommt. Für diese Zukunftsvision, die Menschheit mit kostengünstiger erneuerbarer Energie zu versorgen, entwickeln wir vielfältige Technologien und Systemlösungen für eine nachhaltige Energiebereitstellung und -verteilung sowie für deren Speicherung und effiziente Nutzung.

Jahresbericht 2020/21



Vorwort

Mit diesem Jahresbericht blicken wir zurück auf eine Zeit, die für uns alle durch das Corona-Pandemiegeschehen geprägt war. Trotz der zwingend erforderlichen Anpassungen unserer aller Arbeitsweise können wir feststellen, dass die Pandemie dem Fraunhofer ISE bislang keinen wesentlichen Schaden zugefügt hat. Der größte Teil der Projekte konnte im angepassten Betrieb des Instituts erfolgreich bearbeitet werden. Trotz Corona-Krise haben die Themen Klimawandel und Energiewende ihre Dringlichkeit nicht verloren. Im vorliegenden Jahresbericht haben wir einige unserer laufenden Arbeiten für Sie zusammengestellt. Weitergehende Informationen finden Sie auf der [Website des Fraunhofer ISE](#).

Im Februar 2020 haben wir eine zentrale Studie mit dem Titel [»Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen«](#) vorgestellt. Hier haben wir erstmals Transformationspfade für die Energiewende mit gesellschaftlichem Verhalten verknüpft. Im Herbst wurden die darin skizzierten Szenarien neu gerechnet, im Kontext der Zielverschärfungen des europäischen Green Deals, die eine Treibhausgasreduktion der EU auf 55 % bis 2030 und auf 100 % bis 2050 vorsehen. Die Ergebnisse der [Studie](#) unterstützen den wissenschaftlichen Diskurs zur Weiterentwicklung der Energiewende.

Die breite Expertise des Fraunhofer ISE führte im vergangenen Jahr auch wieder zur Berufung in hochrangige Gremien. So wurde Prof. Dr. Hans-Martin Henning im August 2020 vom Bundeskabinett in den neuen [»Expertenrat für Klimafragen«](#) berufen, dessen Vorsitz er innehat. Das unabhängige Expertengremium aus fünf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern berät die Bundesregierung bei der Anwendung des Bundesklimaschutzgesetzes.

Auch unsere oben genannte Studie zeigt deutlich auf, dass grüner Wasserstoff ein Kernelement des zukünftigen Energiesystems sein wird. Er kann einen wesentlichen Beitrag zur angestrebten Treibhausgasneutralität aller Sektoren bis 2050 leisten und zur Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energien beitragen. Im Vorfeld der Verkündung der Nationalen Strategie Wasserstoff (NSW) durch die Bundesregierung hat die Fraunhofer-Gesellschaft eine [Wasserstoff-Roadmap](#) entwickelt und den an der Strategieentwicklung beteiligten Ministerien zur Verfügung gestellt. Federführend waren das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und das Fraunhofer ISE. Auch im europäischen Kontext wird die Wasserstofftechnologie-Kompetenz des Instituts und der Fraunhofer-Gesellschaft wahrgenommen: Prof. Dr. Christopher Hebling wurde zum Juli 2020 als Experte für die Vertretung Deutschlands im Executive Committee des [»Technology Collaboration Program for Research and Development on the Production and Utilization of Hydrogen«](#) der [Internationalen Energieagentur IEA](#) nominiert. Im Dezember wählte ihn der [Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband](#) in das im Rahmen einer Neuausrichtung aufgestellte Präsidium und ernannte ihn dort zum Vizepräsidenten. Er wurde außerdem von Bundesminister Peter Altmaier (BMWi) in den zwölfköpfigen Expertenausschuss [»Zukunftsfonds Automobilindustrie«](#) der Bundesregierung berufen.

Ebenfalls eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende – auch auf europäischer Ebene – sind Wärmepumpen, zu denen das Fraunhofer ISE entlang der gesamten Wertschöpfungskette forscht. Dr. Marek Miara, Business Developer Wärmepumpen am Fraunhofer ISE, wurde vor Kurzem in den Vorstand der [European Heat Pump Association](#) gewählt.



Ein wesentliches Resultat unserer Studien zur Energiewende ist auch, dass ein starker und beschleunigter Ausbau der Photovoltaik erforderlich ist. In diesem Kontext sollte auch die europäische Technologie-Souveränität betrachtet werden. Bei dieser ist Prof. Dr. Andreas Bett stark engagiert, u. a. über das White Paper »10GWGreen-Fab«. Erste Erfolge sind sichtbar, da einige Firmen wieder Solarzellen in Europa produzieren. Das Fraunhofer ISE ist zudem auch Mitglied im neu gegründeten [European Solar Manufacturing Council \(ESMC\)](#), um die europäische Produktion zu unterstützen.

Die Entwicklung höchsteffizienter Solarzellen ist seit Jahren ein Markenzeichen des Fraunhofer ISE. Um diese auch künftig leisten zu können, haben wir in 2020 den Bau und die Erstausrüstung unseres neuen Laborgebäudes »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« (Seite 83) beendet und mit dem Bezug begonnen. Das Gebäude wurde mit Mitteln des Bundesforschungsministeriums und des Landes Baden-Württemberg finanziert. Dafür sind wir sehr dankbar. Im neuen Gebäude werden verstärkt [Tandem-Photovoltaiktechnologien](#) entwickelt, die es ermöglichen, die theoretische Wirkungsgradgrenze der Siliciumsolarzelle zu überwinden und so eine noch höhere Energieausbeute pro Fläche zu erreichen.

Die Fraunhofer ISE-Plattform [energy-charts.info](#) erfuhr im September einen Relaunch. Die interaktive Webseite wurde um neue Daten und Verknüpfungsmöglichkeiten erweitert und das Design komplett überarbeitet sowie für die mobile Nutzung optimiert.

Auch zwei neue Fraunhofer ISE-Ausgründungen sind entstanden. Mit KI-basierten Softwarelösungen für die Planung von Energiesystemen ging [greenventory](#) – ein Spin-off des KIT und des Fraunhofer ISE – an den Start.

Ressourcenschonende und effizienzsteigernde Produktionstechnologie mit Kostenreduktionspotenzial für Solarzellen ist das Thema unserer jüngsten Ausgründung, der [HighLine Technology GmbH](#).

Wir freuen uns sehr, dass Saskia Vormfelde im Juni 2020 ihre Rolle als Verwaltungsdirektorin am Fraunhofer ISE angetreten hat. In dieser für das Institut neuen Funktion hat Frau Vormfelde einen Prozess zur organisatorischen Weiterentwicklung des Verwaltungsbereichs begonnen.

Im Jahr 2021 blicken wir auf zwei Veranstaltungs-Highlights: die Einweihung des erwähnten »Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen« und die Feierlichkeiten zum vierzigjährigen Bestehen des Instituts.

Wir danken unseren Projektpartnern, Kuratoren, Auditoren, Stipendiengebern, Ansprechpartnern und Förderern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene herzlich für die Unterstützung und Förderung des Fraunhofer ISE sowie für die gute Zusammenarbeit. In der Hoffnung, dass wir alle ohne größere Blessuren durch die Pandemiephase kommen, freuen wir uns auf deren Fortsetzung in der Zukunft. Denn mindestens genauso wichtig wie das Überwinden der Pandemie ist die dringliche Aufgabe, die Transformation unseres Energiesystems hin zu Nachhaltigkeit schnellstmöglich voranzubringen.

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Prof. Dr. Andreas Bett

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

Inhalt

Vorwort	2
<hr/>	
Das Fraunhofer ISE	8
Organisationsstruktur	10
Kuratorium	11
Profil	12
Nachhaltigkeit	13
Kooperationen	14
Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft	15
Das Institut in Zahlen	16
Promotionen	18
Preise und Auszeichnungen	20
Austausch zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik	22

Highlights unserer Forschung	24		
Photovoltaik	26	Künstliche Intelligenz für die Solarzellencharakterisierung	37
Tandem-Photovoltaik – der Weg zu höheren Wirkungsgraden	28	Neue Einblicke in das Kristall- und Defektwachstum	38
Silicium-Photovoltaik	30	Entwicklung von Cast-Mono-Silicium mit niedrigem CO ₂ -Fußabdruck	39
III-V- und Konzentratorphotovoltaik		Silicium-Heterojunction-Technologie (HJT)-Plattform am Fraunhofer ISE	40
Perowskit- und Organische Photovoltaik		Digitalisierung von präzisen Hochdurchsatz-Druckprozessen	42
Photovoltaische Module und Kraftwerke		Vereinzelung und Kantenpassivierung von Siliciumsolarzellen	43
TOPCon: Von der 26 %-Laborzelle zur Industriereife	31	Matrix-Schindeltechnologie für die Integrierte Photovoltaik	44
Kosten- und ressourceneffiziente Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen	32	Entwicklung von Prüfverfahren am Beispiel LeTID	45
Al ₂ O ₃ -Passivierungsschichten für gedruckte Perowskitsolarzellen	33	Satellitenbasierte Daten solarer Einstrahlung für PV-Anwendungen	46
Flexible III-V-Solarzellen für neue Luft- und Raumfahrtanwendungen	34	Räumliche Solarpotenziale von Verkehrswegen – PV2Go	47
Miniaturisierung in der Konzentratorphotovoltaik (μ-CPV)	35	Lebenszyklusanalyse von Modulen: Glas-Folie versus Glas-Glas	48
Materiallimitierung durch Sauerstoffpräzipitation in Solarzellen	36	Ansprechpartner / Ausgewählte Projekte 2020	49

<hr/>			
Energietechnologien und -systeme	50	Ammoniak als Plattformmolekül für die Sektorenkopplung	64
<hr/>			
Wärmepumpen – Schlüsseltechnologie für die Energiewende	52	Gedruckte Lithium-Festkörperbatterien mit sulfidischem Ionenleiter	65
<hr/>			
Energieeffiziente Gebäude	54	2nd-life-Fahrzeuggbatterien in der stationären Anwendung	65
MorphoColor®: Ästhetisch ansprechende PV-Module und Solarkollektoren	55	»Haid-Power«: Aktive Netzentlastung durch kommerzielle PV-Batteriespeicher	66
Beschreibung von Regelungen gebäudetechnischer Anlagen in BIM	56	Qualitätsbewertung von Batteriezellen im Produktionsprozess	66
Ansprechpartner / Ausgewählte Projekte 2020	57	Ansprechpartner / Ausgewählte Projekte 2020	67
<hr/>			
Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse	58	Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme	68
Optimierte Füllkörper für Hochtemperaturspeicher	59	Energy-Charts mit neuen Daten und Funktionen	69
Automatisierte Verschmutzungsmessungen in solarthermischen Kraftwerken	60	Flexibilisierung von Energiesystemen in der Industrie	69
Ansprechpartner / Ausgewählte Projekte 2020	61	Smart Meter Gateway – sicher messen und steuern im Smart Grid	70
<hr/>			
Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher	62	Wie Berlin sein Solarpotenzial erschließt: »Masterplan Solarcity«	70
Siebdruck für die Herstellung von Brennstoffzellenelektroden	63	Netzbildende Wechselrichter	71
Standardisierte Messungen in der PEM-Wasserelektrolyse	63	Netzplanung und Netzausbauoptimierung	71
Hochauflösende Messtechnik bietet neue Einblicke in die Methanolsynthese	64	Photovoltaik- und Batterieumrichter mit 1500 V-Systemtechnik	72
		Teillastoptimierung von Ladeelektronik in PV-Heimspeichersystemen	72
		Ansprechpartner / Ausgewählte Projekte 2020	73

FuE-Infrastruktur **74**

Akkreditierte Labors **76**

CallLab PV Cells	76
CallLab PV Modules	77
TestLab PV Modules	78
TestLab Solar Façades	79
TestLab Solar Thermal Systems	80
TestLab Heat Pumps and Chillers	81
TestLab Power Electronics	82

Laborzentren **83**

Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen	83
Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse	84
Zentrum für Optik und Oberflächenforschung	85
Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien	86
Zentrum für Elektrische Energiespeicher	87
Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe	88
Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze	89

Technologie-Evaluationszentren **90**

SiM-TEC – Silicon Material Technology Evaluation Center	90
PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center	91
Module-TEC – Module Technology Evaluation Center	92
Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation	93

Veranstaltungen 2021 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE **94**

Impressum	95
Bildnachweise	96

40-jähriges Bestehen

1282 Mitarbeitende

2 Institutsleiter

88 % Eigenenerträge

2 neue Ausgründungen im Jahr 2020

GRÖSSTES SOLARFORSCHUNGSINSTITUT IN EUROPA

104,8 Mio. Euro Gesamtetat

119 DoktorandInnen

77 Lehrveranstaltungen

13 Kuratoriumsmitglieder

305 aktive Patentfamilien

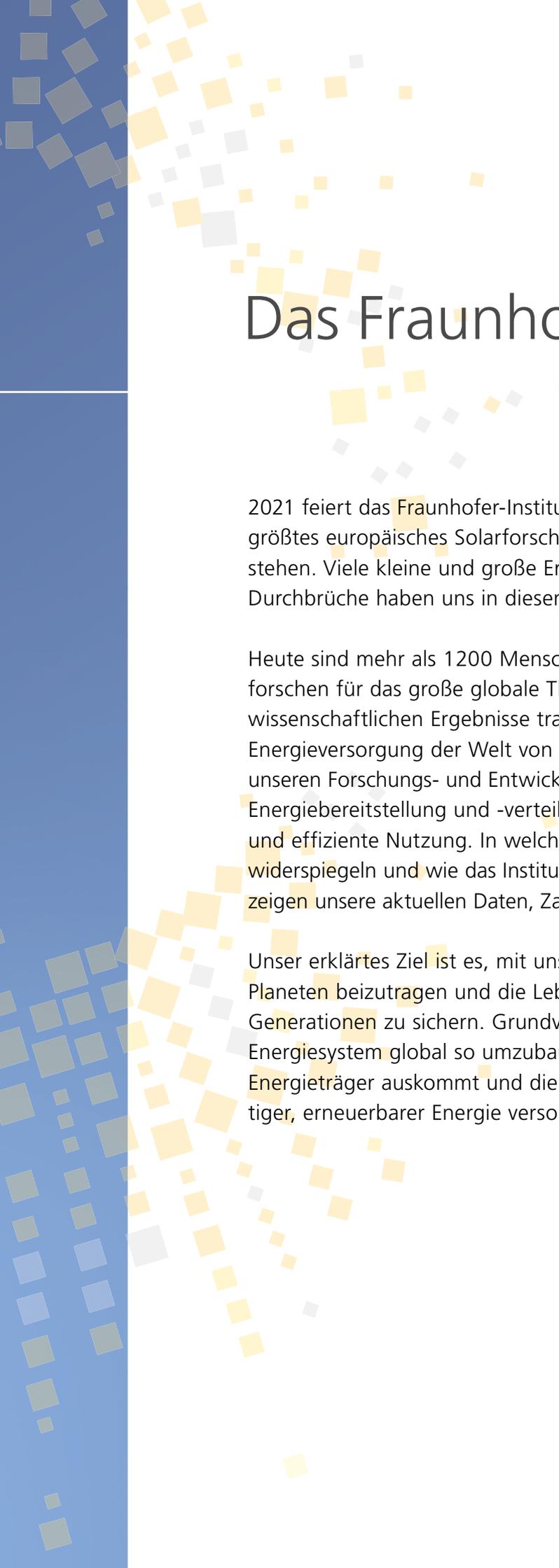
46 WissenschaftlerInnen mit Lehraufträgen

67 Nationalitäten

158 Publikationen

über 30 Memorandums of Understanding

1560 laufende Projekte im Jahr 2020



Das Fraunhofer ISE

2021 feiert das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE als größtes europäisches Solarforschungsinstitut sein vierzigjähriges Bestehen. Viele kleine und große Erfolge, Meilensteine und technologische Durchbrüche haben uns in diesen vier Jahrzehnten begleitet.

Heute sind mehr als 1200 Menschen am Fraunhofer ISE beschäftigt und forschen für das große globale Thema Energiewende. Mithilfe unserer wissenschaftlichen Ergebnisse tragen wir dazu bei, die Weichen für die Energieversorgung der Welt von morgen zu stellen. Dabei geht es in unseren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowohl um nachhaltige Energiebereitstellung und -verteilung als auch um deren Speicherung und effiziente Nutzung. In welchen Geschäftsbereichen sich diese Inhalte widerspiegeln und wie das Institut personell und strukturell aufgestellt ist, zeigen unsere aktuellen Daten, Zahlen und Fakten.

Unser erklärtes Ziel ist es, mit unserer Forschung zum Erhalt unseres Planeten beizutragen und die Lebensgrundlage heutiger und zukünftiger Generationen zu sichern. Grundvoraussetzung dafür ist, das bestehende Energiesystem global so umzubauen, dass es in Zukunft ohne fossile Energieträger auskommt und die Menschheit zuverlässig mit kostengünstiger, erneuerbarer Energie versorgt.



Organisationsstruktur

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

In der Außendarstellung operieren wir zudem mit marktorientierten Geschäftsfeldern:

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

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

Prof. Dr. Adolf Goetzberger
(Institutsgründer und Institutsleiter 1981–1993)

Prof. Dr. Joachim Luther
(Institutsleiter 1993–2006)

Prof. Dr. Volker Wittwer
(stellvertretender Institutsleiter 1997–2009)

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

Institutsleitung

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

Prof. Dr. Andreas Bett
Telefon +49 761 4588-5257

Bereichsleitung Photovoltaik

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

Dr. Ralf Preu
Telefon +49 761 4588-5260

Dr. Harry Wirth
Telefon +49 761 4588-5858

Bereichsleitung Energietechnologien und -systeme

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

Dr. Peter Schossig
Telefon +49 761 4588-5130

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

Verwaltungsdirektion

Saskia Vormfelde
Telefon +49 761 4588-5336

Kommunikation

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

Oben: v. l. n. r.: Prof. Dr. Hans-Martin Henning,
Prof. Dr. Andreas Bett, Saskia Vormfelde,
Prof. Dr. Christopher Hebling;
Mitte: v. l. n. r.: Karin Schneider, Prof. Dr. Stefan Glunz,
Dr. Harry Wirth, Dr. Ralf Preu;
unten v. l. n. r.: Prof. Dr. Christof Wittwer, Dr. Peter Schossig.

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

Dr. Klaus Bonhoff

Bundesministerium für Verkehr und
Digitale Infrastruktur (BMVI) | Berlin

Ullrich Bruchmann

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
(BMWi) | Berlin

Ministerialdirigent Martin Eggstein

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

Dipl.-Ing. Daniel Etschmann

Kreditanstalt für Wiederaufbau | Frankfurt

Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus

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

Dr. Stefan Reber

NexWafe GmbH | Freiburg

Dr. Norbert Schiedeck

Vaillant Group | Remscheid

Peter Schneidewind

RENA Technologies GmbH | Gütenbach

Dr. Lioudmila Simon

innogy SE | Essen

Dipl.-Ing. Thomas Speidel

ads-tec GmbH | Nürtingen

Prof. Dr. Frithjof Staiß

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

Prof. Dr. Anke Weidenkaff

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und
Ressourcenstrategie IWKS | Alzenau

(Stand: 31.12.2020)

Profil



Zielsetzung

Das 1981 in Freiburg gegründete Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ist das größte Solarforschungsinstitut in Europa und beschäftigt aktuell mehr als 1200 Mitarbeitende. Wir setzen uns für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf der Basis erneuerbarer Energien ein. Diese Zielsetzung spiegelt sich in den Forschungsschwerpunkten Energieeffizienz, nachhaltige Energiebereitstellung, Energieverteilung und Energiespeicherung wider. Da die Transformation des bestehenden Energiesystems ein globales Thema ist, erstrecken sich unsere Forschungsaktivitäten sowohl auf Industrie- als auch auf Schwellen- und Entwicklungsländer. Neben einer Grundfinanzierung über die Fraunhofer-Gesellschaft finanziert sich das Fraunhofer ISE zu rund 88 % durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. 2020 betrug der Gesamtetat des Instituts 104,8 Millionen Euro.

Forschungsansatz

Unser Anspruch ist es, konkret umsetzbare technische Lösungen zu entwickeln, die wir unseren Industriepartnern zur Verfügung stellen, um mit ihnen individuelle, passgenaue Lösungen zu 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 immer stärker frühzeitig in unsere Arbeiten einbeziehen.

Das Fraunhofer ISE verfügt über die zwei großen organisatorischen Bereiche »Photovoltaik« sowie »Energietechnologien und -systeme« und ist in fünf marktorientierte Geschäftsfelder (Seite 30 ff.) unterteilt. Unser Forschungsansatz reicht von der Materialforschung über die Entwicklung von Komponenten bis hin zur Systemintegration.

Leistungen

Die Basis der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Fraunhofer ISE bildet eine hochmoderne FuE-Infrastruktur auf höchstem technischem Niveau (Seite 74 ff.). Diese umfasst sieben Forschungs- und Entwicklungszentren sowie vier produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren mit einer Gesamtfläche von 17800 m². Darüber hinaus bietet das Institut in seinen akkreditierten Labors Prüf- und Zertifizierungsleistungen nach DIN EN ISO 9001:2015 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

1 Das Hauptgebäude des Fraunhofer ISE in Freiburg.

Nachhaltigkeit

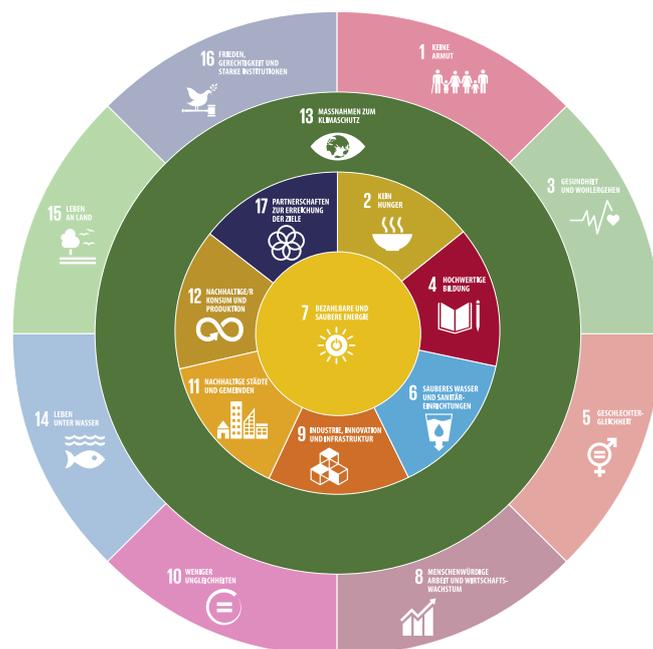
Am Fraunhofer ISE betreiben wir Forschungs- und Entwicklungsarbeit für eine nachhaltige Energieversorgung weltweit. Konkret bedeutet dies für uns, sowohl unsere Forschungsinhalte als auch die dazugehörigen Forschungs- und Organisationsprozesse am Prinzip einer nachhaltigen Entwicklung auszurichten.

Mit unserer Forschungsarbeit tragen wir zu innovativen Lösungen für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen der Energiewende und des Klimawandels bei. Unsere Arbeiten adressieren ganz unmittelbar das Ziel »Bezahlbare und saubere Energie«, aber im Weiteren auch acht weitere der Sustainable Development Goals (SDG) der Vereinten Nationen (siehe Grafik).

So beschäftigen wir uns beispielsweise mit solarer Wasseraufbereitung und leisten so einen Beitrag zu dem Ziel, der Bevölkerung weltweit Zugang zu sauberem Wasser zu ermöglichen. Andere Projekte, wie etwa die zur Integrierten Photovoltaik, tragen einer nachhaltigen Landnutzung Rechnung, indem sie durch die Integration von PV-Technologie in Gebäude, Fahrzeuge, Agrar- und Wasserflächen helfen, Flächennutzungskonflikte zu lösen.

Zu diesen und zahlreichen weiteren Themen entwickeln wir umweltfreundliche Technologien und systemorientierte Innovationen, um eine nachhaltigere Wirtschaftsweise und die Circular Economy voranzubringen. Nachhaltigkeit spiegelt sich aber nicht nur in unseren Forschungsinhalten wider. Relevant ist auch die Gestaltung der Forschungsprozesse selbst.

Ein entscheidender Hebel, um Forschungsergebnisse gesellschaftlich wirksam zu machen, ist ein erfolgreicher Wissens- und Technologietransfer. Als anwendungsorientierte Forschungseinrichtung arbeiten wir daher eng mit Partnern aus Wirtschaft und Industrie zusammen, um Innovationen nutzerorientiert und marktfähig zu



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

entwickeln. Weitere Akteure, die wir gezielt z. B. durch inter- und transdisziplinäre Forschungsmethoden in die Prozesse einbinden, sind Wissenschaft und Forschung, Politik und Gesellschaft.

Für eine nachhaltigere Entwicklung unserer internen Organisationsprozesse sind für uns außerdem ein wirtschaftlich tragfähiger und zukunftssicherer Haushalt, eine verantwortungsvolle Zusammenarbeit und zufriedene Mitarbeitende sowie umweltverträgliche Stoffströme notwendig. Als Technologie-Institut setzen wir auf energie- und ressourcenaufwendige Forschungsprozesse, deren ökologischen Fußabdruck wir kontinuierlich reduzieren.

Ausführliche Informationen zu unseren Fortschritten und Maßnahmen für eine nachhaltigere Institutsentwicklung gibt unser [Nachhaltigkeitsbericht 2020](#).

Kooperationen



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

Außenstandorte

Neben dem Hauptsitz in Freiburg unterhält das Fraunhofer ISE eine Außenstelle gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Halle – das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, dessen Schwerpunkte auf der Kristallisationstechnologie und Recyclingtechnologien liegen.

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

Kooperationen mit Hochschulen

Ein starker Fokus des Fraunhofer ISE liegt auf der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. 46 Mitarbeitende sind in der Lehre tätig, das Institut zählt ca. 250 BSc-, MSc- und PhD-Studierende und unterhält mehrere Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen in Deutschland und weltweit.

Besonders intensiv ist die Zusammenarbeit mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Im Oktober 2015 wurde das »Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH)« mit seinen Schwerpunkten Nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz an der Technischen Fakultät gegründet. Das INATECH basiert auf einer engen Partnerschaft zwischen der Universität

Freiburg sowie den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten. Dieses Fundament macht das INATECH einzigartig in der Forschungslandschaft und ermöglicht es, die gesamte Bandbreite von der Grundlagenforschung bis hin zur industriellen Anwendung abzudecken. Ergänzt wird diese Kooperation durch das »Leistungszentrum Nachhaltigkeit«, das die Vernetzung mit nachhaltigkeitsorientierten Unternehmen, Verbänden und sonstigen Akteuren aus Freiburg, der Region und darüber hinaus fördert.

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

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

Memorandums of Understanding

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

1 Die Schwerpunkte des Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET) in Santiago de Chile sind solare Stromerzeugung, Solarthermie sowie die Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme.

Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft

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

Verbünde und strategische Forschungsfelder

Die Fraunhofer-Institute arbeiten in kompetenzorientierten Verbänden zusammen. Gemeinsam mit 18 anderen Instituten arbeitete das Fraunhofer ISE im Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, »Bauteile – MATERIALS« an werkstoffrelevanten Innovationen und Innovationsprozessen. Seit Januar 2021 ist das Fraunhofer ISE Mitglied im neu gegründeten Fraunhofer-Verbund »Energietechnologien und Klimaschutz«.

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

Leitmarktorientierte Fraunhofer-Allianzen

Neben wissenschaftlicher Exzellenz steht in der anwendungsorientierten Forschung auch die Exzellenz im Hinblick auf den Transfer im Fokus. Vor diesem Hintergrund

hat die Fraunhofer-Gesellschaft seit 2020 acht Leitmärkte definiert, die prioritär von leitmarktorientierten Allianzen adressiert werden.

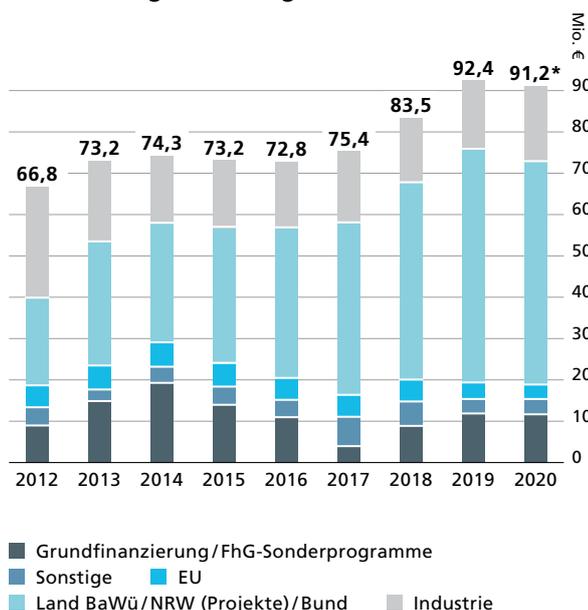
Das Fraunhofer ISE ist nicht nur eines der 19 Mitgliedsinstitute der Fraunhofer-Allianz Energie, sondern seit deren Gründung im Jahr 2003 auch Sitz der Geschäftsstelle. Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning vertritt als Sprecher die Ziele der Allianz nach außen. Gemeinsam mit den Fraunhofer-Allianzen Batterie und SysWasser, in denen das Fraunhofer ISE ebenfalls aktives Mitglied ist, organisiert die Fraunhofer-Allianz Energie den gemeinschaftlichen Marktzugang ihrer Mitgliedsinstitute und bedient die Bedarfe des Leitmarkts Energiewirtschaft. Als einer der größten Energieforschungsverbände Europas bietet sie Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in den Geschäftsfeldern Energie Erneuerbar, Energie Speicher, Energie Effizient, Energie Digital, Energie System, Energie Urban, Energie Netze sowie Klima und Umwelt.

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

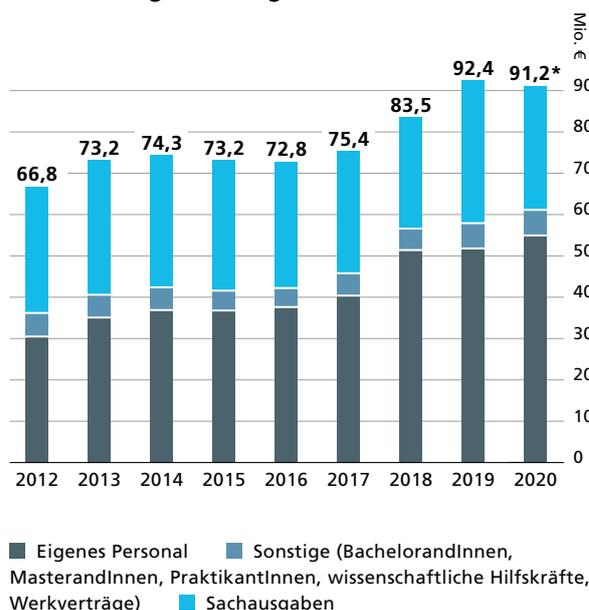
Das Institut in Zahlen



Entwicklung der Erträge**



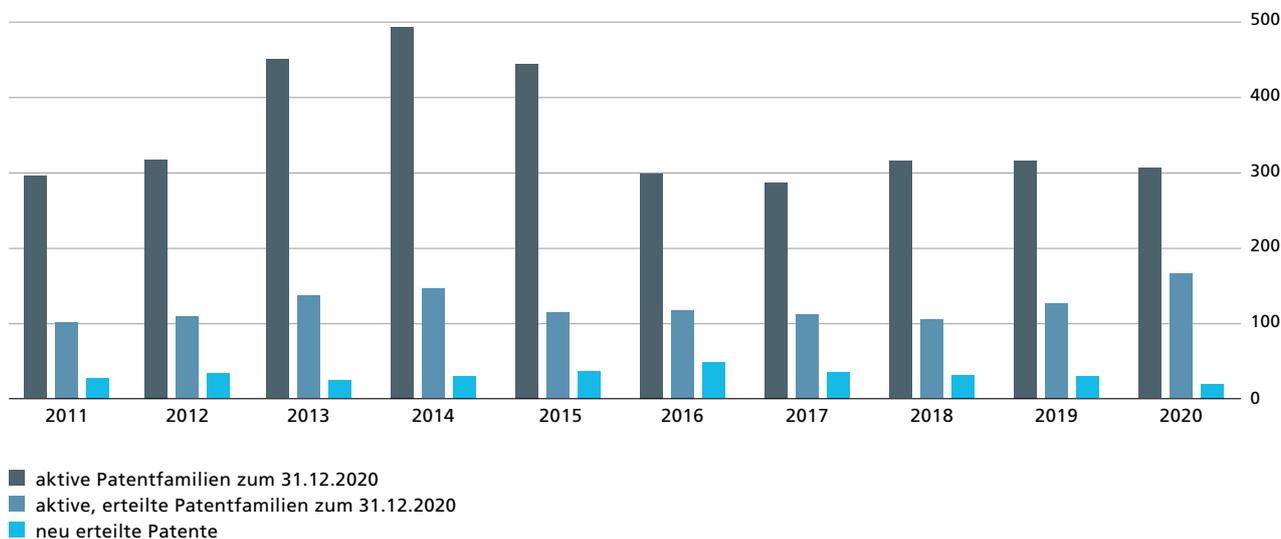
Entwicklung der Ausgaben**



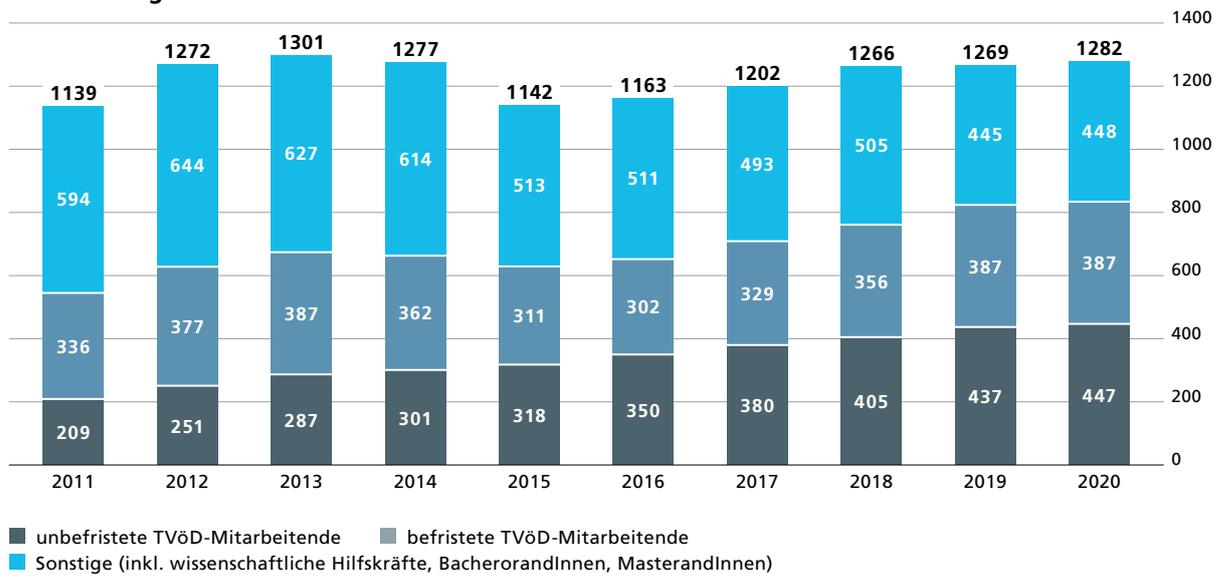
*vorläufig **ohne Investitionen – Der Gesamthaushalt 2020 (inkl. Investitionen) betrug 104,8 Mio. €.



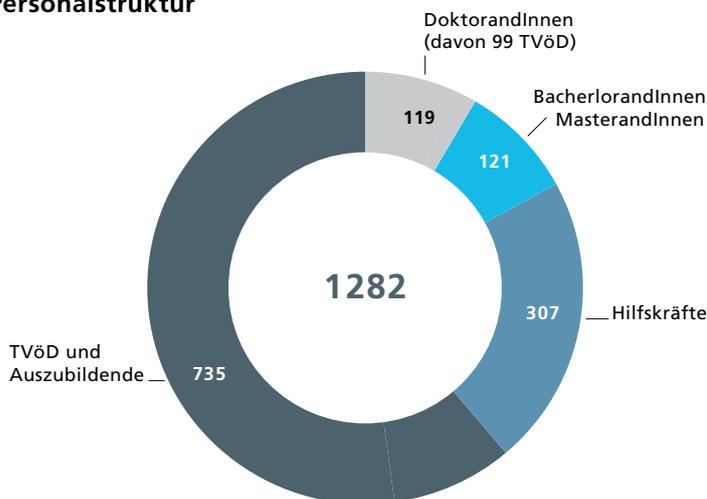
Patente



Entwicklung der Mitarbeiterzahlen



Personalstruktur



Lehrveranstaltungen

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

Promotionen

Alexander Bett

»Perovskite Silicon Tandem Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Monika Bosilj

»Hydrothermal Carbon Supports for
Biorefinery-Related Catalysis«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Rebekka Eberle

»Influence of Realistic Operation Conditions on
Silicon Solar Cells and Energy Yield«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Markus Feifel

»Hocheffiziente III-V-Mehrfachsolarzellen auf Silicium«
Universität Konstanz, 2020

Christoph Hank

»Techno-Economic and Environmental
Assessment of Power-to-Liquid Processes«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Anna Heimsath

»Optical Efficiency of Concentrating Solar Collectors –
Investigation of Reflector Loss Mechanisms«
Universität Bremen, 2020

Ismail Kaaya

»Photovoltaic Lifetime Forecast: Models for Long-Term
Photovoltaic Degradation Prediction and Forecast«
University of Malaga, Spanien, 2020

Gayathri Mathiazhagan

»Development of Future Stable Perovskite Solar Cells
Through Interfacial Analysis Using Sub-Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Fabian Meyer

»Transient Effects During Laser Processing
of Silicon for Photovoltaic Applications«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Katharina Morawietz

»Experimentelle Analyse von horizontalen und
leicht geneigten Zwei-Phasen-Thermosiphons
für die solarthermische Fassadenintegration«
Technische Universität Darmstadt, 2020

Hannah Neumann

»Untersuchung eines Latentwärmespeichers
für Prozesswärmeanwendungen«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

**Felix Predan**

»Development of Highly Efficient Four-Junction Solar Cells Based on Antimonides«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Sönke Rogalla

»Analyse frequenzabhängiger Netzwechselwirkungen von selbstgeführten Wechselrichtern mittels differentieller Impedanzspektroskopie und Oberschwingungsquellenbetrachtung«
Technische Universität Braunschweig, 2020

Mohamed Kamal Ouda Salem

»New Routes for Efficient and Sustainable Oxymethylene Ethers Synthesis«
Technische Universität München, 2020

Jörg Schube

»Metallization of Silicon Solar Cells with Passivating Contacts«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Patricia Schulze

»High Band Gap Perovskite Absorbers in Monolithic Perovskite Silicon Tandem Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Oliver Selinger-Lutz

»A Robust and Cost-Efficient Smart Grid Concept Based on Ripple Control«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Leonard Tutsch

»Implementing Sputter-Deposited Transparent Conductive Metal Oxides into Passivating Contacts for Silicon Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

Rahel Volmer

»Instationäre Verdampfung von Wasser aus Drahtgewebestrukturen bei subatmosphärischen Drücken«
Technische Universität Darmstadt, 2020

Sven Wasmer

»Sensitivity Analysis of Silicon PERC Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2019

Preise und Auszeichnungen

Dr. Sven Killinger, Dr. David Fischer

Make it Matter Award
»Start-up greenventory«
Start-up-Wettbewerb der Elektrizitätswerke Schönau
Dezember 2019, Freiburg

Simone Mastroianni

Posterpreis des Journals der
Royal Society of Chemistry (RSC)
»Double Mesoscopic HTM-Free Perovskite Solar Cells:
Overcoming Charge Transport Limitation by Sputtered
40 nm Al₂O₃ Isolating Layer«
IPEROP20, 20.–22.01.2020, Tsukuba, Japan

Cornelius Armbruster

Gigawatt Winner
Artikel »Batteriesteller des Fraunhofer ISE«
PV Magazine, Messe Düsseldorf und
Energy Storage Europe
März 2020

Robin Lang

Nachwuchspreis der Deutschen Gesellschaft für
Kristallwachstum und Kristallzüchtung (DGKK)
Vortrag »MOVPE Growth of GaAs with Growth
Rates up to 280 µm/h«
DKT2020, 11.–13.03.2020, München

Dr. Tilmann Kuhn

Leon Gaster Award 2019
Paper »Cross-Validation and Robustness of
Daylight Glare Metrics« (Co-Autorenschaft)
Society of Light and Lighting
21.05.2020, London, Vereinigtes Königreich

Markus Feifel

Best Student Award
Präsentation »Advances in Epitaxial GaInP/GaAs/Si
Triple Junction Solar Cells«
IEEE PVSC 47, 15.06.–21.08.2020

Sang Hyuk Lee

Best Paper Award
»Learning from Tetris: A New Approach for the
Automated Configuration of the Interconnection Layout
of BIPV Modules for Large-Scale Application«
IEEE PVSC 47, 15.06.–21.08.2020

Dr. Felix Predan

Best Student Award
Präsentation »Wafer-Bonded GaInP/GaAs/GaInAs/GaSb
Four-Junction Solar Cells with 43.8 % Efficiency under
Concentration«
IEEE PVSC 47, 15.06.–21.08.2020

Moritz Bitterling

Alumni-Preis 2020
Masterarbeit »Messung des räumlich aufgelösten
Reflexionsgrades von Strahlungsempfängern in
Solarturmkraftwerken«
Förderverein Alumni Freiburg e. V.
01.07.2020, Freiburg

Andreas Büchler

Südwestmetall-Förderpreis 2020
Dissertation »Laser-Structured Plated Metal Contacts
for Silicon Solar Cells«
Verband der Metall- und Elektroindustrie
Baden-Württemberg e. V. (Südwestmetall)
Juli 2020



Christoph Messmer

Student Award

Präsentation »The Race for the Best Silicon Bottom Cell: Efficiency and Cost Evaluation of Perovskite-Silicon Tandem Cells«

37th EU PVSEC, 11.09.2020

Dr. Patricia Schulze

Student Award

Präsentation »High Band Gap Absorber for Monolithic Perovskite Silicon Tandem Solar Cells Reaching 25.1 % Certified Efficiency and Ways Beyond«

37th EU PVSEC, 11.09.2020

Robert Meyer et al.

