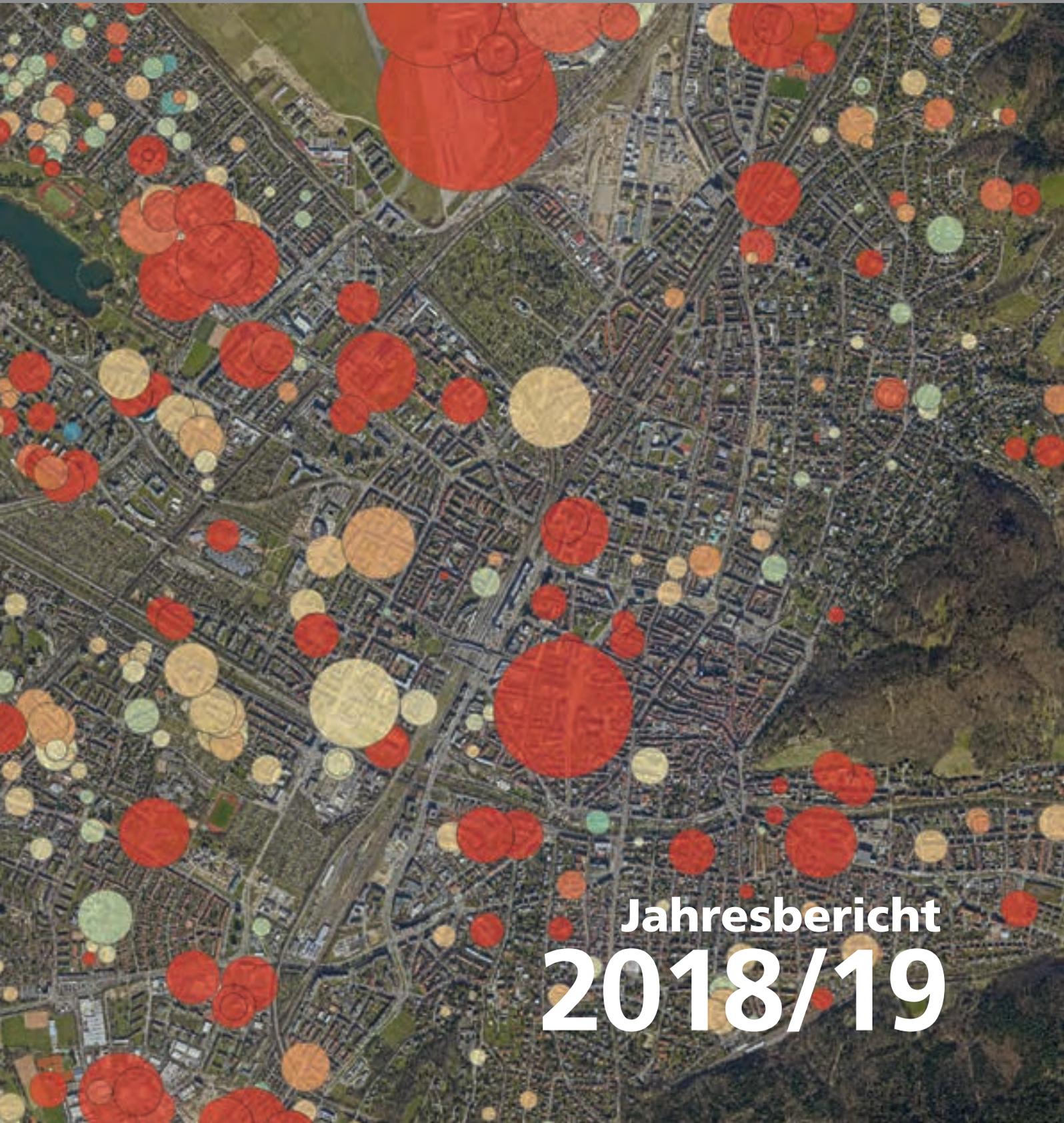




Fraunhofer

ISE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE



Jahresbericht
2018/19

Titelbild: Die farbigen Kreise in der Satellitenaufnahme des Stadtkerns von Freiburg im Breisgau markieren die Standorte von PV-Anlagen. Die Kreisgröße bildet die installierte Leistung der Anlagen ab. Die Farbgebung orientiert sich am Neigungswinkel der Anlagen. Dabei wird deutlich, dass größere Anlagen oft einen ähnlichen, eher kleineren Neigungswinkel haben. Das sind typischerweise Anlagen auf Industriegebäuden, die meist flachere Dächer haben. Kleinere PV-Anlagen auf Wohnhäusern hingegen zeigen heterogenere Neigungswinkel. Die Varianzen bei Größe, Neigungswinkel und auch bei der Ausrichtung führen dazu, dass die Anlagen im Tagesverlauf unterschiedliche Mengen Strom erzeugen. Für Netzbetreiber ist es wichtig, so genau wie möglich zu wissen, wann welche Menge Strom aus den PV-Anlagen ins Netz eingespeist wird. Im Energiesystem der Zukunft wird durch die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr das Zusammenspiel einzelner Technologien komplexer und ein hochaufgelöster Überblick zur Energiebereitstellung und -nutzung daher immer wichtiger. Das Fraunhofer ISE arbeitet im Rahmen seiner zahlreichen Digitalisierungsprojekte daher unter anderem daran, moderne Prognosemethoden für Energiegewinnung und -verbrauch sowie anwenderfreundliche Steuerungswerkzeuge zu entwickeln.

Jahresbericht
2018/19

VORWORT

Wir können auf ein erfolgreiches Jahr 2018 zurückblicken. Sowohl bei der Finanzierung des Instituts als auch bei den Mitarbeitenden verzeichnen wir ein leichtes Wachstum.

Das gesellschaftliche Großprojekt Energiewende, dem wir uns verpflichtet sehen, rückt immer stärker in seine zweite Phase, in der die Kopplung verschiedener Sektoren relevant wird. Neben der fortschreitenden Technologieentwicklung im Bereich »Photovoltaik« verstärkt sich dementsprechend deutlich die Nachfrage nach den umfassenden Kompetenzen im Bereich »Energietechnologien und -systeme«, in denen das Institut auch über jahrzehntelange Erfahrung verfügt. Technologien für die systemische Integration der Erneuerbaren sowie für die Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr stehen zunehmend mehr im Fokus. Vor diesem Hintergrund haben wir uns im vergangenen Jahr intensiv mit der perspektivischen Entwicklung des Fraunhofer ISE auseinandergesetzt und daraus eine Geschäfts- und Standortentwicklung für das Institut formuliert, die den Titel »Technologien und Systemlösungen für die globale Energiewende« trägt und aus der wir auch die notwendige bauliche Entwicklung in naher Zukunft ableiten (s. Seite 20).