Seifriz-Preis ›Studierenden-Sonderpreis‹

Projekt »SHK4FutureEnergysystems«

Verein Technologietransfer Handwerk e. V.

23.09.2020, Offenburg

Mathias Drews, Manuel Bauer

4. Platz beim Deutschen Nachhaltigkeitspreis ›Forschung‹
»Funky Upcycling«

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

28.09.2020

Dr. Sönke Rogalla, Sebastian Kaiser, Prof. Dr. Bruno Burger, Bernd Engel

Best Paper Award

»Determination of the Frequency Dependent Thévenin Equivalent on Inverters Using Differential Impedance Spectroscopy«

IEEE 2020, 28.09. – 01.10.2020

Dr. Matthias Klingele, Dr. Roman Keding

f-cell Award, Kategorie ›Research & Development‹

Projekt »Through-Plane Ionomer Gradients in Fuel Cell Catalyst Layers for Enhanced Power Density«

Peter Sauber Agentur

29.09.2020, Stuttgart

Dr. Felix Predan

Eva-Mayr-Stihl-Nachwuchsförderpreis 2020

Dissertation »Development of Highly Efficient Four-Junction Solar Cells Based on Antimonides«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

04.11.2020, Freiburg

Dr. Martin C. Schubert

Best Paper Award

»The Potential of Cast Silicon«

SiliconPV 2020

Rebekka Eberle

Best Paper Award

»Breakdown of Temperature Sensitivity of Silicon Solar Cells by Simulation and Experiment«

SiliconPV 2020

Dr. Matthias Vetter

Global Excellence Award 2020, Kategorie

›Renewable Sector‹, Energy And Environment Foundation

Virtual 4th World Water Summit 2020 and

Virtual 11th World Renewable Energy

Technology Congress

15.12.2020, Delhi, Indien

1 Der f-cell Award wurde von Baden-Württembergs Umweltminister Franz Untersteller (l.) an Dr. Roman Keding (m.) und Dr. Matthias Klingele (r.) übergeben.

Austausch zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik

Forschungsinstitute haben unterschiedliche Wechselwirkungen mit der Politik. Sei es durch das Erstellen wissenschaftlicher Studien und Roadmaps, die als Grundlage für Entscheidungen dienen können, sei es über Informationsveranstaltungen für politische Entscheidungsträger oder die Aufbereitung wissenschaftlicher Fakten für die Öffentlichkeit, die wiederum über gesellschaftliche Meinungsbildung auf politische Entscheidungen einwirkt. Nicht zuletzt ist die von der Politik direkt in Anspruch genommene Beratung zu nennen. So wurde jüngst Prof. Dr. Hans-Martin Henning in den Expertenrat der Bundesregierung für Klimafragen berufen. Über diese und weitere Fragestellungen zum Austausch zwischen Wissenschaft, Gesellschaft und Politik unterhalten sich die beiden Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning und Prof. Dr. Andreas Bett im folgenden Gespräch.

Wissenschaft berät Energiepolitik

Henning: Wenn wir über Politikberatung unseres Instituts sprechen, halte ich es für wichtig, von unserer Hauptaufgabe auszugehen: Wir arbeiten ganz überwiegend und im Sinne unserer Mission an Technologieentwicklungsthemen, an technischen Fragestellungen und Lösungsansätzen für ein neues Energiesystem. Die Verknüpfung der Vielzahl neuer technischer Komponenten längs der gesamten Kette von der Bereitstellung über Wandlung, Verteilung bis hin zur Nutzung impliziert zugleich vielfältige und komplexe systemische Fragestellungen, und auch hier haben wir in den letzten Jahren umfangreiches Know-how bis hin zu leistungsfähigen techno-ökonomischen Gesamtmodellen aufgebaut. Dieses profunde Wissen über technische und systemische Themen ist die Basis für unseren Beitrag in der Politikberatung. Denn Politikgestaltung im Bereich der Energiewende und deren gesellschaftlicher Umsetzung benötigt fundierte Kenntnisse über die technischen Möglichkeiten und deren Implikationen. Wenn wir uns also in die Politik

einbringen, mit Politikern, Ministerien, aber auch Verbänden sprechen, dann ist unser wichtigster Beitrag evidenzbasiertes Wissen. Auch wenn wir als Institut und Person eine Meinung zu Fragen haben, die über unsere wissenschaftliche Arbeit hinausgehen, sollten wir uns in unserer politikberatenden Tätigkeit dort einbringen, wo wir wissenschaftlich tätig sind, und uns ausreichend sprachfähig fühlen.

Wissenschaft informiert Gesellschaft

Bett: Ich würde den Rahmen über die direkte Politikberatung hinaus spannen und die wissenschaftlich fundierten Informationsquellen erwähnen, die wir der Öffentlichkeit und insbesondere den Medien zur Verfügung stellen. Politik wird auch beeinflusst von Gesellschaft, und diese informiert sich über die Medien. Daher ist es aus meiner Sicht sehr wichtig, den Redaktionen faktenbasierte Information bereitzustellen. Beispiele aus dem Fraunhofer ISE sind die [Energy Charts](#), der [»PV Report«](#) oder die [»Fakten zur PV in Deutschland«](#). Über breite Informationsangebote entsteht ein Berührungspunkt zur Bevölkerung und führt damit zu einem größeren Verständnis der neuen Technologien, das eine wichtige Voraussetzung für ihre Akzeptanz ist. Dies nimmt letztendlich wiederum Einfluss auf das politische Handeln. Für mich ist diese Wechselwirkung zwischen Technikaufklärung, gesellschaftlicher Akzeptanz und politischen Entscheidungen eines der spannendsten Themen.

Und dann gibt es natürlich auch noch den Punkt, dass man konkret von einzelnen Politikern angesprochen wird und zuweilen in Grenzbereiche kommt, weil man eben doch nicht einfach nur auf Basis technologisch orientierter Argumentation der Politik helfen kann. Dann übernimmt man auch Argumente von anderen Stakeholdern, die gegebenenfalls weniger wissenschaftlich fundiert sind als die, die man selbst beforscht. Hier ist ein vorsichtiges Vorgehen angebracht.



Henning: Dabei ist interessant zu sehen, dass sich dieses Spannungsfeld in Bezug auf die Energiewende und damit auch auf die vierzigjährige Geschichte des Fraunhofer ISE massiv verändert hat. Als das Institut gegründet wurde, waren Solarforscher die Außenseiter, auf die kaum gehört wurde. Dann wurde lange ein polarisierender Kampf gegen die erneuerbaren Energien geführt, und heute herrscht weitgehend Konsens, dass eine Energiewende ohne erneuerbare Energien nicht gelingen wird. In diesem Zusammenhang ist es auch spannend, die parallele Entwicklung in der Fraunhofer-Gesellschaft zu betrachten: Erst ab jetzt wird die Energiewirtschaft als einer der acht wichtigsten Leitmärkte der Fraunhofer-Gesellschaft angesehen und benannt.

Wissensvermittlung im Verbund

Henning: Für mich stellt es einen besonderen Reiz dar, dass wir immer stärker disziplinenübergreifend, im Austausch mit Kolleginnen und Kollegen aus Ökonomie sowie mit Politik- und Gesellschaftswissenschaftlern, arbeiten und aus dem Dialog neue Perspektiven und Handlungsoptionen entstehen. Ein schönes Beispiel ist die im ESYS-Projekt entstandene Studie zur Sektorenkopplung. Im Rahmen dieser interdisziplinären Arbeit habe ich ein viel tieferes Verständnis für die Frage der CO₂-Bepreisung erworben und bin mittlerweile sehr überzeugt, dass ein übergreifender Preis ein zentrales Steuerungsinstrument ist, gerade auch vor dem Hintergrund der Sektorenkopplung.

Agenda-Setting für Forschungspolitik

Bett: Ein anderes Element der Wechselwirkung mit der Politik ist die Tatsache, dass wir auch abhängig sind von der Politik in Bezug auf die Frage, wie Forschungspolitik gestaltet wird und welche Forschungsstrategien entwickelt werden. Da wirken wir durchaus auf Entscheidungsprozesse hinsichtlich der Gestaltung technologischer Roadmaps ein, zusammen mit unseren Netzwerken und

Kunden. Auch hier noch einmal ein Blick auf die Historie: Das Fraunhofer ISE hat immer auf Hoch- und Höchsteffizienz in der Photovoltaik gesetzt, dies hat sich dann auch auf dem Markt durchgesetzt. Das Fraunhofer ISE hat schon von Anfang an zu Wasserstoff geforscht, zu Leistungselektronik, Batteriesystemtechnologie, energieeffizienten Gebäuden und den vielen systemischen Aspekten. Es war eine großartige visionäre Leistung des Institutsgründers Prof. Dr. Adolf Goetzberger, all diese für eine Energiewende wichtigen Themen schon damals mitzudenken, als das Wort Energiewende noch gar nicht in aller Munde war. Aufgrund dieser langjährigen Erfahrung in der Breite der energietechnischen Themen konnte unser Institut immer in gewissem Sinne forschungspolitisch Einfluss nehmen. Und es gibt noch einen weiteren Aspekt: Jenseits des forschungspolitischen Agenda-Settings steht das Beispiel Photovoltaik-Produktion, wo wir uns mit unseren Studien zur kostentechnischen Darstellbarkeit überzeugt für einen Neustart von PV-Produktion in Europa einsetzen. Wenn man so will, ist dies ein Einsatz für den Erhalt des Industriestandorts und der Technologiesouveränität in Deutschland, der auch Teil unserer Fraunhofer-Mission im Sinne der industrienahen angewandten Forschung ist.

Fraunhofer-Mission Nachhaltigkeit

Henning: Das Leitbild des Fraunhofer ISE stellt eine Werteorientierung dar, es drückt die Überzeugung des Instituts und der Mitarbeitenden aus, dass wir mit unseren planetaren Grenzen haushalten müssen und dass es dafür insbesondere eines nachhaltigen Energiesystems bedarf. Dies kommt auch in der Fraunhofer-Gesellschaft immer mehr an, wo wir heute von wertorientierter Wertschöpfung sprechen und die Sustainable Development Goals prominent auf der Agenda führen. Unsere Forschung trägt so zu einer Zukunft bei, die ein Fortbestehen der Menschheit und des Planeten, wie wir ihn kennen, möglich machen soll.

PV-TEC – Forschungsfabrik für Solarzellen

AUTOMATISIERTE VERMESSUNG SOLARTHERMISCHER
KRAFTWERKE MIT »AVUS«

Vermessung von **300** Wärmepumpen im Feld

15,2 % Wirkungsgradrekord für organische
Solarzellen mit mindestens 1 cm² Fläche

Energieautarkes Solarhaus

30 Gebäude mit thermisch aktivierten Bauteilsystemen analysiert

MIKROVERKAPSELTE LATENTWÄRMESPEICHER FÜR BAUMATERIALIEN

34,5 % Wirkungsgrad für
kombinierte Solarzellen aus
Silicium mit III-V-Halbleitern

800 Watt Heizleistung
bei Lüftungsgerät
mit Wärmepumpe

WELTWEIT ERSTES PASSIVHOCHHAUS IN FREIBURG-WEINGARTEN

25,1 % Wirkungsgrad für monolithische
Pero-Si-Tandemsolarzellen

46 % Wirkungsgradrekord für
Vierfachsolarzellen unter
konzentriertem Licht

SOLARE WASSERSTOFFTANKSTELLE

26 % Wirkungsgradrekord für
beidseitig kontaktierte
Siliciumsolarzellen

RAPPENECKER HÜTTE – ERSTE SOLARVERSORGTE WANDERGASTSTÄTTE IN EUROPA

1000 V stationärer Lithium-Ionen-Batteriespeicher

28 kWh Lithium-Ionen-Batteriesystem
für E-Fahrzeuge

bis zu **350 kW** konduktive Ladeinfrastruktur

99,03 % Wirkungsgrad bei PV-Wechselrichtern

1000 Stunden Remote-Betrieb einer Methanolsynthese
mit gereinigtem Hüttengas

Energy Charts machen die Energiewende transparent

Highlights unserer Forschung

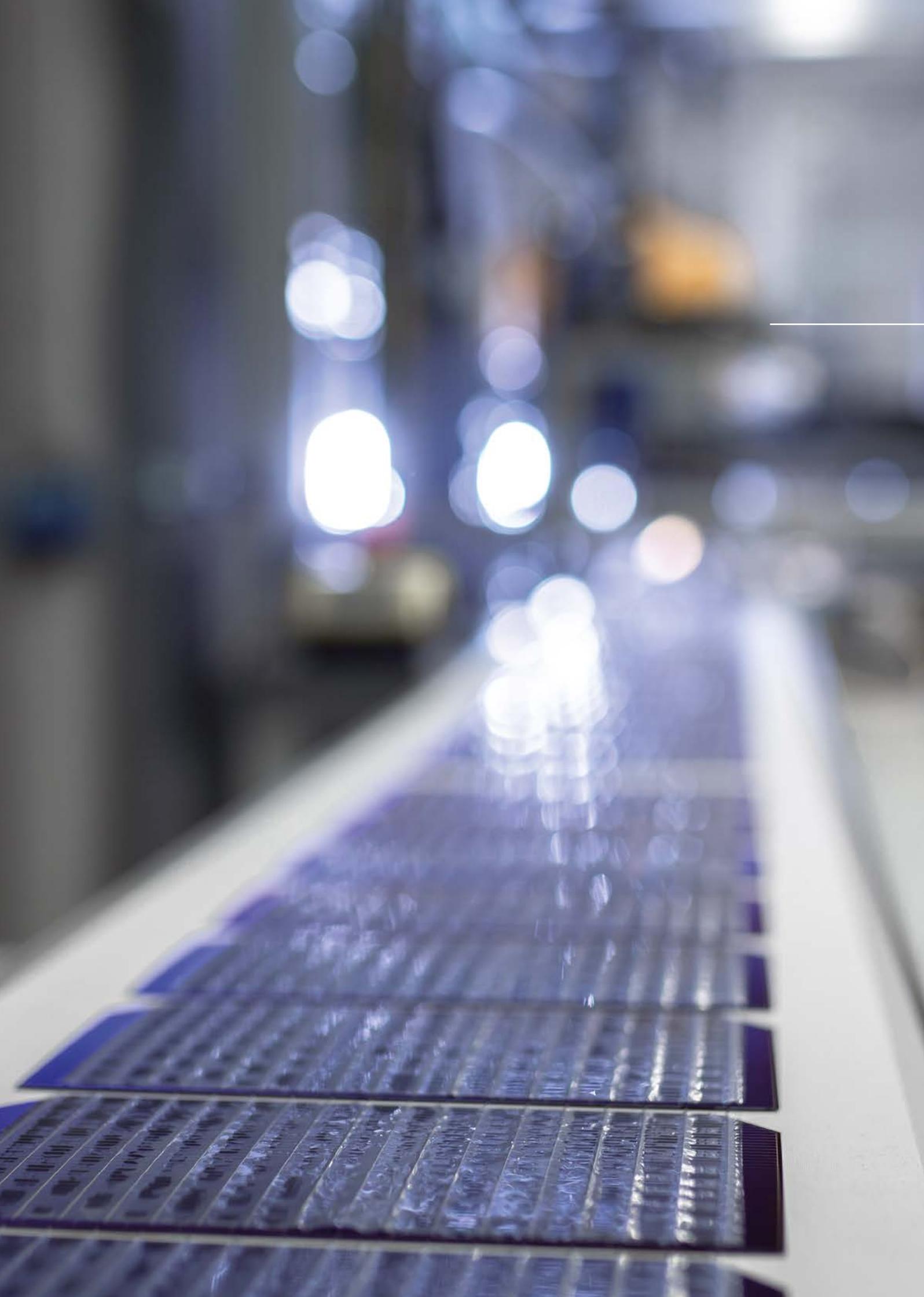
Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE forscht seit vierzig Jahren für eine nachhaltige Energieversorgung. Dabei decken wir unterschiedliche Forschungsgebiete ab, die sehr anwendungsnahe, aber auch zukunftsorientierte Projekte adressieren.

Die beiden großen organisatorischen Bereiche »Photovoltaik« und »Energietechnologien und -systeme« sind in die folgenden fünf markt-orientierten Geschäftsfelder unterteilt:

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

Als Partner der Industrie orientiert sich das Fraunhofer ISE an den Bedürfnissen seiner Kunden und leistet damit einen wichtigen Beitrag zu deren wirtschaftlichem Erfolg. Durch den langjährigen Umgang mit vielen unterschiedlichen Auftraggebern hat das Institut umfassende Erfahrungen mit den Arbeitsweisen und Anforderungen von Unternehmen. Zugeschnitten auf den individuellen Bedarf und spezifische Fragestellungen, begleiten wir unsere Kunden zuverlässig von der ersten Produktidee bis zur Marktreife.

Diese Innovationskraft spiegelt sich auch in unseren aktuellen **Leitthemen** »Tandem-Photovoltaik« (Seiten 28/29) und »Wärmepumpen« (Seiten 52/53) wider. Weitere **ausgewählte Forschungsergebnisse und Projekte** stellen wir auf den folgenden Seiten vor.



Photovoltaik

Die Photovoltaik ist eine tragende Säule für die Energieversorgung der Zukunft, wie die jüngste [Studie zur Entwicklung des deutschen Energiesystems des Fraunhofer ISE](#) belegt. Seit vierzig Jahren leistet das Fraunhofer ISE einen wichtigen Beitrag zur Steigerung des Wirkungsgrads von Solarzellen, der Zuverlässigkeit von PV-Modulen und -Kraftwerken sowie zur Weiterentwicklung nachhaltiger und kostengünstiger Produktionsprozesse für Zellen und Module. Es ist Forschungspartner der europäischen Solarindustrie entlang der gesamten PV-Wertschöpfungskette. Solarstrom ist heute in weiten Teilen der Welt die kostengünstigste Form der Energiebereitstellung, das Potenzial der Technologie ist jedoch noch nicht ausgereizt.

Wir freuen uns, dass wir mit dem »Zentrum für höchst-effiziente Solarzellen« (Seite 83) unsere Infrastruktur mit Blick auf die künftigen technologischen Herausforderungen ausweiten können. Unser Dank für die Finanzierung dieses neuen Gebäudes mit 1000 m² modernster Laborfläche und Reinraumausstattung gilt dem Bundesforschungsministerium sowie dem Land Baden-Württemberg. Neben der Weiterentwicklung der Silicium- sowie der III-V-Mehrfachsolarzellen liegt ein Fokus des neuen Zentrums auf dem vielversprechenden Ansatz der Si-basierten [Tandem-Photovoltaik](#). Dabei werden Solarzellenmaterialien mit unterschiedlichen elektronischen Eigenschaften wie III-V-Halbleiter, Perowskite oder Silicium zusammengeführt. Das breitbandige Sonnenspektrum kann so bei der Umwandlung von Licht in elektrische Energie noch effizienter genutzt und die theoretische Wirkungsgradgrenze von konventionellen Solarzellen aus nur einem Solarzellenmaterial durchbrochen werden. Dies führt zu Einsparpotenzialen bei Solarzellen- und Modulmaterialien und trägt damit zur Nachhaltigkeit der Photovoltaik bei. Zudem wird der Einsatz höchst-effizienter Tandemsolarzellen die für den PV-Ausbau benötigte Fläche reduzieren. Dies gilt insbesondere für

ihren Einsatz in der Integrierten Photovoltaik, also der Anwendung von PV-Modulen in bereits genutzten und bebauten Flächen, wie beispielsweise Gebäude- und Fahrzeughüllen. Der für Deutschland zum Erreichen der Klimaschutzziele erforderliche Photovoltaik-Ausbau um das Zehnfache von heute erfordert effiziente und nachhaltige Technologien.

Die leistungsfähigen Tandemzellen stellen höchste Ansprüche an die Serienverschaltung und Einkapselung, um langlebige und sichere Module herzustellen. Die industriellen Prozessplattformen in unserem Module-TEC haben wir an diese Anforderungen angepasst. Dazu haben wir verschiedene Niedertemperatur-Verbindungstechnologien implementiert, die zugleich modulseitige Leistungsverluste weitgehend eliminieren.

Ressourcenschonende Produktionstechnologie spielt neben der Effizienzsteigerung eine immer bedeutendere Rolle. Aus dem Bereich der Photovoltaik-Produktionstechnologie ging die [Ausgründung HighLine Technology GmbH](#) hervor. Ziel des Start-ups ist, ein am Institut entwickeltes neues Verfahren zu kommerzialisieren, bei dem die Metallkontakte auf der Solarzellenvorderseite kontaktlos in einem Dispensverfahren aufgebracht werden. Dies spart Ressourcen, erhöht die Stromausbeute und reduziert die Kosten.

Über die Technologieentwicklung hinaus engagiert sich das Fraunhofer ISE auch im Kontext der Wiederbelebung der europäischen Solarindustrie, um die Technologiesouveränität in Europa zu erhalten. So unterstützt das Institut beispielsweise das Bündnis [»Solar Europe Now«](#), das die Anerkennung der Solarenergie als Schlüsseltechnologie für die Zielstellungen im Rahmen des europäischen Green Deals fordert.

Tandem-Photovoltaik – der Weg zu höheren Wirkungsgraden

Die Photovoltaik ist eine tragende Säule nachhaltiger Energiesysteme und muss daher noch deutlich ausgebaut werden. Eine entscheidende Rolle bei der weiteren Senkung der Stromgestehungskosten spielt der Wirkungsgrad der Solarzelle. Die Tandem-Photovoltaik gewinnt deshalb an Bedeutung, weil mit ihr die theoretische Wirkungsgradgrenze der bisher marktdominierenden Siliciumsolarzelle deutlich überschritten werden kann.

Tandem- oder Mehrfachsolarzellen verwenden zwei oder mehr photovoltaische Absorber mit jeweils unterschiedlichen elektronischen Bandlücken. Durch deren Kombination kann das breitbandige Sonnenspektrum viel effizienter genutzt und so mehr Strom pro Flächeneinheit erzeugt werden. Neben einem höheren Wirkungsgrad bietet der Tandemansatz vielversprechende Vorteile wie einen geringeren Ressourcenverbrauch und Energieeinsatz bei der Herstellung der Zellen bezogen auf die Leistung. Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen, sind intensive Aktivitäten in Forschung und Entwicklung notwendig – eine Herausforderung, der wir 2021 mit der Eröffnung des »Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen« begegnen, das über 700 m² Reinraumfläche mit modernsten Geräten verfügen wird. Um höchste Wirkungsgrade zu erzielen, ist eine detaillierte Charakterisierung der Zellen und Materialien von zentraler Bedeutung. Insbesondere die exakte Bestimmung des Wirkungsgrads in unseren [Callab PV Cells](#) und [Callab PV Modules](#), die wir auch als Service anbieten, ist dabei unverzichtbar.

Konzentrator-Anwendungen

Die Tandemkompetenz am Fraunhofer ISE basiert auf langjähriger Forschung an monolithischen Konzentrator-Tandemsolarzellen auf Basis von III-V-Halbleitern mit Spitzenwirkungsgraden von bis zu 46,1 %. Wir erforschen neue Zellstrukturen mit dem Ziel, Wirkungsgrade von über 50 % zu erreichen. Im Jahr 2020 haben wir erfolgreich eine neuartige wafergebundene Vierfachsolarzelle mit einem Spitzenwirkungsgrad von 43,8 % auf der Basis

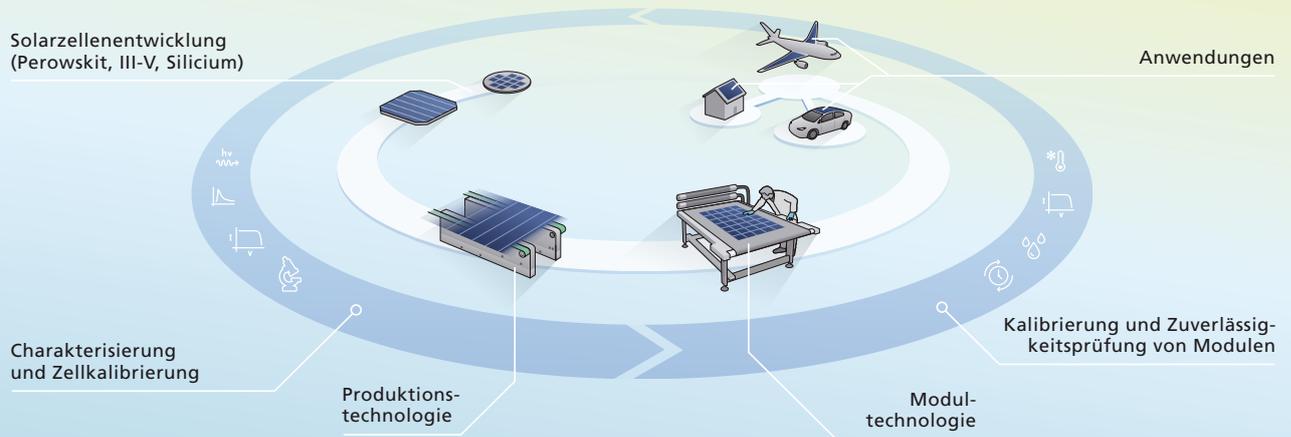
von Antimoniden (GaInP/GaAs/GaInAs//GaSb) entwickelt. Damit haben wir eine hervorragende Grundlage für unsere weiteren Arbeiten geschaffen. Unsere Forschungsschwerpunkte liegen dabei auf der Optimierung der III-V-Epitaxie, der Anpassung des Wafer-Bonding-Prozesses und der Entwicklung einer geeigneten Prozessroute für die Herstellung der Metallfinger und Antireflexschichten.

Nicht- oder niedrigkonzentrierende Anwendungen

Bei der nicht-konzentrierenden Tandem-PV arbeiten wir mit III-V-Silicium- und Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen. Für alle drei Materialgruppen verfügen wir über erstklassige technologische Einrichtungen und exzellente wissenschaftliche Expertise. Insbesondere unser langjähriges Know-how in der Entwicklung und Produktion von Siliciumsolarzellen bietet eine starke Basis für die Entwicklung der geeigneten Siliciumzelle, die als Basiszelle einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Stromgestehungskosten der Tandemsolarzelle hat. Neben der Analyse zur technischen Machbarkeit führen wir auch Kostenbewertungen durch, um die zu erwartenden Stromgestehungskosten verschiedener Tandemansätze zu bestimmen.

III-V auf Silicium

Die Materialkombination III-V/Silicium ist für die nächste Generation von Solarzellen mit höchstem Wirkungsgrad von großem Interesse. Das Fraunhofer ISE arbeitet an unterschiedlichen Ansätzen, um Kombinationen aus III-V- und Siliciumsolarzellen herzustellen. 2020 wurde der Weltrekord, den das Institut seit 2019 hält, auf 34,5 % verbessert. Für die Rekordzelle (GaInP/AlGaAs//Si) wurden die wenige Mikrometer dünnen III-V-Halbleiterschichten von einem Galliumarsenid-Substrat auf Silicium übertragen, wobei die Schichten durch einen sogenannten Wafer-Bond verbunden sind. Da diese Technologie effizient, aber teuer ist, arbeitet das Fraunhofer ISE auch an direkten Herstellungsverfahren und konnte 2020



einen neuen Weltrekord-Wirkungsgrad von 25,9 % für eine direkt auf Silicium gewachsene III-V/Si-Tandemsolarzelle erzielen.

Perowskit auf Silicium

Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen versprechen niedrigere Stromgestehungskosten und einen geringeren Ressourcenverbrauch als herkömmliche Silicium-solarzellen. In Laborexperimenten hat der maximale Wirkungsgrad den von Siliciumsolarzellen bereits übertraffen. Erste Unternehmen beginnen, diese Technologie industriell umzusetzen. Am Fraunhofer ISE konnten wir im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium finanzierten Projekts »PersiST« einen Rekordwirkungsgrad von 25,1 % für eine monolithische Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle erreichen. Der von uns entwickelte Perowskitabsorber weist eine optimale Bandlücke von 1,68 eV und eine hohe Photostabilität auf. Diese Technologie entwickeln wir nun im Fraunhofer-Leitprojekt »MaNiTu« weiter, wobei hohe Wirkungsgrade, aber auch die Entwicklung neuartiger bleifreier Perowskitabsorber im Mittelpunkt stehen. Unter der Voraussetzung, dass es gelingt, hohe Wirkungsgrade von 28 % und eine Lebensdauer von mindestens 23 Jahren zu erreichen, lassen erste Kostenanalysen einen großen ökologischen Mehrwert erkennen.

Produktionstechnologie

Für den Transfer von Laborprototypen ins industrielle Umfeld sind kosteneffiziente produktionstechnologische Lösungen von entscheidender Bedeutung. Am Fraunhofer ISE werden kontinuierlich innovative Prozesse und Anlagen hinsichtlich ihrer Eignung für die Tandem-Photovoltaik evaluiert und optimiert. Nachhaltige Aspekte wie die Einsparung von Energie und Material spielen dabei eine zentrale Rolle. Im Photovoltaic Technology Evaluation Center verfügen wir über umfangreiche Expertise in allen relevanten Produktionstechnologien und haben langjährige Kompetenz beim Transfer in die industrielle Produktion.

Für die Abscheidung von Perowskit-Absorberschichten bieten wir eine große Bandbreite von Technologien an. Mittels Blade-Coating können Wafer in industriellen Größen beschichtet werden, Sprühbeschichtung und entsprechende Aufdampfprozesse sind derzeit in Entwicklung.

Modultechnologie

Im Module Technology Evaluation Center des Fraunhofer ISE forschen wir an zuverlässigen Lösungen zur Verschaltung und Einkapselung von Perowskit-Silicium- und III-V-Silicium-Tandemsolarzellen und analysieren die Zuverlässigkeit dieser neuartigen Module in unserem TestLab PV Modules nach geltenden IEC-Normen.

Perowskit-Silicium-Solarzellen sind besonders empfindlich gegenüber Feuchte, Temperatur und mechanischer Belastung. III-V-Tandemsolarzellen sind dünn und flexibel. Deshalb können die klassischen Prozesse für die Verbindungstechnik und Einkapselung von kristallinen Siliciumsolarzellen nur bedingt zur Anwendung kommen. Wir entwickeln verschiedene Verschaltungsverfahren, um PV-Module effizienter zu machen, beispielsweise das Schindeln für III-V/Si-Tandemsolarzellen. Somit können wir die Zelle-zu-Modul-Verluste minimieren und sehr hohe Modulwirkungsgrade ermöglichen. Auch für Perowskit-Si-Tandemsolarzellen entwickeln wir unterschiedliche Verschaltungsverfahren, z. B. leitfähiges Kleben, Drahtverschaltung auf Basis von SWCT (Smart Wire Connection Technology) und Niedertemperaturlöten. Wir können auf langjährige Erfahrung zurückgreifen, um die Modulanforderung an Zuverlässigkeit, elektrische Performance und geringe Herstellungskosten zu erfüllen. Da das Modulgewicht bei der Integration in unterschiedliche Anwendungen eine Rolle spielt, haben wir Einkapselungsmaterialien und Prozesse für III-V/Si-Tandemsolarzellen entwickelt, mit denen wir ein Modulgewicht von 380 g/m² realisieren können, im Vergleich zum klassischen Silicium-Modul mit etwa 10 000 g/m².

1 Die Tandem-Photovoltaik gehört zu den sich am schnellsten entwickelnden Solartechnologien.

Silicium-Photovoltaik

Sowohl für a-Si/c-Si-Heterojunction-Solarzellen als auch für die am Fraunhofer ISE entwickelte TOPCon-Technologie haben wir exzellente Ergebnisse erzielt. Mit der erstmaligen Demonstration von Siebdruckkontakten mit Fingerbreiten unter 20 µm ist es uns gelungen, das nachhaltige Verbesserungspotenzial dieser Technologie aufzuzeigen. Die Entwicklung einer neuen Hochdurchsatzanlage für die Metallisierung stellt im Kontext wachsender Anforderungen an die industrielle Fertigung ein weiteres Highlight dar.

III-V- und Konzentrorphotovoltaik

Tandemsolarzellen aus III-V-Halbleitern erzielen die höchsten Wirkungsgrade aller Solarzellentypen und werden für Weltraum- und Konzentroranwendungen eingesetzt. Aber auch für terrestrische Photovoltaikmodule ohne Konzentration bietet dieses Material in Verbindung mit Silicium ein hohes Potenzial. Hier konnten wir für eine direkt auf Silicium gewachsene III-V/Si-Tandemsolarzelle einen Wirkungsgrad von 25,9 % erreichen.

Perowskit- und Organische Photovoltaik

Perowskitsolarzellen erreichen im Labor bereits sehr hohe Wirkungsgrade. Unser Ziel ist es hier, hochskalierbare Zell- und Modulkonzepte zu entwickeln. Zudem eignen sich Perowskitabsorber sehr gut für die Tandem-Photovoltaik, was uns erlaubte, einen kalibrierten Wirkungsgrad von 25,1 % für monolithische Pero-Si-Tandemsolarzellen zu erzielen. Für organische Solarzellen konnten wir mit einer zertifizierten Effizienz von 15,2 % einen Rekordwert für Zellflächen $\geq 1 \text{ cm}^2$ aufstellen.

Photovoltaische Module und Kraftwerke

Für die neuen Zellgenerationen entwickeln wir industrielle Verbindungstechnologie. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Integration von PV in verschiedene Anwendungen, aktuell mit Produktentwicklung und -prüfung, Potenzialstudien (BIPV, FPV) und einem Anwendungsleitfaden. Unser Callab PV Modules hat die Akkreditierung als unabhängiges Kalibrierlabor mit dem weltweiten Spitzenwert von nur 1,1 % Messunsicherheit erhalten.

525 
Mitarbeitende

113 
Zeitschriften- und
Buchbeiträge

161 
Vorträge und
Konferenzbeiträge

9 
Neu erteilte Patente

 Regelmäßige Infos zu
Meilensteinen unserer
Forschung bieten
unsere Newsletter!

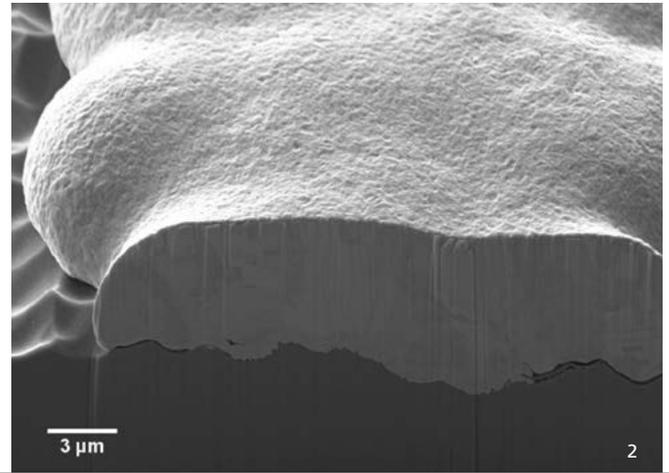


www.ise.fraunhofer.de/photovoltaik

Bild: Hocheffiziente Schindel-
solarzellen in einem Autodach.



1

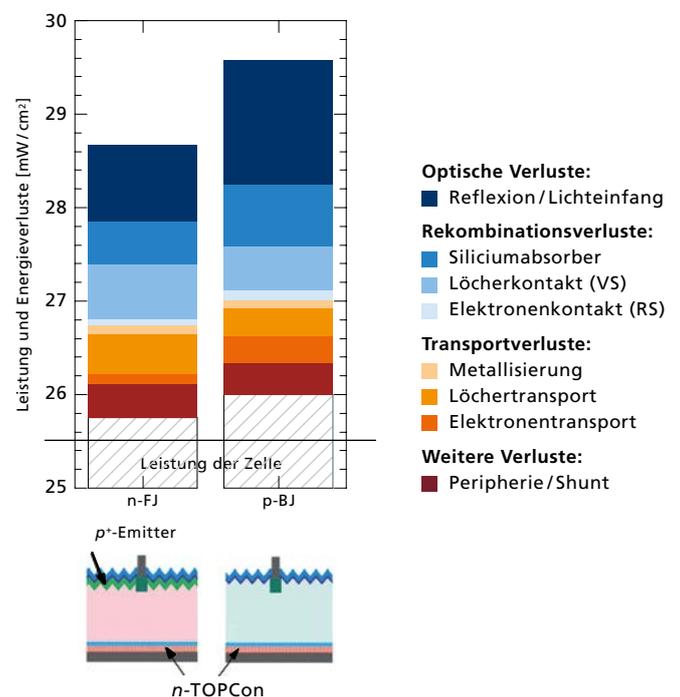


2

TOPCon: Von der 26 %-Laborzelle zur Industriereife

Um höchste Wirkungsgrade von Siliciumsolarzellen zu erzielen, ist die Implementierung von passivierenden Kontakten, die die Rekombination der Ladungsträger minimieren, unumgänglich. Ein prominentes Beispiel ist die am Fraunhofer ISE entwickelte TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)-Technologie. Aufgrund geringer optischer Transparenz wird dieses Kontaktsystem zumeist auf der Zellerückseite implementiert. Durch Kombination einer transparenten Vorderseite inklusive Bor-Emitter mit einer exzellent passivierten Rückseite haben wir auf einem *n*-Typ Wafer einen Wirkungsgrad von 25,8 % ($V_{oc} = 724$ mV) auf kleiner Zellfläche erzielt. Diese Laborzelle haben wir nun auf eine vollständig industriell umsetzbare Prozessfolge transferiert. Innerhalb eines Jahres ist es gelungen, den Wirkungsgrad dieser industriellen TOPCon-Solarzellen, die siebgedruckte Kontakte aufweisen, auf 23 % (Zellfläche: 244 cm²) zu steigern. Zudem wurde eine große TOPCon-Zelle mit galvanisch aufgebrachtene Kupferkontakten, die einen Wirkungsgrad von 22,7 % erreichte, hergestellt. Eine Steigerung des Wirkungsgrads auf über 23,5 % ist durch einfache Prozessverbesserungen zeitnah möglich, ohne dabei die Prozesskomplexität zu erhöhen.

Basierend auf numerischen Simulationsmodellen ergab die Analyse dieses Zelltyps, dass die Rekombination am Emitter den Wirkungsgrad limitiert und ein Zielkonflikt zwischen hoher Löcherleitfähigkeit und geringen Rekombinationsverlusten im Emitter besteht. Durch den Austausch der Wafer-Polarität von *n*-Typ Si zu *p*-Typ Si kann dieser Zielkonflikt elegant umgangen werden: Der Siliciumwafer unterstützt nun den Transport der Löcher zum Vorderseitenkontakt und macht somit den Bor-diffundierten Bereich obsolet. Mit diesem Konzept konnten wir einen Wirkungsgrad von 26 % ($V_{oc} = 732$ mV) im Labormaßstab erzielen. Die einzelnen Verlustkanäle dieser Zelle wurden mittels numerischer Simulation quantifiziert

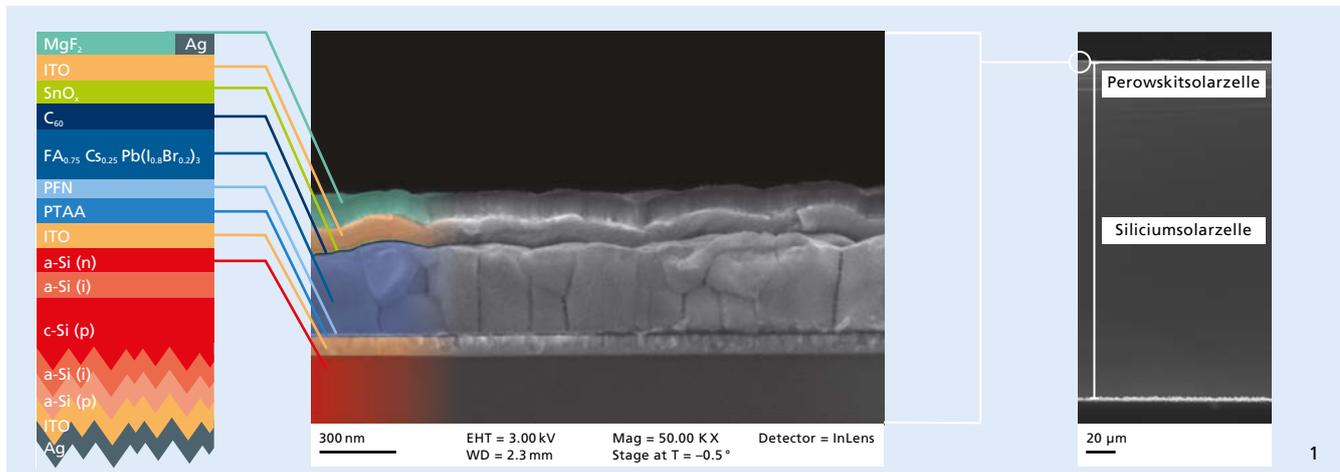


Grafik: Elektrische und optische Analyse der verschiedenen Verlustmechanismen einer *n*-Typ sowie *p*-Typ TOPCon-Zelle.

und sind in der Grafik der *n*-Typ TOPCon-Zelle gegenübergestellt. Anhand der orange und gelb eingefärbten Säulen lässt sich gut erkennen, dass hier – im Gegensatz zur *n*-Typ Zelle – das Verhältnis der Transportverluste von Elektronen und Löchern ausgeglichen ist. Zudem sind die Rekombinations- und Transportverluste im Allgemeinen besser ausbalanciert. Die Realisierung dieser Zellstruktur erfordert weniger Fertigungsschritte und ermöglicht die Verwendung kostengünstigerer *p*-Typ Si-Wafer. Sie ist daher eine sehr attraktive Alternative zur *n*-Typ TOPCon-Zelle und zeigt, dass auch beidseitig kontaktierte Solarzellen Wirkungsgrade über 26 % erreichen können.

- 1 Vorderseite einer industriellen TOPCon-Solarzelle.
- 2 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines auf TOPCon galvanisch abgeschiedenen Metallfingers.

Dr. Frank Feldmann
Telefon +49 761 4588-5265
sipv.hieta@ise.fraunhofer.de



Kosten- und ressourceneffiziente Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen

Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen versprechen niedrigere Stromgestehungskosten und einen geringeren Ressourcenverbrauch als herkömmliche Siliciumsolarzellen. Das liegt an ihrem höheren Wirkungsgrad. Die Perowskitsolarzelle wird im Tandemstapel direkt auf die Siliciumsolarzelle abgeschieden. Da der Perowskit Halbleiter eine höhere energetische Bandlücke als Silicium aufweist, kann die Perowskitsolarzelle hochenergetische Photonen besser nutzen als die Siliciumsolarzelle. Die Siliciumsolarzelle wiederum kann die niederenergetischen Photonen, die von der Perowskitsolarzelle transmittiert werden, effizient nutzen. Insgesamt steigt die Effizienz, und Wirkungsgrade von über 30 % sind möglich.

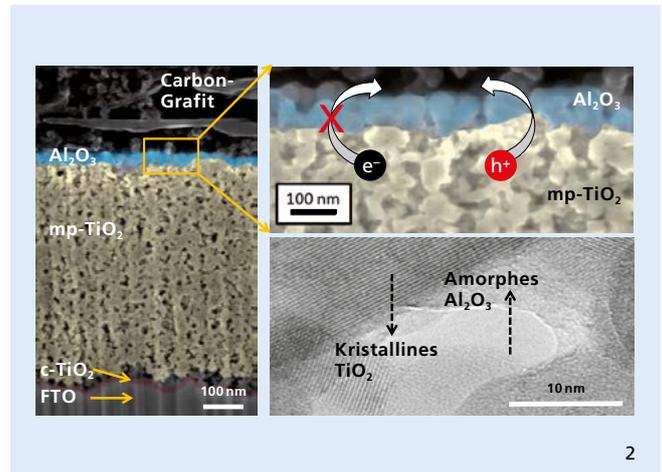
Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts »PersiST« konnte das Fraunhofer ISE einen Wirkungsgrad von über 25 % für eine Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle erreichen. Bei der Siliciumsolarzelle handelte es sich um eine a-Si/c-Si-Heterojunction-Solarzelle, die auf der Rückseite texturiert war. Eine Schicht aus Indium-dotiertem Zinnoxid (ITO) diente als elektrische Verbindung zur Perowskitsolarzelle. Auf dieser haben wir eine sehr dünne Schicht eines organischen Lochleiters abgeschieden, gefolgt vom Perowskitabsorber. Mit der Absorberverbindung $\text{FA}_{0,75}\text{Cs}_{0,25}\text{Pb}(\text{I}_{0,8}\text{Br}_{0,2})_3$ konnten wir eine optimale Bandlücke von 1,68 eV und eine hohe Stabilität erreichen. Als Elektronenkontakt fungierte eine Schicht aufgedampftes C_{60} , gefolgt von SnO_x und einer weiteren ITO-Schicht (Abb. 1). Im Fraunhofer-Leitprojekt »MaNiTU« entwickeln wir diese Technologie nun mit dem Ziel weiter, noch höhere Wirkungsgrade zu erreichen. Außerdem forschen wir an bleifreien Alternativen für den Absorber. Unter der Voraussetzung, dass es gelingt, hohe Wirkungsgrade von 28 % und eine Lebensdauer der Tandemzellen von

mindestens 23 Jahren zu erreichen, lassen erste Analysen zum Lebensdauerzyklus bereits jetzt einen großen ökologischen Mehrwert erkennen. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Schichten der Perowskitsolarzelle sehr dünn sind und durch den höheren Wirkungsgrad der CO_2 -Fußabdruck zur Erzeugung einer Kilowattstunde Strom deutlich sinkt.

Ähnlich verhält es sich mit den Stromgestehungskosten: Die Herstellung der zusätzlichen Schichten für die Perowskitsolarzelle ist perspektivisch sehr kostengünstig möglich. Insgesamt steigt der Wirkungsgrad deutlich, und die Kosten pro Kilowattstunde Strom sinken. In einer ausführlichen Kostenanalyse haben wir festgestellt, dass Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen besonders vielversprechend für Anwendungen für Aufdachanlagen und andere flächenbegrenzte Anwendungen sind und einen signifikanten Kostenvorteil gegenüber reinen Siliciumsolarzellen versprechen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Perowskit-Technologie innerhalb der nächsten fünf bis sechs Jahre ein Niveau erreicht, bei dem der Wirkungsgrad von Tandemsolarzellen im industriellen Maßstab 30 % übersteigt. Dabei gilt es, kostengünstige Prozesse zu implementieren und die Lebensdauer der Module mit denen von Silicium vergleichbar zu machen.

Dr. Jan Christoph Goldschmidt
Telefon +49 761 4588-5475
emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de

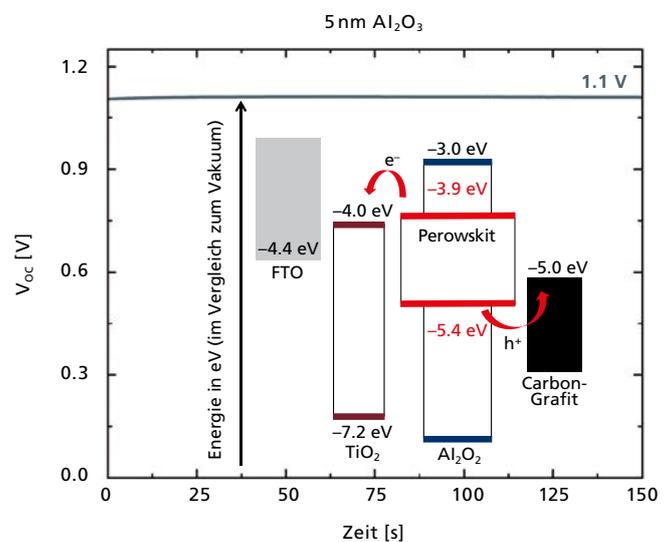
1 Struktur (links) und Elektronenmikroskop-Aufnahme (rechts) der Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle. Im Vergleich zur Siliciumsolarzelle ist die Perowskitsolarzelle sehr dünn.



Al₂O₃-Passivierungsschichten für gedruckte Perovskitsolarzellen

Das Forschungsfeld der Perovskitsolarzellen stößt weltweit auf stark wachsendes Interesse. Auf Einzelzellen konnten bereits solare Wirkungsgrade von bis zu 25,2 % erreicht werden, die jedoch in der Regel auf instabilen organischen Passivierungsschichten und nicht-aufskalierbaren Labormethoden beruhen. Das Fraunhofer ISE hat sich daher frühzeitig das Ziel gesetzt, großflächig druckbare Module aus Perovskitsolarzellen zu entwickeln, bei denen anorganische, langzeitstabile Passivierungs- und Elektrodenschichten eingesetzt werden.

Als besonders erfolgversprechend hat sich die Kombination einer elektronenselektiven Elektrodenschicht aus porösem nanoskalischem TiO₂ mit einer porösen rückseitigen Elektrodenschicht aus Grafit herausgestellt. Der Perovskit wird anschließend aus einer Lösung in die offene Schichtstruktur eingebracht und kristallisiert. Unter Beleuchtung findet hier die Ladungstrennung statt, wobei ein Übertritt von Elektronen aus dem TiO₂ in die Grafitpartikel der Rückelektrode vermieden werden muss, um eine unerwünschte Grenzflächenrekombination zu unterdrücken. Mit diesem Konzept hat das Fraunhofer ISE bereits eine zertifizierte Effizienz von 15,5 % erreicht, die zugleich den Weltrekord für gedruckte Solarzellen darstellt. Wir konnten zeigen, dass das Sputtern einer ultradünnen Passivierungsschicht aus Aluminiumoxid (Al₂O₃) auf die poröse Oberfläche der nanoskalischen TiO₂-Schicht die Photospannung deutlich erhöhen kann. Das Al₂O₃ bewirkt eine elektrische Isolierung, ohne die Porosität zu zerstören, die für das Einbringen des Perovskits notwendig ist. Im Elektronenmikroskop haben wir die Bildung einer Oberflächenschicht von 5 nm amorphem Al₂O₃ auf dem kristallinen TiO₂ nachgewiesen. Neben der Bedeckung auf der Nanoskala findet zusätzlich während des Sputterns auch



Grafik: Stabilisierte V_{oc} von Perovskitsolarzellen mit Al₂O₃-Passivierungsschichten. Inlet: Ladungstrennung von Elektronen und Löchern.

die Isolation von Defekten («Pinholes») in der gedruckten Elektrodenschicht statt, was einer großflächigen Isolation zugutekommt. Die so hergestellte Passivierung resultiert in einer hohen Photospannung von 1,1 V (siehe Grafik), die nur noch 100 bis 150 mV unterhalb der höchsten berichteten Photospannungen für Perovskitsolarzellen mit organischen Lochleitern liegt. Die Arbeiten sind daher für die weitere Aufskalierung von hocheffizienten, langzeitstabilen Perovskitsolarmodulen von wesentlicher Bedeutung.

Dr. Andreas Hinsch
 Telefon +49 761 4588-5417
 emergingpv.organic@ise.fraunhofer.de

1 Siebgedruckte Photoelektrode eines Perovskitsolarmoduls.

2 Schichtaufbau und Aluminiumoxid-Passivierungsschicht einer gedruckten Perovskitsolarzelle.



Flexible III-V-Solarzellen für neue Luft- und Raumfahrtanwendungen

Für die Energieversorgung von Satelliten werden seit vielen Jahren standardmäßig hocheffiziente III-V-Mehrfachsolarzellen eingesetzt. Dazu werden nur wenige Mikrometer dünne III-V-Schichten auf typischerweise mehrere 100 Mikrometer dicke, starre Germaniumsubstrate abgeschieden. Neben konventionellen Satelliten entstehen in der Luft- und Raumfahrtindustrie aktuell neue Anwendungen und Geschäftsperspektiven. Die Möglichkeiten sind vielfältig: Sie reichen von Konstellationen aus Hunderten von Kleinsatelliten auf niedrigen Erdumlaufbahnen (»New Space«), z. B. für eine erdumspannende, satellitengestützte Internetanbindung, über unbemannte, quasistationäre Pseudosatelliten in der Stratosphäre (»High-Altitude Pseudo-Satellites«, HAPS) bis hin zur Elektrifizierung von Flugzeugen.

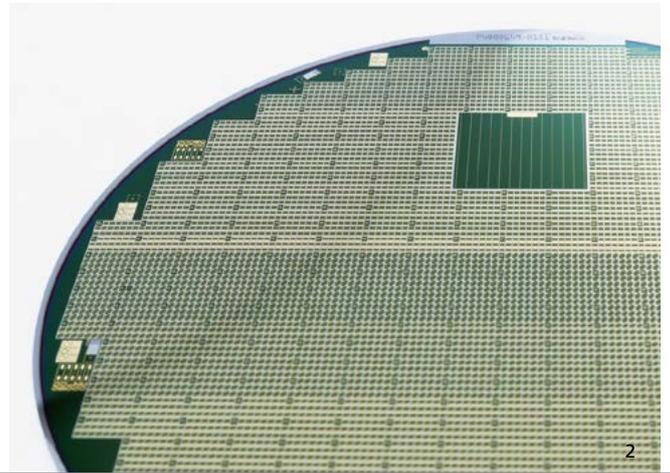
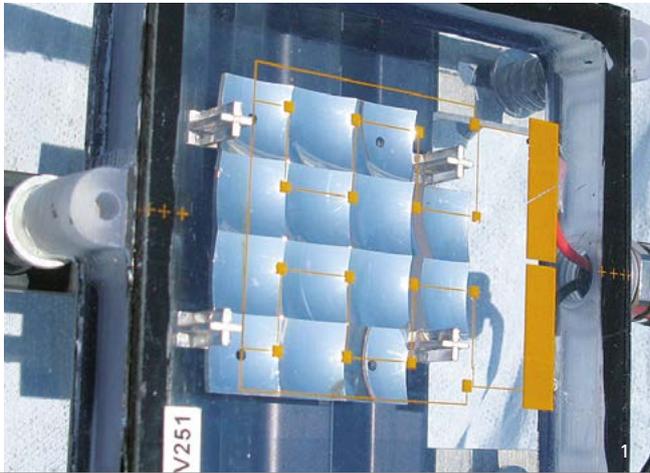
Neben hoher Effizienz, also hoher Leistung pro Fläche (W/m^2), ist für diese Anwendungen stets auch ein minimales Gewicht bzw. eine hohe Leistung pro Masse (W/g) entscheidend. Weiterhin müssen die Solarzellen flexibel sein, um sie in gekrümmte Tragflächen integrieren zu können, ohne die Aerodynamik zu beeinträchtigen. Für die neu aufkommenden Luft- und Raumfahrtmärkte sind außerdem die Produktionskosten dieser Solarzellen ein wesentlicher Faktor.

Am Fraunhofer ISE arbeiten wir zusammen mit unseren Partnern an technologischen Lösungen für diese neuen Märkte. In dem von der EU geförderten Projekt »ALFAMA« haben wir eine III-V-Dreifachsolarzelle in Dünnschichttechnik entwickelt (Abb. 1). Die nur wenige Mikrometer dünnen GaInP/GaAs/GaInAs-Solarzellschichten werden dafür mithilfe eines nasschemischen Verfahrens von dem GaAs-Substrat abgelöst (»Epitaxial Lift-off«) und anschließend auf eine dünne Metallfolie übertragen. Mit

einem spezifischen Gewicht von nur $13,3 \text{ mg/cm}^2$ ist die Zelle vier- bis fünfmal leichter als typische Weltraumsolarzellen. Dabei konnten wir ein Leistung-pro-Masse-Verhältnis von $2,76 \text{ W/g}$ demonstrieren. Neben dem geringen Gewicht bietet das Substratablöseverfahren den Vorteil, dass das kostbare Substrat mehrfach verwendet werden kann. Im EU-Projekt »SiTaSol« haben wir einen einfachen nasschemischen Prozess entwickelt, um GaAs-Substrate nach Ablösen der Solarzellschichten wiederaufzubereiten. Bei anschließender Wiederverwendung konnten wir eine mit dem ursprünglichen Substrat vergleichbare Materialqualität nachweisen. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »LightBridge« entwickelt das Fraunhofer ISE außerdem ein beschleunigtes Substratablöseverfahren, bei dem die zum Ablösen verwendete Flusssäure nicht nur von den Seiten, sondern zusätzlich durch vorstrukturierte Kanäle in die Halbleiterschichten eindringen kann. Damit ist es uns gelungen, einen 4-Zoll-Wafer innerhalb von weniger als zwei Stunden vollständig abzulösen.

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

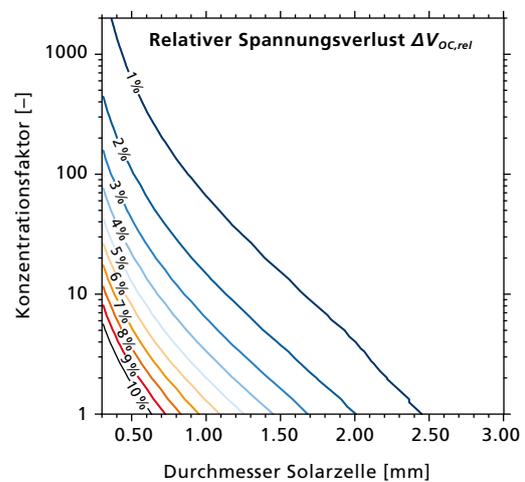
1 Gewölbte Dünnschicht-Dreifachsolarzelle mit 20 cm^2 Zellfläche. Die am Fraunhofer ISE gewachsenen III-V-Schichten wurden dazu vom Projektpartner »tf2 devices« (Nijmegen, Niederlande) mittels Lift-off-Technik auf eine dünne Metallfolie übertragen.



Miniaturisierung in der Konzentratorphotovoltaik (μ -CPV)

Die konzentrierende Photovoltaik (CPV) erreicht die höchsten Wirkungsgrade und niedrigsten Energierücklaufzeiten aller Photovoltaik-Technologien. Die industrielle Umsetzung wurde bereits in zahlreichen Multi-MW-Kraftwerksinstallationen demonstriert. Um die Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen, ist es jedoch nötig, die Modulkosten weiter zu senken. Miniaturisierung und innovative Fertigungstechnologien aus anderen Branchen, wie der Mikro- und Optoelektronik sowie der Displayfertigung, versprechen neue Modulkonzepte mit hohem Kostensenkungspotenzial. Die Miniaturisierung erfordert die präzise Positionierung und Kontaktierung Tausender Bauelemente auf großen Flächen. Dafür wird auf additive Fertigungsprozesse sowie parallelisierte Bestückungs- und Kontaktierungsprozesse zurückgegriffen. Weiterhin werden Selbstausrichtungseffekte ausgenutzt.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »HeKMod4« haben wir ein miniaturisiertes CPV-Modul mit reflektiver Spiegeloptik (Kantenlänge einer Einheitszelle 12,8 mm) und Konzentratorsolarzellen mit nur wenigen 100 Mikrometern Kantenlänge entwickelt. Wir konnten u. a. zeigen, dass die Beeinträchtigung der elektrischen Leistung durch erhöhte Randrekombination unter hoch konzentriertem Sonnenlicht selbst bei Mikro-Solarzellen mit Kantenlängen von nur wenigen Hundert Mikrometern vernachlässigbar ist (siehe Grafik). Das vom BMWi geförderte Verbundprojekt »micro-CPV« baut auf diesen Ergebnissen auf. Hier entwickeln wir ein Mikro-CPV-Modul auf Basis eines ganzheitlichen Ansatzes, der optische, elektrische, mechanische und produktionstechnische Rahmenbedingungen berücksichtigt. Ziel ist es, trotz kostengünstiger Fertigungsprozesse höchste Effizienz und eine hohe Akzeptanz gegenüber einer



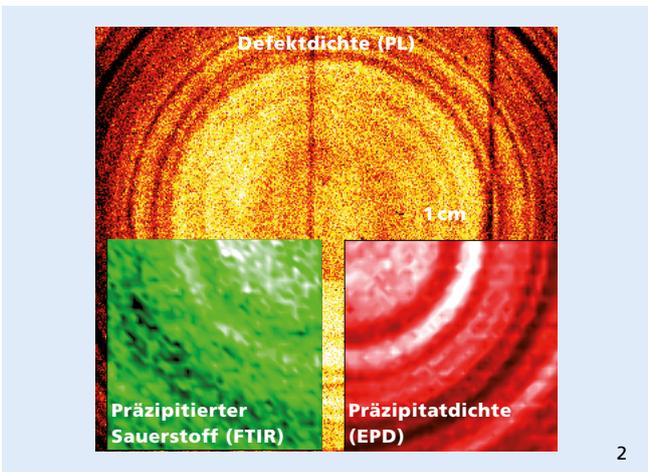
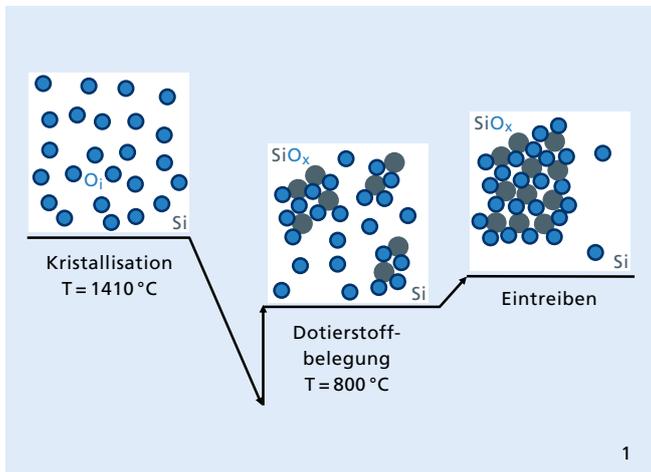
Grafik: Relativer Verlust in der Leerlaufspannung V_{OC} aufgrund von Randrekombination (bezogen auf V_{OC} einer runden Konzentratorsolarzelle mit 3 mm Durchmesser).

Fehlausrichtung zur Sonne zu erreichen. Die Bodenplatte des Moduls besteht aus einem glasbasierten, in additiver Leiterplattentechnologie hergestellten Panel. Mikro-Konzentratorsolarzellen mit einer Fläche von nur einem Bruchteil eines Quadratmillimeters werden als unverkapselte Chips direkt auf das Panel bestückt und richten sich durch Rückstellkräfte beim Aufschmelzen des Lots selbst aus. Die elektrische Kontaktierung der Vorderseite der Chips erfolgt mittels additiver Drucktechnik. Ein Linsenarray konzentriert das Sonnenlicht 1000-fach auf die Mikro-Solarzellen. Parallelisiert auf die Solarzellen bestückte Glaskugellinsen homogenisieren die Ausleuchtung der Zellen und verbessern die Winkelakzeptanz. Aufgrund der effizienten Verteilung der durch Miniaturisierung reduzierten Wärmelast erwarten wir trotz der 1000-fachen Sonnenkonzentration und des Verzichts auf eine dezidierte Wärmesenke im Betrieb Zelltemperaturen von unter 80 °C.

1 Miniaturisiertes CPV-Modul mit reflektiver Spiegeloptik (Kantenlänge einer Einzelelektrode 12,8 mm) aus »HeKMod4«.

2 Tausende Mikro-Konzentratorsolarzellen auf einem prozessierten 4-Zoll-Wafer beim Partner AZUR SPACE Solar Power GmbH im Rahmen des Projekts »micro-CPV«.

Dr. Henning Helmers
Telefon +49 761 4588-5094
cpv.highconcentration@ise.fraunhofer.de

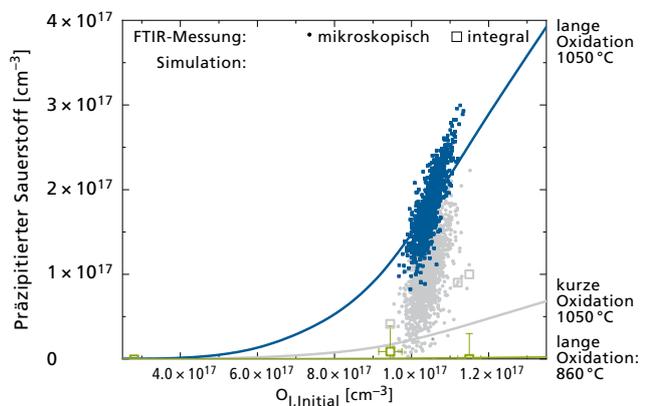


Materiallimitierung durch Sauerstoffpräzipitation in Solarzellen

In Siliciumwafern mit hohen Sauerstoffkonzentrationen bilden sich während der Solarzellenprozessierung rekombinationsaktive Sauerstoffpräzipitate, die zu einer deutlichen Degradation der Solarzelleneffizienz führen können. Der Sauerstoff wird beim Czochralski-Verfahren über den Tiegel eingebracht und liegt zunächst in nicht rekombinationsaktiver, gelöster Form vor. Durch die Abkühlung nach der Kristallisation und die Dotierstoffbelegung bei etwa 800 °C übersättigt der gelöste Sauerstoff und formiert sich in kleineren Sauerstoffpräzipitaten (Abb. 1). Sind diese Präzipitate groß genug, wachsen sie bei zusätzlichen Hochtemperaturprozessschritten zu sehr großen und damit schädlichen Präzipitaten heran, die ringförmige Defektzonen auf dem Wafer bilden (Abb. 2). Für eine eindeutige Identifikation dieser Defekte als Sauerstoffpräzipitate haben wir am Fraunhofer ISE die bildgebende Photolumineszenz (PL) zur Ladungsträgerlebensdauer- bzw. Defektdichtemessung mit bekannten Methoden zur Sauerstoffpräzipitanalytik aus der Halbleiterindustrie kombiniert. Hierbei haben wir folgende Methoden gewählt:

- » Einsatz eines mikroskopischen Zählverfahrens der Ätzgruben (EPD), die sich im Spannungsfeld von Sauerstoffpräzipitaten in SECCO-Ätze bilden
- » Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie (FTIR) zur Messung der Abnahme von gelöstem Sauerstoff bzw. Konzentration von präzipitiertem Sauerstoff während der Solarzellenprozessierung

Durch die Anpassung dieser beiden Verfahren auf ca. $150\text{ }\mu\text{m}$ dünne, nicht-polierete Wafer konnte erstmals eine eindeutige lokale Korrelation von Defektdichte, Präzipitatchichte und präzipitierter Sauerstoffkonzentration auf industriell prozessierten Solarzellenwafern erfolgen (Abb. 2).

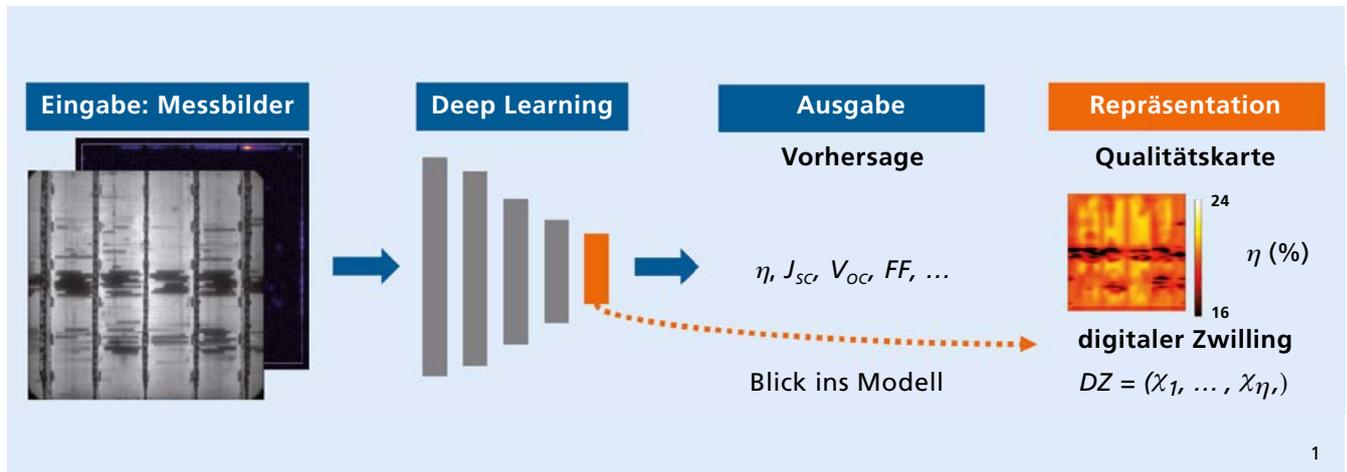


Grafik: Vergleich der gemessenen und simulierten Konzentration an präzipitiertem Sauerstoff in Abhängigkeit der initialen Sauerstoffkonzentration $O_{i,\text{initial}}$.

Für eine detaillierte Modellierung von Sauerstoffpräzipitaten haben wir zudem Erkenntnisse aus der Halbleiterindustrie auf die sehr viel kürzeren Prozesssequenzen von Solarzellen übertragen und dabei Oberflächeneffekte der dünnen Wafer sowie den Einfluss der Gasatmosphäre im neuen kinetischen Präzipitationsmodell berücksichtigt. Die gute Übereinstimmung von Simulationen und Messungen der präzipitierten Sauerstoffkonzentration in der Grafik zeigt die gelungene Berücksichtigung dieser Effekte. Ein weiteres Ziel dieser Arbeiten, die wir in den vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekten »Genesis« und »Limes« in Kooperation mit der Universität Freiburg durchgeführt haben, war die Vorhersage der Lebensdauerlimitierung in Solarzellen durch Sauerstoffpräzipitate. Hierfür haben wir das kinetische Modell mit einer Berechnung der Ladungsträgerrekombination an Sauerstoffpräzipitaten unter Berücksichtigung der Präzipitatgröße kombiniert.

Dr. Jonas Schön
 Telefon +49 761 4588-5192
 sipv.characterization@ise.fraunhofer.de

- 1 Der gelöste Sauerstoff bildet kleine Präzipitate, die bei Eintreibschritten zu großen Präzipitaten anwachsen.
- 2 Der Vergleich der drei Messmethoden PL, FTIR und EPD zeigt eine klare Korrelation zwischen rekombinationsaktiven Defekten und Sauerstoffpräzipitaten.



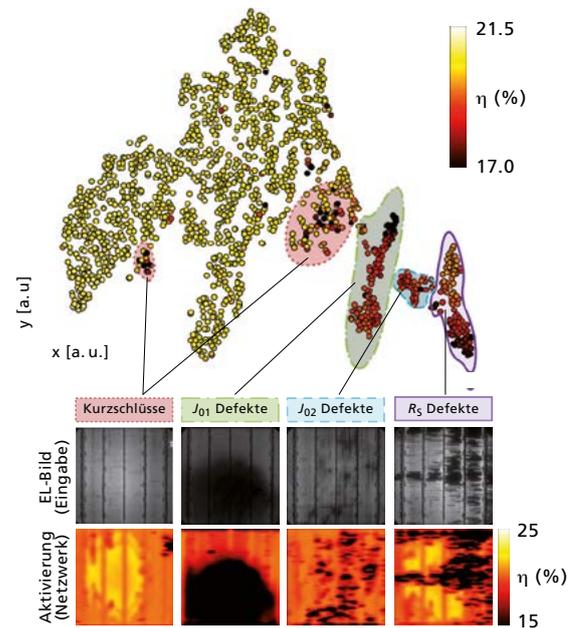
1

Künstliche Intelligenz für die Solarzellencharakterisierung

Die Qualitätsinspektion anhand orts aufgelöster Inline-Messdaten eröffnet der PV-Produktion neue Möglichkeiten der Prozesskontrolle. Bisher am Markt verfügbare Bildauswertemethoden beruhen auf manuell definierten Algorithmen, die angesichts der komplexen Zusammenhänge in den Daten allerdings nur einen Bruchteil der verfügbaren Informationen erfassen können. Das Fraunhofer ISE forscht daher im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts »NextTec« an Methoden der künstlichen Intelligenz (KI), um eine digitale Repräsentation der Solarzelle (»digitaler Zwilling«) aus den Messdaten abzuleiten.

Der digitale Zwilling soll anhand empirischer Daten die wesentlichen Qualitätsinformationen erlernen. Hierzu werden u. a. Elektrolumineszenz(EL)- und Thermographie-messungen über Deep Learning zur Vorhersage von physikalischen Qualitätsparametern verknüpft. Das Modell erlernt eine aussagekräftige Zustandsbeschreibung der Solarzelle, indem es aus den hochdimensionalen Messbildern eine kompakte Repräsentation der Daten ableitet, die eine erfolgreiche Qualitätsvorhersage ermöglicht. Ein Blick ins Modell zeigt die Aktivierung der Neuronen. Diese spiegelt zum einen die erwartete orts aufgelöste Qualitätsverteilung aus Sicht des Netzwerks anhand einer »Qualitätskarte« wider und lässt so Rückschlüsse auf Ursache und Wirkung von Defekten zu. Zum anderen bewirkt die kompakte Modell-Repräsentation eine effiziente Speicherung der Daten und deren Vergleichbarkeit zur schnellen Fehlerklassifikation.

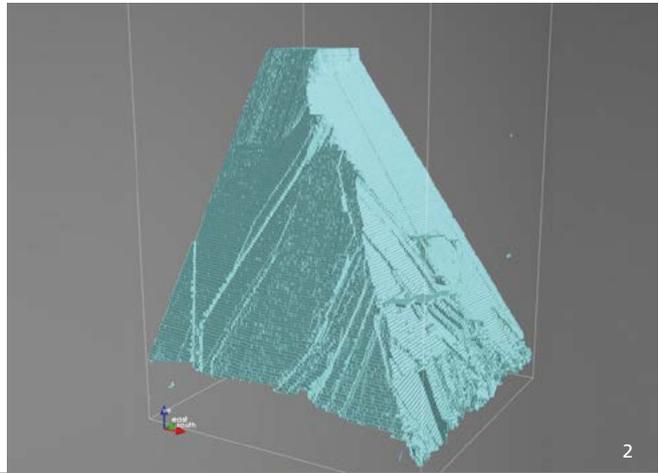
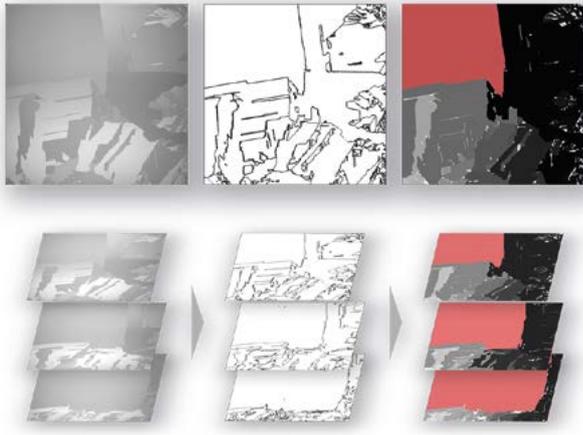
Im Beispiel lernt unser KI-Modell die Ableitung eines digitalen Zwillings anhand eines Datensatzes von 1600 Zellen. Zur Veranschaulichung werden die Repräsentationen der untersuchten Solarzellen in einer zweidimensionalen Abbildung betrachtet. Die Abbildung wurde dabei so vereinfacht, dass sich benachbarte Punkte auch in ihrer



Grafik: Niederdimensionale Einbettung der empirischen Verlustanalyse. Proben mit ähnlichen Defekten sind im Graph farbig unterlegt. Für jede Gruppe ist eine EL-Aufnahme mit der vom Netzwerk antizipierten Qualitätsverteilung dargestellt.

Repräsentation ähneln: Es bilden sich Gruppen von Solarzellen, die spezifische Defekte aufweisen. Diese sind farbig unterlegt. Zur qualitativen Analyse ist pro Defektgruppe ein typisches EL-Bild dargestellt. Zu jedem dieser Bilder ist auch die Qualitätskarte mit dem rückgerechneten orts aufgelösten Wirkungsgrad zu sehen, der in defektreichen Regionen niedriger ausfällt. Die beschriebene Technik kann dazu verwendet werden, Zellen automatisch zu klassieren, um Proben bestimmter Repräsentationen bzw. Defektgruppen gezielt aussortieren zu können. Die orts aufgelöste Beurteilung der Schwere von Defekten anhand der Qualitätskarten kann einen zusätzlichen Beitrag zur Prozessoptimierung leisten.

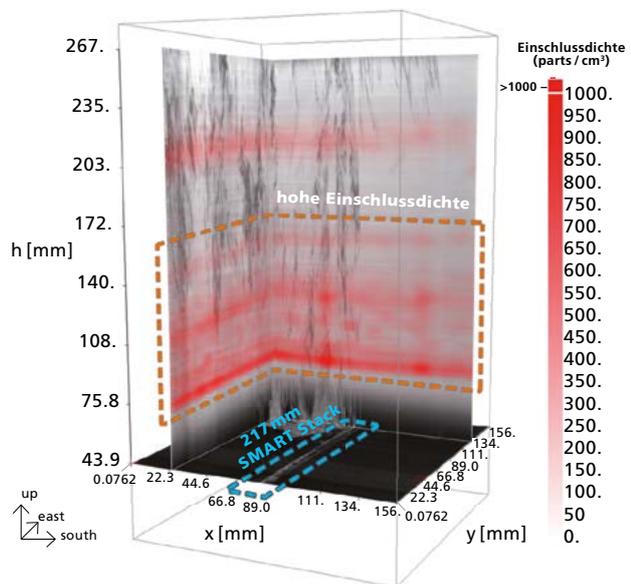
Dr. Matthias Demant
Telefon +49 761 4588-5651
sipv.metrology@ise.fraunhofer.de



Neue Einblicke in das Kristall- und Defektwachstum

Die Erforschung neuer Siliciummaterialien auf Basis gerichteter Erstarrung mit Keimvorlage setzt ein detailliertes Verständnis über die Entstehung und Entwicklung von Kristallstruktur und Defekten voraus. Die Umsetzung innovativer Kristallzüchtungsverfahren in der Produktion erfordert zudem die iterative Optimierung des Kristallisationsrezeptes und damit ein Monitoring des Prozesses. Verfahren, die eine effiziente und zeitnahe Kontrolle und Analyse des Kristallwachstums ermöglichen, kommt daher eine hohe Bedeutung zu.

Das Fraunhofer ISE hat eine Analyseplattform entwickelt, mit der sich die innere Kristallstruktur einer hergestellten Siliciumsäule auf Basis von Säulen- und Waferdaten schnell und detailliert visualisieren lässt. Während Aussagen zur gewachsenen Struktur und zu nötigen Prozessanpassungen bislang oft anhand der Säulenoberfläche oder nach dem Wafering anhand von 2D-Rohbildern getroffen wurden, gibt das neue Verfahren über verschiedene 2D- und 3D-Visualisierungstechniken einen plastischen, natürlichen Einblick in das räumliche Wachstum von Kristallen und Versetzungen. Intelligentes Datenmanagement, eine optimierte Darstellung und einfache Bedienkonzepte erlauben eine intuitive Navigation durch die zu einer Säule erhobenen Messdaten und eine konzentrierte Analyse der physikalischen Struktur. Die Kombination verschiedener Daten ermöglicht es zudem, Interaktionen zwischen Korngrenzen und Defekten genauer zu studieren. Zum Beispiel haben wir im Rahmen der Weiterentwicklung des Cast-Mono-Silicium-Verfahrens mit der sogenannten »SMART«-Technik über spezielle Keimvorlagen gezielt funktionale Defekte in den Kristall eingebracht, um die Entstehung und Ausbreitung unerwünschter Kristallbaufehler zu verhindern. Deren Wirkung und wechselseitige Interaktionen können wir durch angepasste Visualisierungen inspizieren und analysieren (siehe Grafik). Die Plattform ist offen für weitere Datentypen und kann durch weitere Visualisierungs- und Analysemethoden ergänzt werden.