In diesem Papier zur Geschäftsentwicklung des Fraunhofer ISE haben wir auch Trendthemen identifiziert, die auf unsere Arbeit im Kontext der Transformation des Energiesystems maßgeblichen Einfluss haben. Dazu gehört die Digitalisierung, der wir in diesem Jahresbericht ein besonderes Augenmerk widmen (s. Seite 22). Wir haben die FuE-Projekte mit Digitalisierungsanteil für Sie mit einem Symbol  markiert. Auch die weiteren Trendthemen – Sektorenkopplung, Nachhaltige Mobilität, Materialengineering und Ressourceneffizienz sowie Innovative Fertigungsverfahren – werden wir sukzessive im Kontext der Außendarstellung akzentuieren.

Ein Highlight im Bereich »Photovoltaik« war im Juli die Einweihung unserer Technologieplattform »PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center«, die wir nach einem Brand im Februar 2017 komplett neu aufbauen mussten. Wir sind

sehr froh, mit diesem einzigartigen Dienstleistungszentrum als zentraler Impulsgeber für den Innovationstransfer in der gesamten Wertschöpfungskette der Photovoltaik wieder operativ zu sein. Das »SiM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center« kann auf zehn Jahre erfolgreiche Arbeit zurückblicken, dazu zählt die Ausgründung von NexWafe für die Markteinführung einer neuen disruptiven Wafertechnologie ebenso wie die Materialentwicklung für höchste Effizienzen bei multikristallinen Siliciumsolarzellen.

Ein wichtiges Instrument für die strategische Ausrichtung der FuE-Themen des Fraunhofer ISE sind die Strategie-Audits. 2018 haben wir unsere Photovoltaik-Technologien einem Audit unterzogen und wertvolle Rückmeldungen für die weitere Orientierung erhalten. Jenseits der Technologieentwicklung bemühen wir uns aktuell – im Schulterschluss mit deutschen und europäischen Forschungs- und Industriepartnern – um die Wiederansiedlung einer PV-Produktion in Europa, für den Erhalt der Technologiesouveränität und Innovationsfähigkeit in dieser so wichtigen Schlüsselbranche Energie. Ein in diesem Zusammenhang wichtiger Aspekt ist die Berücksichtigung und frühe Einbindung von Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz im Zuge des weiteren Aus- und Aufbaus eines nachhaltigen Energiesystems.

Im Bereich »Energietechnologien und -systeme« haben wir in Anpassung an die Marktentwicklungen unsere Geschäftsfelder neu sortiert. So wurde die Niedertemperatur-Solarthermie dem umbenannten Geschäftsfeld »Energieeffiziente Gebäude« beigefügt und im Geschäftsfeld »Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse« die industriellen Anwendungen der Solarthermie berücksichtigt. Die umfassenden Technologien für zentrale und dezentrale Stromnetze haben wir zusammengefasst im Geschäftsfeld »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme«. Die im Vorjahr angekündigte strategische Ausweitung unserer FuE-Arbeiten bei elektrischen Speichern von Batteriesystemen auch auf die Zellebene hat nun ihren Platz im Geschäftsfeld »Wasserstofftechnologien und Elektrische Speichersysteme« gefunden. Der geplante

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



Aufbau eines mit Bundes- und Landesmitteln geförderten neuen »Kompetenzzentrums Batterien und Energiespeichersysteme«, in Kooperation mit den Partnern Fraunhofer-Institut für Kurzzeiddynamik EMI und VDE Renewables GmbH, nimmt Fahrt auf. An dem hierfür vorgesehenen neuen Standort in Freiburg werden 2019 die baulichen Maßnahmen sowie Umzug und Neuaufbau der relevanten technischen Ausstattung vorgenommen.

Wärmepumpen sind eine Schlüsseltechnologie für den Erfolg der Energiewende im Wärmesektor. Wir hatten im vergangenen Jahr die Chance, im Rahmen der führenden Fachmesse Chillventa eine Sonderpräsentation zum Potenzial der Wärmepumpe und den aktuellen Herausforderungen zu gestalten. Grundlage dafür war die langjährige Erfahrung des Fraunhofer ISE in der Wärmepumpentechnologie auf der gesamten Wertschöpfungskette, von der Entwicklung von Materialien und Komponenten gemeinsam mit Partnern und Kunden aus Industrie und Forschung, über Feldtests und Prüfungen bis zur Betrachtung der Geräte im Gesamtenergiesystem. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt ist der Einsatz umweltfreundlicher Kältemittel wie Propan in Wärmepumpen.

Die Neuauflage der Fraunhofer ISE Studie zu Stromgestehungskosten, inklusive Marktszenarien bis 2035, zeigt deutlich, dass die Gestehungskosten für Strom aus erneuerbaren Energien kontinuierlich sinken und kein Hindernis für eine CO₂-freie Stromerzeugung mehr sind. Die Stromgestehungskosten neu errichteter Photovoltaikanlagen und Onshore-Windenergieanlagen liegen an günstigen Standorten bereits heute niedriger als diejenigen neuer fossiler Kraftwerke und dieser Trend wird sich weiter fortsetzen.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat das Fraunhofer ISE gemeinsam mit Partnern eine Studie zum Gigawatt-Potenzial der Elektrolyse erarbeitet: »Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme«. Sie zeigt

auf, wie die notwendigen industriellen Fertigungskapazitäten für Elektrolyseure in den nächsten Jahren aufgebaut werden können. Allein für Deutschland wird bis 2050 eine installierte Anlagenleistung im zwei- bis dreistelligen Gigawattbereich prognostiziert, unter der Maßgabe, dass die Klimaschutzziele der Bundesregierung erreicht werden.