Grafik: 3D-Schnittebenen durch PL-Daten (grau) einer Cast-Mono-Randsäule mit Einschlussdichten (rot). Ein »SMART Stack« blockiert vom Tiegelrand kommende Versetzungen.

Die Analyseplattform basiert auf einer vielseitigen Bildverarbeitungskette zur Extraktion und Rekonstruktion von Defekten aus Photolumineszenz- und Korngrenzaufnahmen von Wafern, die im Laufe mehrerer Jahre aus den Projekten »Q-Wafer« und »Q-Crystal« hervorgegangen ist. Im Gegensatz zu älteren, destruktiven Techniken kann das neue Verfahren direkt zur Produktionskontrolle eingesetzt werden, da Inline-Messdaten am Rohwafer zur 3D-Rekonstruktion der Kristallstruktur und ihrer Defekte ausreichen.

Dr. Matthias Demant
 Telefon +49 761 4588-5651
 sipv.metrology@ise.fraunhofer.de

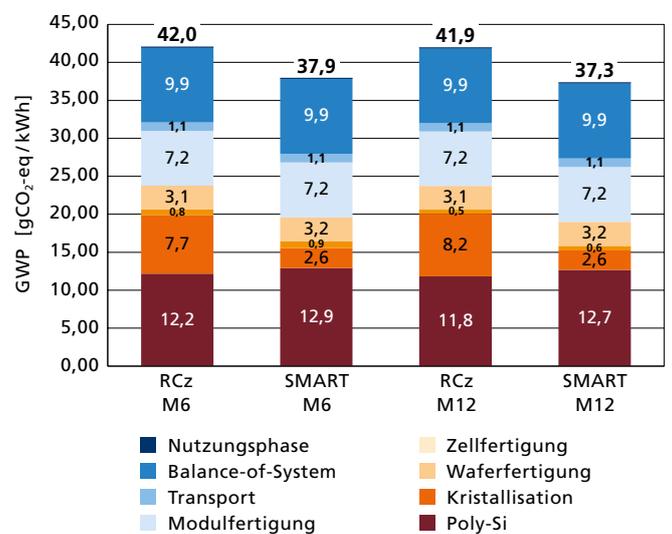
- 1 Rekonstruktion der Körner einer Cast-Mono-Säule.
 Links: Optische Aufnahmen, Mitte: extrahierte Korngrenzen, rechts: 3D-Kornsegment-Tracking.
- 2 Frei navigierbare 3D-Visualisierung des Hauptkorns einer Cast-Mono-Ecksäule.



Entwicklung von Cast-Mono-Silicium mit niedrigem CO₂-Fußabdruck

Als Alternative zum etablierten Czochralski-Verfahren (Cz-Si) für das Ziehen von einkristallinen Ingots arbeiten wir am Fraunhofer ISE an der kostengünstigen und ressourcenschonenden Herstellung von einkristallinen Wafern nach dem Cast-Mono-Verfahren. Durch die Kombination von großen Keimplatten mit dünnen Streifen aus Silicium nach dem Konzept der »Seed Manipulation for ARTificially controlled defect Technique« (SMART) konnten wir Material mit gezielt eingebrachten funktionalen Defekten herstellen, das eine deutliche Verminderung unerwünschter Kristallbaufehler aufwies. So haben wir vollquadratische, einkristalline Wafer mit einer Kantenlänge von 210 mm hergestellt, die die Basis für die neueste Generation von Solarzellen bilden. Für solche Wafer erzielten wir mit einem industrienahen Solarzellenprozess das gleiche Wirkungsgradniveau von knapp 22 % wie für Wafer aus dem Czochralski-Verfahren.

Die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit der Verwendung von Cast-Mono-Siliciumwafern für die Herstellung von PERC-Solarzellen und deren anschließender Anwendung in einem Photovoltaiksystem haben wir im Rahmen einer Kosten- und Kohlenstoffbilanzanalyse für die gesamte Wertschöpfungskette im Vergleich zu Czochralski-Siliciumwafern untersucht. Die Cast-Mono-Technologie wurde auf Grundlage eines G8-Industrieofens im Vergleich zu einer Cz-Kristallzüchtungsanlage mit 36-Zoll-Tiegelgröße und Wiederbeschickungsverfahren (Recharging Cz, RCz) modelliert. Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) und die Kosten pro Wafer haben wir für zwei relevante Formate (M6: 166 × 166 mm², M12: 210 × 210 mm²) analysiert. Berechnungen für ein PV-System mit Modulen, die jeweils 138 PERC-Halbzellen aus Cast-Mono-Wafern enthalten, zeigen ein um 9 % reduziertes Treibhauspotenzial bei einer angenommenen Nutzungsphase von 25 Jahren. Die Kostenprofile der Wafer ergeben für beide Technologien einen Schnittpunkt bei etwa 5 bis 7 Dollarcent pro Kilowattstunde Strom und Kostenvorteile für



Grafik: Treibhauspotenzial (GWP) für die beiden betrachteten Kristallisationsverfahren und Wafergrößen nach 25 Jahren Nutzung in einem Muster-PV-System.

Cast-Mono-Wafer im Fall höherer Strompreise. Darüber hinaus würde eine Erhöhung der Brick-Ausbeute von derzeit ca. 53 % auf über 60 % zu einer signifikanten Senkung der Waferkosten um bis zu 0,4 Dollarcent pro Wattpeak führen. Somit stellt die Cast-Mono-Technologie besonders unter dem Gesichtspunkt nachhaltiger Wertschöpfungsketten eine zukunftssträchtige Alternative zur aktuell dominierenden RCz-Technologie dar.

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

- 1 Monokristalline Keimplatten in einem Labortiegel, angeordnet nach der SMART-Mono-Technik.
- 2 Einkristalline vollquadratische Wafer aus einem Cast-Mono-Block im Waferformat M6 mit Kantenlänge 166 mm.



Silicium-Heterojunction-Technologie(HJT)-Plattform am Fraunhofer ISE

Silicium-Heterojunction-Technologie(HJT)-Solarzellen ermöglichen Rekordzellwirkungsgrade über 25 % und zählen somit neben poly-Silicium-basierten passivierten Kontakten (TOPCon) zu den vielversprechendsten Technologien der nächsten Generation. In den letzten Jahren ist das Interesse der Photovoltaikindustrie an der HJT-Technologie gestiegen, was wachsende Marktanteile und Produktionskapazitäten zur Folge hat. Auch die wieder neu in Europa entstehende Produktion setzt sowohl bei Einfachsolarzellen als auch bei den Unterzellen für Mehrfachsolarzellen, den Si-Perowskit-Tandemsolarzellen, auf HJT.

Das Fraunhofer ISE deckt die vollständige Prozesskette vom Si-Wafer-Eingangstest bis zur Modulfertigung und Qualitätskontrolle für die HJT-Technologie ab und arbeitet kontinuierlich an der Optimierung spezifischer Einzelprozesse und Schnittstellen sowie der Entwicklung neuer Technologieansätze. Die FuE-Aktivitäten zielen dabei neben der Effizienzsteigerung besonders auf die Senkung der Herstellungskosten und eine Produktivitätserhöhung der verwendeten Geräte ab.

Im PV-TEC Front-End-Labor des Fraunhofer ISE fokussieren sich unsere aktuellen Arbeiten auf die Weiterentwicklung von Prozessen und Anlagentechnologien zur nasschemischen Oberflächenstrukturierung, -reinigung und -konditionierung sowie zur Plasma-basierten Abscheidung der amorphen Silicium (a-Si)-Schichten und leitfähigen transparenten Oxidschichten (Transparent Conductive Oxide, TCO). Spezifische Forschungsthemen sind die Feinoptimierung der a-Si- und TCO-Schichtstapel hinsichtlich Passivierung und Kontakteigenschaften,

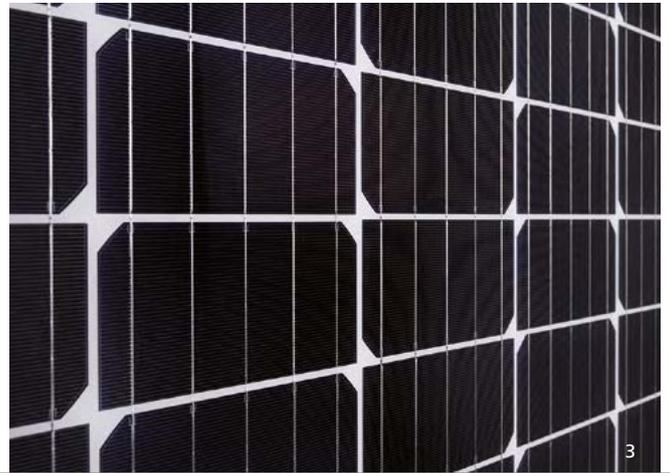
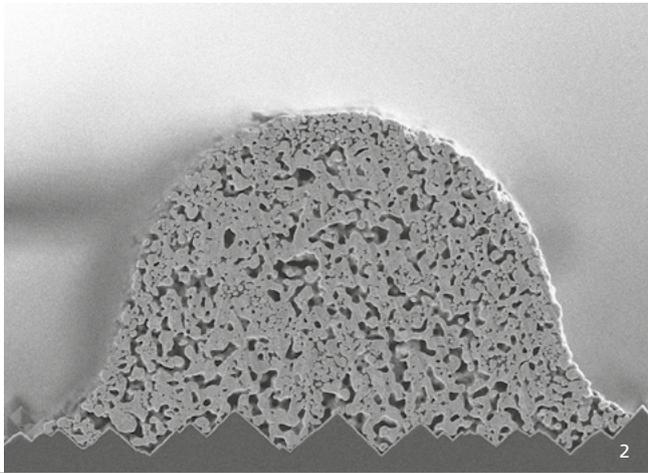
Ansätze zum Einsparen von Indium durch Verwendung von Capping-Schichten zur partiellen Substitution der TCO-Schicht sowie multifunktionale Capping-Schichten, die neue Prozessrouten ermöglichen und zur Verbesserung der Effizienz von Voll- und Teilzellen beitragen. Die experimentellen Arbeiten werden durch Prozess- und Device-Simulationen unterstützt.

Im PV-TEC Back-End-Labor evaluieren wir verschiedene innovative Metallisierungsverfahren wie Feinlinien-Siebdruck, Multi-Düsen-Dispensen, Flextrail-Druck, Lasertransferdruck und Rotationsdruckverfahren. Dabei ist es uns gelungen, die erreichten Strukturbreiten in den letzten Jahren zu reduzieren: Sie liegen heute im Labor bei weniger als 10 µm. Der Silberauftrag konnte folglich deutlich reduziert werden.

Darüber hinaus entwickeln wir alternative, silberfreie Metallisierungsansätze speziell für Heterojunction-Solarzellen. Sowohl bei der »NOBLE« (Native Oxide Barrier Layer for selective Electroplating) als auch beim Laser Transfer and Firing (LTF) wird galvanisch Kupfer auf eine metallische Saatschicht abgeschieden. Ein weiterer Fokus der aktuellen FuE-Arbeiten liegt auf der Entwicklung schneller Prozesse zur Trocknung bzw. dem Curing der Kontakte. Die Verwendung photonischer Verfahren konnten wir erfolgreich demonstrieren und Prozesszeiten von wenigen Sekunden realisieren.

Halbzellen sind heute bereits Industriestandard, und durch immer größere Waferformate wird das Vereinzeln der Zellen weiter an Bedeutung gewinnen. Um den temperaturempfindlichen Schichten und dem hohen

1 PVD-Anlage mit Wafern nach TCO-Abscheidung.



Wirkungsgradpotenzial der HJT-Technologie Rechnung zu tragen, haben wir den Zellteilungsprozess speziell für diese Solarzellen optimiert. Weiterhin entwickeln wir photonische Prozesse zur Optimierung der elektrischen und optischen Schichteigenschaften sowie zur Reduktion der Defektzustände. Durch die Entwicklung sogenannter »Light-Soaking«-Prozesse in Verbindung mit einem optimierten Zellteilungsprozess ist es gelungen, einen Wirkungsgradgewinn von bis zu 0,6 %_{abs} zu demonstrieren.

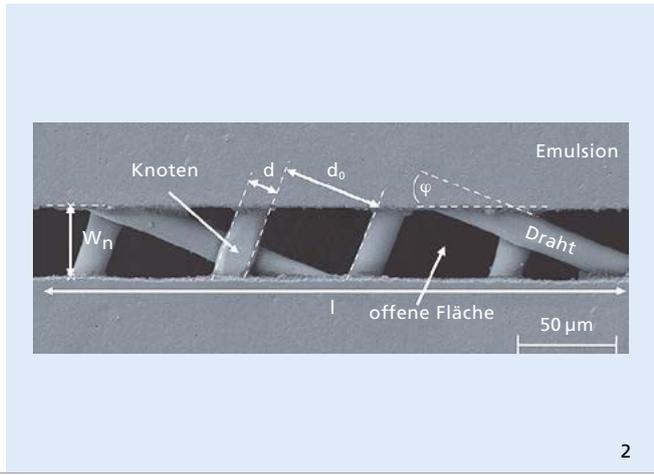
Im Module-TEC des Fraunhofer ISE konnten wir hocheffiziente HJT-Solarzellen bereits erfolgreich verschalten: Dabei kamen eine Smart-Wire-Drahtverschaltung einerseits und eine Verbinderschaltung mittels leitfähigen Klebens oder auf Basis des konventionellen Infrarotlötens andererseits zum Einsatz.

Das leitfähige Kleben und Smart Wire ermöglichen eine bleifreie Verschaltung von busbarlosen Solarzellen bei Temperaturen von ca. 150 °C. Der Einsatz von Runddraht für die Drahtverschaltung und von strukturierten Verbindern beim leitfähigen Kleben erzielt einen Leistungsgewinn von ca. 1,5 % auf Modulebene. Für die langzeitstabile Moduleinkapselung konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten auf den Ausschluss von Feuchtigkeit durch die Verwendung von Glas-Glas-Modulen mit Randversiegelung, die Entwicklung von Glas-Folie-Modulen mit feuchtestabilen Rückseitenfolien sowie eine schonende und schnelle Niedertemperaturlamination.

In den vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojekten »PV-BAT-400«, »ProSelect«, »HJT 4.0«, »DYNASTO«, »Smart« und »CUSTCO« haben wir institutsintern und in enger Kooperation mit unseren Projektpartnern aus Industrie und Wissenschaft viele wichtige Einzelaspekte der HJT-Prozesskette weiterentwickelt und neue Ansätze aufgezeigt.

Mit der seit 2020 in den Labors des Fraunhofer ISE vollständig abgebildeten HJT-Prozestechnologie konnten wir für unseren HJT-Basisprozess mit Siebdruckmetallisierung maximale Zellwirkungsgrade von 23 % auf großflächigen M2-Wafern demonstrieren und durch das CallLab des Fraunhofer ISE bestätigen. Als erstem Forschungsinstitut ist uns mit unserer optimierten Prozessroute von der Voll- zur Halbzelle zudem der Nachweis gelungen, dass für das HJT-Halbzellenmodul im Vergleich zum Vollzellenmodul sogar eine Effizienzsteigerung möglich ist.

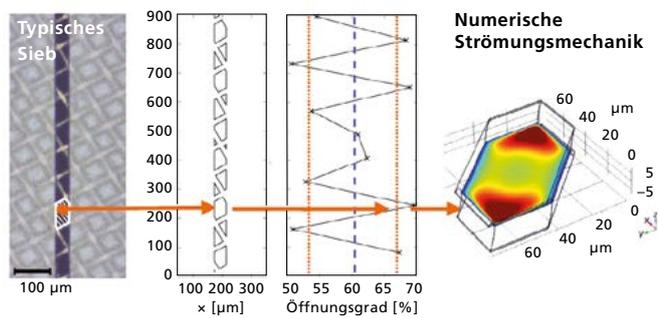
Dr. Anamaria Moldovan
 Telefon +49 761 4588-2136
sipv.surface@ise.fraunhofer.de



Digitalisierung von präzisen Hochdurchsatz-Druckprozessen

Im Zuge der Digitalisierung von Produktions- und Geschäftsprozessen ist es notwendig, digitale Abbilder von Werkstücken und Produktionsprozessen zu entwickeln. Diese sogenannten »digitalen Zwillinge« setzen eine physikalische Modellierung und/oder Simulation des realen Abbildes voraus. Für die Realisierung von digitalen Zwillingen für die Hochdurchsatzmetallisierung von Solarzellen ist dabei entscheidend, die Komplexität des Flachbett- und Rotationssiebdruckprozesses mit allen kritischen Merkmalen abzubilden.

Am Fraunhofer ISE haben wir hierfür zunächst einen Simulationsalgorithmus entwickelt, der – basierend auf einer beliebigen Siebspezifikation – einen virtuellen Klon des jeweiligen Siebes erzeugt. Dieser virtuelle Klon wird anschließend von einem Analysealgorithmus in seine Bestandteile zerlegt und hinsichtlich seiner funktionalen Eigenschaften im Druckprozess analysiert. Dazu wird das virtuelle Sieb in eine numerische Strömungssimulation (CFD) geladen und anschließend in einem virtuellen Siebdruckprozess getestet. Derartige Strömungssimulationen setzen eine detaillierte Modellbildung des rheologischen Verhaltens der jeweiligen Druckpasten voraus. Dafür haben wir spezielle Charakterisierungsmethoden entwickelt, die die Rheologie von hochgefüllten Metallpasten in einem ausreichenden Detailgrad abbilden. Die Ergebnisse der Strömungssimulation werden an den Analysealgorithmus übergeben, der dann selbstständig Änderungen an der Siebarchitektur vornehmen kann. Derzeit arbeiten wir daran, dieses physikalische Simulationsmodell effizienter zu machen und eine größere Bandbreite rheologischer Parameter abzudecken. Ziel ist es, das Modell in einem nächsten Schritt zu nutzen, um künstliche neuronale Netze zu trainieren.



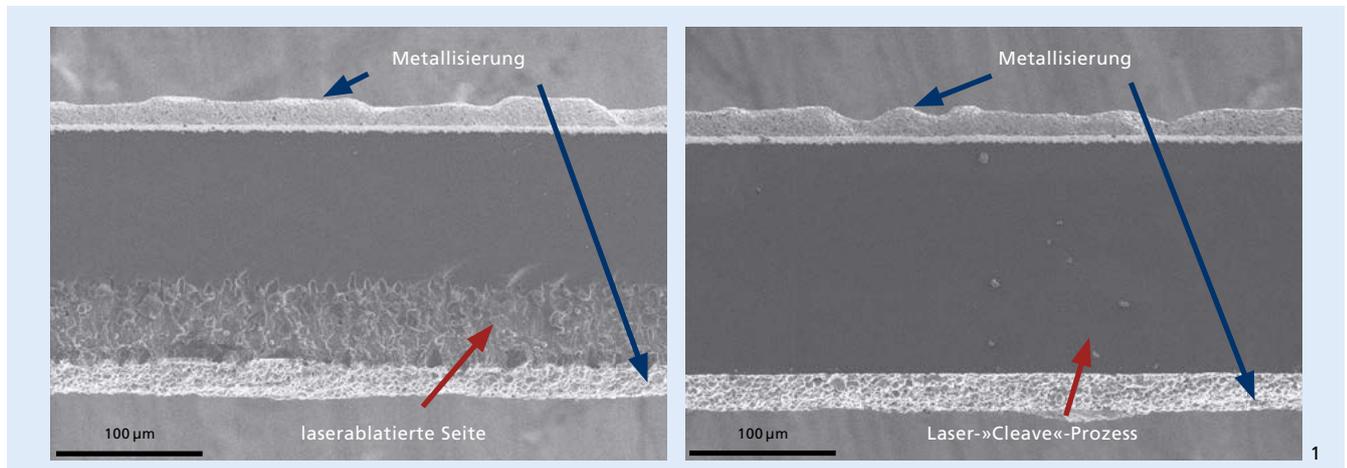
Grafik: Digitale Repräsentation eines Siebes und dessen Einbindung in eine CFD-Siebdruckmodellierung.

Außerdem planen wir, diese Lösungen nicht nur im Flachbett-, sondern auch im rotativen Siebdruckprozess zu erproben. Im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekte »Rock-Star« und »Rock-It« haben wir eine industrielle Hochdurchsatz-Demonstratoranlage entwickelt, die dafür eine ideale Plattform darstellt. Sie verfügt über ein innovatives Transportsystem auf Basis autonomer Shuttles mit eigener Energieversorgung und eines Hochgeschwindigkeitskameranagements zur präzisen Ausrichtung der Wafer für den Druckprozess. Aktuell erlaubt sie einen Durchsatz von bis zu 8000 Wafern pro Stunde, was einer Verdopplung pro Spur auf modernen Flachbett-Siebdrucklinien entspricht. Das neu entwickelte Anlagenkonzept eröffnet zahlreiche weitere Anwendungsfelder für die Hochdurchsatzbeschichtung von Präzisionsbauteilen wie Brennstoffzellen, Leiterplatten oder Elektronikkomponenten.

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

1 Demonstratoranlage für die Hochdurchsatzmetallisierung im Rotationsdruck.

2 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer typischen Sieböffnung.

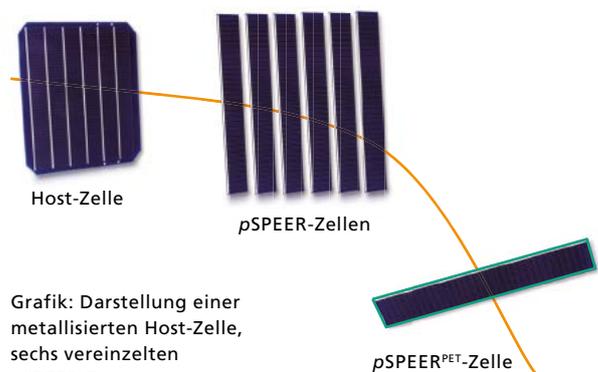


Vereinzelung und Kantenpassivierung von Siliciumsolarzellen

Der Marktanteil von vereinzelt Siliciumsolarzellen, wie z. B. Halb- und Schindelsolarzellen, ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass der niedrigere Strom der Teilsolarzellen die Zellverbindungsverluste verringert.

Die Vereinzelung erfolgt gewöhnlich nach Fertigstellung der sogenannten »Host-Zelle« auf Waferformat. Diese Host-Zelle entspricht dem fertigen Zellprodukt und weist ein Metallisierungslayout auf, das der zu vereinzeln Teilsolarzellengröße entspricht. Die Vereinzelung von Host-Zellen führt jedoch auch zur Bildung neu formierter, »nicht passivierter« Zellkanten mit Randdefekten. Diese verursachen die sogenannte Kantenrekombination, die eine Senkung der Zelleffizienz zur Folge hat. Die Kantenrekombination skaliert proportional mit dem Verhältnis von Umfang zu Fläche. Dieser zusätzliche Verlust wird umso bedeutender, je höher das Effizienzpotenzial der Ausgangszelle ist. Auf Zellebene ist eine Reduzierung der Kantenrekombination möglich, indem man die Ladungsträger einer Polarität von der Kante abschirmt und/oder die Defektdichte an der Kante reduziert.

Das Projekt »PV-BAT400« am Fraunhofer ISE hat das Ziel, durch Schindeln von bifazialen Solarzellen Module mit sehr hohen Leistungsdichten herzustellen. Dafür haben wir das Konzept der vereinzelt Schindelsolarzelle auf eine bifaziale »Passivated Emitter and Rear Cell« (PERC)-Schindelzelle mit *p*-dotierter Basis angewendet (*p*SPEER genannt). In einem ersten Schritt haben wir dazu mit zwei laserbasierten Vereinzelungsprozessen gearbeitet: dem Laserstrahl-Anritzen und mechanischen Brechen (LSMC) sowie dem thermischen Laserstrahl-Separieren (TLS). Daran anschließend wurde eine industriekompatible Technologie zur Kantenpassivierung, die »Passivated Edge Technology« (PET), entwickelt und im Labormaßstab angewendet. Die PET umfasst die Abscheidung von Aluminiumoxid sowie seine thermische Aktivierung. Um bereits vorhandene Metallkontakte und

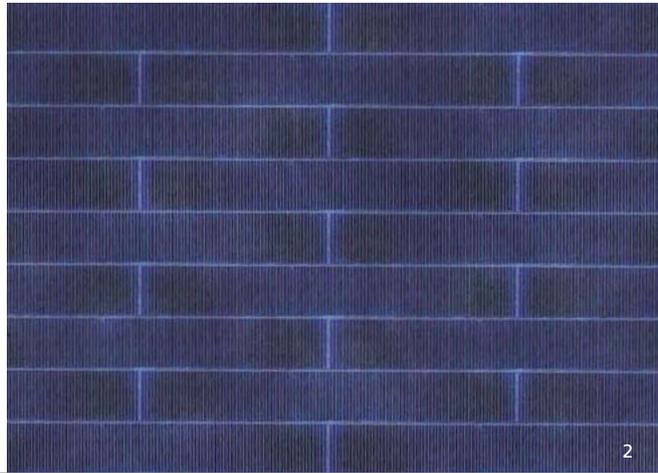


Grafik: Darstellung einer metallisierten Host-Zelle, sechs vereinzelt *p*SPEER-Zellen und einer kantenpassivierten *p*SPEER^{PET}-Zelle.

Passivierungsschichten nicht zu beschädigen, haben wir das Verfahren dahingehend optimiert, dass zum Abscheiden und Aktivieren niedrige Temperaturen unter 200 °C ausreichen. Auf dieser Basis erreichte eine mittels TLS vereinzelt und durch PET passivierte Schindelzelle (*p*SPEER^{PET} genannt) eine um 4 W/m² höhere Leistungsdichte im Vergleich zu einer konventionell LSMC-vereinzelt Schindelzelle ohne PET. Die bisher effizienteste *p*SPEER^{PET}-Solarzelle verzeichnete eine bifaziale Leistungsdichte von 237 W/m² (Bestrahlungsstärke 1000 W/m² von vorn und 100 W/m² von hinten). Die Zellen werden nun in Module integriert, um auch dort die Erhöhung der Leistungsdichte zu demonstrieren. Die PET haben wir darüber hinaus auch an Heterojunction-Halbzellen getestet und konnten hier ebenfalls den Vorteil der Kantenpassivierung belegen.

Puzant Baliozian, M. Sc.
Telefon +49 761 4588-5383
sipv.contact@ise.fraunhofer.de

1 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von *p*SPEER-Zellkanten, die entweder durch Laserstrahl-Anritzen und mechanisches Brechen (LSMC; links) oder durch thermisches Laserstrahl-Separieren (TLS; rechts) erzeugt wurden.



Matrix-Schindeltechnologie für die Integrierte Photovoltaik

Eines der primären Ziele der Integrierten Photovoltaik ist es, auf wenig Fläche hocheffizient und zuverlässig PV-Strom zu produzieren. Die Schindeltechnologie als Zellverbindung bietet hier große Vorteile: Beim Schindeln von Zellen entstehen keine Zwischenräume, sodass die Fläche komplett mit Photovoltaikzellen bedeckt werden kann. Dadurch ist die aktive Fläche des Moduls im Vergleich zum herkömmlichen PV-Modul wesentlich größer, die Moduleffizienz steigt. Eine Klebeverbindung verschaltet die Zellstreifen aus rechteckigen Solarzellen im überlappenden Bereich elektrisch. Zellverbinder werden nicht benötigt, wodurch sowohl die optischen Verluste aufgrund von Verschattung als auch die Widerstandsverluste geringer ausfallen. Die Verschaltung von geschindelten Solarzellen kommt zudem ohne Blei als Zusatzstoff aus. Die hocheffizienten, bifazialen Schindelsolarzellen mit Matrix-Verschaltung steigern die Moduleffizienz um bis zu 6 % gegenüber herkömmlichen Halbzellen-PV-Modulen.

Gemeinsam mit seinen Industriepartnern entwickelt das Fraunhofer ISE die Matrix-Technologie im Projekt »Shirkan«, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird. Dabei verschalten wir die Schindelsolarzellen an der langen Zellseite überlappend und wie bei einem Mauerwerk seitlich versetzt miteinander. Diese Anordnung sorgt für die Vermeidung inaktiver Flächen innerhalb der Zellmatrix, ein gleichmäßiges Erscheinungsbild sowie eine maximale Flächennutzung. Im Projekt optimieren wir verschiedene Modulkonzepte. Darüber hinaus wird ein Stringer entwickelt, der in industrieller Ausführung einen maximalen Durchsatz von ca. 24 000 Schindelsolarzellen pro Stunde erreichen wird.

Erste Ergebnisse des Verschattungsverhaltens eines Matrix-Schindelmoduls zeigen, dass – verglichen mit der klassischen String-Schindelverschaltung – je nach Szenario zwischen 70 % und 95 % mehr Leistung erzeugt wird. Dies gilt vor allem bei diagonaler Verschattung, z. B. durch einen Schornstein oder einen Pfahl, und zufällig verteilter kleinteiliger Verschattung, z. B. durch Baumblätter. Durch die gleichzeitige Parallel- und Reihenverschaltung der Solarzellen kann der Strom die Verschattung umfließen.

Im ebenfalls öffentlich geförderten Projekt »Lade-PV« entwickeln wir außerdem spezielle Leichtbau-PV-Module für Nutzfahrzeuge. Erste Ergebnisse zeigen, dass die verwendeten Kupfer-Zellverbinder in Standard-PV-Modulen aufgrund ihres thermomechanischen Verhaltens den hohen Belastungen im Straßenverkehr voraussichtlich nicht standhalten würden. Ein elektrisch leitfähiger Kleber, der die Schindelzellen verschaltet, bietet mehr Elastizität und thermische Stabilität. Auch hier bietet die Matrix-Schindeltechnologie große Vorteile.

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

1 Elektrolumineszenz-Aufnahme eines Matrix-Schindelmoduls.

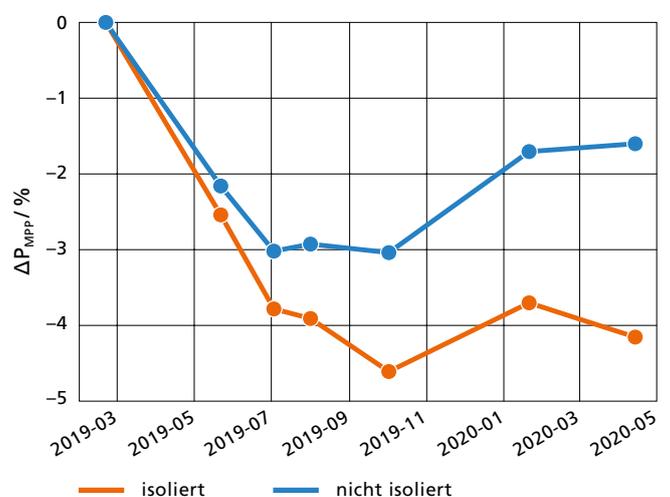
2 Maximale Flächennutzung und innovative Verschaltungstechnologie zeichnen ein Matrix-Schindelmodul aus.



Entwicklung von Prüfverfahren am Beispiel LeTID

Mit dem zunehmenden Einsatz neuer, hocheffizienter Zell- und Modultechnologien in PV-Kraftwerken treten auch neue Degradationsmechanismen auf. »Light and elevated Temperature Induced Degradation« (LeTID) ist ein solcher Effekt, der in den letzten Jahren zu einer Verunsicherung der PV-Branche geführt hat. Die Spanne der Störanfälligkeit von marktüblichen PV-Modulen ist groß: Während wir in Labortests an einzelnen Modulen eine maximale Degradation im Bereich von bis zu 10 % beobachtet haben, zeigen andere Module der gleichen Technologie keine oder nur eine geringe Empfindlichkeit gegenüber LeTID. Durch die Integration kostenoptimaler Prüfverfahren in die Qualitätssicherung können Modulabnehmer das Risiko von Ertragsverlusten durch LeTID deutlich senken. Im Labor werden LeTID-Prüfungen auf Modulebene meist durch Stromeinprägung im Dunkeln bei erhöhter Temperatur durchgeführt. Bei gleicher Temperatur und Ladungsträgerinjektion ermöglicht dies einen vergleichbaren Degradationsverlauf wie unter Beleuchtung.

Prüfverfahren müssen zeiteffizient sein und eine hohe Aussagekraft für den praktischen Betrieb besitzen. Im TestLab PV-Modules hat das Fraunhofer ISE über die letzten Jahre ein großes Spektrum an Prüferfahrung für verschiedene PV-Technologien erarbeitet. Darüber hinaus vergleichen wir verschiedene Prüfbedingungen sowohl untereinander als auch mit Ergebnissen aus einem Freifeldtest. Unsere bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die im Rahmen von Normungsaktivitäten in IEC TC82 zunächst diskutierten Bedingungen (75 °C, Stromeinprägung von $I_{SC}-I_{MPP}$) technologieunabhängig geeignet sind, um die LeTID-Empfindlichkeit von PV-Modulen zu bewerten. Prüfbedingungen, die durch höhere Temperatur oder Spannung deutlich kürzere Prüfzeiten erlauben, senken zwar die Prüfkosten, besitzen jedoch nur eingeschränkte Aussagekraft für bestimmte Zelltechnologien.



Grafik: Degradationsverlauf zweier baugleicher Module mit und ohne rückseitige thermische Isolation während eines Jahres im Freifeldtest.

Ergebnisse aus einem Freifeldtest, bei dem wir zwei baugleiche, multikristalline PERC-Module durch thermische Isolation der Rückseite bei unterschiedlicher Zelltemperatur betrieben haben, deuten auf eine gute Übereinstimmung von Indoor-Prüfergebnissen mit dem Verhalten im Anlagenbetrieb hin. Die höhere Temperatur des isolierten Moduls führt zu einer schnelleren Degradation. Dies bestätigt den hohen Einfluss der Umgebungstemperatur am Standort für den Degradationsverlauf. Wie die temporäre Leistungszunahme nach den Wintermonaten zeigt, führen in Deutschland Kälteperioden zu Erholungseffekten und somit zu einer weiteren Verlangsamung der Degradation durch LeTID.

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

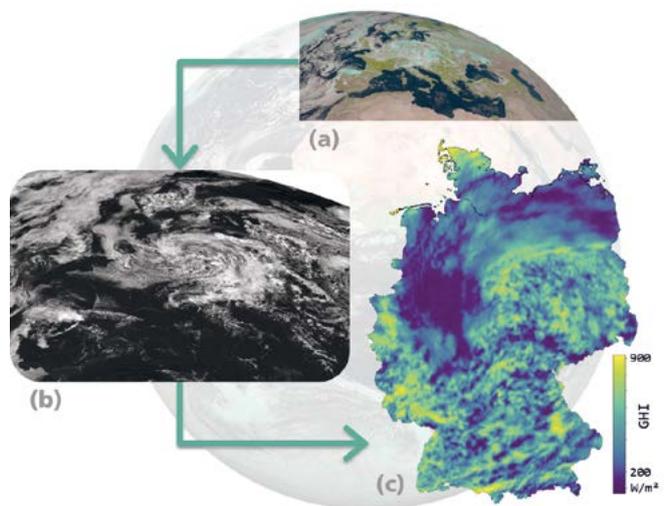


Satellitenbasierte Daten solarer Einstrahlung für PV-Anwendungen

Für die Systemintegration fluktuierender PV-Erzeugung sind hochaufgelöste Informationen zur solaren Einstrahlung erforderlich. Daten von geostationären Wettersatelliten bieten hierfür aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit und Auflösung eine hervorragende Informationsquelle. In der Energiemeteorologie entwickeln wir Algorithmen zur Berechnung und Vorhersage der solaren Einstrahlung sowie der resultierenden PV-Leistung. Wir empfangen und verarbeiten Satellitenbilder in Echtzeit und liefern hochaufgelöste Einstrahlungskarten für PV-Hochrechnungen an Übertragungsnetzbetreiber. Wir arbeiten in verschiedenen Projekten Satellitendaten für spezifische Anwendungen auf.

Zu besserer Bestimmung der PV-Einspeisung haben wir mit dem Übertragungsnetzbetreiber TransnetBW ein anlagenscharfes Modell der PV-Erzeugung entwickelt. Auf Basis von Satellitendaten beschreibt es realistisch die Erzeugung aller PV-Anlagen in der Regelzone. Durch die Kombination mit einer gebäudespezifischen Lastmodellierung ergibt sich daraus ein Bottom-up-Modell von PV-Erzeugung, -verbrauch und -einspeisung für mehrere Hunderttausend Prosumer. Dies ermöglicht detaillierte Analysen der aktuellen und zukünftigen Auswirkungen von Eigenverbrauch auf Energiebilanzierungen.

Mit der Auswertung von Wolkenbewegungen aus Satellitenbildern können wir außerdem Kurzfristprognosen der PV-Leistung auf Basis von Wettermodellen bis zu wenigen Stunden im Voraus deutlich verbessern. Wir haben ein operationelles System zur Prognose der PV-Leistung für ein Gigawatt-PV-Kraftwerk entwickelt, das satellitenbasierte Prognosen, lokale Messdaten und numerische Wetterprognosen integriert. Das Prognosesystem ist am Standort implementiert und liefert für die Netzintegration des erzeugten Stroms notwendige Vorhersagen.



Gratik: Satellitenbasierte Einstrahlungsberechnung: (a) Satellitenbild, (b) Bewölkung im Bildausschnitt Europa, (c) Einstrahlung über Deutschland (Daten: EUMETSAT).

Durch die Verarbeitung historischer Satellitendaten und deren Kombination mit GIS-Daten erstellen wir hochaufgelöste Solarkataster für spezielle Anwendungen. Im Projekt »PV2Go« bereiten wir satellitenbasierte Einstrahlungsdaten zur Analyse des Solarpotenzials auf Verkehrswegen auf. Zur Echtzeitauswertung von fahrzeuggetragenen Strahlungsmessungen haben wir ein operationelles System entwickelt, das die Einstrahlung auf Trajektorien aus Satellitendaten bestimmt. Diese Daten werden den Nutzern in einer Smartphone-App dargestellt und für Analysen, z. B. von Verschattung, genutzt.

Dr. Steffen Karalus
 Telefon +49 761 4588-2210
 pvmod.forecast@ise.fraunhofer.de

1 Aufnahme des Satelliten Meteosat-11 in Echtfarbendarstellung vom 11. Juli 2018, 12:00 UTC, Ausschnitt Zentraleuropa (Daten: EUMETSAT).

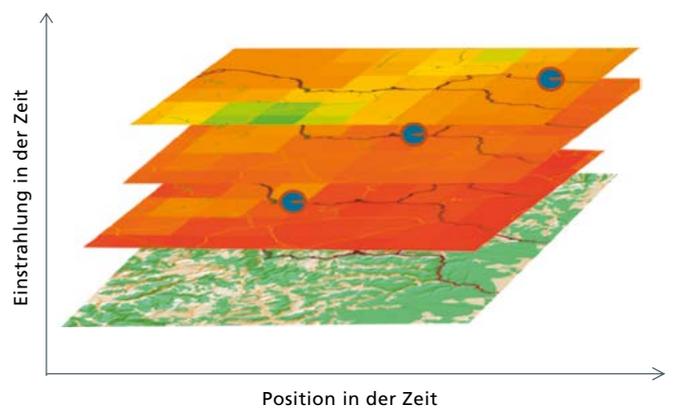


Räumliche Solarpotenziale von Verkehrswegen – PV2Go

Im Bereich der fahrzeugintegrierten Photovoltaik (VIPV) erforscht das Fraunhofer ISE sowohl Möglichkeiten der Integration von PV-Modulen in die Hülle von Fahrzeugen – wie z. B. eindrucksvoll anhand eines farbigen Solardachs demonstriert – als auch die Potenziale einer solchen Integration für Pendler, Familien und den Lastverkehr. VIPV erhöht die Reichweite von Fahrzeugen mit (teil-)elektrischem Antrieb und erlaubt, völlig unabhängig vom Antriebstyp, eine partielle Versorgung der Bordelektrik. Das Einstrahlungs- und Ertragspotenzial hängt hierbei erheblich von Routen, Tageszeiten und Nutzungsprofilen ab.

Die beiden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekte »LadePV« und »PV2Go« ergänzen sich hierbei ideal: Während »LadePV« die Marktfähigkeit von PV-Anwendungen im Lastenverkehr untersucht, liegt der Schwerpunkt bei »PV2Go« auf der Untersuchung von Solarpotenzialen deutscher Verkehrswege durch Einstrahlungsmessungen, die sich auch auf Pendler- und Familienfahrzeuge erstrecken. Diese Daten sollen mit satellitenbasierten Einstrahlungsdaten abgeglichen werden. Dafür haben wir einen autarken Einstrahlungssensor entwickelt, der sekundlich Position, Einstrahlung und Umgebungstemperatur per LTE übertragen kann. Er ist zudem in der Lage, bis zu zwei Wochen Garagenstandzeit zu puffern, was u. a. seine Größe erklärt. Die in »PV2Go« entwickelten Sensoren kommen auch im Projekt »LadePV« zum Einsatz.

Eines der Ziele von »PV2Go« ist eine räumliche Modellierung des Solarpotenzials von Verkehrswegen im Tages- und Jahresverlauf unter Berücksichtigung der lokalen Verschattung durch Bebauung, Geländeform sowie Landnutzung bzw. -bedeckung. Die hierfür nötigen großen Datenmengen (solare Einstrahlung, Lage der Verkehrswege, digitale Oberflächenmodelle, LIDAR-Daten, Luftbilder, klassifizierte Satellitenbilder z. B.

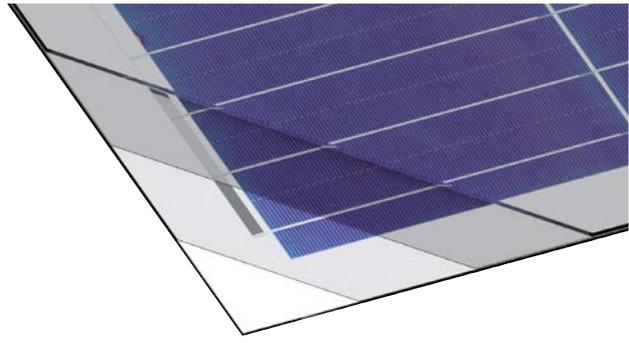
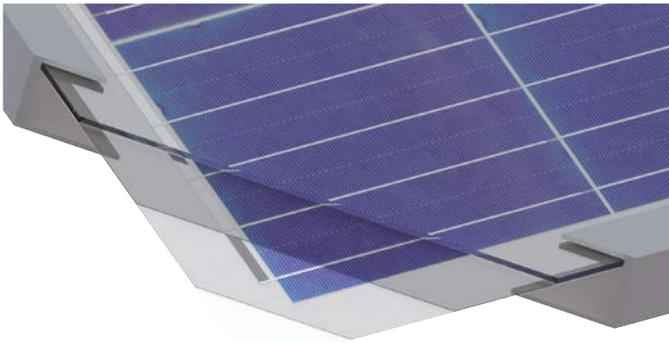


Grafik: Zeitlich aufgelöste Einstrahlungskarten über dem Gelände; Einstrahlung als Funktion von Ort und Zeit.

zur Landnutzung) werden aus öffentlichen Datenquellen gewonnen und durch tagesaktuelle Nahe-Echtzeit-Einstrahlungsdaten von Satelliten ergänzt. Im Rahmen einer »Citizen-Science-Kampagne« werden wir unter Mithilfe interessierter BürgerInnen umfangreiche Daten zur Einstrahlung erheben. Dazu bringen wir die oben beschriebenen Sensoren auf einer Vielzahl von Fahrzeugen an. Zu diesem Zweck verleiht das Fraunhofer ISE ca. 100 solcher Sensoren für die Dauer eines Jahres. Die erhobenen Daten dienen der Validierung des Solarpotenzial-Modells und darüber hinaus der Gewinnung typischer Nutzungsprofile im Verkehrssektor.

Christian Schill
Telefon +49 761 4588-5378
pv2go@ise.fraunhofer.de

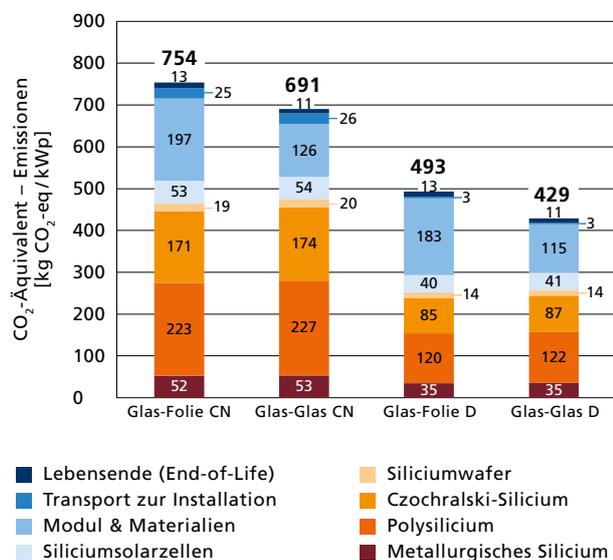
1 Positionsbewusster
Einstrahlungssensor
für Fahrzeuge.



Lebenszyklusanalyse von Modulen: Glas-Folie versus Glas-Glas

Photovoltaik gilt als »grüne« Technologie zur Bereitstellung erneuerbarer Energie, doch auch ihre Herstellung hat Einfluss auf die Umwelt und den Ressourcenverbrauch. Für die Energiewende ist eine gesamtheitliche Bewertung unabdingbar. Deshalb haben wir am Fraunhofer ISE die Umweltauswirkungen von Solarmodulen über den gesamten Lebenszyklus von der Herstellung bis zum Recycling in verschiedenen Kategorien (Klimawandel, Feinstaubemission, Gewässerbelastung etc.) untersucht. Für die Bewertung der Auswirkungen auf den Klimawandel haben wir nach IPCC 2013 die CO₂-Äquivalent-Emissionen von Solarmodulen für einen Zeitraum von 100 Jahren ermittelt. Dazu haben wir die Stoff- und Energieverbräuche für die Herstellung über die gesamte Wertschöpfungskette abgebildet. Das hier betrachtete Solarmodul basiert auf Siliciumsolarzellen und hat eine Nennleistung von 330 W. Im Vergleich zu bisherigen Studien haben wir neuere Entwicklungen wie das Diamantsägen zur Waferherstellung und aktuelle Daten in der Silicium-, Solarzellen- und Modulerstellung berücksichtigt. Die Fertigung ist dabei nicht ortsgebunden: Zwischenprodukte vom metallurgischen Silicium bis zum Modul können in unterschiedlichen Regionen hergestellt werden.

Wir haben die gesamte Wertschöpfungskette für eine vollständige Herstellung in China mit einer kompletten Wertschöpfungskette in Deutschland verglichen und den jeweils aktuellen Energiemix herangezogen. Da unsere Studie die neuesten Industriedaten berücksichtigt, fallen unsere CO₂-Äquivalent-Emissionen von Solarmodulen um bis zu 75 % niedriger aus als bei früheren Studien. Wie in der Abbildung zu sehen ist, würde eine komplette Herstellung in Deutschland gegenüber China 35 % weniger Emissionen verursachen (493 kg gegenüber 754 kg CO₂-eq/kWp). Der Grund hierfür ist einfach: In China wird Strom überwiegend aus fossilen Quellen gewonnen, erneuerbare Energien hatten 2019 einen Anteil von 28 %, in Deutschland lag dieser hingegen bei 46 %.



Grafik: CO₂-Äquivalent-Emissionen von c-Si-Solarmodulen, für unterschiedliche Produktionsstandorte und Modulaufbauten berechnet nach IPCC 2013.

Darüber hinaus haben wir Glas-Folie- mit rahmenlosen Glas-Glas-Modulen verglichen. Letztere verursachen noch geringere Emissionen. Die Ergebnisse unterstreichen, dass leistungsfähige und langlebige Solarmodule tatsächlich eine besonders klimaneutrale Säule einer zukünftigen Energieversorgung darstellen, dass bei ihrer Herstellung weniger CO₂-Äquivalent-Emissionen entstehen als bisher bekannt und dass eine komplette Fertigung in Deutschland anstelle von China über 35 % weniger CO₂-Äquivalent-Emissionen verursacht. Mit Glas-Glas-Modulen können die Emissionen nochmals weiter gesenkt werden.

Dr. Holger Neuhaus
 Telefon +49 761 4588-5825
 pvmod.tech@ise.fraunhofer.de

1 CAD-Zeichnungen eines Glas-Folie-Moduls mit Aluminiumrahmen (links) sowie eines rahmenlosen Glas-Glas-Moduls (rechts).

Ansprechpartner

Silicium-Photovoltaik

Prof. Dr. Stefan Glunz | Telefon +49 761 4588-5191
Dr. Ralf Preu | Telefon +49 761 4588-5260
sipv@ise.fraunhofer.de

III-V- und Konzentrator-Photovoltaik

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

Perowskit- und Organische Photovoltaik

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

Photovoltaische Module und Kraftwerke

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

Ausgewählte Projekte 2020



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



APV Obstbau – Agri-Photovoltaik als Resilienzkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Obstbau



micro-CPV – Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV-Moduls auf Basis modernster Micro-Fertigungstechnologie



APV-MaGa – Agri-Photovoltaik für Mali und Gambia: Nachhaltige Stromproduktion durch integrierte Nahrungsmittel-, Energie- und Wassersysteme



PV²WP – PV Vorhersage für netzdienliche Steuerung von Wärmepumpen



PV-Süd – PV-Straßenüberdachung

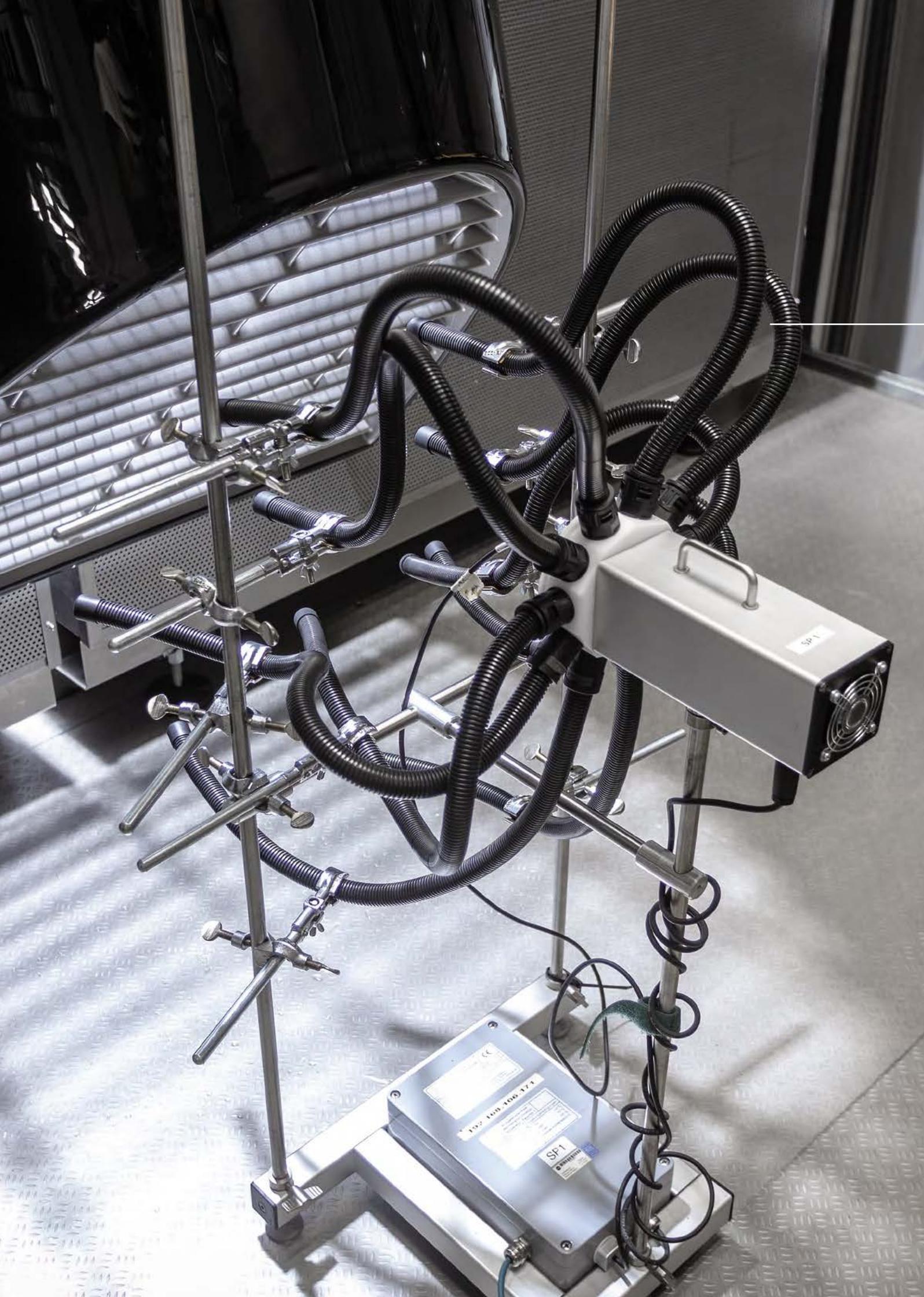


PVwins – Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz



RoMoT – Robuste Modultechnologie für hohe Solarstrahlung





Energietechnologien und -systeme

Speicherung sowie effiziente Wandlung, Verteilung und Nutzung von Energie spielen eine gleichermaßen wichtige Rolle für eine erfolgreiche Energiewende wie Verfahren zur Energiegewinnung. Das Fraunhofer ISE bearbeitet Forschungs- und Entwicklungsfragen in diesem Themenspektrum seit vierzig Jahren – als breit aufgestelltes Einzelinstitut, aber auch in Kooperation mit anderen Einrichtungen, wie aktuell z. B. dem Fraunhofer Cluster of Excellence »Integrated Energy Systems« CINES, einem Zusammenschluss aus vier Fraunhofer-Instituten, deren Sprecher Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning ist. CINES hat jüngst in 13 Thesen dargelegt, wie sich unser Energiesystem auf Basis erneuerbarer Energien als wichtigster Energiequelle bis zur Mitte des Jahrhunderts entwickeln kann. Demnach wird der Endenergiebedarf an fossilen Energieträgern zwar sinken, der Stromverbrauch für Verkehr, Gebäudewärme und Prozesse in der Industrie aufgrund der Sektorenkopplung aber deutlich steigen. Um die Klimaziele zu erreichen, sind daher bestimmte Schlüsseltechnologien von zentraler Bedeutung. Das Fraunhofer ISE hat diese in der Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem« benannt und ihre Bedeutung in unterschiedlichen Szenarien quantifiziert. Da neben der technischen Machbarkeit und der Kostenfrage das gesellschaftliche Verhalten eine maßgebliche Rolle spielt, ist es wichtig, die wissenschaftlichen Erkenntnisse und Lösungsansätze in eine breit angelegte Kommunikation und Diskussion einzubringen, um zu Verständnis, Akzeptanz und gesellschaftlicher Beteiligung beizutragen.

Zu den erforderlichen Schlüsseltechnologien im Wärmesektor gehören insbesondere Wärmepumpen, die nicht nur die Heiz- und Warmwasserbereitung in Gebäuden elektrifizieren, sondern auch die Industrie mit Prozesswärme versorgen können. Das Fraunhofer ISE hat einen Forschungsschwerpunkt auf dieses Thema gelegt, um besonders den Einsatz klimafreundlicher Kältemittel voranzutreiben sowie Kosten und Effizienz der Anlagen zu optimieren.

Auch chemische und elektrische Speicher gewinnen massiv an Stellenwert. Wasserstoff wird für den Mobilitätssektor in verschiedener Weise – über Brennstoffzellenantriebe oder synthetische Kraftstoffe – eine große Bedeutung erlangen. Das Fraunhofer ISE kann hier u. a. die Erfahrungen aus 30 Jahren Brennstoffzellenforschung in die Hochskalierung der Brennstoffzellenproduktion in Deutschland einbringen. Industrieprozesse und die Herstellung flüssiger Energieträger sind weitere Anwendungen von Wasserstoff mit einem großen Wachstumspotenzial. Wir befassen uns sowohl mit der Entwicklung von Verfahren zur Kostensenkung bei der PEM-Elektrolyse als auch mit Verfahren zur Herstellung von Methanol oder anderer Energieträger auf Basis von Kohlenwasserstoff. Um die – unter anderem für die Elektromobilität – entscheidende Produktion von Batterien am Standort Deutschland voranzubringen, arbeitet die Forschungsfertigung Batteriezellen (FFB) in Münster an der Optimierung von Material- und Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik, Digitalisierung sowie der Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Das Fraunhofer ISE trägt hierzu mit seiner Expertise in der Qualitätssicherung der einzelnen Prozessschritte sowie bei der Formierung von Batteriezellen bei.

Für die Steigerung der Flexibilität und Stabilität der Stromnetze spielt die Digitalisierung eine große Rolle. Mit dem neuen Digital Grid Lab in unserem Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze wollen wir unsere Forschungsaktivitäten in diesem Bereich weiter ausbauen. Um die Stromerzeugung stets im Blick zu behalten und Transparenz hinsichtlich des Stromangebots und der Kosten zu schaffen, betreibt das Fraunhofer ISE seit 2014 die Energy Charts. Diese haben wir nun auch um andere europäische Länder und neue Funktionalitäten erweitert. Alle Interessierten konnten verfolgen, dass der Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Stromnetz 2020 einen neuen Rekordwert von ca. 50 % erzielte.

Wärmepumpen – Schlüsseltechnologie für die Energiewende

Wärmepumpen werden im zukünftigen Energiesystem die dominierende Heizungstechnologie sein; davon gehen zahlreiche wissenschaftliche Studien aus. Viele Jahre lang wurden sie in erster Linie als eine Lösung für die Beheizung von Einfamilienhaus-Neubauten betrachtet. Mittlerweile ist jedoch klar, dass die technischen Anwendungsmöglichkeiten wesentlich vielfältiger sind: Neubau, Altbau, Modernisierung, Ein- und Mehrfamilienhäuser, Nicht-Wohngebäude und ganze Quartiere können so effizient und zuverlässig mit Wärme und Kälte versorgt werden. Durch ihren breiten Einsatz kann der Gebäudesektor, der bezogen auf die Wärmebereitstellung für rund 19 % der CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich ist, langfristig Klimaneutralität erreichen.

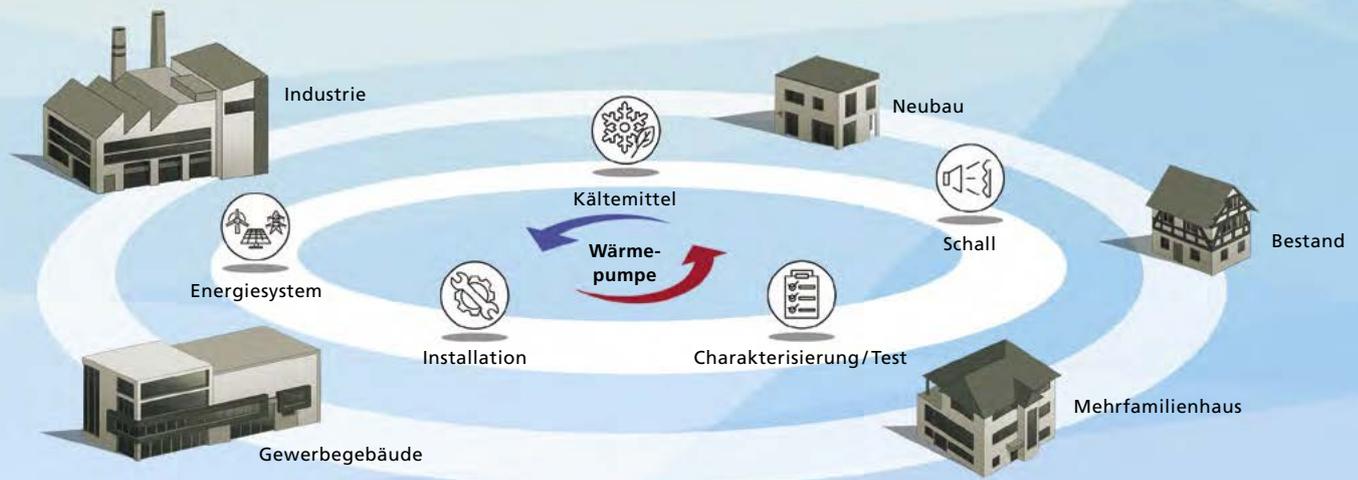
Wärmepumpen sind am Markt mit Kapazitäten bis in den zweistelligen Megawatt-Bereich verfügbar. In Industrieprozessen kommen schon Hochtemperaturwärmepumpen mit bis zu 160 °C zum Einsatz. Sie nutzen unterschiedliche Entnahmesysteme für Umweltwärme (Außenluft, Erdwärme, Grundwasser, Abwasser, Solarthermie). Die Defossilisierung und Elektrifizierung der Wärmeversorgung mithilfe von Wärmepumpen ermöglicht es nicht nur, erneuerbare Energien effizient zu nutzen, mit ihnen kann – insbesondere bei Einbindung von Wärmespeichern – auch der Stromverbrauch flexibilisiert und so das Stromnetz stabilisiert werden.

Die Bedeutung der Wärmepumpe für die Energiewende geht mit Herausforderungen für die Gerätehersteller einher. Es müssen Methoden, Komponenten und Produkte entwickelt, integriert und etabliert werden. Das schnelle Marktwachstum verlangt zudem effiziente, kostengünstige Produktionsmethoden, um konkurrenzfähig zu bleiben. Um die Installation von Wärmepumpen in verschiedenen

Anwendungsbereichen zu vereinfachen und die Effizienz im Betrieb zu steigern, bedarf es weiterer Optimierungen. Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie der Energiewende sind daher für das Fraunhofer ISE ein Leitthema, in dem wir Kompetenzen bündeln und Kapazitäten ausbauen. Wir arbeiten an verschiedenen technologischen Fragestellungen, um Materialien, Komponenten und Geräte zu optimieren und so unsere Partner kompetent zu unterstützen.

Natürliche Kältemittel einsetzen

Kältemittel zirkulieren als Arbeitsmedium im Kältekreis und transportieren die Wärme von der kalten zur warmen Seite des Prozesses. Die Wahl des Kältemittels ist wesentlich für die erreichbare Effizienz des Kältekreises in Wärmepumpen und kältetechnischen Anwendungen. Allerdings sind Kältemittel unterschiedlich stark klimaschädlich, toxisch und brennbar. Die F-Gas-Verordnung der Europäischen Union gibt die schrittweise Reduzierung von klimaschädlichen Kältemitteln vor. Dies führt bei Anlagen- und Geräteherstellern weltweit zu Neuentwicklungen oder Umrüstungen. Das Fraunhofer ISE setzt einen besonderen Schwerpunkt auf nachhaltige, effiziente und langfristige Lösungen mit natürlichen Kältemitteln wie Propan. In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten und im Oktober 2020 gestarteten Forschungsvorhaben »LC150 – Entwicklung eines kältemittelreduzierten Wärmepumpenmoduls mit Propan« entwickeln wir einen kompakten und kosteneffizienten Kältekreis. Die Entwicklungsarbeiten werden durch ein breites Industriekonsortium europäischer Wärmepumpenhersteller finanziell unterstützt und fachlich begleitet. Darüber hinaus arbeiten wir an Sicherheitskonzepten und -prüfungen für Wärmepumpen.



Schallemissionen senken

Die meisten Gebäudewärmepumpen verwenden Luft als Wärmequelle: Umgebungsluft wird angesaugt, über einen Wärmeübertrager geführt und dabei abgekühlt. Die Wärme wird im Kältekreis der Wärmepumpe aufgenommen. Durch die Luftströmung, den Ventilator und den Kompressor der Wärmepumpe können Schallemissionen entstehen. Diese werden durch die Luft, das Gehäuse und abhängig von Art und Ort der Aufstellung des Geräts mehr oder weniger stark an die Umgebung abgestrahlt. Je nach Installationsort und Betriebspunkt können diese Geräusche als störend wahrgenommen werden. Mit den steigenden Installationszahlen außen aufgestellter Wärmepumpen im Umfeld von Gebäuden steigen daher auch – besonders im verdichteten urbanen Raum – die Anforderungen an die Geräteakustik. Schwerpunkte der Arbeiten am Fraunhofer ISE sind die Entwicklung vereinfachter Verfahren zur Identifikation von Geräuschquellen sowie die akustische und strukturdynamische Bewertung von Komponenten (z. B. Kompressor) und Geräten.

Gerätequalität sichern

Durch die Hybridisierung der Geräte, innovative Regelungskonzepte und die smarte Integration in das Energiesystem steigt die Komplexität der Wärmepumpen. Damit kommt der Geräte- und Systemvermessung unter kontrollierten Bedingungen sowohl bei der Produktentwicklung als auch bei der Geräte- und Technologiebewertung eine wachsende Bedeutung zu. Im [TestLab Heat Pumps and Chillers](#) führt das Fraunhofer ISE akkreditierte Messungen für fast alle Produktgruppen durch. Wir unterstützen zudem unsere Kunden im Entwicklungsprozess durch innovative Prüf- und Bewertungsmethoden, die Informationen über das Produktverhalten unter

verschiedenen Betriebsbedingungen bieten. Dafür führen wir Hardware-in-the-Loop-Prüfungen durch. Unsere Partner können so die Zeit zwischen Idee und Produkteinführung deutlich reduzieren.

Installation und Betrieb optimieren

Der nächste bedeutende Entwicklungsschritt liegt in der Steigerung der ökologischen und ökonomischen Effizienz des Gesamtsystems. Damit rücken Installation und Betriebsphase in den Fokus. Wir entwickeln dafür Methoden zur digital unterstützten Qualitätssicherung bei der Installation und nutzen Methoden der künstlichen Intelligenz, um die Betriebsphase zu optimieren. So soll nicht nur die schnellere und fehlerarme Installation der Wärmepumpenanlagen vor Ort, sondern auch die Selbstoptimierung und Überwachung während des Betriebs ermöglicht werden.

In das Energiesystem integrieren

Ein Kernelement der Energiewende ist die Sektorenkopplung, insbesondere die direkte und indirekte Nutzung von erneuerbarem Strom in allen Verbrauchssektoren. Wärmepumpen müssen intelligent in das Energiesystem integriert werden, um sie für die Flexibilisierung des Stromverbrauchs und damit zur Stabilisierung der Stromnetze zu nutzen. Dazu sind beispielsweise intelligente Steuerungen und Betriebsführungssysteme erforderlich. Neue Geschäftsmodelle für Versorger, Netzbetreiber und Anlagenbesitzer werden entstehen. Am Fraunhofer ISE entwickeln und testen wir Werkzeuge und Konzepte für eine optimale Integration von Wärmepumpen ins Stromsystem der Zukunft.

1 Wärmepumpen werden im Energiesystem der Zukunft die dominierende Heizungstechnologie sein. Bereits heute sind sie in zahlreichen Gebäudetypen im Einsatz.



Energieeffiziente Gebäude

Die Energieeffizienz von Gebäuden spielt für die Energiewende eine zentrale Rolle: Über 40 % des Endenergiebedarfs entfallen in Deutschland auf den Gebäudesektor. Für einen klimafreundlichen Gebäudebetrieb müssen wir den Energiebedarf senken und diesen weitestgehend mit erneuerbaren Energien decken. Die Forschungsarbeiten des Fraunhofer ISE betrachten nahezu alle Lebensphasen eines Gebäudes – von der Planung über die Errichtung bis hin zum Betrieb.

Wir arbeiten an der Reduzierung des Raumwärme- und Raumkältebedarfs durch optimierte Gebäudehüllen und zur Integration erneuerbarer Energien. Neue Verglasungstechnologien, angepasste Sonnenschutzsteuerungen und farbige Abdeckscheiben für gebäudeintegrierte Photovoltaik bieten Architekten vielfältige Möglichkeiten. Beispiele finden sich in einer Datenbank mit umfangreichen Daten und Werkzeugen zur Erstellung von nahezu Nullenergiegebäuden.

Für die Wärmeversorgung von Gebäuden sind Wärmepumpen unser Schwerpunkt. Für diese Technologie bieten wir die gesamte Wertschöpfungskette an: von der Komponentenentwicklung im Kältekreis über die Geräte- und Anlagenentwicklung bis hin zur Qualitätssicherung im realen Betrieb. Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und mit einem breiten Industriekonsortium haben wir im Oktober 2020 mit der Entwicklung eines kompakten Propan-Kältekreises begonnen.

Die Digitalisierung von Prozessen ist ebenfalls ein wichtiger Baustein zur Steigerung der Energieeffizienz und Sektorenkopplung. Die Planung mit digitalen Methoden, wie Building Information Modeling (BIM), hilft mit einer konsistenten semantischen Beschreibung, den Informationsfluss im Lebenszyklus eines Gebäudes sicherzustellen. Produktdaten sind ein wichtiger Bestandteil dieser datengestützten Prozesse. Seit Juli 2020 sind wir der europäische Regional Data Aggregator für das National Fenestration Rating Council NFRC und Ansprechpartner für europäische Verglasungshersteller, die mit ihren Produkten den nordamerikanischen Markt adressieren.

150 
Mitarbeitende

24 
Zeitschriften- und
Buchbeiträge

42 
Vorträge und
Konferenzbeiträge

4 
Neu erteilte Patente

 Regelmäßige Infos zu
Meilensteinen unserer
Forschung bieten
unsere Newsletter!

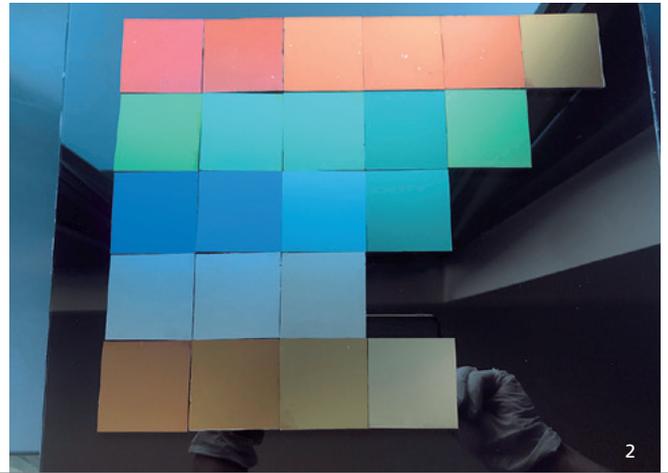


www.ise.fraunhofer.de/energieeffiziente-gebäude

Bild: Verwaltungszentrum der Stadt Freiburg
mit fassadenintegrierter Photovoltaik.



1



2

MorphoColor®: Ästhetisch ansprechende PV-Module und Solarkollektoren

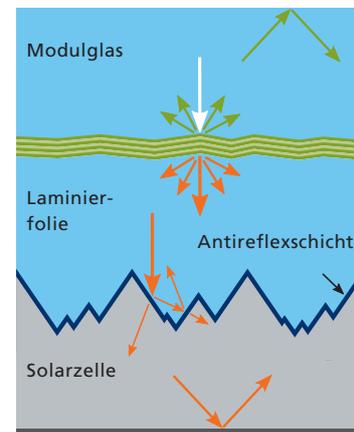
Die Integration von Photovoltaikmodulen und Solarthermiekollektoren in Gebäude und Fahrzeuge ermöglicht die Erschließung großer Flächen für die Gewinnung erneuerbarer Energien. Für ihre Akzeptanz sind dabei besonders ästhetische Gesichtspunkte entscheidend. Dazu muss die Farbe der Module architektonisch gestaltbar sein. Viele Architekten, aber auch Autohersteller wünschen sich »schöne« Module, die einen homogenen, winkelstabilen und frei wählbaren Farbeindruck mit gesättigten Farben bieten und durch einen nahezu unverändert hohen Wirkungsgrad überzeugen. Bisherige Konzepte waren jedoch in der Farbwahl stark eingeschränkt, wiesen eine große Winkelabhängigkeit auf, verursachten einen hohen Effizienzverlust oder eigneten sich nicht für die industrielle Produktion.

Am Fraunhofer ISE haben wir dieses Problem gelöst, indem wir den MorphoColor®-Effekt, benannt nach dem Morpho-Schmetterling, nutzen, um einen winkelstabilen und gesättigten Farbeindruck zu erreichen. Es handelt sich dabei um ein bionisches Konzept, das auf komplexen dreidimensionalen photonischen Strukturen basiert.

Die winkelstabile Farbwirkung entsteht durch die Wechselwirkung von geometrischen Strukturen und Interferenzschichten, die wir auf der Innenseite des Modul- bzw. Kollektordeckglases anbringen. Auf diese Weise bleibt der bestehende Fertigungsprozess der Solarzelle bzw. des solarthermischen Absorbers erhalten, es wird lediglich ein separates Deckglas verwendet. Um die Optik dieses Systems, bestehend aus dünnen Schichten im Bereich von Nanometern, Oberflächenstrukturen im Bereich von Mikrometern und einigen Millimeter dicken Gläsern, effizient zu beschreiben, wird der am Fraunhofer ISE entwickelte 3D-Modellierungsalgorithmus »OPTOS« verwendet.

1 MorphoColor®-PV-Module im Maßstab 1 × 1 m². Ein Modulwirkungsgrad von 93 % der schwarzen Referenzmodule wurde für die Farben Rot, Grün und Blau erreicht.

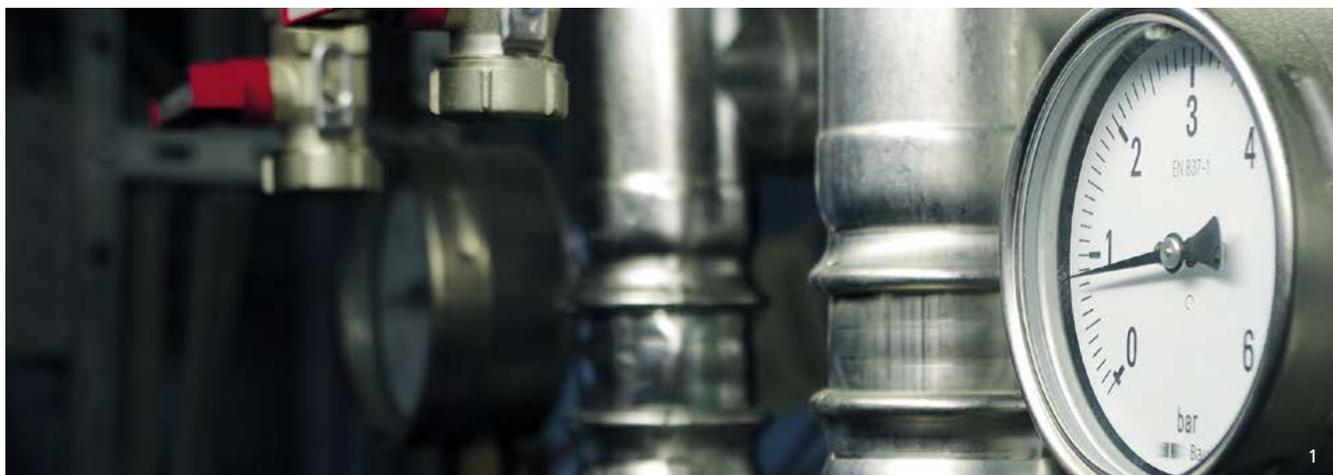
2 Die aktuelle Farbpalette der MorphoColor®-Schichten.



Grafik: MorphoColor®-Schicht auf der Rückseite des vorderen Modulglases mit den relevanten Streu- und Brecheffekten.

Basierend auf dieser Simulation definieren wir die Anforderungen an die Oberflächenstruktur und das Interferenzsystem. Dessen besondere Ausführung sorgt für eine hohe Farbsättigung bei gleichzeitig hoher Ausgangsleistung von deutlich über 90 % der schwarzen Originalmodule bzw. -kollektoren. Diese hohen Wirkungsgrade konnten bereits im Maßstab 1 × 1 m² gezeigt werden. Zur Illustration der breiten Gestaltungsmöglichkeiten haben wir eine Palette mit über zwanzig Farben erstellt. Eine kostengünstige Produktion der farbigen Modul- und Kollektordeckgläser ist durch den Einsatz des industriell großflächig verfügbaren Sputter-Beschichtungsprozesses möglich.

Dr. Thomas Kroyer
Telefon +49 761 4588-5968
soltherm.materials@ise.fraunhofer.de



Beschreibung von Regelungen gebäudetechnischer Anlagen in BIM

Gebäudeautomationssysteme (GA) haben in den letzten Jahrzehnten immer mehr Funktionen – wie etwa die Steuerung von Heizung, Klimatisierung, Lüftung, Beleuchtung und Brandschutz – übernommen. Sie sorgen dafür, dass Gebäude energieeffizient, behaglich und sicher betrieben werden können. In vielen Gebäuden sind jedoch die Informationen zu den Steuer- und Regelfunktionen, die in den GA-Systemen implementiert sind, schlecht dokumentiert oder schwer zugänglich und somit nicht auswertbar. Der Grund hierfür liegt in fehlenden einheitlichen digitalen Schemata für ihre Beschreibung.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts »EnergieDigital« hat das Fraunhofer ISE eine Methode entwickelt, um Funktionen von gebäudetechnischen Anlagen anhand der Methodik des Building Information Modeling (BIM) digital zu beschreiben und für viele verschiedene Akteure im gesamten Lebenszyklus von Gebäudeautomationssystemen zugänglich zu machen. Die Methode übernimmt die Grundlagen der gängigen Richtlinien – wie die VDI-Richtlinie 3814 – für die Beschreibung von Funktionen. Ihr Kern ist eine Kombination aus Ontologie-basierten Beschreibungen der Systemtopologie, also einem digitalen Anlagenschema, und einer Abbildung der zu realisierenden Funktionen. Diese basieren auf dem IEC-Standard 61131-3, der die Grundlage für speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) darstellt.

Zur Beschreibung der Sensoren, Aktoren und Regler haben wir die bereits existierenden SEAS(Smart Energy Aware Systems)-, SOSA(Sensor, Observation, Sample and Actuator)- und die CTRLont-Ontologien verwendet. Da es wenig praxistauglich ist, die Regelungs- und Steuerungsmechanismen mit Semantic-Web-Technologien zu beschreiben, haben wir die tatsächliche Logik der Regler nicht als Ontologie hinterlegt, sondern mit dem OpenPLC-Editor direkt als Programmcode implementiert und mit der Ontologie verknüpft. Daraus entsteht ein Framework, das es ermöglicht, Informationen zu Steuer- und Regelfunktionen in einer konsistenten digitalen Darstellung zu erfassen und für die Planung, Projektierung und den Betrieb von GA-Systemen nutzbar zu machen.

Wir haben die Methode bereits im Labor demonstriert und werden sie 2021 im Rahmen des Leuchtturmvorhabens Schulungszentrum »Viega World« in Attendorf implementieren und validieren.

Dr. Gesa Benndorf
 Telefon +49 761 4588-3136
 controls@ise.fraunhofer.de

1 Wärmeverteilung und messtechnische Systeme einer raumluftechnischen Anlage.



Ansprechpartner

Energieeffiziente Gebäude

Dr. Peter Schossig | Telefon +49 761 4588-5130
Dipl.-Ing. Sebastian Herkel | Telefon +49 761 4588-5117
building@ise.fraunhofer.de

Gebäudehülle

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

Betriebsführung

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

Gebäudesystemtechnik

Dr. Constanze Bongs | Telefon +49 761 4588-5487
Dr. Peter Engelmann | Telefon +49 761 4588-5129
building.concepts@ise.fraunhofer.de

Niedertemperatur-Solarthermie

Dr. Korbinian Kramer | Telefon +49 761 4588-5139
soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de

Wärmepumpen

Dr. Marek Miara | Telefon +49 761 4588-5529
heatpumps@ise.fraunhofer.de

Wärme- und Kältespeicher

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

Lüftung, Klima, Kälte

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

Ausgewählte Projekte 2020



[integraTE – Initiative zur Marktetablierung und Verbreitung von Anlagen zur thermisch-elektrischen Energieversorgung mittels PVT-Kollektoren und Wärmepumpen im Gebäudesektor](#)



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



[ICON LBNL-Fraunhofer ISE – Modelle und Methoden zur optischen und thermischen Charakterisierung von Gebäudehüllen](#)



[LowEx-Bestand NK4HTWP – Neue Kältemittel für Hochtemperatur-Wärmepumpen](#)



[LowEx-Bestand-HTWP – Verbundvorhaben LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von sanierten Mehrfamilien-Bestandsgebäuden](#)



[safeSENSE – Entwicklung und Bewertung einer innovativen Sicherheitseinrichtung für Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln basierend auf Sorptionselementen und neuartiger Sensorik](#)



[WAMS – Wärmepumpen – Akustik und Mehrquellensysteme](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/3-00





Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

In sonnenreichen Regionen liefern solarthermische Kraftwerke (Concentrated Solar Power, CSP) mit großen thermischen Speichern bedarfsgerecht Strom. Gemeinsam mit unseren Partnern forschen wir daran, Materialien, Beschichtungen, Komponenten, Kollektoren und Systeme dafür weiter zu verbessern, um die Effizienz zu erhöhen und Herstellungskosten zu senken. So hat das Fraunhofer ISE 2020 ein Kalibrier- und Regelungssystem für Heliostatenfelder auf Basis digitaler Bildverarbeitung vorgestellt. Damit können die Zielpunkte vieler Spiegel erstmals während des laufenden Betriebs zeit- und kosteneffizient ermittelt werden. Wir optimieren auch die Qualität und Lebensdauer von Komponenten und haben z. B. neue Reflektorbeschichtungen für Sekundärspiegel in Turmkraftwerken entwickelt.