Im Sommer 2018 erfolgte durch das Präsidium der Fraunhofer-Gesellschaft die Genehmigung des Cluster of Excellence »Integrated Energy Systems«. Gemeinsam mit den weiteren Kerninstituten Fraunhofer IEE und Fraunhofer ISI sowie weiteren Partnerinstituten werden darin ab 2019 zentrale Fragestellungen für eine erfolgreiche Energiesystemtransformation übergreifend bearbeitet.

Im Herbst konnten wir uns gemeinsam mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg über den großen Erfolg beim Wettbewerb der Exzellenzstrategie freuen. Das Fraunhofer ISE ist aktiv an einem der beiden Exzellenzcluster – »livMatS: Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems« – beteiligt.

Unseren Kuratoren, Auditoren, Stipendiengebern, Ansprechpartnern und Förderern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene und bei den Projektträgern sowie unseren Projektpartnern danken wir herzlich für die Unterstützung und Förderung des Fraunhofer ISE sowie für die gute Zusammenarbeit. Wir freuen uns auf die weitere gemeinsame Arbeit im Sinne einer konsequenten Umsetzung der Energiewende in Deutschland und global – mit dem Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien sowie des Erhalts der deutschen und europäischen Technologiesouveränität auf diesem Gebiet.

Handwritten signature of Prof. Dr. Hans-Martin Henning in black ink.

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Handwritten signature of Dr. Andreas Bett in black ink.

Dr. Andreas Bett

LEITBILD DES FRAUNHOFER ISE

VISION

Die Sicherung der Lebensgrundlage heutiger und zukünftiger Generationen sowie der Erhalt unserer natürlichen Umwelt sind unser Antrieb.

Mit unseren richtungsweisenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nehmen wir international eine führende Rolle im Bereich erneuerbarer Energiesysteme und -technologien ein. So leisten wir einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige, wirtschaftliche, sichere und sozial gerechte Energieversorgung weltweit – hin zur ausschließlichen Nutzung von erneuerbaren Energien.

MISSION

Wir betreiben angewandte Energieforschung. Durch herausragende Forschungsergebnisse, erfolgreiche Projekte mit Industriepartnern, Firmenausgründungen und globale Kooperationen gestalten wir die Transformation der Energieversorgung weltweit.

Originäre Ideen setzen wir gemeinsam mit Unternehmen in Innovationen um – zum Wohl der Gesellschaft und zur Stärkung der deutschen und europäischen Wirtschaft. Durch unseren technologie- und systemorientierten Ansatz unterstützen wir unsere Kunden bis zur industriellen Umsetzung und erfolgreichen Marktimplementierung. Unsere wissenschaftlichen Arbeiten reichen von der Materialforschung bis zur Systemintegration.

LEITSÄTZE

Mitarbeitende und Zusammenarbeit

Der Erfolg des Fraunhofer ISE basiert auf dem Wissen, der Begeisterung und der Vielfältigkeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Wir legen großen Wert auf deren fachliche Ausbildung und persönliche Weiterentwicklung und arbeiten aktiv daran, Chancengleichheit zu erreichen. Durch flexible Arbeitsbedingungen unterstützen wir die Vereinbarkeit von Beruf und Privatleben. Unsere Zusammenarbeit basiert auf Vertrauen und gegenseitiger Wertschätzung und ist geleitet von Respekt und Verantwortung. Durch eine transparente und kooperative Institutskultur fördern wir dieses Vertrauen sowie Motivation und Selbstbestimmung.

Nachhaltigkeit

Bei der Erfüllung unserer Aufgaben wissen wir um unsere Verantwortung gegenüber der Gesellschaft und der natürlichen Umwelt. Wir orientieren uns an den Grundsätzen einer nachhaltigen Entwicklung. Sie sind für uns integraler Bestandteil unserer Ziele in Forschung und Entwicklung sowie unserer internen Abläufe. Die Schonung von Ressourcen durch geschlossene Stoffkreisläufe ist für uns ein wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung.

Kunden

Unsere Forschung richten wir am Bedarf unserer Kunden aus. Wir gehen auf die Kunden zu, verstehen ihre Herausforderungen und entwickeln gemeinsam Lösungen für ihren langfristigen Erfolg. Dabei profitieren unsere Kunden von unserer Vorlaufforschung und Infrastruktur. Wir stehen für eine professionelle und zielgerichtete Arbeitsweise. Mit unseren Kunden pflegen wir einen vertrauensvollen und verlässlichen Umgang.

Wir schätzen dauerhafte Partnerschaften, die auf gegenseitigem Respekt und Integrität basieren.

Wissenschaft

Wir streben nach wissenschaftlicher Exzellenz. Die Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis ist für uns eine Selbstverständlichkeit. Wir veröffentlichen unsere wissenschaftlichen Ergebnisse in renommierten Zeitschriften, präsentieren sie weltweit auf Konferenzen, sind in Gremien aktiv und melden Patente an.

Wir kooperieren mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg sowie weiteren nationalen und internationalen Hochschulen und Instituten. Wir engagieren uns in der akademischen Lehre und tragen zur wissenschaftlichen Ausbildung bei, indem wir Arbeiten von Studierenden und Promovierenden initiieren und betreuen.

Qualität und Prozesse

Wir haben den Anspruch, qualitativ hochwertige Ergebnisse zu liefern. Unsere internen Prozesse optimieren wir fortwährend im Sinne eines wirksamen und effizienten Einsatzes von Ressourcen. Unser Qualitätsmanagement unterliegt regelmäßigen externen Audits und ist nach internationalen Standards zertifiziert.