Thermische Speicher bieten auch in industriellen Prozessen große Chancen, Prozesse effizienter und Energieflüsse flexibler zu gestalten. Neben konkreten Speicherlösungen und Energieeffizienzmaßnahmen arbeiten wir an der Einbindung solarer Prozesswärme in die Wärmeversorgung industrieller Prozesse. Hier haben wir für eine schnelle techno-ökonomische Bewertung ein öffentlich verfügbares Online-Tool erarbeitet und in Workshops vorgestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die effiziente Wandlung und Übertragung von Wärme. Wir forschen hierfür an Materialien und Komponenten. Fragen der Be- und Entfeuchtung bilden den Übergang zu den Arbeiten zur Wasseraufbereitung. Dafür haben wir im Auftrag eines chilenischen Bergbauunternehmens eine Prozesskette zur Abtrennung von Solarsalz aus Solen des Chilesalpeters im Technikumsmaßstab aufgebaut und deren kontinuierlichen Betrieb demonstriert.

Am Fraunhofer ISE verfügen wir über profunde Kompetenzen in Materialwissenschaften, Komponentendesign, Charakterisierung und Prüfverfahren, Modellierung und Simulation sowie Anlagenregelung und Systementwicklung und können dabei auf langjährige Erfahrungen aus Projekten für Anwendungen in solarthermischen Kraftwerken und in verschiedenen Industriezweigen zurückgreifen.

57 

Mitarbeitende

8 

Zeitschriften- und Buchbeiträge

4 

Vorträge und Konferenzbeiträge

3 

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!



www.ise.fraunhofer.de/solarthermische-kraftwerke-und-industrieprozesse

Bild: Wir arbeiten an ressourcenschonenden Prozessen zur Salzgewinnung in Südamerika.



Optimierte Füllkörper für Hochtemperaturspeicher

Die Integration effizienter thermischer Energiespeicher macht bisher ungenutzte industrielle Abwärme nutzbar. Den Betrieb thermischer Hochtemperaturspeicher in Zukunft effizienter und preiswerter zu gestalten, ist daher ein wesentliches Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundvorhabens »FENOPTHEs«. Unter Koordination des Fraunhofer ISE werden in diesem Projekt Füllkörper entwickelt, die herkömmliche Speicherfluide zu großen Teilen ersetzen sollen. Dazu untersuchen wir unterschiedliche Materialzusammensetzungen und Geometrien. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse soll im weiteren Verlauf ein Demonstrator bei unserem Industriepartner integriert und im Betrieb auf Zuverlässigkeit und Effizienz geprüft werden. In einem ersten Schritt haben wir durch Instrumentierung der Schornsteine das Abwärmepotenzial beim Industriepartner ermittelt.

Geeignete Füllkörper müssen eine Vielzahl von Kriterien erfüllen: Entscheidend sind ein guter Wärmeübergang zum Fluid, die Wärmeleitung innerhalb des Füllkörpers sowie eine hohe Wärmekapazität, um hohe Speicherdichten zu erreichen. Außerdem ist die Kompatibilität mit dem Arbeitsfluid des jeweiligen Speichers ebenso erforderlich wie die Stabilität der Materialeigenschaften über eine lange Nutzungsdauer hinweg. Darüber hinaus sollten Materialien und Produktion gleichermaßen umweltverträglich und kostengünstig sein. Beim Testen der thermischen Eigenschaften unterschiedlicher Füllkörperkonfigurationen haben wir ein neues Konzept verfolgt: Die Füllkörperkonfigurationen werden zunächst nicht mit Hochtemperaturmedien wie Thermalöl oder geschmolzenem Salz vermessen, sondern in einem Teststand mit Wasser umströmt. Dazu konnten wir auf die dafür

bestens geeignete Infrastruktur des TestLab Heat Pumps and Chillers am Fraunhofer ISE zurückgreifen. Dort haben wir einen entsprechenden Teststand erfolgreich in Betrieb genommen und erste Füllkörperkonfigurationen vermessen.

Die Untersuchung der Kompatibilität mit den Hochtemperaturmedien erfolgt separat in Dauerversuchen. Um auftretende Effekte unterscheiden zu können, werden dabei Arbeitsfluid und Füllkörper getrennt und in Kontakt miteinander thermisch zyklert. Chemische Analysen und Tests auf mechanische Beanspruchung geben anschließend Aufschluss über deren Eignung. Für einen Einsatz der Füllkörper in den Speichern solarthermischer Kraftwerke erfolgen derzeit Kompatibilitätstests mit geschmolzenem Salz. Nach Adaption der Salzschnmelze-Testinfrastruktur des Fraunhofer ISE werden die vielversprechendsten Füllkörperkandidaten zusätzlich in einem Laborprototypspeicher mit Salzschnmelze im Betrieb getestet, um die vorherigen Untersuchungen zu verifizieren. Die genannten Experimente dienen auch der Validierung numerischer Modelle, die wir zur Abbildung des Speicherverhaltens, der SpeicherAuslegung sowie für Systemsimulationen nutzen. So können wir bereits in der Planungsphase die Zwischenspeicherung und Wiedereinspeisung der Abwärme für den beim Industriepartner entstehenden Demonstrator sowohl separat für den Speicher als auch innerhalb des Gesamtsystems simulieren und optimieren.

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

1 Befüllung der Tiegel mit Füllkörpern und Hochtemperaturmedien für die Kompatibilitätstests.

2 Die vorbereiteten Tiegel werden im Hochtemperaturofen thermisch zyklert.



Automatisierte Verschmutzungsmessungen in solarthermischen Kraftwerken

Die Verschmutzung von Spiegeln oder Absorberelementen in solarthermischen Kraftwerken ist stark standortabhängig und kann sogar innerhalb eines Kraftwerksstandorts signifikant variieren. Die Beschaffenheit der Erdoberfläche, Wetterbedingungen sowie natürliche und anthropogene Emissionen in der Umgebung spielen hierbei eine wesentliche Rolle und können zu erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich der Ertragsprognose und der Reinigungskosten im Betrieb führen. Diese Unsicherheiten erhöhen zudem die Finanzierungskosten. Eine bessere Kenntnis der Verschmutzungscharakteristika und -raten ist daher entscheidend für die richtige Standortwahl und den wirtschaftlichen Betrieb solarer Kraftwerke.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »AVUSpro« untersucht und optimiert das Fraunhofer ISE hierfür Lösungsansätze unter besonderer Berücksichtigung von Verschmutzungs- und Korrosionserscheinungen. Dazu entwickeln wir drei Messmethoden, die die Verschmutzung im Kraftwerk charakterisieren und so die Ertragsprognose verbessern sollen.

Der im Rahmen des Projekts entwickelte Prototyp des »AVUS«-Messgeräts erlaubt die automatisierte Messung der Verschmutzung z. B. in stündlichen Intervallen. Die Daten werden gemeinsam mit den Wetterdaten der meteorologischen Stationen am Standort bzw. im Kraftwerk ausgewertet. Durch die Weiterentwicklung des »AVUS«-Instruments wird eine erhöhte Zuverlässigkeit im automatisierten Betrieb sichergestellt.

Das ebenfalls am Fraunhofer ISE entwickelte portable Reflektometer »pFlex« ist für schnelle manuelle Messungen im Solarfeld geeignet und bietet Vorteile gegenüber bestehenden Systemen. Die wichtigste technische Entwicklung ist dabei die erweiterte Funktionalität über eine Datenauswertungs-App.

Darüber hinaus wird es in Zukunft möglich sein, mit der kamerabasierten Methode »FREDA« die flächige Verschmutzung auf den Tausenden von Solarspiegeln von einem Fahrzeug oder von einer Drohne aus zu überwachen und Defekte auf den Spiegeln zu erkennen.

Begleitende Laboruntersuchungen mit dem »VLABS«-Messgerät erbrachten außerdem neue Erkenntnisse über Streuung und Absorption der Solarstrahlung durch Staub und Verschmutzung. Dabei zeigte sich, dass die Reduktion der reflektierten Strahlung stark vom Einfallswinkel abhängt.

Die genannten Methoden zeigen, dass durch die Verknüpfung mit physikalischen Modellen eine deutlich zuverlässigere Ertragsprognose möglich ist. Unsere Forschungsaktivitäten tragen außerdem dazu bei, Reinigungskonzepte im laufenden Betrieb eines Kraftwerks zu optimieren. Dadurch kann der Ertrag erhöht und gleichzeitig der Wassereinsatz minimiert werden, was wiederum zu einer Senkung der Betriebskosten führt.

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

1 AVUS-Geräte (links) am Teststand des Fraunhofer ISE in Freiburg, Hochdorf. Vergleichsmessung mit PV-Soiling-Messgeräten.



Ansprechpartner

Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

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

Solarthermische Kraftwerke

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

Konzentrierende Kollektoren

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

Wasseraufbereitung und Stofftrennung

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

Thermische Speicher für Kraftwerke und Industrie

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

Industrieprozesse und Prozesswärme

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

Effiziente Wärmeübertrager

Dr. Hannes Fugmann | Telefon +49 761 4588-2353
building.airconditioning@ise.fraunhofer.de

Ausgewählte Projekte 2020



Jumbotrough – Entwicklung eines robusten großformatigen Parabolrinnenreflektors



CAS-T – Softwareentwicklung für Design und Optimierung von Solarturmanlagen



Solarthermische Kraftwerke für die Stromsysteme in der MENA-Region – Kraftwerksanalyse und Integration in die Strommärkte im Rahmen von MENA CSP



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



SubSie-Plattform – Sorptions-Verdampfer für Siedetemperaturen unter 0 °C



Polyphem – Entwicklung eines kleinskaligen Solar-Kombikraftwerks (Gasturbine/ORC)

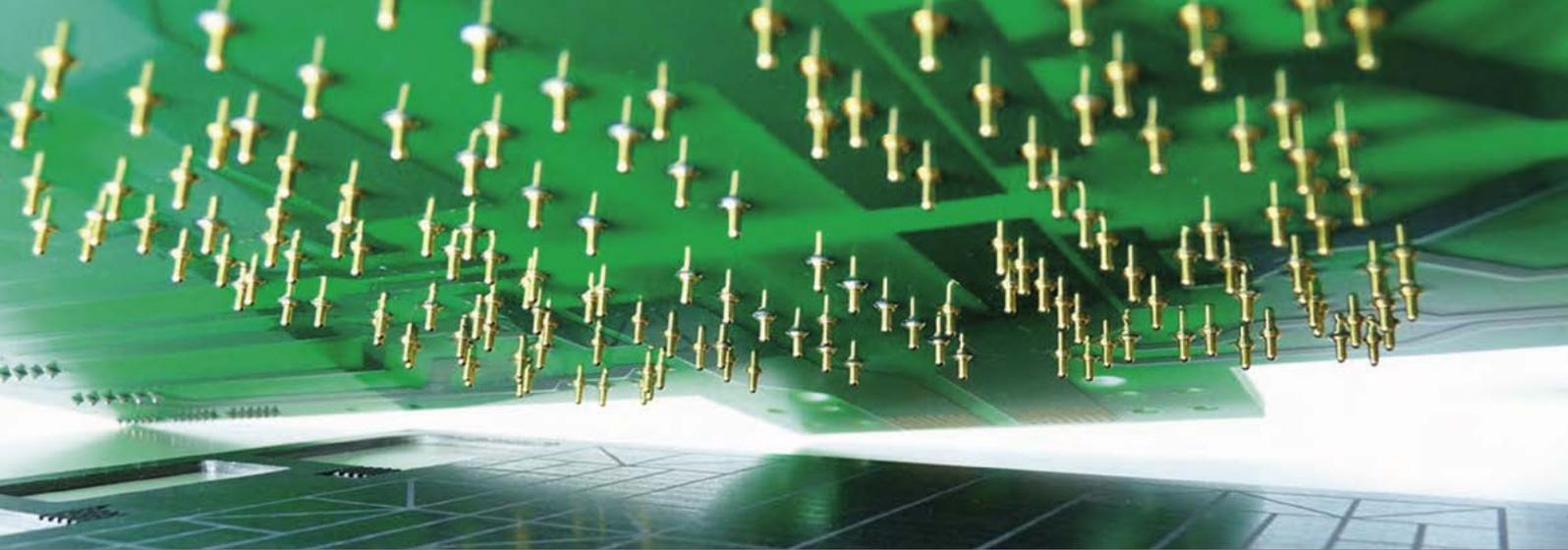


INSHIP – Integration nationaler Forschungsagenden für solare Prozesswärme



SEArcularMINE – Rohstoffgewinnung aus Meerwasserkonzentrat





Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher

Wasserstofftechnologien

Wir forschen zur Erzeugung, Wandlung und thermochemischen Weiterprozessierung von Wasserstoff. Vor dem Hintergrund der steigenden Bedeutung von grünem Wasserstoff als Energieträger haben wir im vergangenen Jahr federführend bei der Fraunhofer-Wasserstoff-Roadmap mitgewirkt und im Projekt »Wasserstofftechnologien am Südlichen Oberrhein« das Potenzial in der Region eruiert. Bei der Wasserstoff-erzeugung liegt unser Schwerpunkt auf der Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Elektrolyse. Auf Basis der PEM-Technologie entwickeln wir außerdem Brennstoffzellensysteme – insbesondere für den Mobilitätssektor. Im Projekt »HyFab« forschen wir an automatisierten Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren für die industrielle Fertigung von Brennstoffzellen. Auf Basis thermochemischer Verfahren synthetisieren wir Wasserstoff und Kohlendioxid zu flüssigen Kraftstoffen und Chemikalien (Power-to-Liquids). Beispielhaft zu nennen ist dabei unsere neue Mini-plant-Anlage für die Methanolsynthese.

Elektrische Energiespeicher

Auf dem Gebiet der Batteriematerialien, -zellen, -module und -systeme forschen wir zu neuen Materialzusammensetzungen und Zellarchitekturen ebenso wie zu Fertigungsverfahren, Aufbau- und Verbindungstechniken, Formierung, Alterung und Charakterisierung. Dabei beteiligen wir uns am Projekt »Forschungsfertigung Batteriezelle« (FFB), das den Ausbau der deutschen Batterieforschung zum Ziel hat und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Für unser Batterietest-Labor planen wir ab 2021 eine Akkreditierung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS). Das Labor ist Teil des vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg und BMBF geförderten »Entwicklungs- und Prüfzentrums für Batterien und Energiespeichersysteme« im Freiburger »Haidhaus«. Wir entwickeln zudem komplette Prototypen und begleiten unsere Partner bei der Integration in verschiedenste Anwendungen und der zugehörigen Qualitätssicherung. Dazu zählen stationäre, gewerblich und industriell genutzte Batteriespeicher ebenso wie die E-Mobilität, bei der wir das gesamte Spektrum bis hin zur Elektrifizierung bzw. Hybridisierung von Schiffen abdecken.

176 

Mitarbeitende

13 

Zeitschriften- und Buchbeiträge

10 

Vorträge und Konferenzbeiträge

2 

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!



www.ise.fraunhofer.de/wasserstofftechnologien-und-elektrische-energiespeicher

Bild: Stromabnehmerplatte bei der Kontaktierung einer segmentierten grafischen Gasverteilerplatte.



Siebdruck für die Herstellung von Brennstoffzellenelektroden

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts »DEKADE« hat das Fraunhofer ISE den Flachbettsiebdruck als industriell skalierbaren Herstellungsprozess für Brennstoffzellenelektroden entwickelt. Dabei haben wir unsere Kompetenzen aus der Produktions- und der Brennstoffzellentechnologie gebündelt.

Die Herstellung mittels Flachbettsiebdruck bietet bei der Strukturierung von Elektroden Vorteile gegenüber dem konventionellen, kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess. Bei der Strukturierung in »through-plane«-Richtung kommt dem protonenleitenden Binder-Polymer (Ionomer) eine Sonderrolle zu. Bei geringen Stromdichten sind hohe Ionomer-Anteile gewünscht, da protonische Widerstände stärker limitieren als Sauerstoffdiffusionswiderstände. Bei hohen Stromdichten kehrt sich dieser Sachverhalt um. Da sich die Reaktionszone mit zunehmender Stromdichte von der Membran wegbewegt, ist ein Ionomer-Gradient in diese Richtung sinnvoll. Dieser Ansatz wurde im »DEKADE«-Projekt mit Mehrfachsiebdruck realisiert. Im Vergleich zu homogenen Elektroden konnte die Leistungsdichte der untersuchten Brennstoffzellen bei 0,6 V um ca. 10 % gesteigert werden. Begleitende Modellierungsarbeiten bestätigten die zugrunde liegenden Effekte, die zur Leistungssteigerung führten. In weiteren laufenden Projekten untersuchen wir zudem die technoökonomischen Aspekte der Brennstoffzellenproduktion mit Flachbettsiebdruck.

Dr. Matthias Klingele
Telefon +49 761 4588-5432
h2fc.systems@ise.fraunhofer.de

1 Brennstoffzellenelektroden auf Transferfolie beim Trocknungsvorgang. Im nächsten Schritt werden diese auf eine Membran umlaminiert und bilden dann das Herzstück der Brennstoffzelle.



Standardisierte Messungen in der PEM-Wasserelektrolyse

Durch die Nationale Wasserstoffstrategie ist die Erzeugung von grünem Wasserstoff als wichtiger Treiber der Energiewende stark in den öffentlichen Fokus gerückt. Hierbei ist insbesondere die Gewinnung von grünem Wasserstoff durch PEM-Elektrolyse mithilfe von regenerativ gewonnenem Strom eine äußerst vielversprechende Variante. Um die anvisierten Leistungsdichten erreichen zu können, ist es essenziell, sowohl die Technologie als auch die verwendeten Materialien konsequent weiterzuentwickeln.

Aufgrund der vielfältigen Einflüsse der unterschiedlichen Zellkomponenten und Materialien ist allerdings eine direkte Vergleichbarkeit zwischen den Resultaten verschiedener Arbeitsgruppen nicht immer gegeben. Das Fraunhofer ISE arbeitet daher unter Koordination der Internationalen Energieagentur (IEA) an der Entwicklung von standardisiertem Messequipment und harmonisierten Prüfprotokollen.

Eine von uns entwickelte Elektrolysezelle mit einer aktiven Fläche von 4 cm² hat sich aufgrund der robusten Bauweise und der leichten Handhabbarkeit zu einer internationalen Referenzzelle entwickelt. Durch die Verwendung von Referenzmaterialien und einem abgestimmten Messprotokoll, das alle wichtigen Einflussparameter wie Konditionierung, Temperatur, Druck der Produktgase, Wasserdurchfluss durch die Zelle und Anpressdruck der aktiven Fläche beinhaltet, konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse in verschiedenen Arbeitsgruppen erzielt werden.

Dr. Sebastian Metz
Telefon +49 761 4588-2321
h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de

2 Referenztestzelle mit Vorrichtung zur Aufbringung eines kontrollierten Anpressdrucks. Im Vordergrund zwei Halbzellen mit parallelem Flow Field.



Hochauflösende Messtechnik bietet neue Einblicke in die Methanolsynthese

Methanol gehört mit über 100 Millionen Tonnen zu den Chemikalien mit der höchsten Jahresproduktion weltweit. Dabei kommen heute fast nur fossile Ressourcen zum Einsatz, und es entstehen je Tonne Methanol 0,5 bis 0,77 Tonnen CO₂-Äquivalente. Eine Methanolsynthese basierend auf Elektrolysewasserstoff aus nachhaltigen Energien und CO₂ ermöglicht hingegen einen technischen Kohlenstoffkreislauf und die Kopplung der Energie-, Chemie- und Verkehrssektoren. Das Fraunhofer ISE untersucht diese Synthese in einer Miniplant-Anlage, die 2019 im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten »Power-to-Methanol«-Projekts geplant, gebaut und in Betrieb genommen wurde.

Die für den hochdynamischen Betrieb konzipierte Anlage setzt Wasserstoff und CO₂ in einem kontinuierlichen Prozess zu Methanol um. Bis zur großtechnischen Umsetzung dieses Verfahrens gibt es noch einige Hürden. So führen beispielsweise hohe CO₂-Anteile im Synthesegas zu einer beschleunigten Alterung des Katalysators. Diese und weitere Fragestellungen können wir – auch für andere Reaktionen – mit dieser Miniplant untersuchen. Begleitende Modellrechnungen ermöglichen zudem die schnelle und effiziente Übertragung der Ergebnisse auf industrielle Anlagen.

Um an der Miniplant eigene oder Modellierungsansätze aus der Literatur zu validieren, wurde ein zeitlich und räumlich hochauflösendes Mess- und Analytiksystem verbaut. Die Kombination aus Infrarotspektroskopie (FTIR) zur Produktanalyse und einer faseroptischen Temperaturmessung erfasst Echtzeitdaten über die Vorgänge im Reaktor.

Max Hadrich
Telefon +49 761 4588-2207
h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

1 Miniplant-Anlage am Fraunhofer ISE.

Ammoniak als Plattformmolekül für die Sektorenkopplung

Mit dem Bevölkerungswachstum des 19. Jahrhunderts etablierte sich der Begriff »Bread from Air« – eine Forderung an die Wissenschaft, die im Haber-Bosch-Prozess zur Ammoniaksynthese ihren Abschluss fand. Analog dazu ist heute Wasserstoff aus erneuerbaren Energien der Schlüssel zu einem nachhaltigen Energiesystem. Ammoniak als nachhaltiger, wasserstoffbasierter Energieträger und Bindeglied zwischen den Sektoren steht dabei im Mittelpunkt des Interesses.

In einer aktuellen [Studie](#) des Fraunhofer ISE zu Power-to-X(PtX)-Wertschöpfungsketten wird deutlich, dass Ammoniak verschiedene Vorteile gegenüber anderen PtX-Produkten aufweist, wie z. B. wirtschaftliche Attraktivität, geringe CO₂-Vermeidungskosten, sehr geringe Transportkosten aufgrund hoher Energiedichte, große Flexibilität in der Standortwahl, da nur Luft, (Salz-) Wasser und erneuerbare Energie als Ausgangsstoffe notwendig sind, und schließlich die Möglichkeit, verschiedene Anwendungen in den Bereichen Chemie, Industrie, Energie und insbesondere in der maritimen Wirtschaft zu adressieren. Eine moderne Ammoniaksynthese bietet neue Möglichkeiten bzgl. Gesamtprozesseffizienz, Herstellkosten und Nachhaltigkeit. Dieses Potenzial loten wir zusammen mit unserem japanischen Partner, dem National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), aus. Unser Fokus liegt dabei auf der Anwendung von Katalysatoren der zweiten Generation in Kombination mit innovativen Prozessintensivierungstechnologien. Unser Ziel ist die maßgeschneiderte Ammoniaksynthese mit höheren Raum-Zeit-Ausbeuten unter Berücksichtigung des dynamischen Betriebs.

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

2 3D-CAD-Zeichnung des KISS-Setups für kinetische Untersuchungen von Pulvern und Partikeln, bei denen fortschrittliche Katalysatoren für die Ammoniaksynthese untersucht werden.



Gedruckte Lithium-Festkörperbatterien mit sulfidischem Ionenleiter

Festkörperbatterien, sogenannte »All solid state«-Batterien verfügen über feste Ionenleiter, wodurch das thermische Durchgehen von herkömmlichen Batteriezellen mit flüssigen Elektrolyten vermieden werden kann. Darüber hinaus vereinfachen sie den Einsatz von metallischem Lithium als Anode, was eine deutliche Steigerung der Energiedichte erwarten lässt.

Im von der Vector-Stiftung geförderten Projekt »Printsolid« entwickelt das Fraunhofer ISE Druckprozesse für solche Festkörperbatterien mit Sulfid-basierten Festelektrolyten. Es ist uns gelungen, eine Batteriezelle herzustellen, bei der sowohl die Kathode als auch die ionenleitende Separator-Schicht, die die Kathode von der Anode trennt, gedruckt werden konnten (Abb. 1). Die Batteriezelle erreicht mehr als 1000 Lade-/Entladezyklen. Dabei haben wir für Feststoffbatterien vergleichsweise hohe Ladeströme (1C, entspricht einer Ladung in einer Stunde) und Entladeströme (C/2, entspricht einer Entladung in zwei Stunden) angewandt. Nach 1000 Zyklen waren noch 80 % der ursprünglichen Entladekapazität verfügbar. Solche Festkörperbatterien sind von hohem Interesse für die Consumer-Elektronik, vor allem aber für die Elektromobilität.

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

2nd-life-Fahrzeuga-batterien in der stationären Anwendung

Der Ausbau der E-Mobilität trägt wesentlich dazu bei, die Schadstoff- und Treibhausgasemissionen zu senken. Die Produktion von Fahrzeugbatterien ist jedoch noch immer sehr energieintensiv, sodass sich die Vorteile der Elektromobilität erst bei einer langen Nutzungsdauer auszahlen. Am Ende der sinnvollen Nutzungsdauer im Fahrzeug können Batterien in einer Zweitanwendung als stationäre Energiespeicher genutzt werden. Über die damit verbundene längere Nutzungsdauer verbessert sich ihre CO₂-Bilanz.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »EMILAS« werden Batterien für den 2nd-life-Einsatz in stationären Pufferspeichern von Mehrfamilienhäusern qualifiziert. Hierfür haben wir die Betriebsdaten ausgelesen, die im Erstbetrieb aufgezeichnet wurden. Dazu zählen z. B. die Betriebsdauer in verschiedenen Leistungsklassen und Ladezustandsbereichen sowie der Betrieb in verschiedenen Temperaturklassen. Darüber hinaus haben wir mithilfe deaktivierter Kühlung die Eignung der Batterien für den stationären Einsatz untersucht und die thermischen Abschaltgrenzen des Batteriemangements bei hohen Entladeströmen bestimmt. Für die Eingangskontrolle wurden die Batterien an einem spezifisch dafür programmierten Prüfstand mit Kapazitätstests und Pulstests beaufschlagt, um ihren Alterungszustand festzustellen. Es zeigte sich, dass alle untersuchten Batterien für die Weiterverwendung geeignet waren. Das Verfahren zur Eingangskontrolle und Qualitätsüberprüfung entwickeln wir aktuell zu einem Dreißig-Minuten-Schnelltest weiter.

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

1 Aluminiumableiter-Folie mit gedruckter Kathode (rechts, schwarz) und darauf gedruckter Separator-Schicht (links, weiß).

2 Charakterisierung einer gebrauchten Fahrzeugbatterie im Labor des Fraunhofer ISE.



1



2

»Haid-Power«: Aktive Netzentlastung durch kommerzielle PV-Batteriespeicher

Die fortschreitende Elektrifizierung des Verkehrssektors bringt eine erhebliche Transformation des Stromsektors mit sich und stellt neben dem Ausbau der volatilen erneuerbaren Energien eine große Herausforderung für das deutsche Stromnetz dar. Insbesondere in den Verteilnetzen ist aufgrund der fortschreitenden Sektorenkoppelung mit tiefgreifenden Veränderungen hinsichtlich der Netzbelastung zu rechnen. Im Projekt »Haid-Power«, das vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg gefördert wird, erarbeitet das Fraunhofer ISE Lösungen für diese Fragestellung und erprobt sie in der Praxis.

In unserem neuen Entwicklungs- und Prüfzentrum für Batterien und Energiespeichersysteme entwickeln wir ein Last- und Energiemanagementsystem mit intelligenter Lastspitzenkappung und kombinieren es mit einer großen Photovoltaikanlage sowie einem Hybrid-Batteriespeicher. Ziel ist es, einen kostenintensiven Ausbau der vorhandenen Verteilnetzstruktur zu umgehen und zugleich den Betrieb des Zentrums sicherzustellen. Im Rahmen des Projekts ist es möglich, unter realen Betriebsbedingungen nachzuweisen, dass die großen Herausforderungen beim Ausbau der Ladeinfrastruktur in den Verteilnetzen technisch lösbar und wirtschaftlich darstellbar sind. Die entwickelten Methoden und Analysetools können zudem bei weiterführenden FuE-Themen im Kontext zukunftsweisender Energiespeicher Anwendung finden. Die Demonstration und Erforschung dieser beispielhaften Modellanwendung auf Verteilnetzebene leistet somit einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Energie- und Verkehrswende.

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

Qualitätsbewertung von Batteriezellen im Produktionsprozess

Die Sicherstellung zuverlässiger Prozesse für eine qualitativ hochwertige Batteriezellproduktion ist eine komplexe Aufgabe, bei der es gilt, eine Reihe von Einflussgrößen zu berücksichtigen. Die Qualität von Batteriezellen kann in vielen Parametern, wie beispielsweise der mechanischen Stabilität, Kapazität, Leistung oder Lebensdauer, variieren. Grund hierfür sind Schwankungen bei der Materialqualität, aber auch bei den Produktionsprozessen wie Mischen, Beschichten, Assemblierung und Formierung. Dies kann zu hohen Ausschussquoten führen.

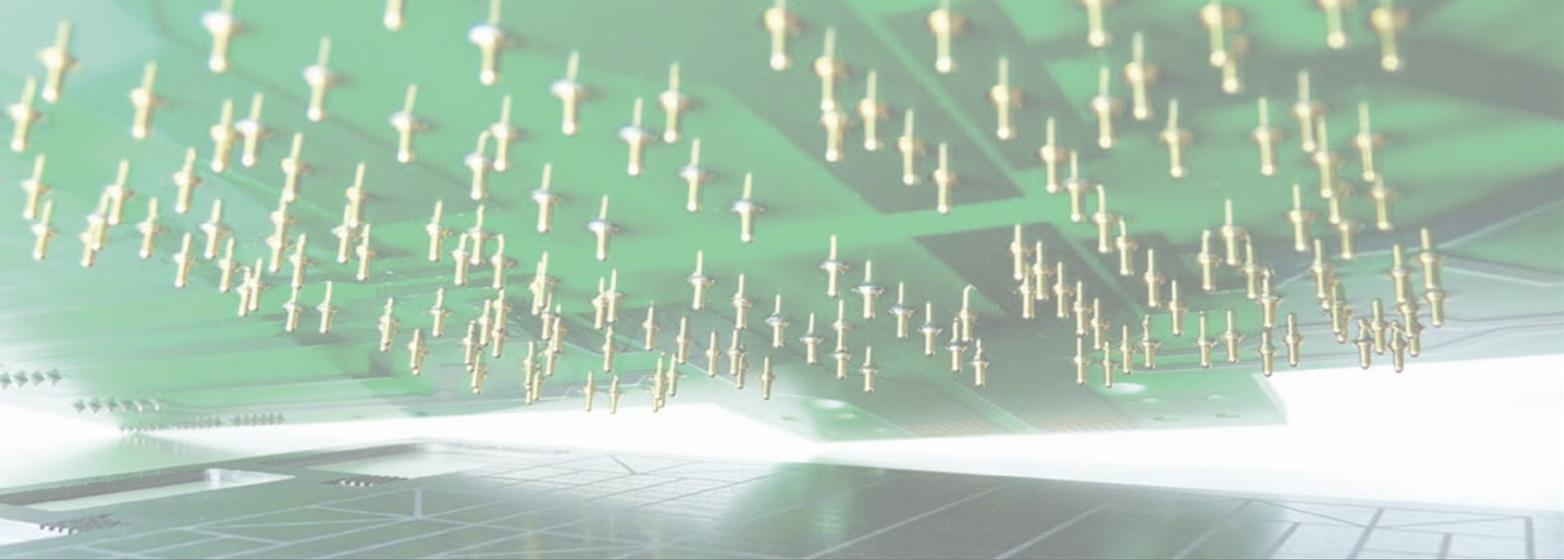
Um den Ausschuss signifikant zu verringern, benötigen die Produktionsstätten Realtime-Feedback aus dem Produktionsprozess. Die End-of-Line-Qualitätsbewertung von Batteriezellen stellt dabei ein zentrales Instrument dar, mit dessen Hilfe Optimierungspotenziale frühzeitig identifiziert und so Produktionskosten gesenkt werden können. Hierauf basiert unser Ansatz einer zerstörungsfreien Qualitätsbestimmung von Batteriezellen in der Produktionslinie, den wir auch in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »OrtOptZelle« verfolgen. In unserem Batterie-Testlabor werden mechanische, optische und elektrische Methoden genutzt, um Batterien zu klassifizieren. Im Anschluss werden diese Methoden durch Post-Mortem-Analytik validiert, was die Zellöffnung, die Analyse von Proben in Mikroskopen, Oberflächenanalysen und die chemische Analytik umfasst.

Neben der Qualitätsbewertung in der Zellfertigung sind unsere Methoden und Prozesse besonders auch im Rahmen der qualitativen Wareneingangsprüfung für Batteriesystembauer anwendbar.

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

1 Das neue Entwicklungs- und Prüfzentrum für Batterien und Energiespeichersysteme des Fraunhofer ISE.

2 Lithium-Ionen-Batteriezellen in unterschiedlichen Formen und Größen.



Ansprechpartner

Wasserstofftechnologien

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

Thermochemische Prozesse

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

Elektrolyse und Power-to-Gas

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

Brennstoffzellensysteme

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

Elektrische Energiespeicher

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

Batteriezelltechnologie

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

Batteriesystemtechnik

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

Angewandte Speichersysteme

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

Ausgewählte Projekte 2020



FLiBatt – Feste Lithiumbatterien mit Vliesstoffen



H2-SO – Wasserstofftechnologien am Südlichen Oberrhein



Haid-Power – Planung und Umsetzung eines innovativen Energiekonzepts für ein Entwicklungs- und Prüfzentrum für Batterien und Energiespeichersysteme in einem industriell und elektromobil geprägten Verteilnetz



HyDrive-OWL – Feinkonzept zum Ausbau der regionalen Wasserstoffinfrastruktur für die Region Kreis Lippe, Kreis Minden-Lübbecke und die Stadt Bielefeld



NAMOSYN – Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe



OrtOptZelle – Ortsabhängige Kompression von Pouchzellen zur Lebensdaueroptimierung



Printsolid – Druckbare Solid-State-Lithium-Batterien



NESSI – Neuartige Si-Anoden für Solid-State-Lithium-Ionen-Batterien

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/4-00





Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

Im Geschäftsfeld »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme« befassen wir uns mit Technologien zur Transformation des elektrischen Energiesystems. Dazu bedarf es einer eingehenden Analyse des heutigen Energiesystems, zu dessen Transparenz wir auch in der breiten Öffentlichkeit mit unserem Online-Auswertungstool »[Energy-Charts](#)« beitragen. Szenarien für die Transformation ergeben sich aus unserer [REM0D-Studie](#), auf deren Basis wir neue Technologien für das Stromnetz der Zukunft erforschen.

Nachdem die Erneuerbaren bei der Stromproduktion inzwischen dominieren, steht nun die Umstellung des Verkehrs- und Gebäudesektors im Fokus. Aufgrund der zunehmenden Sektorenkopplung wird das Stromnetz mehr und mehr zur Drehscheibe für die Einbindung der erneuerbaren Energien. Die dafür notwendige Digitalisierung erfolgt mithilfe der Leistungselektronik und Smart-Grid-Technologien.

Die Leistungselektronik stellt eine Schlüsseltechnologie für die Integration von erneuerbaren Energien und Speichern dar. Der Ausbau der Elektromobilität führt zudem zu einem steigenden Bedarf an Umrichtersystemen. Durch den Einsatz neuester Halbleiter werden diese extrem kompakt und effizient. In unseren [neuen Prüfeinrichtungen im »Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze«](#) entwickeln wir das netzkonforme Verhalten von Umrichtern und sogenannten »netzbildenden« Wechselrichtern.

Auch die Kommunikation und Vernetzung von Energiesystemen gewinnt zunehmend an Bedeutung. In unserem neuen »Digital Grid Lab« befassen wir uns mit der Interoperabilität und Digitalisierung der Energiesysteme, wobei die Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz eine wichtige Rolle spielt. Dieser Entwicklungsprozess wird heute durch leistungsstarke Verfahren wie »Power-Hardware-in-the-Loop« (PHIL) unterstützt. Wir sind somit in der Lage, für unsere Kunden sowohl Umrichter als auch die Leit- und Steuerungstechnik für die nächste Generation der Energiesysteme zu entwickeln und zu qualifizieren.

165 
Mitarbeitende

18 
Zeitschriften- und
Buchbeiträge

48 
Vorträge und
Konferenzbeiträge

1 
Neu erteilte Patente

 Regelmäßige Infos zu
Meilensteinen unserer
Forschung bieten
unsere Newsletter!

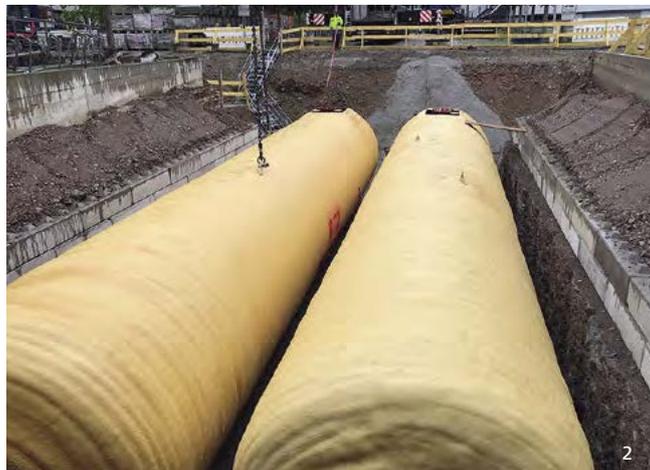


www.ise.fraunhofer.de/leistungselektronik-netze-und-intelligente-systeme

Bild: FRT-Prüfeinrichtung
am Fraunhofer ISE.



1



2

Energy-Charts mit neuen Daten und Funktionen

Die Plattform energy-charts.info bereitet seit 2014 Daten zur Stromerzeugung aus verschiedenen neutralen Quellen auf und stellt sie der Öffentlichkeit zur Verfügung. Im Projekt »InGraVi«, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wird, hat das Fraunhofer ISE die Webseite weiterentwickelt, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Datenkategorien besser darzustellen. Auch das Design wurde komplett überarbeitet und für die mobile Nutzung optimiert, da viele NutzerInnen die Seite auf Smartphones oder Tablets öffnen.

Zu den neuen Daten gehört die Residuallast, die als Differenz des Verbrauchs und der erneuerbaren Leistung den Bedarf an konventioneller Leistung aufzeigt. Auf Wunsch vieler NutzerInnen haben wir auch Stromerzeugung und -verbrauch der Pumpspeicherkraftwerke integriert. Für die bessere Lesbarkeit lassen sich die Zahlenwerte nun direkt in den Grafiken einblenden. Neu ist auch die responsive Deutschlandkarte, die neben Infrastrukturdaten (Kraftwerke, Stromnetz, Übertragungsnetzbetreiber) aktuelle Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes anzeigt. Der Nutzer kann sich eine eigene »Heatmap« erstellen, die Werte für z. B. Solarstrahlung, Niederschlag oder Eistage in Farbabstufungen darstellt. Der CO₂-Preis als Hebel für die Dekarbonisierung des Energiesystems wird in der Kategorie »Preise« sichtbar: Aktuelle Preise der CO₂-Emissionszertifikate können mit dem Börsenstrompreis verglichen werden. So sieht man beispielsweise, ob die Kohleverstromung für Kraftwerksbetreiber in Bezug auf die Marktpreise des Stroms noch wirtschaftlich ist.

Prof. Dr. Bruno Burger
Telefon +49 761 4588-5237
energysystem.components@ise.fraunhofer.de

1 Monatliche Day-Ahead-Strompreise und CO₂-Emissionszertifikatspreise.

Flexibilisierung von Energiesystemen in der Industrie

Wie können Flexibilisierungspotenziale durch die Sektorenkopplung von Strom, Wärme und Kälte optimal ausgeschöpft und wirtschaftlich genutzt werden? Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts »FlexGeber« hat das Fraunhofer ISE zu dieser Fragestellung neuartige Wärme- und Kälteerzeugungstechnologien untersucht sowie neue Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Integration erneuerbarer Energien für Industrie, Gewerbe, Handel und den Dienstleistungssektor aufgezeigt.

Mit dem Ziel, Strom, Wärme und Kälte effizient und bedarfsgerecht bereitzustellen und so zukunftssichere lokale Energiesysteme zu schaffen, haben wir dazu Umbauten oder Erweiterungen an bestehenden Energiesystemen vorgenommen. So haben wir beispielsweise die lokale Wärme- und Kälteversorgung des Fraunhofer ISE erweitert, um die Versorgung einzelner Gebäude flexibler zu gestalten und damit die Energieeffizienz des gesamten Campus zu erhöhen. Bei den Industrieunternehmen wurden unterschiedliche Erweiterungen der Wärmeversorgung evaluiert. Über ein detailliertes Monitoring des bestehenden sowie des erweiterten Systems ermitteln wir modellbasiert die Auswirkungen und Potenziale zur Flexibilisierung.