Vernetzung

Gemeinsam mit unseren Schwesterinstituten in der Fraunhofer-Gesellschaft gestalten wir die Energiewende. Wir pflegen eine enge Vernetzung mit Akteuren in nationalen und internationalen Märkten sowie Kooperationen mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft weltweit. Die Mitwirkung in Verbänden und Gremien hilft uns bei der Ausrichtung unserer Forschungsschwerpunkte. Die aktive Einbeziehung der Gesellschaft und die Beteiligung an der politischen Diskussion ermöglichen uns die Gestaltung der Zukunft im Sinne unserer Vision.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	2	PHOTOVOLTAIK	24
Leitbild	4	Silicium-Photovoltaik	26
Organisationsstruktur	8	 Maschinelles Lernen zur Materialbewertung in der PV-Produktion	28
Kuratorium	9	Epitaktisch gewachsene Siliciumwafer für höchsteffiziente Solarzellen	29
Die Fraunhofer-Gesellschaft	10	Passivierende Kontakte – eine zukünftige Schlüsseltechnologie	30
Außenstellen, Kooperationen, Vernetzung	11	Optimierte Unterzellen für Silicium-basierte Mehrfachsolarzellen	31
Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	12	III-V- und Konzentrator-Photovoltaik	32
Forschung im Auftrag der Kunden	14	 III-V-basierte Photovoltaik für »Internet of Things (IoT)« und Innenräume	34
Preise und Auszeichnungen	15	EyeCon-Konzentrator: Strom aus direktem und diffusem Sonnenlicht	35
Das Institut in Zahlen	16	Neuartige Photovoltaik-Technologien	36
Promotionen	18	 Organische Photovoltaik für das »Internet of Things (IoT)«	38
Standortentwicklung und Trendthemen	20	Rakelbeschichtung planarer Perowskitsolarzellen und Minimodule	38
 Energiewende – Paradigmenwechsel und Digitalisierung	22	 Von der Tandem-Rekordzelle zur Ertragsanalyse	39
		Photovoltaische Module und Kraftwerke	40
		Kleben statt Lötten – schonende Verschaltungstechnologie für Solarzellen	42
		 Maximale Erträge und höchste Zuverlässigkeit mit bifazialen PV-Modulen	43

**ENERGIETECHNOLOGIEN
UND -SYSTEME**
44
Energieeffiziente Gebäude
46

Neue, architektonisch attraktive Solarthermie-Konzepte 48

 Nachhaltige Wärmeversorgung von Mehrfamilien-
häusern im Bestand 48

 Digitale Methoden für die energetische
Betriebsführung von Gebäuden 49

 Innovative Betriebsführung eines nahwärme-
versorgten Quartiers 49

Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse
50
 Digitalisierung transformiert Betrieb solarer
Turmkraftwerke 52

Effiziente Wärmeübertrager für Industrieprozesse 53

**Wasserstofftechnologien und Elektrische
Energiespeicher**
54

 Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stapeln
Methanol aus Prozessgasen der Stahlindustrie 57

 Wasserstoffeinspeisung: Teil von Elektrolyse-
Geschäftsmodellen 58

Wasserelektrolyse: Potenzial für eine Gigawatt-Industrie 59

 Umweltfreundliche Zink-Ionen-Batterie der nächsten
Generation 60

 Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher zur Pufferung
von Lastspitzen 60

 PV-Batterie-Inselnetze: Simulation, Auslegung,
Qualitätssicherung 61

 Innovative Photovoltaik-DC-Ladeinfrastruktur mit
Pufferspeicher 61

Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme
62

Neues Laborzentrum nimmt Betrieb auf 64

 Anforderungen an intelligente Netze 65

Stabilisierung von Mittelspannungsverteilnetzen 66

 Hybrider Wechselrichterregler für den Netz-
und Inselbetrieb 66

 Integrales Netzengpassmanagement im Stromnetz 67

 Entwicklung von Smart-City-Technologien in Reallaboren 67

AKKREDITIERTE LABORS
68

CalLab PV Cells 69

CalLab PV Modules 70

TestLab PV Modules 71

TestLab Solar Façades 72

TestLab Solar Thermal Systems 73

TestLab Heat Pumps and Chillers 74

TestLab Power Electronics 75

FuE-INFRASTRUKTUR
76

Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen 77

 Zentrum für Materialcharakterisierung und
Gebrauchsdaueranalyse 78

Zentrum für Optik und Oberflächenforschung 79

Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien 80

Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme 81

 Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und
synthetische Kraftstoffe 82

 Zentrum für Leistungselektronik und
nachhaltige Netze 83

SiM-TEC – Silicon Material Technology Evaluation Center 84

PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center 85

Module-TEC – Module Technology Evaluation Center 86

Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center 87

Impressum **88**

Bildnachweise 89



ORGANISATIONSSTRUKTUR

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich neben Business Administration, Facility Management und Stabsstellen in die beiden wissenschaftlichen Bereiche »Photovoltaik« sowie »Energietechnologien und -systeme«.

In der Außendarstellung operieren wir zudem mit marktorientierten Geschäftsfeldern:

Photovoltaik

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

Energietechnologien und -systeme

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

In beratender Funktion wird das Fraunhofer ISE von langjährigen Begleitern und erfahrenen Experten der Solarbranche unterstützt: Prof. Dr. Adolf Goetzberger (Institutsgründer und Institutsleiter 1981–1993), Prof. Dr. Joachim Luther (Institutsleiter 1993–2006), Prof. Dr. Volker Wittwer (stellvertretender Institutsleiter 1997–2009) und Prof. Dr. Eicke R. Weber (Institutsleiter 2006–2016).

V.l.n.r.: Dr. Harry Wirth, Dr. Peter Schossig, Jochen Vetter, Karin Schneider, Dr. Ralf Preu, Dr. Olivier Stalter, Dr. Alexandra Heßling, Dr. Christopher Hebling, Dr. Andreas Bett, Prof. Dr. Stefan Glunz, Prof. Dr. Hans-Martin Henning.

Institutsleitung

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

Dr. Christopher Hebling | Telefon: +49 761 4588-5195
Dr. Peter Schossig | Telefon: +49 761 4588-5130
Dr. Olivier Stalter | Telefon: +49 761 4588-5467

Verwaltungsleitung – Business Administration

Dr. Alexandra Heßling | Telefon: +49 761 4588-5917

Verwaltungsleitung – Facility Management

Jochen Vetter | Telefon: +49 761 4588-5214

Presse und Public Relations

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

KURATORIUM

Vorsitzender

Burkhard Holder

VDE Renewables GmbH, Alzenau

Stellvertretender Vorsitzender

Dr. Hubert Aulich

SC Sustainable Concepts GmbH, Erfurt

Mitglieder

Dr. Klaus Bonhoff

NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, Berlin

Ullrich Bruchmann

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin

Ministerialdirigent Martin Eggstein

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

Dipl.-Ing. Daniel Etschmann

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

Dipl.-Ing. Helmut Jäger

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus

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

Sylvère Leu

Meyer Burger Technology AG, Gwatt, Schweiz

Dr. Norbert Pralle

Ed. Züblin AG, Stuttgart

Dr. Klaus-Dieter Rasch

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

Prof. Dr. Leonhard Reindl

Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

Dipl.-Ing. Thomas Speidel

ads-tec GmbH, Nürtingen

Prof. Dr. Frithjof Staiß

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

Prof. Andreas Wagner

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE (Stand: 31.12.2018).

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 26 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,5 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als 2,1 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

AUSSENSTELLEN, KOOPERATIONEN, VERNETZUNG

1

Neben dem Hauptsitz in Freiburg unterhält das Fraunhofer ISE drei Außenstellen – eine davon gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Halle, eine andere mit dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB in Freiburg. Das Institut ist an zwei internationalen Kooperationen direkt beteiligt und unterhält Memorandums of Understanding mit rund 51 Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Organisationen weltweit. Unter anderem ist es Mitglied im Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE), der European Research Alliance (EERA), der European Technology and Innovation Platform (ETIP) und der Association of European Renewable Energy Research Centres (EUREC). Gemeinsam mit dem National Renewable Energy Laboratory NREL in USA und dem National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST in Japan bildet es die Global Alliance of Solar Research Institutes (GA-SERI).

Außenstandorte des Fraunhofer ISE

- » Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter LSC in Gelsenkirchen: Entwicklung von transparenten Elektroden auf der Basis von Nanodrähten und Messtechnik für die Photovoltaik
- » Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle/Saale: Kristallisationstechnologie (CSP-LKT), Recycling von PV-Modulen
- » Fraunhofer-Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM, Freiberg: Herstellung von kristallinen Werkstoffen und Vereinzelung des hergestellten Grundmaterials

Internationale Kooperationen

- » Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE, Boston, USA und CFV Solar Test Laboratory in Albuquerque, New Mexico
- » Fraunhofer Chile Research – Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET), Santiago, Chile: Solare Stromerzeugung, Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme

Fraunhofer-Allianz Energie

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

Weitere Vernetzung in der Fraunhofer-Gesellschaft

- » Fraunhofer-Allianzen Batterien, Bau, Space, SysWasser
- » Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
- » Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS
- » Fraunhofer-Netzwerke Elektrochemie, Energiespeichersysteme und Netze, Intelligente Energienetze, Nachhaltigkeit, Windenergie
- » »Morgenstadt-Initiative« der Fraunhofer-Gesellschaft

Leistungszentrum Nachhaltigkeit in Freiburg

Das 2015 gegründete transdisziplinäre Forschungsnetzwerk besteht aus der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und den fünf Fraunhofer-Instituten vor Ort. Im Mittelpunkt stehen Forschung und Lehre zu Themen der Nachhaltigkeit sowie die Entwicklung innovativer Produkte und Dienstleistungen gemeinsam mit Unternehmen aus der Region. Den ingenieurwissenschaftlichen Kern des Leistungszentrums bildet das »Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH)« an der Universität Freiburg mit seinen Schwerpunkten Nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz.

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

DAS FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

Das 1981 in Freiburg im Breisgau gegründete Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ist mit 1266 Mitarbeitenden (600 Vollzeitäquivalent) das größte europäische Solarforschungsinstitut.

Das Fraunhofer ISE setzt sich für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf der Basis erneuerbarer Energien ein. Im Rahmen der Forschungsschwerpunkte Energieeffizienz, Energiegewinnung, Energieverteilung und Energiespeicherung schafft es technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung, sowohl in Industrie- als auch in Schwellen- und Entwicklungsländern. Das Institut finanziert sich neben einer Grundfinanzierung über die Fraunhofer-Gesellschaft zu rund 87 % durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. Das Fraunhofer ISE ist nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert.

Zusammen mit Kunden und Partnern aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft entwickelt das Fraunhofer ISE konkret umsetzbare technische Lösungen. In seinen fünf Geschäftsfeldern erforscht und entwickelt es Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren. Das Institut bietet auch Prüf- und Zertifizierungsleistungen in seinen sieben akkreditierten Test- und Kalibrierlabors an. Basis der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Fraunhofer ISE ist eine hochmoderne, technische Infrastruktur, die sich in stärker grundlagenorientierte Forschungs- und Entwicklungszentren sowie produktionsnahe Technologieevaluationszentren gliedert.

Geschäftsfelder

Die beiden großen organisatorischen Bereiche des Fraunhofer ISE – »Photovoltaik« sowie »Energietechnologien und -systeme« – bedienen fünf marktorientierte Geschäftsfelder:

- » Geschäftsfeld Photovoltaik
 - » Silicium-Photovoltaik
 - » III-V- und Konzentrator-Photovoltaik
 - » Neuartige PV-Technologien
 - » Photovoltaische Module und Kraftwerke
- » Geschäftsfeld Energieeffiziente Gebäude
- » Geschäftsfeld Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse
- » Geschäftsfeld Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher
- » Geschäftsfeld Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

Serviceleistungen in akkreditierten Labors

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

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



Angebotspektrum

Durch seine Forschungsaktivitäten entwickelt das Fraunhofer ISE neue Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen und optimiert bestehende. Dafür findet das Institut zukunftsweisende technische Lösungen bzw. transferiert Technologien aus Wissenschaft und Forschung in Wirtschaft und Gesellschaft. Als Partner der Industrie orientiert es sich an den Bedürfnissen der Kunden und leistet einen Beitrag zu deren wirtschaftlicher Wertschöpfung. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen ohne eigene FuE-Abteilung erhalten durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE Zugang zu hochleistungsfähiger Laborinfrastruktur und exzellenten Forschungsleistungen.