Die bisherigen Ergebnisse lassen einerseits den Rückschluss zu, dass die aktuellen Regularien und Marktbedingungen den Unternehmen bislang keinen ausreichenden Anreiz für die Nutzung vorhandener Flexibilitätspotenziale bieten. Andererseits zeigen Zukunftsszenarien, dass durch neue Anreize, wie z. B. die Implementierung variabler Stromtarife, ein deutlich höheres Potenzial für die wirtschaftliche Nutzung vorhandener Flexibilitäten erschlossen werden kann.

Dr. Noha Saad Hussein
Telefon +49 761 4588-5081
flexgeber@ise.fraunhofer.de

2 Erweiterung eines Kältenetzes im Rahmen der Fallstudie.



Smart Meter Gateway – sicher messen und steuern im Smart Grid

Smart Meter Gateways (SMGW) sind zentrale Bausteine zur Digitalisierung des Energiesystems. Zusammen mit modernen Messeinrichtungen bilden sie sogenannte »intelligente Messsysteme« und ermöglichen die sichere und eichrechtskonforme Übertragung von Messwerten an den Messstellenbetreiber. Darüber hinaus bieten sie einen gesicherten Kommunikationskanal, der in Verbindung mit Energiemanagementsystemen zur Steuerung von energietechnischen Anlagen genutzt werden kann.

In den vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekten »C/sells« und »LamA-connect« betrachten wir insbesondere die Kommunikationsprozesse der SMGW-Infrastruktur für den Anwendungsfall der Elektromobilität. Dazu untersuchen wir zusammen mit den Verteilnetzbetreibern (VNB) die Steuerung von privater Ladeinfrastruktur in zwei süddeutschen Testgebieten. Vor dem Hintergrund des Ausbaus der Elektromobilität ist dieser Anwendungsfall deshalb besonders bedeutend, weil das gleichzeitige Laden mehrerer Elektrofahrzeuge mit hoher Ladeleistung eine neue Herausforderung für die Netzstabilität darstellt. Mithilfe von lokalem Lastmanagement und den Steuerungssignalen des jeweiligen VNB ist es jedoch möglich, solche Ladevorgänge sowohl an die Kundenwünsche als auch an die jeweilige Netzsituation optimal anzupassen. Für die Umsetzung der Steuerkette von der VNB-Leitwarte bis zur Ladestation des Kunden hat das Fraunhofer ISE dafür sein offenes Energiemanagement-Framework »OpenMUC« zu einer generischen Steuerbox-Software weiterentwickelt. Zusätzlich verfügt das Fraunhofer ISE in seinem neuen Digital Grid Lab über eine umfangreiche SMGW-Infrastruktur, mit der sich weitere zukünftige Forschungsfragen dieser Art untersuchen lassen.

Wie Berlin sein Solarpotenzial erschließt: »Masterplan Solarcity«

Berlin will bis zum Jahr 2050 klimaneutral werden und dabei 25 % seines Stroms mit Solarenergie erzeugen. Um die PV-Leistung von heute etwa 100 MW auf die erforderlichen 4400 MW zu vervielfachen, hat der Berliner Senat im März 2020 den »Masterplan Solarcity« beschlossen. Dieser besteht aus einem Maßnahmenkatalog, der von einem Expertenkreis entwickelt und vom Fraunhofer ISE inhaltlich ausgearbeitet wurde. Der Entstehungsprozess wurde von der Agentur »ZebraLog« moderiert. Einen zweiten Baustein bildet die »Masterplanstudie«, die das Fraunhofer ISE erarbeitet hat.

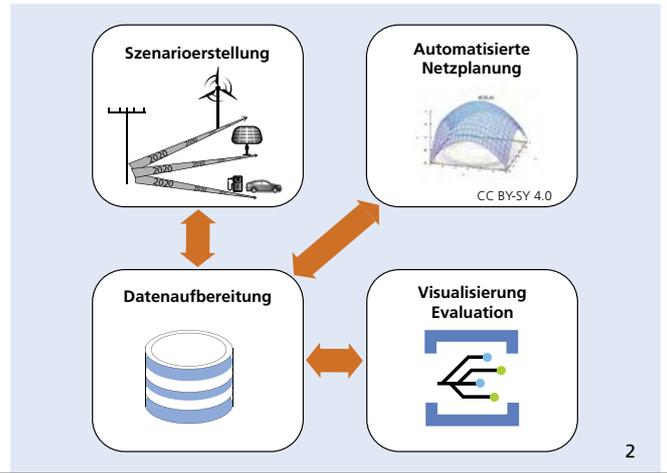
Die Planung wirksamer Maßnahmen erfordert eine detaillierte Kenntnis von Marktsegmenten und Markthemmnissen des Solarmarkts, die vom Investorentyp, der Gebäudenutzung und dem Geschäftsmodell abhängen. Deshalb wurden die Solarpotenziale mithilfe eines 3D-Stadtmodells für ca. 530 000 Berliner Gebäude berechnet und den Eigentümergruppen durch Verschneiden mit den Liegenschaftsdaten zugeordnet. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich 58 % des Berliner Solarpotenzials auf Wohngebäuden befinden, 32 % auf gewerblichen und 9 % auf öffentlichen Gebäuden. 41 % des Solarpotenzials sind dabei Privatpersonen, 48 % Unternehmen und Genossenschaften und 8 % dem Land Berlin zuzuordnen. In Kombination mit der zielgruppenspezifischen Untersuchung von Entscheidungsprozessen ist es anhand dieser Daten gelungen, 27 Maßnahmen in neun Handlungsfeldern für den »Masterplan« abzuleiten. Die erfolgreiche Erschließung von urbanen Solarpotenzialen ist nur mit einer umfassenden Strategie und deren entschiedener Umsetzung möglich, der »Masterplan Solarcity Berlin« ist dafür ein vielversprechendes Beispiel.

Marco Mittelsdorf
Telefon +49 761 4588-5446
energysystem@grids.ise.fraunhofer.de

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

1 Intelligente Messsysteme ermöglichen gezielte Energieeffizienzanalysen von Anlagen im Stromnetz.

2 Bau einer PV-Anlage auf der Max-Taut-Schule durch die Berliner Stadtwerke.



Netzbildende Wechselrichter

Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energiegewinnung gelangt zunehmend Energie über leistungselektronische Umrichter ins Stromnetz. Schon in naher Zukunft werden erneuerbare Energieträger zeitweise den kompletten Energiebedarf decken können. Dabei verdrängen sie die Erzeugung durch Synchrongeneratoren, wie sie in konventionellen Kraftwerken zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund müssen Wechselrichter immer mehr Funktionen übernehmen, um einen stabilen und sicheren Betrieb des Stromnetzes zu ermöglichen.

Für diese sogenannten Netzdienstleistungen werden netzbildende Wechselrichter benötigt. Im vergangenen Jahr haben wir im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts »VerbundnetzStabil« ein neues Konzept entwickelt, das bei extremen spannungs- oder frequenzgetriebenen Fehlern das Stromnetz stützt. Darüber hinaus untersuchen wir die Auswirkungen dieser neuartigen Regelung auf das Stromnetz ebenso wie den Bedarf des Netzes und leiten daraus weitere Anforderungen an das Verhalten der Umrichter ab. Auf dieser Grundlage haben wir mit anderen europäischen Partnern einen Entwurf für eine entsprechende Prüfrichtlinie entwickelt. Dieser beinhaltet neben dem Nachweis der grundsätzlichen Eigenschaften von netzbildenden Wechselrichtern, wie etwa Spannungsquellenverhalten und Bereitstellung von Systemträgheit, auch die Beschreibung von Verfahren zur Abschätzung der Wechselwirkungen zwischen dem Prüfling und dem Netz bzw. anderen Erzeugungsanlagen sowie zum Verhalten bei Netzfehlern.

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

1 Vermessung eines netzbildenden Wechselrichters im Multi-Megawatt Lab.

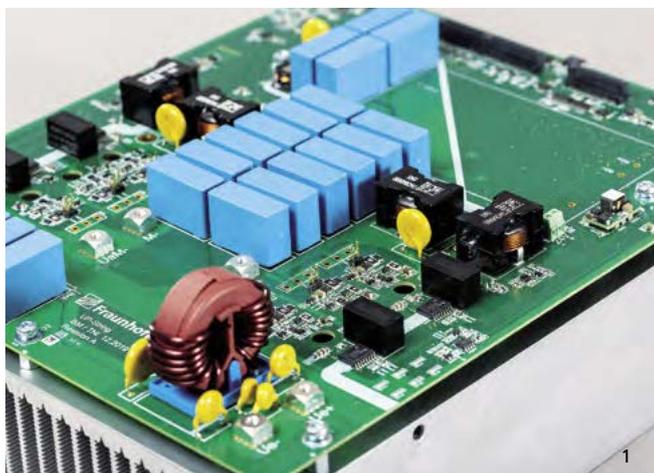
Netzplanung und Netzausbauoptimierung

Forschungsfragen zur Stabilisierung der Verteilnetzinfrastuktur und einer langfristig angelegten Zielnetzplanung gewinnen vor dem Hintergrund zunehmender dezentraler Stromgewinnung und eines steigenden Strombedarfs aufgrund von Sektorenkopplung an Bedeutung.

Das Fraunhofer ISE entwickelt im Forschungsprojekt »StraZNP – Strategische Zielnetzplanung« ein Planungstool, das den kostenoptimalen Netzausbau bei gegebenen und zu erwartenden Netzbelastungen berechnet. Zur Bestimmung der Netzbelastung analysieren wir neben Lastprofilen, die mit unserem Lastprofilgenerator »synPRO« erzeugt werden, auch gesellschaftliche Faktoren, technologische Entwicklungen, regulatorische Rahmenbedingungen und aktuelle Marktentwicklungen. Diese Analysen bilden die Grundlage für die Algorithmen des Planungstools, das verschiedene Planungsszenarien berechnen kann und eine nachhaltige und kosteneffiziente Automatisierung des Planungsprozesses ermöglicht. In Zusammenarbeit mit den beteiligten Netzbetreibern wurde der Planungsprozess in vier Schritte unterteilt und für jeden Schritt ein Softwaremodul spezifiziert. Einen großen Mehrwert für die Netzbetreiber stellt die Möglichkeit dar, jedes Modul unabhängig von den anderen Modulen anwenden zu können. Gleichzeitig sollen die Module in Zukunft auch miteinander verknüpft werden, sodass sie dann den gesamten Planungsprozess abbilden können.

Wolfgang Biener
Telefon +49 761 4588-5893
sys.smartgrid@ise.fraunhofer.de

2 Module zur automatisierten Verteilnetzplanung.



Photovoltaik- und Batterieumrichter mit 1500V-Systemtechnik

In der Photovoltaik-Kraftwerkstechnik hat sich ein Trend zu höheren Spannungen etabliert. Systemspannungen von 1500V auf Modulebene und in der dazugehörigen Leistungselektronik ermöglichen eine Reduktion der dazugehörigen Stromstärken. Der Vorteil liegt darin, dass weniger Kupfer für die stromführenden Leiter benötigt wird und somit Kosten eingespart werden können.

Im Rahmen dreier vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekte haben wir hierfür Lösungen entwickelt. Im Projekt »MODUS« haben wir im letzten Jahr einen 1500V-PV-Wechselrichter mit 1 MW Leistung in Betrieb genommen. Die modulare Bauweise mit einer 3-Level-Topologie und 4 kHz Schaltfrequenz in Verbindung mit einem Fluidkühlsystem der Halbleitermodule und der Induktivitäten erlaubte einen hochkompakten Aufbau. In einer kleineren Leistungsklasse haben wir im Projekt »UP-STRING« einen 1500V-Tiefsetzsteller mit einer Leistung von 20 kW realisiert. Zum Einsatz kamen dabei diskrete Siliciumcarbid-Halbleiter mit einer Schaltfrequenz von 100 kHz und einer magnetisch gekoppelten Induktivität. Die Verwendung eines Tief- anstelle eines Hochsetzstellers ermöglicht bei Stringwechselrichtern die Beibehaltung der niedrigeren 1000V-Spannungsklasse. Denkbar ist dieser Einsatz auch im Verbund mit 1000V-Batteriesystemen auf Parkebene. Im Projekt »HYBAT« arbeiten wir aktuell an einem bidirektionalen Wechselrichter in der Leistungsklasse von 150 kW und einer Schaltfrequenz von 48 kHz in der 1500V-Spannungsklasse. Neben stationären Speichersystemen erforschen wir die Überführung der 1500V-Spannungsklasse auch für den Bereich der Elektromobilität und der mobilen Batteriespeicher.

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

Teillastoptimierung von Ladeelektronik in PV-Heimspeichersystemen

Vor dem Hintergrund der steigenden Beliebtheit von Heimspeichersystemen hat das Fraunhofer ISE im Verbundprojekt »HyBaG« einen Hybrid-Wechselrichter entwickelt. Er kann wahlweise mithilfe einer Batterie, mit Solarstrom oder hybrid – als Kombination aus beidem – betrieben werden. Zentraler Bestandteil des Projekts war die Entwicklung von kompakten und modularen Batteriestellern, die wir durch den konsequenten Einsatz von Siliciumcarbid(SiC)-Leistungsbau-elementen realisieren konnten. Eine der großen Herausforderungen bei Heimspeichersystemen besteht darin, dass die Batterien bei intensiver Sonneneinstrahlung innerhalb weniger Stunden aufgeladen und dann nachts über einen längeren Zeitraum bei sehr geringer Leistung (»Teillast«) entladen werden. Aus diesem Grund sollten Batteriewechselrichter über einen hohen Umwandlungswirkungsgrad verfügen, der einen möglichst breiten Leistungsbereich abdeckt.

Zur Optimierung des Teillastwirkungsgrads haben wir im Rahmen des Forschungsprojekts unterschiedliche Ansätze untersucht. Unter Berücksichtigung verschiedener Bewertungsparameter haben wir dafür einen dreiphasigen Synchronwandler für den Hochvolt-Batteriesteller ausgewählt und aufgebaut. Dieser ermöglicht es, durch die Aktivierung bzw. Deaktivierung einzelner Wandlerbrücken den Leistungsbereich gezielt anzupassen (1/3, 2/3, Vollast). Für sehr geringe Leistungen werden dabei zusätzlich ein entsprechender Betriebsmodus mit variabler Schaltfrequenz zur Ansteuerung mit möglichst geringen Schaltverlusten (»Lückgrenzbetrieb«) und ein pulsierender Betrieb (»Burst-Modus«) mit nur einer Phase aktiviert, bei dem der Wandler nur 10 % der Zeit aktiv ist. Damit haben wir leistungsabhängig eine wirkungsgradoptimierte Betriebsführung umgesetzt.

Christian Schöner
Telefon +49 761 4588-2078
energysystem.components@ise.fraunhofer.de

1 Leistungsplatine des bidirektionalen 1500 V-Tiefsetzstellers.

2 Optimiertes Batterie-ladegerät für eine Hochvoltbatterie mit 6 kW Nennleistung.



Ansprechpartner

Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

Prof. Dr. Christof Wittwer | Telefon + 49 761 4588-5115
energysystem@ise.fraunhofer.de

Neue Bauelemente und Technologien

Prof. Dr. Bruno Burger | Telefon +49 761 4588-5237
energysystem.components@ise.fraunhofer.de

Umrichtersysteme

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

Wechselrichter in Netzen

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

Intelligente Netze

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

Energiesystemanalyse

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

Ausgewählte Projekte 2020



Kopernikus-Ariadne – Evidenzbasiertes Assessment für die Gestaltung der deutschen Energiewende



HYBAT – Hybride Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit 1500 V-Systemtechnik, innovativem Thermomanagement und optimierender Betriebsführung



LamA-connect – BSI-konformes Laden mithilfe von Smart Meter Gateways



UP-STRING – Bidirektionaler 1500 V-Tiefsetzsteller mit kostenoptimierter Schaltungstopologie



StraZNP – Strategische Zielnetzplanung



MAPSEN – Methoden und Analysen für die Auswirkung von dezentralen Prosumer- und Speichergeschäftsmodellen auf Erzeugung und Netz im deutschen Stromsystem



TransDE – Transformation der Infrastruktur Deutschlands bis zum Jahr 2050 im Einklang mit der Energiewende aller Verbrauchssektoren



power4re – Zuverlässige Umrichter für die regenerative Energieversorgung



17800 m² Laborfläche

920 m² Reinraumfläche

Batterietester bis **250 kW**

Innovative Drucktechnologie
für Strukturbreiten kleiner **20 μm**

Prüfnetz am **110-kV-Netz**

2-Megawatt-Netzsimulator

40 MVA Leistung

UVRT- und OVRT-Tests bis **10 MW**

Spitzenwert von **1,1 %** Messunsicherheit im Callab PV Modules

Akkreditierung für **56 Normen**

WELTWEIT EINZIGER AKKREDITIERTER ANBIETER FÜR VOLLUMFÄNGLICHE PRÜFUNG NACH
ISO 9806:2017

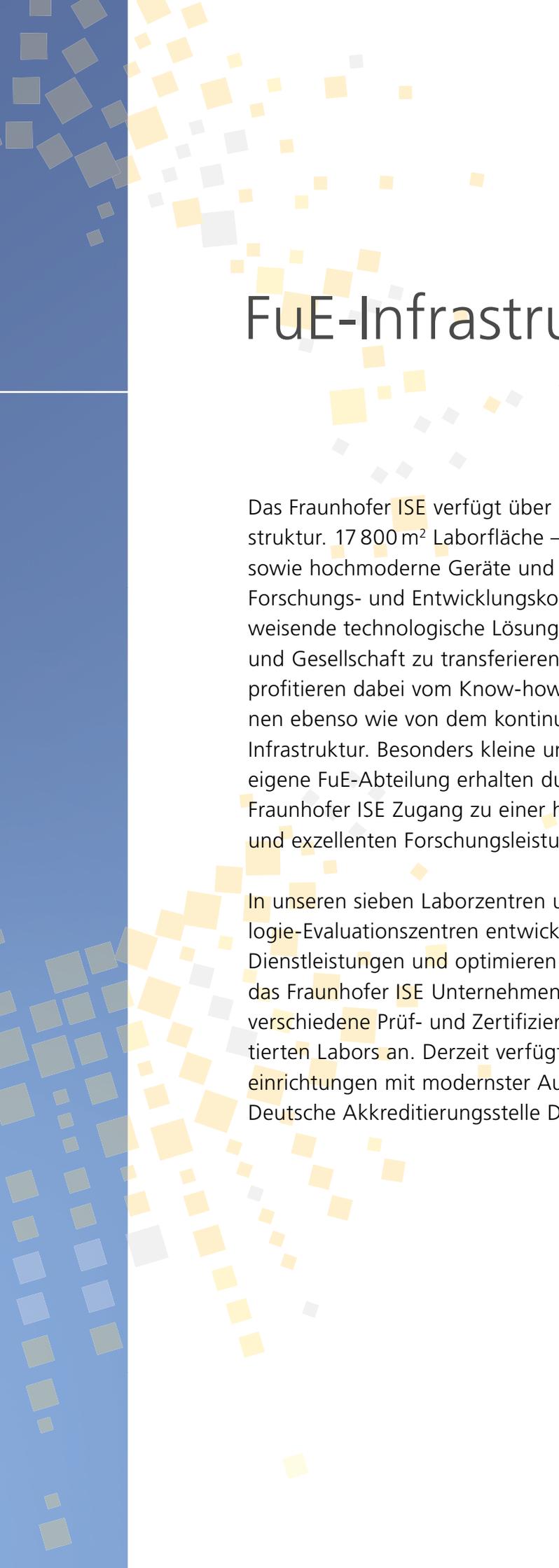
Drei Luftkonditionierungsstrecken
für Volumenstrombereiche von

80 bis 5000 m³/h

Erzeugung von Strukturen zwischen **100 nm**
und **100 μm** mittels Interferenzlithographie

NAP-XPS-Anlage für Untersuchungen bis zu

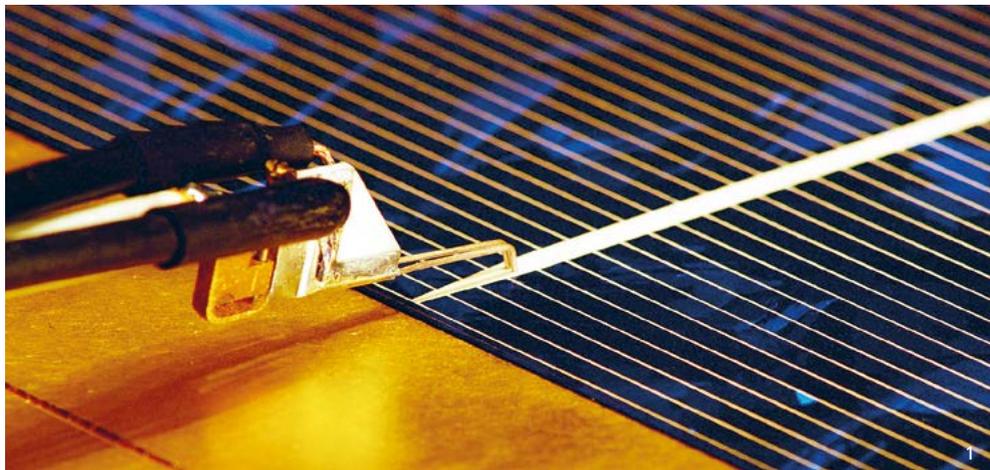
50 mbar und 5 °C bis 1000 °C



FuE-Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 17 800 m² Laborfläche – darunter 920 m² Reinraumfläche – sowie hochmoderne Geräte und Anlagen bilden die Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Unser Ziel ist es, zukunftsweisende technologische Lösungen zu finden und diese in Wirtschaft und Gesellschaft zu transferieren. Unsere Partner aus der Industrie profitieren dabei vom Know-how unserer Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen ebenso wie von dem kontinuierlichen Ausbau unserer technischen Infrastruktur. Besonders kleine und mittelständische Unternehmen ohne eigene FuE-Abteilung erhalten durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE Zugang zu einer hochleistungsfähigen Laborinfrastruktur und exzellenten Forschungsleistungen.

In unseren sieben Laborzentren und vier produktionsnahen Technologie-Evaluationszentren entwickeln wir neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen und optimieren bestehende. Ergänzend dazu bietet das Fraunhofer ISE Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen verschiedene Prüf- und Zertifizierungsverfahren in seinen sieben akkreditierten Labors an. Derzeit verfügt es über zwei Kalibrier- und fünf Testeinrichtungen mit modernster Ausstattung und Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS.



Kalibrierung von Solarzellen

Das CalLab PV Cells des Fraunhofer ISE bietet die Kalibrierung und Messung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an und arbeitet national sowie international mit Unternehmen und Instituten an der Entwicklung von Methoden zur präzisen Messung von neuen Solarzellentechnologien. Es zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors und ist Referenz für Forschung und Industrie. Solarzellenhersteller lassen ihre Referenzsolarzellen für die Produktion nach internationalen Standards bei uns kalibrieren.

Das CalLab PV Cells ist als Labor für die Solarzellenkalibrierung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle DAkkS akkreditiert. In Kooperation mit Photovoltaikherstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung von Messunsicherheiten und der Entwicklung neuer Messverfahren.

Wir können bifaziale Solarzellen sowohl mit beidseitiger als auch mit einseitiger Beleuchtung präzise vermessen. Unsere Kunden profitieren dabei von der Weiterentwicklung unserer Messplätze, die nun eine noch höhere Präzision bei kürzerer Messzeit ermöglichen. Hierbei spielen neu entwickelte und verbesserte Optiken zur Homogenisierung eine wesentliche Rolle. Sie sind die

Grundlage für die präzise Vermessung von großflächigen Mehrfachsolarzellen für terrestrische Anwendungen, wie z. B. Perowskit-auf-Silicium-Tandemzellen. Darüber hinaus führen wir mit verschiedenen Mehrlichtquellen-simulatoren Messungen von Mehrfachsolarzellen unter nahezu beliebigen Normbedingungen – z. B. auch für Weltraum- und für Konzentratoranwendungen – durch.

In einem neuen Arbeitsgebiet beschäftigen wir uns zudem mit der Vermessung von Laserleistungssolarzellen, insbesondere mit Zellen, die aus identischen monolithischen Zellstapeln von bis zu zwölf pn-Übergängen bestehen. Zusätzlich unterstützen wir die Normentwicklung der Arbeitsgruppen WG2 und WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC im Bereich der konzentrierenden und nicht-konzentrierenden Photovoltaik.

Silicium-, Dünnschicht-, Perowskit-, organische Solarzellen

Dr. Jochen Hohl-Ebinger
Telefon +49 761 4588-5359
Wendy Schneider
Telefon +49 761 4588-5146

Mehrfach- und Konzentratorzellen

Dr. Gerald Siefer
Telefon +49 761 4588-5433
cells@CalLab.de

Standards und Spezifikationen

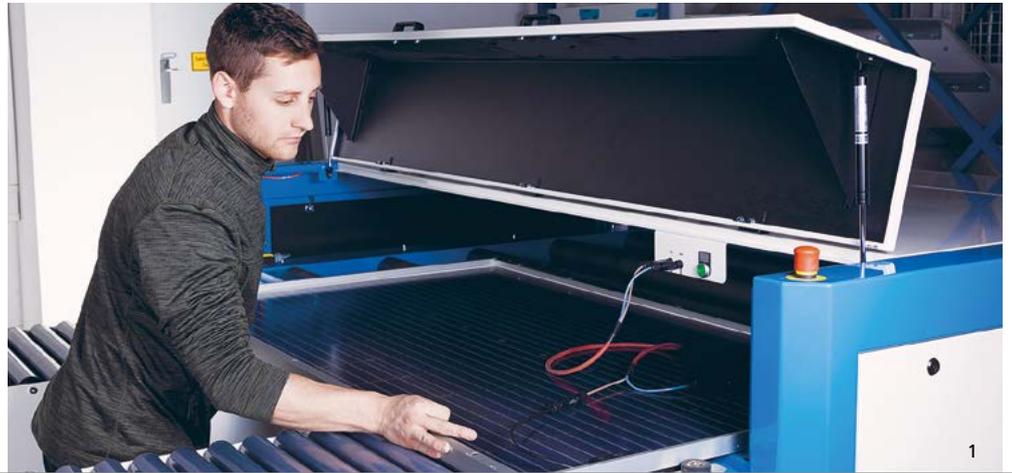
» Solarzellenkalibrierung nach IEC 60891 und den Normen der Serie IEC 60904 unter diversen Referenzbedingungen wie:

- AM1.5g (IEC 60904-3)
- AM0 (ISO 15387)
- AM1.5d (ASTM G173-03)

» Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO / IEC 17025

» Weitere Messungen nach IEC 61853

1 Verschattungsfreie 4-Draht-Kontaktierung einer Siliciumwafer-Solarzelle.



Kalibrierung und Performance-Tests von PV-Modulen

In unserem akkreditierten Kalibrierlabor CalLab PV Modules führen wir schnell und zuverlässig präziseste Kalibrierungen von PV-Modulen für Produktionslinien weltweit durch. Mit dem weltweiten Spitzenwert von 1,1 % Messunsicherheit, bestätigt von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS), kalibrieren wir die Referenzobjekte für Modulhersteller und bilden damit das Bezugsnormale für Produktionsmengen im GW-Maßstab. Unsere Kalibrierscheine und Kalibriermarken auf den Modulen stehen für höchste Präzision und Qualität.

Hocheffiziente Zelltechnologien wie PERC, TOPCon und HJT finden sich bei fast allen Modulherstellern im Sortiment, ebenso bifaziale Technologien. Die kontinuierliche Entwicklung neuer Messmethoden und angepasster Messsysteme in unserem Kalibrierlabor stellt sicher, dass wir für diese PV-Module präzise Leistungsmessungen anbieten können. Aktuell drängen vermehrt großformatige Module mit Leistungen über 500 Watt, teilweise schon über 600 Watt auf den Markt. Wir arbeiten daran, die akkreditierte Kalibrierung in Kürze auch für diese Formate anbieten zu können.

Mit unseren genauen Performance-Tests gemäß IEC 61853 ermitteln wir die Leistung der Module für relevante Betriebsbedingungen mit kleinsten Messunsicherheiten. Durch Optimierung des Sonnensimulators

für Power-Rating-Messungen haben wir die Genauigkeit besonders bei Schwachlicht weiter verbessert. Damit kann die Unsicherheit bei der Ertragssimulation deutlich reduziert werden, was für Investoren von PV-Kraftwerken einen klaren Vorteil bietet. Basierend auf unseren präzisen Performance-Tests im Kalibrierlabor führen wir Ertragssimulationen für Module nach IEC 61853 durch. Dies erlaubt den genauen Vergleich unterschiedlicher Modultypen für definierte Standorte. Selbstverständlich erstellen oder verifizieren wir auch PAN-Files basierend auf unseren präzisen Messdaten.

In enger Kooperation mit Forschenden aus dem Bereich Zellentwicklung erarbeiten wir bereits heute Methoden zur Charakterisierung von Modulen, die auf Basis hocheffizienter Zelltechnologien künftiger Generationen aufgebaut sind, wie Perowskit-Si-Tandemzellen.

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

Martin Kaiser, B.Sc.
 Telefon +49 761 4588-5786
 modules@CalLab.de

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO / IEC 17025:2018
- » Kalibrierung von PV-Modulen mit einer Messunsicherheit von nur 1,1 %
- » Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit auf Modul- und Zellebene von 300 nm bis 1200 nm
- » Präzise Power-Rating-Messungen gemäß IEC 61853
- » Simulation von Modulerträgen basierend auf IEC 61853
- » Bewertung von CPV-Modulen gemäß IEC 62670-3 bei CSOC und CSTC

1 Elektrolumineszenzprüfung als Qualitätskontrolle.



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 Prüfanlagen, deren Anwendungsspektrum deutlich über die Standardprüfungen hinausreicht.

Im TestLab PV Modules erkennen wir potenzielle Schwachstellen von Modulen und analysieren Schadensursachen, z. B. auch zur Klärung von Garantiefragen im Fall von Problemen im Feld. Wir beraten unsere Kunden zu kosten- und zeiteffizienten Prüfprogrammen und individuellen Qualitätskriterien. Gemeinsam mit unserem Partner VDE bieten wir die Produktzertifizierung nach internationalen Standards an.

Aktuell besteht eine sehr große Dynamik im Bereich neuer Zell- und Modulkonzepte. Module werden leistungsfähiger und größer und die Vielfalt der Zell- und Verschaltungskonzepte nimmt zu. Geteilte Zellen, Schindeltechnik mit und ohne Verbinder, Multiwire- und Tandemtechnologien spielen hierbei eine große Rolle. Auch die Anwendungsgebiete entwickeln sich stetig weiter: Systemkonzepte wie Gebäude- oder Fahrzeugintegration bringen neue Herausforderungen hinsichtlich der Rahmenbedingungen von Modulprüfungen mit sich. Oft sind die Vorgaben in existierenden Standards zur Prüfung solcher

Module 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.

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

Das Fraunhofer ISE und die akkreditierten Prüflabors genießen weltweit höchstes Vertrauen als unabhängige Prüfstelle. Wir unterstützen unsere Kunden bei der Verbesserung der »Bankability« für ihre innovativen Produkte und Projekte, indem wir maßgeschneiderte Prüfverfahren für Module anbieten und die Ergebnisse auch im Kontext von State-of-the-Art-Technologien darstellen (Benchmarking).

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

Standards und Spezifikationen

» Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025 für folgende PV-Modul-Standards:

- IEC 61215-1/-2:2016 Design Qualification and Type Approval
- IEC 61730-1/-2:2016 Safety Qualification
- UL 1703 / UL 61730/UL 61215
- IEC TS 62804-1:2015 Test Methods for the Detection of PID
- IEC TS 62782 Cyclic Mechanical Load

» Darüber hinaus bieten wir:

- Technische Due Diligence
- Material- und Komponentenqualifizierung
- Schadens- und Fehleranalyse
- Sonderprüfungen (Salznebel und Sandabrasion)

1 Für die Durchschlagsfestigkeitsprüfung werden die PV-Module in Kupferfolie gehüllt.

TestLab
Solar Façades



Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

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

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

Wir verfügen über umfangreiche Forschungserfahrung im Bereich der Sonnenschutzsysteme, der bauwerk-integrierten Photovoltaik (BIPV) und der bauwerk-integrierten Solarthermie (BIST). Wir sind spezialisiert

auf die mathematische und physikalische Modellierung optischer, thermischer und PV-elektrischer Prozesse in sonnenbestrahlten Fassaden sowie auf die Analyse ihrer energetischen Effekte auf Gebäude. Für die Bewertung von Tageslichtnutzung und Blendung, z. B. bei Büroräumen mit komplexen Fenster- und Sonnenschutzsystemen, setzen wir in unseren Simulationsprogrammen goniometrisch ermittelte BSDF-Datensätze (Bi-Directional Scattering Distribution Function) ein. Studien zu Nutzerpräferenzen und visuellem Komfort führen wir in drehbaren Tageslicht-Testeinrichtungen durch.

Zudem ist das TestLab Solar Façades der europäische Regional Data Aggregator (RDA) für das National Fenestration Rating Council (NFRC). Europäische Verglasungshersteller, die mit ihren Produkten den nordamerikanischen Markt adressieren möchten, müssen dazu Datensätze vom RDA begutachten und in Zusammenarbeit mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in eine Datenbank eintragen lassen. Das Fraunhofer ISE berät und unterstützt europäische Hersteller bei diesem Einreichungsprozess.

Dr. Tilmann Kuhn
Telefon +49 761 4588-5297
testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Transmission, Reflexion und g-Wert nach DIN EN 410, ISO 9050, DIN EN ISO 52022, DIN EN 14500, DIN EN 14501
- » Notifizierung für optische und kalorimetrische Prüfungen nach EN 572-9, EN 1096-4, EN 1279-5, EN 1863-2, EN 12150-2, EN 14179-2, EN 14449
- » Wärmeleitfähigkeit und U-Wert nach ISO 8302, DIN EN 673, DIN EN 674
- » Solar Reflectance Index (SRI) nach ASTM E1980
- » Regional Data Aggregator (RDA) für IGDB-Datensätze europäischer Glashersteller im Auftrag des National Fenestration Rating Council (NFRC)

1 Drehbare Testräume für Tageslichtuntersuchungen.



Prüfung von Kollektoren, Speichern und Systemen

Integrale Systemlösungen mit möglichst hohem Anteil erneuerbarer Energien sind für die CO₂-Reduzierung essenziell. Um Technologien unter diesem Aspekt bewerten zu können, sind technische Kennzahlen erforderlich, die das Fraunhofer ISE für seine Kunden ermittelt. Das Leistungsangebot des akkreditierten TestLab Solar Thermal Systems umfasst dabei die Prüfung als Grundlage für die Marktzulassung und Zertifizierung solarthermischer Kollektoren und Wärmespeicher 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 interdisziplinäre Zusammenarbeit mit dem akkreditierten TestLab PV Modules sind wir zudem in der Lage, unseren Kunden diese Dienstleistungen auch für PVT-Kollektoren anzubieten. Bei der Prüfung hybrider Heizungssysteme, z. B. der Kombination von solaren Lösungen mit Wärmepumpen, arbeiten wir mit dem akkreditierten TestLab Heat Pumps and Chillers zusammen.

Unsere Kunden profitieren vom umfassenden Know-how unserer Mitarbeitenden ebenso wie von der hochmodernen Laborausstattung auf dem neuesten Stand

der Technik. Unser Indoor-Solarsimulator liefert beste Wiederholgenauigkeit, was besonders im Entwicklungskontext von Bedeutung ist. Unsere Outdoor-Teststände sind sowohl auf die Prüfung von Großflächen-Kollektoren als auch auf konzentrierende Kollektoren ausgelegt. Die mechanische Widerstandsfähigkeit von Montagesystemen, PV-Modulen und Solarthermie-Kollektoren prüfen wir individuell und zusätzlich zu den normativen Testbedingungen je nach Kundenbedarf in Temperaturbereichen von -40 °C bis +90 °C. Mit der in situ Charakterisierung kann das TestLab Solar Thermal Systems auch im Feld Anlagen für seine Kunden vermessen, z. B. Nahwärmenetze. Im Rahmen des Zertifikats Solar Keymark führen wir außerdem weltweit Werksinspektionen, auch im Remote-Verfahren, bei unseren Kunden durch.

Kollektoren

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

Speicher, Systeme

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

in situ Vermessung

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

testlab-sts@ise.fraunhofer.de

Standards und Spezifikationen

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

- » Solar Keymark
- » CE
- » SRCC

1 Teststand für Leistungsprüfung eines fassadenintegrierten, luft erwärmenden Solarkollektors.

TestLab
Heat Pumps
and Chillers



Vermessung und Prüfung von Wärmepumpen und Kältemaschinen

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

In einer kalorimetrischen Doppelklimakammer vermessen wir Prüflinge bis zu 100 kW Wärme- oder Kälteleistung (50 kW im kalorimetrischen Betrieb) bei Temperaturen von -25°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ 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 $+95^{\circ}\text{C}$ im Leistungsbereich bis 75 kW thermisch bereitstellen können. In den drei Luftstrecken kann der Luftstrom ($80\text{ m}^3/\text{h}$ bis $5000\text{ m}^3/\text{h}$) im Temperaturbereich von -15°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ 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 zusammen mit unseren Kunden individuelle Messverfahren, durch die sich Entwicklungs- und Optimierungsprozesse von Geräten und komplexeren Systemen durch realitätsnahe, dynamische Prüfabläufe, inklusive »Hardware-in-the-Loop«, zeit- und kosteneffizienter gestalten lassen. Es ist dabei möglich, die Mess- und Betriebsdaten in Echtzeit über unsere gesicherte Verbindung auf externe Rechner zu übertragen und das geprüfte Gerät anzusteuern. Wir konzipieren und betreiben auch komponentenspezifische Teststände (z. B. Verdichterteststand, diverse Wärmeübertrager-Teststände), bei denen modernste Mess- und Analysetechnik für spezifische Fragestellungen, insbesondere im Bereich Strukturdynamik und Akustik, zum Einsatz kommt.

DI Ivan Malenković
Telefon +49 761 4588-5533
Mobil +49 162 205 3924
testlab-heatpumps@ise.fraunhofer.de

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025
- » Prüfnormen EN 14511, EN 14825, EN 16147, EN 12309
- » Alle Prüfungen für Energy Labeling der Wärmepumpen und Kältemaschinen im Rahmen der Ecodesign-Richtlinie
- » Heat-Pump-Keymark-Prüfungen
- » Prüfungen für die Passivhaus-Institut-Zertifizierung (PHI)
- » Nach der F-Gas-Verordnung, Klasse I, zertifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

1 Seitenansicht auf Teilkreise zur Konditionierung der hydraulischen Wärmesenken oder Wärmequellen an unserem Teststand.



1

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 dabei auf die umfangreiche Ausstattung des »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« zurückgreifen und profitiert vom eigenen Anschluss ans 110-kV-Netz.

Die Ausstattung des Labors ermöglicht die Prüfung von Umrichtersystemen hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften, die Charakterisierung nach heutigen Netzanschlussrichtlinien sowie die Durchführung von kundenspezifischen Klimatests. Wir prüfen vor allem PV- und Batteriewechselrichter, aber auch Verbrennungskraftmaschinen wie BHKWs sowie Lasten, wie etwa Schnellladesysteme für die Elektromobilität. Es stehen verschiedene Transformatoren, FRT-Prüfeinrichtungen (bis 10 MVA), Netzsimulatoren (bis 1 MVA), DC-Quellen (je 1 MW), Schutzprüfgeräte sowie eine Schwingkreistesteinrichtung für Anti-Islanding-Tests (400 kVA) zur Verfügung.

Darüber hinaus bieten wir unseren Kunden Vermessungen im Feld, etwa in großen PV-Kraftwerken oder Windparks, an. Hierfür verfügen wir über sechs Leistungsmesssysteme mit je 16 Messkanälen, die wir räumlich verteilt anordnen und synchronisieren können. Mit unserem 4,5-MVA-LVRT-Test-Container können wir auch

größere Erzeugungseinheiten direkt vor Ort prüfen. In unserem Outdoor-Testfeld nutzen wir u. a. für Wechselrichterests einen variabel konfigurierbaren PV-Generator mit einer Leistung von 1 MWp.