Das Institut setzt FuE-Projekte auf unterschiedlichen Stufen im Lebenszyklus von Technologien um. Je nach Auftrag und Bedarf des Kunden oder Reifegrad einer Technologie bietet das Institut unterschiedliche Leistungen an:

-  Neues Material / Verfahren
-  Prototyp / Kleinserie
-  Patent / Lizenz
-  Software / Anwendung
-  Messtechnische Analyse / Qualitätssicherung
-  Beratung / Planung / Studie
-  Marktnahe Forschungsdienstleistungen (Messen, Prüfen, Monitoring)

FuE-Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE zeichnet sich durch seine hervorragende technische Infrastruktur aus. Über 16 000 m² Laborfläche mit modernen Geräten und Anlagen sind Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Die FuE-Infrastruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich in acht Laborzentren sowie vier produktionsnahe Technologieevaluationszentren:

- » Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- » Zentrum für neuartige PV-Technologien
- » Zentrum für Optik und Oberflächen
- » Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse
- » Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien
- » Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme
- » Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe
- » Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- » SiM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center
- » PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center
- » Module-TEC – Module Technology Evaluation Center
- » Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center

FORSCHUNG IM AUFTRAG DER KUNDEN

Forschung im Auftrag von Kunden in Wirtschaft, Wissenschaft und Politik ist das primäre Tätigkeitsfeld des Fraunhofer ISE. Dabei arbeiten wir mit zahlreichen und unterschiedlichen Projektpartnern zusammen. Für kleine und mittlere Unternehmen ersetzen wir mitunter die eigene Forschungsabteilung. Großkonzerne profitieren von unserem spezifischen Know-how und unserer hervorragenden technischen Ausstattung. Wir beraten aber auch Städte, Kommunen und Bildungseinrichtungen und führen z. B. Machbarkeitsstudien und Modellierungen durch. Je nach den Anforderungen unserer Kunden bieten wir ihnen passgenaue Lösungen an.

Im Zentrum stehen dabei vertraglich vereinbarte Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit unseren Partnern aus Wirtschaft und Forschung. Als größtes Solarforschungsinstitut in Europa und mit über 30jähriger Erfahrung sind wir zudem in der Branche, in Politik und Verbänden gut vernetzt, so dass unsere Kunden auch über strategische Partnerschaften und Innovationscluster von der Zusammenarbeit mit uns profitieren.

Von der ersten Idee zum marktreifen Produkt

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

Wir entwickeln Prototypen und Kleinserien von neuen Komponenten und Geräten, übertragen die Herstellungsverfahren in den Produktionsmaßstab und führen messtechnische

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

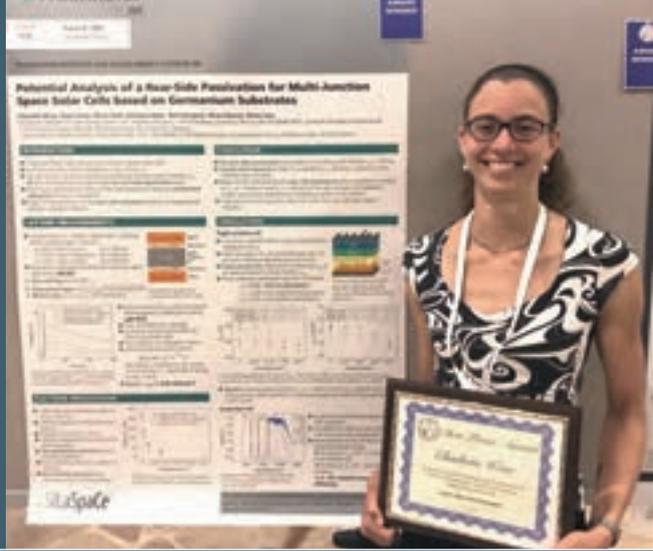
Expertise und Erfahrung

Nach über 30 Jahren im Markt verfügt das Fraunhofer ISE über profunde Marktkenntnis und außerordentliches fachliches Know-how. Ein wichtiger Vorteil des Instituts ist auch die erstklassische technische Infrastruktur. Auf über 16 000 m² stehen unseren Kunden modernste Labore und Anlagen über die ganze Bandbreite unserer Geschäftsfelder zur Verfügung.

Für die erfolgreiche Durchführung von FuE-Projekten ist neben der fachlichen Kompetenz auch zielorientiertes Arbeiten und zuverlässiges Projektmanagement mit eingespielten Prozessen erforderlich. Zudem bieten wir garantierte Vertraulichkeit und professionelle Vereinbarungen hinsichtlich der Nutzungsrechte von Patenten und Lizenzen. Um uns stets optimal an den Anforderungen des Marktes auszurichten, ist uns die Qualitätssicherung unserer Arbeit ein wichtiges Anliegen. Dazu führen wir jedes Jahr externe Audits durch. Zudem befragen wir regelmäßig unsere Kunden. Wir sind stolz, und es ist uns ein Ansporn, stets hohe Zufriedenheitswerte von unseren Projektpartnern widergespiegelt zu bekommen.



PREISE UND AUSZEICHNUNGEN



Dr. Christoph Siedle, Stefan Reichert, Benjamin Stickan, Moritz Bader | 6. Zukunftspreis der Privaten Stiftung Ewald Marquardt für Wissenschaft und Technik | Arbeit »Universelle hochdynamische Umrichterregelung für ein- und dreiphasige Systeme im Netzparallel-, Insel- und unterbrechungsfreien USV-Betrieb« | 16.03.2018 | Bulzingen

Dr. Elmar Lohmüller | »BBr₃ Diffusion with Second Deposition for Laser-Doped Selective Emitters from Borosilicate Glass«, **Tim Niewelt** | »Taking Monocrystalline Silicon to the Ultimate Lifetime Limit«, **Dr. Florian Schindler** | »Towards the Efficiency Limits of Multicrystalline Silicon Solar Cells« | SiliconPV Awards 8. SiliconPV | 18.03.2018 | Lausanne, Schweiz

Dominik Noeren, Simon Bürer, Gerhard Stryi-Hipp | Best Poster Award | »Speicherkapazitäten & DSM-Potenziale von E-Carsharing-Flotten« | Lab2Reality | 12.04.2018 | Berlin

Juan Francisco Martínez Sánchez | Student Award | Präsentation »4-Terminal CPV Module Capable of Converting Global Normal Irradiance into Electricity« | 14. Internationalen CPV-Konferenz | 16. – 18.04.2018 | Puertollano, Spanien

Theresa Trötschler | Best Poster Award | »3D Grain Structure and Defect Analysis Based on Optical and PL Measurements of As-Cut-Wafers« | 10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells | 18.04.2018 | Sendai, Japan

Andreas Fell, Sebastian Meier, Malcolm Abbott, Keith Mcintosh | Best Poster Award | »Comprehensive Electro-Optical Device Simulation of Bifacial PERC and PERT Silicon Solar Cells Enabled by Interfacing SunSolve and Quokka3« | SNEC | 19. – 21.04.2018 | Shanghai, China

Dr. Frank Dimroth, Dr. Martin Hermle | GreenTec Award (2. Platz in der Kategorie »Energie«) | »Höchsteffiziente Solarzellen mit 18 % mehr Leistung« | 13.05.2018 | München

Marius Holst | Innovationspreis Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWW) | Masterarbeit »Technische Untersuchung des Abwärmenutzungspotenzials von Power-to-Gas-Anlagen« | 30.05.2018 | Salzgitter

Dr. Matthias Breitwieser | Innovationspreis Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband | Dissertation »Neues Verfahren für die Herstellung von Elektrolyten für Brennstoffzellen oder PEM-Elektrolyseure« | 30.05.2018 | Salzgitter

Dr. Charlotte Weiss | Best Poster Award Space PV Technologies | »Potential Analysis of a Rear-Side Passivation for Multi-Junction Space Solar Cells based on Germanium Substrates« | **Jonas Huyeng** | Best Poster Award Homojunction Devices and Technologies | »Advancements in the Utilization of Screen Printed Boron Doping Paste for High Efficiency Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cells« | WCPEC-7 | 10. – 15.06.2018 | Waikoloa, Hawaii, USA

Nicolas Carbonare | Scientific Paper Award | »Clustering the Occupant Behaviour in Residential Buildings: A Method Comparison« | IBPSA Germany/ BauSim Austria 2018 | 26.09.2018 | Karlsruhe

Monika Bosilj | 3. Platz Poster Award Biotechnologie | »Sustainable Hydrothermal Carbons for Biorefinery-related Catalysis« | N.I.C.E. Conference | 14. – 17.10.2018 | Nizza, Frankreich

Claudia Lisa Schilling | Robert-Mayer Nachwuchsförderpreis | Masterarbeit »Entwicklung hochreflektierender Kontaktschichten für III-V-Konzentratorsolarzellen« | 17. 10.2018 | Freiburg

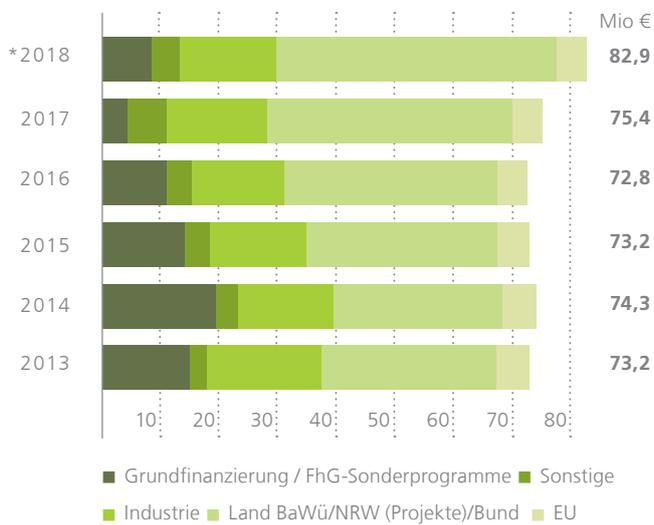
Thaddäus Weniger | Studienpreis Deutscher Verband des Gas- und Wasserfachs | Bachelorarbeit »Labortest einer Netzdienlichen BHKW-Regelung« | 23.10.2018

Lukas Wagner | 2. Platz Ideenwettbewerb »Energie-Campus« | Forschung zu Perowskitsolarzellen | Stiftung Energie und Klimaschutz | 23.11.2018

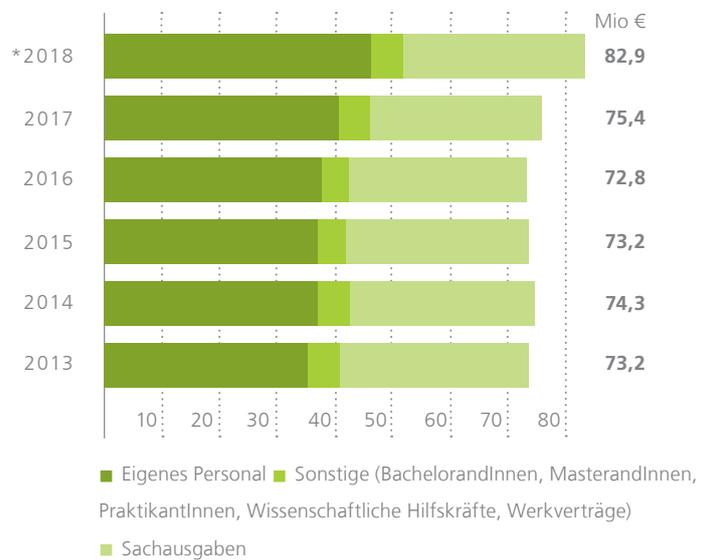
1 WCPEC-7 Best Poster Award Preisträgerin Dr. Charlotte Weiss.

DAS INSTITUT IN ZAHLEN

Entwicklung der Erträge**

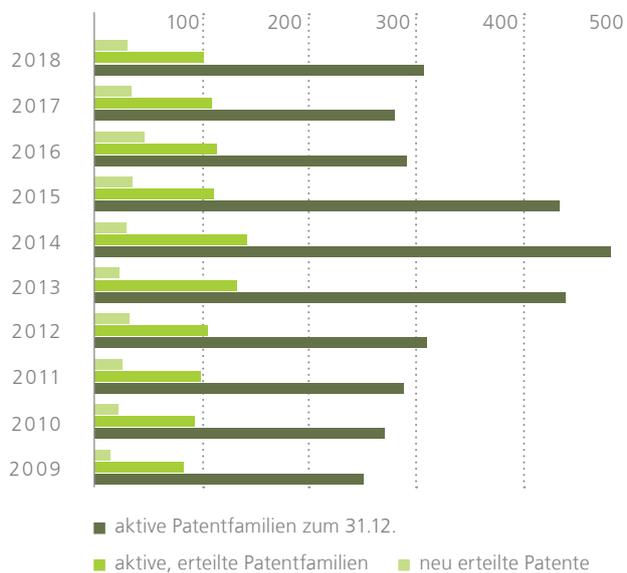


Entwicklung der Ausgaben**

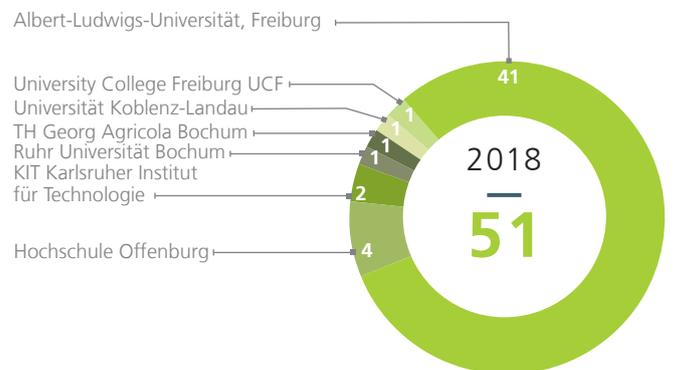


*vorläufig **ohne Investitionen – Der Gesamthaushalt 2018 (inklusive Investitionen) betrug 100,1 Mio €.