Wir prüfen Erzeugungseinheiten nach internationalen Einspeiserichtlinien (z. B. für Deutschland, China, Großbritannien) und bestimmen hochgenau den Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte. Darüber hinaus unterstützen wir unsere Kunden bei der Modellierung von Erzeugungseinheiten und Kraftwerken am Netzanschlusspunkt. Bei der Planung und Durchführung von Messkampagnen reagieren wir jederzeit flexibel auf die Bedürfnisse unserer Kunden und bieten auch im Vorfeld ausführliche Beratungsleistungen an.

Roland Singer M. Eng.
 Telefon +49 761 4588-5948
 testlab-pe@ise.fraunhofer.de

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditiert nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten für Netzanschlussrichtlinien (FGW TR3: Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, DIN VDE V 0124-100: Niederspannungsnetz)
- » Modellierung und Validierung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten (FGW TR4)
- » Weitere Normen und Standards in den Bereichen Wirkungsgrad (DIN EN 61683, DIN EN 50530), Windenergieanlagen (DIN EN 61400-21) und Hausverfahren (bidirektionaler Wirkungsgrad)

1 Prüfling im Multi-Megawatt Lab mit 1-MVA-Netzsimulator.



Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen

Im »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« entwickeln wir Technologien, um höchste photovoltaische Wirkungsgrade zu erreichen, und setzen sie auf internationalem Spitzenniveau um. Zu den Anwendungsmöglichkeiten von Höchsteffizienz solarzellen gehört neben herkömmlichen Solarmodulen auch die Stromversorgung von Satelliten, Elektroautos, autarken Sensoren sowie elektronischen Geräten.

Das Fraunhofer ISE hält im Bereich der höchsteffizienten Solarzellen mehrere Weltrekorde, etwa für beidseitig kontaktierte Siliciumsolarzellen (26,0 %) und für multikristallines Silicium (22,3 %). Auch die weltweit besten monolithischen III-V- auf Si-Tandemzellen (34,5 %) und Vierfachsolarzellen (46,1 % unter konzentriertem Licht) wurden am Fraunhofer ISE hergestellt.

Um diese Spitzenstellung weiter auszubauen, beziehen wir aktuell ein neues Laborgebäude, das wir 2021 einweihen werden. Dieses wird über eine Reinraumausstattung verfügen, die optimal auf die künftigen

technologischen Herausforderungen ausgerichtet ist. Auf mehr als 1000 m² modernster Laborfläche können wir hier fortschrittliche PV-Technologien testen und optimieren.

Neben der Weiterentwicklung der Silicium- und III-V-Technologie liegt ein Fokus des neuen Labors auf der Kombination dieser beiden Materialien: Höchsteffiziente siliciumbasierte Tandemzellen zählen zu den vielversprechendsten Zukunftstechnologien der Photovoltaik. Mit dem neuen Laborgebäude entwickelt das Fraunhofer ISE auch in Zukunft wegweisende neue Solarzellentypen und trägt mit innovativen Prozessen und Technologien zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie bei.

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

Technische Ausstattung

- » Flexibel nutzbarer Reinraum mit 740 m²
- » Weitere Laborflächen von 340 m²
- » Hochtemperaturdiffusion (BBr₃, POCl₃)
- » Hochtemperaturoxidation (trocken und feucht)
- » Ionenimplantation (P, B, H, Ga, Si)
- » Nasschemische Prozesse zur Reinigung und Strukturierung
- » Waferbonding-Technologie
- » Plasmatechnologie (PECVD und Ätzen)
- » Gelblichtbereich für Photo- und Laserlithographie zur Erzeugung von Mikrostrukturen mit beidseitiger Alignierung
- » Atomlagenabscheidung (ALD)
- » Bearbeitung von flexiblen Wafergrößen bis zu 157 × 157 mm²
- » Thermisches und Elektronenstrahlverdampfen von Metallen und dielektrischen Schichten
- » Galvanische Metallverdickung
- » Umfangreiche Ausrüstung zur Material- und Bauelementcharakterisierung

1 Das neue Laborgebäude des »Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen« in Freiburg.



Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse

In unserem Zentrum bündeln wir technische Kompetenzen zur Prüfung, Vermessung und Gebrauchsdaueranalyse unterschiedlichster Materialien. Darüber hinaus sind wir in der Lage, verschiedene Betriebs- und Belastungsfälle, wie z. B. extreme Klimabedingungen, zugrunde zu legen und ihre Auswirkungen auf die Materialeigenschaften zu untersuchen.

Unsere Industriepartner unterstützen wir schwerpunktmäßig in den folgenden Anwendungsfeldern:

- » Photovoltaikzellen, -module und -systeme
- » Gebäudetechnik
- » Energiespeicher
- » Polymere
- » Oberflächen und Beschichtungen

Außerdem arbeiten wir branchenübergreifend für zahlreiche andere Industriezweige, wie etwa die Konsumgüter-, Elektro- und Chemieindustrie. Besondere Expertise besitzen wir auf den Gebieten Halbleitermaterialien, thermochemische und poröse Materialien, Phasenwechselmaterialien sowie Beschichtungen auf Glas und Metallen. Ein weiterer Fokus liegt auf der Analyse von Wärmetransporteigenschaften und optischen Materialeigenschaften.

Dr. Karl-Anders Weiß
Telefon +49 761 4588-5474

PV-Module
Daniel Philipp
Telefon +49 761 4588-5414

PV-Zellen
Dr. Martin Schubert
Telefon +49 761 4588-5660

Technische Ausstattung

Die Ausstattung auf höchstem technischem Niveau bietet unseren Partnern eine große Bandbreite aussagekräftiger, anwendungsorientierter Analysen und Untersuchungen:

- » Elektrische Analytik: präzise Bestimmung elektrischer Parameter von Solarzellen und Modulen
- » Optische Analytik: bildgebende mikroskopische sowie kamerabasierte Messmethoden zur Messung der Materialeigenschaften für Solarzellen und Module
- » Transmissions- und Reflexionsmessung mittels FTIR-Spektrometrie und integrierender Kugeln
- » Oberflächenanalytik: mikroskopische Untersuchung von Oberflächen mit höchster Auflösung mittels Rasterelektronenmikroskopie und weiterer Verfahren
- » Konfokales Raman-Mikroskop mit AFM zur hochauflösten Charakterisierung der Oberflächenmorphologie und mobiles AFM zur Untersuchung großer Bauteiloberflächen
- » Kontaktwinkelmessung zur Bestimmung von Oberflächenenergien

- » Wärme- und Temperaturanalytik
- » Messung von Wärmekapazität und -leitfähigkeit, Degradations- und Zersetzungsuntersuchungen mittels TGA-MS
- » Bestimmung der Permeation von Feuchtigkeit und weiteren Testmolekülen durch Einkapselungs- und Hochbarrierematerialien
- » Material-Strukturanalyse
- » Strukturanalyse poröser Materialien mittels Adsorption von N₂ und CO₂
- » Strukturanalyse mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) und diffuser Reflexions-FTIR-Spektroskopie (DRIFTS), gekoppelt mit in situ Reaktionskammern
- » Beschleunigte Alterung: flexibel kombinierbare künstliche Bewitterung mit Temperatur, Feuchtigkeit und (UV-)Strahlung sowie mechanischer Belastung
- » Freibewitterung: Exposition und Monitoring in verschiedenen Klimazonen

1 Apparatur zur beschleunigten thermischen Zyklierung von Materialien, insbesondere von Verbundmaterialien und Baustoffen.



Zentrum für Optik und Oberflächenforschung

Im »Zentrum für Optik und Oberflächenforschung« entwickeln wir optisch-funktionale Oberflächen für eine Vielzahl von Anwendungen.

In der Beschichtungstechnologie erarbeiten wir Lösungen basierend auf dem Sputterverfahren für die Bereiche Solarthermie, Photovoltaik, Energieeffiziente Gebäude und Wasserstofftechnologie. Die Anwendungen umfassen z. B. Spiegel und Absorber für solarthermische Kraftwerke, ladungsträgerselektive Elektroden für die Photovoltaik, Solar Control Coatings sowie optisch schaltbare Systeme für energieeffiziente Gebäude. Über die optischen Eigenschaften hinaus maßschneidern wir Schichtsysteme für die jeweiligen Anforderungen des Endprodukts, z. B. Langzeitstabilität im Außeneinsatz oder industrielle Skalierbarkeit. Unser Leistungsspektrum umfasst Machbarkeitsstudien, Kleinserienfertigungen sowie Produktentwicklungen bis hin zum fertigen industriellen Prototyp.

Die Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen ermöglicht verschiedenste optische wie auch nicht-optische Funktionalitäten. Die großflächige Herstellung passgenauer Oberflächenstrukturen ist die Grundlage für eine industrielle Umsetzbarkeit. In Solarzellen

führen photonische Strukturen zu einer verbesserten Ausnutzung der solaren Strahlung. In Beleuchtungsanwendungen werden Mikro- und Nanostrukturen genutzt, um Licht aus LEDs auszukoppeln oder in gewünschte Richtungen zu lenken. In Displays werden funktionale Strukturen für Entspiegelung, Polarisation oder Lichtlenkung eingesetzt. Auch bei der Modifikation nicht-optischer Eigenschaften spielen Mikro- und Nanostrukturen eine Rolle, z. B. bei der Beeinflussung der Benetzbarkeit, Haftung oder Reibung.

Für die konzentrierende Photovoltaik und für solarthermische Kraftwerke entwickeln wir optische Komponenten. Neben Schichtentwicklungen ist die Bewertung von Spiegeln und Absorbern ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit. Dafür quantifizieren wir z. B. die Strahlaufweitung durch Oberflächenstreuung und Verschmutzung sowie die Formtreue, womit wir maßgeblich zur Optimierung und Qualitätssicherung beitragen.

Dr. Thomas Kroyer
Telefon +49 761 4588-5968
Dr. Benedikt Bläsi
Telefon +49 761 4588-5995
Dr. Gregor Bern
Telefon +49 761 4588-5906

Technische Ausstattung

- » Moderne Sputteranlagen mit einer Beschichtungsfläche bis zu $1,5 \times 4 \text{ m}^2$ bei maximal 16 cm Stichhöhe
- » Substrate: ebene und gebogene Glasscheiben, Polymerfolien sowie Metallbleche und -rohre
- » Interferenzlithographie-Aufbauten zur Erzeugung von Masterstrukturen mit Strukturdetails zwischen 100 nm und $100 \mu\text{m}$ homogen auf Flächen bis $1,2 \times 1,2 \text{ m}^2$
- » Nanoimprint- und Heißprägeanlagen, um Mikro- und Nanostrukturen auf Prototypen zu übertragen
- » Bestimmung der Formtreue von Objekten und Konzentroptiken mittels Deflektometrie, Photogrammetrie und 3D-Laserscanning
- » Plasmaätzanlagen zur Übertragung geimprinteter Strukturen in nicht-polymere Materialien
- » Charakterisierung der optischen und mikrostrukturellen Eigenschaften: Fourierspektrometer, Rasterelektronenmikroskopie (REM), Rasterkraftmikroskopie (AFM), Goniometrie zur Quantifizierung von Streuung bzw. Strahlaufweitung (Scanning 3D-Goniometer, VLABS)

1 Horizontale Sputteranlage mit einer Beschichtungsfläche von $1,5 \times 4 \text{ m}^2$.



Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien

Wir prüfen und charakterisieren eine Vielzahl von Geräten und Komponenten für den Einsatz in der Gebäudetechnik. So analysieren wir Wärmeübergang und Druckverlust an charakteristischen Strukturausschnitten sowie an maßstabsgetreuen Wärmeübertragern mit unterschiedlichen Fluiden bis hin zur Vermessung von Verdichtern, Wärmepumpen und Kältemaschinen nach verschiedenen Normen und Regelwerken.

Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit liegt auf der Entwicklung und Bewertung von Komponenten für natürliche Kältemittel, wie u. a. Propan. Unser gesamtes Labor ist daher für Arbeiten mit brennbaren Kältemitteln ausgestattet, sodass wir Komponenten für Propan-Kältekreise entwickeln und optimieren können. Gezielt arbeiten wir an Methoden zur Reduktion der benötigten Kältemittelmenge.

Darüber hinaus entwickeln wir mit unseren Partnern individuelle Messverfahren, die den Entwicklungs- und Optimierungsprozess von Geräten und komplexeren Systemen durch realitätsnahe, dynamische Prüfabläufe, inklusive Hardware-in-the-Loop, zeit- und kosteneffizient gestalten. Wir unterstützen sie zudem bei der Bewertung der Schallintensität und der Langzeitstabilität von Komponenten und Kältekreisen.

Zur Modellierung und Auslegung von Wärmeübertragern, Kältekreisen und Systemen setzen wir auch Simulationswerkzeuge ein.

Dr. Peter Schossig
Telefon +49 761 4588-5130

Technische Ausstattung

- » Teststände zur Vermessung der dynamischen/ stationären Siede- und Adsorptionscharakteristik von Wasser im Niederdruck an Strukturausschnitten und Wärmeübertragern
- » Teststände zur Vermessung von luftbeaufschlagten Wärmeübertragern mit unterschiedlichen Fluiden (Wasser, Solen, Kältemittel)
- » Drei Luftkonditionierungsstrecken für Volumenstrombereiche 80 bis 5000 m³/h, Heizleistungen 2 bis 50 kW, Kühlleistung 2 bis 15 kW und Temperaturbereich -15 °C bis + 50 °C
- » Teststände zur Kältemittelverteilung und Verdichterprüfung
- » Kalorimetrische Doppelklimakammer für Prüflinge bis zu 100 kW Wärme- oder Kälteleistung bei Temperaturen von -25 °C bis 50 °C und relativen Luftfeuchten von 25 % bis 95 %
- » Particle Image Velocimetry (PIV)
- » Laser-Doppler-Anemometrie (LDA)
- » Shadowgraphy
- » Vibrometrie
- » Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Materialien und Komponenten
- » Schallmessungen

1 Am Fraunhofer ISE entwickelter leistungsfähiger Kältekreis mit dem klimafreundlichen Kältemittel Propan.



Zentrum für Elektrische Energiespeicher

Das Fraunhofer ISE bietet im »Zentrum für Elektrische Energiespeicher« FuE-Leistungen auf Batteriematerial- und Zellebene an. Hierfür entwickeln und charakterisieren wir neue Batteriematerialien, Prozess- und Qualitätssicherungstechnologien sowie neue Zellarchitekturen. Die Batteriesystemtechnik umfasst die Entwicklung von optimierten Batteriemodulen und -systemen inklusive Verbindungstechniken, Sicherheitseinrichtungen, thermischem Management, Batteriemangement mit präzisen Algorithmen für die Zustandsbestimmung sowie optimierten Lade- und Betriebsführungsstrategien. Im Bereich der Produktionstechnologien decken wir dabei die gesamte Wertschöpfungskette ab. Auf dem Gebiet der Systemintegration und Speicherbetriebsführung erarbeiten wir verschiedenste Anwendungen. Dazu zählen stationäre, gewerblich und industriell genutzte Batteriespeicher genauso wie die Elektromobilität.

Unsere umfangreiche Laboreinrichtung ermöglicht die elektrische, thermische und mechanische Charakterisierung von Batteriezellen, -modulen und -systemen nach

gängigen Normen und Standards. Außerdem führen wir Tests zur zyklischen und kalendarischen Alterung durch. Für die Bearbeitung von FuE-Fragen setzen wir modernste Simulationswerkzeuge ein und entwickeln dafür Verhaltens- und orts aufgelöste Modelle. Diese validieren wir anhand von Messkampagnen im Batterielabor.

Darüber hinaus bieten wir techno-ökonomische Bewertungen auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette an. Hierfür greifen wir auf ein umfassendes Kostenkalkulationswerkzeug zurück. Im Bereich der Systemuntersuchungen integrieren wir eigene Batteriemodelle in Systemmodelle – beispielsweise zur simulationsbasierten Auslegung und Optimierung von PV-Batteriesystemen – und ermöglichen somit u. a. die Berechnung der Stromgestehungs- und Stromversorgungskosten über einen definierten Zeitraum.

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

Technische Ausstattung

- » Prozesskette zur Herstellung, Verarbeitung und Charakterisierung von Batteriezellen und neuen Materialien
- » Inertprozesskette für die Erforschung von Festelektrolytbatterien und Materialien hierfür
- » Testkreise für die Zyklisierung von Batteriezellen und Messsysteme für die elektrochemische Charakterisierung von neuen Batteriechemien
- » Batterietestkreise bis zum System mit 250 kW (1000 V, 600 A)
- » Klimakammern mit Schutzeinrichtungen
- » Teststände für komplette PV-Heimspeichersysteme bis 15 kW (Hardware-in-the-Loop)
- » Hochgenauer Coulombmetrie-Teststand
- » Isothermes Batterie-Kalorimeter
- » Testeinrichtungen für DC-Anwendungen, z. B. für Leuchtmittel
- » Elektroniklabor zur Entwicklung von Batteriemangementsystemen und Elektronik für PV-Kleinsysteme
- » Off-Grid-Labor: Test- und Prüfeinrichtungen zur Charakterisierung und Zertifizierung von PV-Batterie-Kleinsystemen (Pico-PV-Systeme und Solar-Home-System-Kits), Komponenten (z. B. Laderegler) und DC-versorgten Produkten
- » PV-Batterie-Dieselsysteme-Teststand

1 Arbeiten an einer Glovebox.



Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe

Im »Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe« werden katalytische Materialien, Komponenten und Subsysteme in den Bereichen PEM-Elektrolyse, PEM-Brennstoffzellen (besonders für die mobile Anwendung), Power-to-Gas, Power-to-Liquids/ Chemicals sowie für hocheffiziente, saubere Verbrennungsmotoren getestet und mit wissenschaftlichen Methoden charakterisiert und bewertet. Dazu verfügen wir über eine hervorragende technische Infrastruktur und apparative Ausstattung. Unsere langjährige Expertise im Bau und Betrieb von Versuchs- und Teststandbauten von

der Einzelzelle bis zur vollautomatisierten Miniplant-Anlage verschafft uns die Möglichkeit, sowohl fundierte wissenschaftliche Fragestellungen in Forschungsprojekten zu untersuchen als auch maßgeschneiderte technische Lösungen im Kundenauftrag zu entwickeln.

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

Technische Ausstattung

- » Teststände zur Charakterisierung von PEM-Elektrolysezellen und Shortstacks bis 50 bar und 80 °C
- » Fullstack-Teststände zur Vermessung von Elektrolysestacks mit einer DC-Anschlussleistung von 200 kW bzw. 1 MW und einer Stromstärke von 4000 A
- » Versuchs- und Demonstrationsanlagen zur Einspeisung von Wasserstoff und 700-bar-Wasserstofftankstelle mit Onsite-Elektrolyse
- » Mehrkanal-Impedanzspektroskopie zur ortsaufgelösten Vermessung von Vollformat-Einzelzellen
- » Mehrkanal-Impedanzspektroskopie zum Einzelzellmonitoring für Brennstoffzellen-Shortstacks
- » Automatisierte Teststände zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Shortstacks bis 20 kW/1000 A
- » Neun automatisierte Einzelzellteststände zur in situ Charakterisierung von Brennstoffzellenkomponenten
- » Umfangreiche Prozesstechnik und Analytik für die Produktionsforschung zu Membranelektrodeneinheiten
- » Begehbare Klimakammer
- » 24/7-Miniplant-Anlagen inkl. Analytik zur Synthese flüssiger Kraftstoffe aus CO₂-reichen Feedgasen sowie für den hochdynamischen Betrieb mit hochauflösender Messtechnik
- » Achtfach-Hochdruckreaktorsystem (bis 100 bar) zum Screening von Katalysatoren
- » Screening von Katalysatoren, z. B. zur Untersuchung des Light-off-Verhaltens und Bestimmung von Sekundäremissionen von Gasgemischen inkl. FTIR
- » Kinetische Untersuchung von Katalysatorpulvern (bis 80 bar) inkl. FTIR/ GC-WLD-Analytik
- » Untersuchung von Abgasnachbehandlungskonzepten für konventionelle und PtX-Kraftstoffe
- » Hochtemperatur-Nah-Umgebungsdruck-Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie (HT-NAP-XPS)
- » Mikro-Computertomographie (Mikro-CT)
- » Standardmessequipment wie GC-MS, GC-FID, REM/EDX, ICP-MS, FTIR-ATR

1 Teststand mit Mehrkanal-Impedanz-Anlage zur Brennstoffzellen-Stack- und Systemcharakterisierung in der Klimakammer.



Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze

Im Zentrum für »Leistungselektronik und nachhaltige Netze« verfügen wir über einen eigenen Hochspannungsanschluss. Hier entwickeln wir innovative Umrichtersysteme im Leistungsbereich bis zu mehreren Megawatt für den Einsatz im heutigen und zukünftigen stromrichterdominierten Stromnetz.

Im Multi-Megawatt Lab betreiben wir hierfür verschiedene hochwertige Testeinrichtungen, wie etwa einen hochdynamischen 1-MVA-Netzsimulator, eine »Fault Ride Through«-Testeinrichtung für kurzzeitige Unter- oder Überspannungen (bis 10 MVA) und eine große Klimakammer. Neben der Charakterisierung des dynamischen Verhaltens am Netz führen wir Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen für leistungselektronische Komponenten durch.

In unserem Mittelspannungslabor können Umrichtersysteme im Leistungsbereich bis zu 20 MVA am 20-kV-Netz betrieben und vermessen werden. Mithilfe entsprechender Entwicklungsarbeitsplätze und Teststände für die Charakterisierung von neuartigen Leistungshalbleitern arbeiten wir an der Entwicklung von Mittelspannungsumrichtern.

Im niedrigen und mittleren Leistungsbereich bis zu wenigen Hundert Kilowatt liegt unser Fokus auf der Erforschung, Entwicklung und Erprobung von innovativen leistungselektronischen Systemen. Neue Halbleitertechnologien auf Basis von Siliciumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) ermöglichen die Realisierung von zukunftsweisenden Hardware-Designs, die wir bis zur Vorserienreife entwickeln.

Mit unserem neuen Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)-Simulator bilden wir in unserem Digital Grid Lab Verteilernetze im Leistungsbereich bis 800 kVA in der Niederspannung ab. Dabei erfolgen die simulative Nachbildung des Netzzustands und die Abbildung des digitalen Kommunikationssystems im HIL-System. Die Entwicklungsumgebung lässt den Entwurf modernster Steuerungskomponenten z. B. auf Basis von künstlicher Intelligenz zu. Die Leitwarte ermöglicht das Monitoring und die Visualisierung des Netzbetriebs sowie die Kopplung mit einem digitalen Netz-Zwilling (PHIL).

Dr. Sönke Rogalla | Telefon +49 761 4588-5454

Digital Grid Lab

Dr. Bernhard Wille-Haussmann | Telefon +49 761 4588-5443

Technische Ausstattung

Multi-Megawatt Lab

- » Netzsimulator (1 MVA) und DC-Quellen (1,4 MW)
- » UVRT- und OVRT-Testeinrichtungen (bis 10 MVA)
- » Klimakammer (-30 °C bis +80 °C, 10 % bis 90 % r. F.)
- » Prüfstand zur Inselnetzerkennung (400 kVA)

Medium Voltage Lab

- » Mittelspannungs-DC-Quelle (bis 40 kV/3 × 200 kW)
- » Mittelspannungswiderstand (12 kVΔ/20 kVY/1 MW)
- » Flexibler MS-Transformator (3 bis 30 kV/2,5 MVA)

Power Converters Lab

- » Maschinenemulator (160 kVA) und Netzsimulator (30 kW), HIL-System von OPAL-RT
- » Hochauflösende Wärmebildkamera (Videos)
- » Induktivitätsmessgerät und Impedanzanalysator

Digital Grid Lab

- » Teststand für Smart-Grid-Leitsysteme und Kommunikationstechnologien
- » Umfangreiche Toolsuite zu IP-basierten Kommunikationsprotokollen



SiM-TEC – Silicon Material Technology Evaluation Center

Am SiM-TEC entwickeln und evaluieren wir neue Technologien für die Produktion von Siliciumwafern für die Photovoltaik. Die Kristallisation von Siliciumblöcken erfolgt nach dem Prinzip der gerichteten Erstarrung. Dazu entwickeln wir qualitativ hochwertige Wafer, indem wir Prozesse mit und ohne Keimvorgabe einbeziehen, die Materialhomogenität erhöhen und den Durchsatz durch Nachführen von Silicium während der Kristallisation steigern (»Feeden«).

Zur Minimierung des Verunreinigungseintrags forschen wir an Tiegelssystemen und Beschichtungen mit erhöhter Reinheit. Im Bereich des Kerfless Wafering untersuchen wir Prozesse zur mechanischen Bearbeitung von Oberflächen und zur elektrochemischen Porosifikation von hochdotierten Siliciumwafern als Substrate für einen nachfolgenden Epitaxieschritt. Für die elektrochemische Prozessierung von Wafern verfügen wir über eine In-line-Ätzanlage, die in mehreren elektrisch voneinander getrennten Becken verschiedene Einseiten-Ätzprozesse durchführen kann.

Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit ist die Weiterentwicklung der Cast-Mono-Technologie zur Herstellung von komplett monokristallinen Siliciumwafern aus der Blockkristallisation. Dazu erforschen wir die Möglichkeiten verschiedener Keimkonfigurationen zur Erhöhung der Materialqualität. Insbesondere der Einsatz von gezielt eingebrachten funktionalen Defekten durch eine Kombination unterschiedlich orientierter monokristalliner Platten (»SMART-Seeding-Technologie«) spielt dabei eine wesentliche Rolle. Er ermöglicht eine Skalierung der Wafergröße an die neu im PV-Markt etablierten Größen M6 oder M12 ohne Eingriff in den eigentlichen Kristallisationsprozess. Für die Analyse der Restspannungen im Material, die aus dem Herstellungsprozess resultieren, stehen verschiedene Untersuchungsmethoden zur Verfügung.

Dr. Stephan Riepe
Telefon +49 761 4588-5636

Technische Ausstattung

- » Multifunktionsätzanlage für Wafer und Blöcke
»Ramgraber«
- » Kristallisationsanlage
»PVA Tepla VGF 623 Multicrystallizer«
- » Diamantsägen zur Siliciumbearbeitung
- » Lasermarkierungsanlage für Siliciumsäulen
»Vision TL 1150-BMCS«
- » Säulendurchleuchtungsanlage
»Intego Orion Super High Resolution«
- » Schleif- und Polieranlage »Arnold«
- » Blockcharakterisierungsanlage
»Semilab WT-2 000D«
- » Inline-Porosifikationsanlage »IporSi«
- » Optischer Schichtdickenscanner
»CyberTechnologies CT-250T«
- » Lichtmikroskop »Zeiss Axiotron«
- » Universalprüfgerät für Bruch-/Zugtests
»Hegewald & Peschke«

1 Kristallisationsanlage »Multicrystallizer VGF632«
für die gerichtete Erstarrung von Siliciumblöcken.



1

PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center

Das PV-TEC verfügt auf mehr als 2000m² über eine hochmoderne Infrastruktur mit flexiblen Prozess- und Charakterisierungsgeräten für die Entwicklung von hocheffizienten Siliciumsolarzellen sowie verwandten Bauelementen und Substraten. Die Unterteilung in zwei Großlabore erlaubt uns eine optimale Anpassung an die spezifischen Anforderungen der Technologiebereiche im Front- und Back-End. Unser Angebot umfasst:

- » Evaluation und Entwicklung von Herstellungsprozessen und Prozesstechnologiekomponenten
- » Entwicklung und Fertigung von fortgeschrittenen industriellen Solarzellenstrukturen
- » Charakterisierung und Entwicklung von Materialien, Solarzellen und verwandten Bauelementen
- » Entwicklung von Messmethoden und KI-basierten Methoden der Datenanalyse
- » Prozesstransfer mit Schulung und Training
- » Ökonomische Kostenstudien

Wir sind fokussiert auf Kernthemen der Produktionstechnologie und Messtechnik und richten uns an Unternehmen aus allen Bereichen der Wertschöpfungskette. Hierfür haben wir drei Baseline-Prozesse etabliert, die uns die industrienahe Produktion von PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)-, TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)- und SHJ (Silicon Hetero Junction)-Solarzellen ermöglichen. Wir erweitern diese z. B. um Diffusions- und Laserprozesse zur Erzeugung selektiver Emitter, Abscheideprozesse zur Herstellung von dotierten polykristallinen Siliciumschichten oder Druckprozesse für ultrafeine Kontakte mit Breiten von unter 20 µm. Damit stehen im PV-TEC hochwertige, kontinuierlich optimierte Baseline-Prozesse für die wichtigsten Routen der Silicium-Solarzellentechnologie zur Verfügung. Darüber hinaus bereiten wir uns auf die pilotartige Herstellung von Tandemsolarzellen vor. Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit liegt in der hochpräzisen Charakterisierung vom Eingangssubstrat bis zum fertigen Bauelement.

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

Technische Ausstattung

PV-TEC Front-End

- » Nasschemische Batch- und Inline-Anlagen zur Texturierung, Reinigung und einseitigen Oberflächenbearbeitung
- » Vollautomatisierte Rohrofenanlagen zur Diffusion, Oxidation und Abscheidung polykristalliner Si-Schichten
- » Voll- und teilautomatisierte PECVD-Anlagen zur Abscheidung dielektrischer sowie intrinsischer und dotierter amorpher Si-Schichten
- » PVD-Anlagen zur Abscheidung metallischer und transparenter leitfähiger Schichten (TCO)

- » Inline-Inspektionsautomaten zur ortsaufgelösten optischen und elektrischen Charakterisierung von Wafern in unterschiedlichen Prozessstadien

PV-TEC Back-End

- » Voll- und teilautomatisierte Laser- und Druckanlage zur Strukturierung und Metallisierung mit stationärer und dynamischer Probenbearbeitung
- » Innovative Durchlauföfen für Kontaktausbildung und Regeneration
- » Flexible Inline-Solarzellencharakterisierungsanlage für unterschiedliche Formate und Kontaktstrukturen
- » Hochflexible Entwicklungslabore für Druck- und Laserprozesse sowie zur detaillierten Bauelementanalyse

1 PV-TEC Front-End: Durchlauf-PECVD Mehrkammer-Vakuumbeschichtungsanlage.



Module-TEC – Module Technology Evaluation Center

Die industriellen Produktionsanlagen und vielseitigen Analyseplattformen im Module-TEC bieten umfassende Möglichkeiten zur Entwicklung von Verbindungs- und Einkapselungstechnologien für PV-Module. Innovative Materialien können in der Verarbeitung erprobt, Modulmuster und kleine Serien für Prüf- und Demonstrationszwecke hergestellt werden. Abhängig von Fragestellung und Entwicklungsstand fertigen wir Module vom Einzeller bis zum Vollformat.

Für die Zellverbindung werden neben den üblichen Bändchen auch Runddrähte (Multi-Wire), strukturierte Verbinder oder leitfähige Rückseitenfolien verarbeitet. Mit industriellen Anlagen stellen wir auch Modulstrings mit überlappenden Zellkanten in Schindel- oder Matrix-Schindelbauweise her. Wir verschalten Solarzellen im Voll-, Halb- und Teilformat. Neben dem marktüblichen Löten ist auch die vollautomatisierte, schonende Verbindung der Solarzellen mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECA) möglich. Dieses innovative Konzept der Klebeverbindung eignet sich besonders für temperatursensitive Hocheffizienzzellen, wie z. B. Heterojunction- oder Tandemsolarzellen, die Schindeltechnologie oder besonders dünne Solarzellen. Außerdem verfügen wir über eine

industrielle Stringeranlage mit Smart Wire Connection Technology (SWCT), die eine schonende Niedertemperaturverschaltung von busbarlosen Solarzellen ermöglicht.

Die Einkapselung erfolgt in unseren Laminatoren im Glas-Folie- oder Glas-Glas-Aufbau. Ebenso ist es uns möglich, randversiegelte Glas-Glas-Module ohne Einkapselungsmaterialien (TPedge) oder gewölbte Module herzustellen. Aktuell arbeiten wir am Prototyp eines Panoramaglasdachs für Autos mit integrierten Solarzellen.

Unsere Kunden nutzen die Angebote des Module-TEC zur Einführung neuer Materialien sowie bei der detaillierten Analyse und Optimierung der Moduleffizienz. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung anwendungsspezifischer Module für Integrierte Photovoltaik, z. B. für die Gebäude- und Fahrzeughülle.

Dr. Holger Neuhaus
Telefon +49 761 4588-5825

Technische Ausstattung

- » Anlage zur Klebe- oder Lötverschaltung von Voll-, Halb- oder Schindelzellen
- » Anlagen zur Drahtverschaltung (Multiwire, SWCT)
- » Laminator zur Lamination von 60- und 72-Zell-Modulen (Glas-Glas/Glas-Folie)
- » Speziallaminator für gewölbte Lamine oder spezielle Materialsysteme
- » 3D-Röntgencomputertomographie
- » Anlage zur Herstellung von metallografischen Schliffproben und Querschliffen von Modulen
- » Digitalmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie
- » Elektrolumineszenz und Gelgehaltsanalyse

1 Mit Smart Wire Connection Technology (SWCT™) hergestellter Zellstring.



Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation

Im Con-TEC nutzen wir unsere produktionsnahen Fertigungsprozesse, um Konzentratormodule mit höchster Effizienz herzustellen und Wege zur Kostenreduktion aufzuzeigen. Auf Basis neuartiger Prototypen als Einzelkomponenten oder auch Kleinserien evaluieren wir Komponenten, Designs und Prozesse. Dafür stehen Fertigungstechnologien für die automatisierte oder semi-automatisierte Montage und elektrische Kontaktierung von Solarzellen und Baugruppen zur Verfügung.

In der Konzentratorphotovoltaik ist besonders die thermische Anbindung der Solarzelle an das Substrat entscheidend, da durch die konzentrierte Strahlung sehr hohe Leistungsdichten übertragen werden. Sowohl unsere Prozesse als auch die Materialauswahl sind daher auf hohe thermische Leitfähigkeit, Temperatur- und Temperaturwechselbeständigkeit ausgelegt. Darüber hinaus weisen unsere Montageprozesse eine hohe Präzision in der Setzgenauigkeit für die sehr kleinen Bauteilgrößen auf. Für die elektrische Vorderseitenkontaktierung mit kleinen Bondflächen bringen wir dünne Drähtchen oder Metallbänder mittels Ultraschall- oder Widerstandsschweißprozessen an.

Einzigartig sind auch unsere Möglichkeiten und Erfahrungen in der Auswahl und Verarbeitung von Silikonen, die wir für die Herstellung von Optiken, zur Ankopplung von Sekundäroptiken oder Verkapselung von Solarzellen nutzen. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung der Zuverlässigkeit einzelner Baugruppen. Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Module und Komponenten werden beschleunigte Alterungstests durchgeführt.

Wir unterstützen unsere Kunden bei der Entwicklung und Evaluierung des Designs von Komponenten und Modulen für die Konzentratorphotovoltaik sowie bei der Prototypenentwicklung optoelektronischer Bauteile. Dabei haben wir immer auch die Wirtschaftlichkeit für eine industrielle Anwendung im Blick.

Maika Wiesenfarth M. Sc.
Telefon +49 761 4588-5470

Technische Ausstattung

- » Löt- und Klebprozesse für die Montage von Halbleiterbauelementen und Solarzellenbaugruppen
 - Hochpräzises Bestücken auf kleinen und großen Flächen bis $600 \times 1170 \text{ mm}^2$
 - Löten unter Luft- oder Stickstoffatmosphäre, kontrolliertes Aushärten von Klebern
 - Vakuumlöten
 - Flussmittelfreies Löten mit Ameisensäure- oder Formiergas-Aktivierung
- » Prozesse für die elektrische Kontaktierung auf kleinen Flächen
 - Dünn- und Dickdrahtbonden
 - Mikro-Bändchen-Schweißen
- » Automatisierte und manuelle Prozesse für die Modulmontage
- » Charakterisierung der Prozesse bezüglich Hafteigenschaft, Bestückgenauigkeit und elektrischer Funktionalität
- » Untersuchung der Langzeitstabilität
 - Klimakammern zur Temperaturentlastung auch mit zusätzlicher Beanspruchung durch erhöhte Luftfeuchtigkeit oder angelegter Rückwärtsspannung
 - Bestrahlung von optischen Komponenten oder Verkapselungsmaterialien unter konzentriertem UV-Licht

1 Eine genaue Ausrichtung der Linienplatte zu den Solarzellen ist für den optimalen Leistungsertrag eines CPV-Moduls entscheidend.

Veranstaltungen 2021 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE

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

Bau 2021 ONLINE

digital
13.01. – 15.01.2021

FC Expo

Tokio, Japan/hybrid
03.03. – 05.03.2021

SPIE Photonics West – Digital Forum

digital
06.03. – 11.03.2021

ISH digital 2021

digital
22.03. – 26.03.2021

CPV-17

digital
12.04. – 14.04.2021

Hannover Messe

digital
12.04. – 16.04.2021

Silicon PV

digital
19.04. – 22.04.2021

Berliner Energietage

digital
21.04. – 28.04.2021

E-world energy & water

Essen
04.05. – 06.05.2021

36. PV-Symposium

Messe Freiburg
18.05. – 20.05.2021

HOPV 21 online

digital
25.05. – 28.05.2021

EMRS Spring Meeting

digital
31.05. – 03.06.2021

SNEC PV Power Expo

Shanghai, China
02.06. – 05.06.2021

WHTC und f-cell HFC

digital
20.06. – 24.06.2021

48th IEEE Photovoltaic Specialists Conference

Miami-Fort Lauderdale, USA/hybrid
20.06. – 25.06.2021

Smarter E / Intersolar Europe

München
21.07. – 23.07.2021

ISHPC

Berlin
22.08. – 25.08.2021

38th EU PVSEC

Lissabon, Portugal
06.09. – 10.09.2021

IAA PKW

München
07.09. – 12.09.2021

f-cell

Stuttgart
14.09. – 15.09.2021

Solar Power International (SPI)

New Orleans, USA
20.09. – 23.09.2021

Battery Experts Forum

Frankfurt
05.10. – 07.10.2021

ECSCRM

Tours, Frankreich
24.10. – 28.10.2021

European Heat Pump Summit

Nürnberg
26.10. – 27.10.2021

Productronica

München
16.11. – 19.11.2021

MRS Fall Meeting & Exhibit

Boston, USA
28.11. – 03.12.2021

Battery Show Europe

Stuttgart
30.11. – 02.12.21

PVSEC-31

Sydney, Australien
13.12. – 15.12.2021

Impressum

Redaktion

Christina Lotz
Susanne Mohr
Karin Schneider (verantwortlich)

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Kommunikation
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Telefon +49 761 4588-5150
Telefax +49 761 4588-9342
info@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de

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

© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Freiburg, 2021

Hier halten wir Sie auf dem Laufenden

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

Konzeption und Gestaltung

www.snow-design.de

Druck

Print Consult GmbH, München



Bildnachweise

Copyrights

Angelini Innovation Center: Seite 14
f-cell Award/Angelika Emmerling: Seite 21
AZUR SPACE Solar Power GmbH: Seite 35 Abb. 2
EUMETSAT: Seite 46
ingenhoven architects H. G. Esch: Seiten 54, 57
Vermessungsamt Freiburg: Seite 66 Abb. 1
iStock.com/Kongphop Petwichai (Mockup-Bild Laptop): Seite 69 Abb. 1
shutterstock.com/Dmitry Kalinovsky: Seite 70 Abb. 1
Berliner Stadtwerke/Benjamin Pritzkeleit: Seite 70 Abb. 2

Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

Fotografen

Michael Eckmann: Seite 72 Abb. 2
Joscha Feuerstein: Seiten 63 Abb. 2, 64 Abb. 1
Andreas Hinsch: Seite 33
Nina Kevlishvili: Seite 65 Abb. 2
Guido Kirsch: Seiten 12, 83
Thomas Kroyer: Seite 55 Abb. 1
Andreas Lorenz: Seite 42 Abb. 1
Dirk Mahler: Seiten 26, 30, 44, 49, 50, 59, 68,
71 Abb. 1, 72 Abb. 1, 73, 78, 79, 82, 83, 89, 91, 92, 93
Marek Miara: Seite 86
Bernd Müller: Seite 40
Tayyab Naeem: Seite 45
Michael Schachtner: Seite 34
Bernd Schumacher: Seiten 10 (S. Vormfelde), 23
Timo Sigurdsson: Seite 19
Rajveer Singh: Seite 63 Abb. 1
Bernd Steinhauser: Seite 31 Abb. 1
Beate Suppinger: Seite 47
Andreas Wessels: Seite 55 Abb. 2
Kai-Uwe Wudtke: Seiten 3, 10 (H.-M. Henning, A. Bett, K. Schneider,
S. Glunz, H. Wirth, R. Preu, C. Wittwer, P. Schossig)

Coverillustration

netsyn, Joachim Würger
© Fraunhofer ISE