Patente

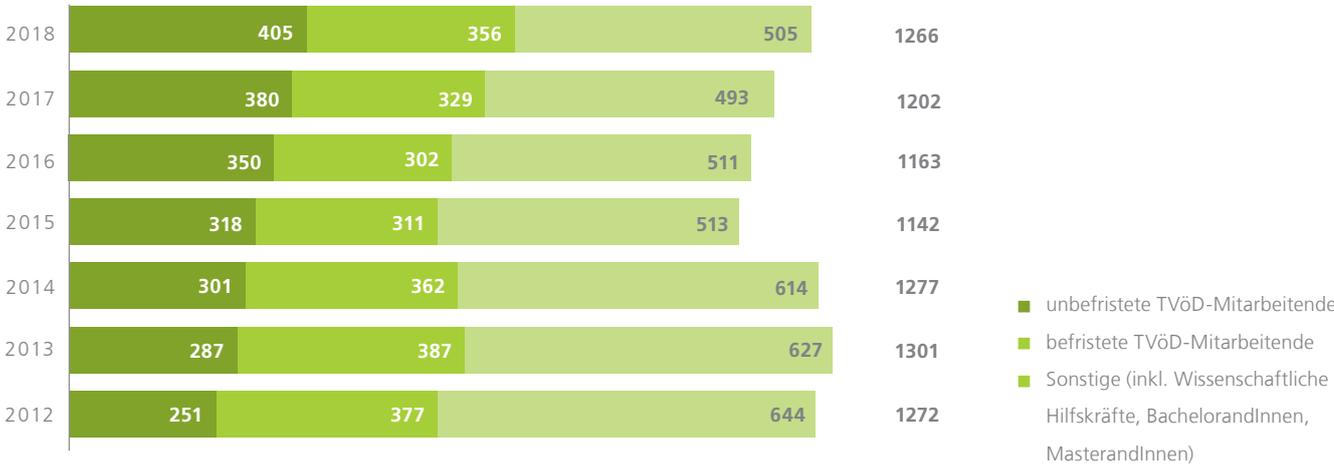


Lehrveranstaltungen

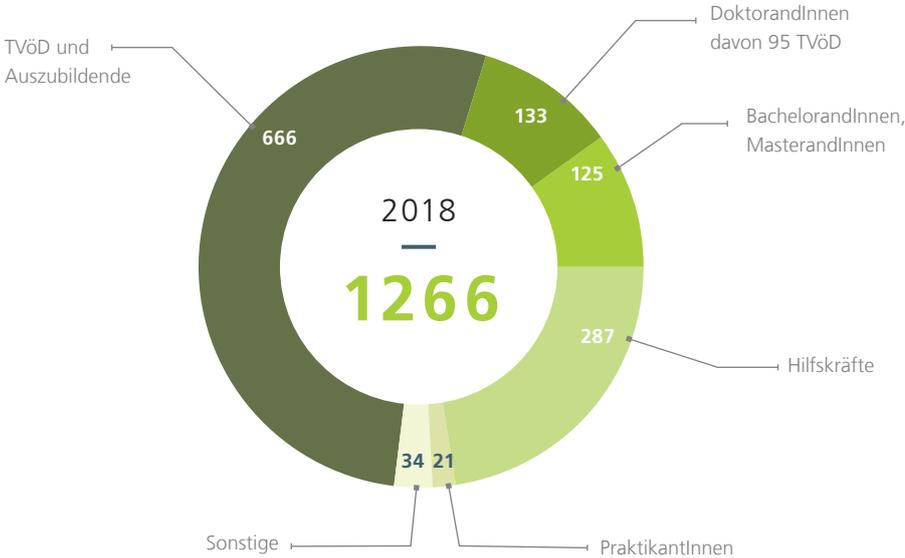


39 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des Fraunhofer ISE sind neben ihrer Forschungsarbeit auch in der Lehre tätig.

Entwicklung der Mitarbeiterzahlen



Mitarbeitende – Personalstruktur 2018



PROMOTIONEN

Shankar Bogati

»Development and Description of Photochromic Devices Prepared by Sputtering«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Marouane Boudhaim

»Optical and Thermal Performance of Complex Fenestration Systems in the Context of Building Information Modelling«
Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA), 2018

Mehmet Elci

»Smarte und Dezentrale Solare Fernwärme«
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018

Fabian Eltermann

»Validierung von Methoden für den Zuverlässigkeitsnachweis von Konzentratorsolarzellen«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Sebastian-Johannes Ernst

»Development and Characterization of Advanced Materials for Heat Transformation Applications«
Technische Universität Kaiserslautern, 2018

Torsten Geipel

»Electrically Conductive Adhesives for Photovoltaic Modules«
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2018

Raphael Hollinger

»Gepoolte PV-Heimspeicher zur Bereitstellung von Primärregelleistung«
Technische Universität Braunschweig, 2018

Noha Saad Hussein

»Effects of building refurbishment on a district energy system: Optimization of the deployment and operation of heat, power and sector coupling technologies«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Peter Jakob

»Verbesserungspotentiale für Silikonoptiken in der konzentrierenden Photovoltaik«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Manuel Lämmle

»Thermal management of PVT collectors: development and modelling of highly efficient glazed, flat plate PVT collectors with low emissivity coatings and overheating protection«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Sebastian Meier-Meybrunn

»Development and Characterization of p-type PERT Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018



Björn Müller

»Unsicherheiten von Ertragsprognosen für Photovoltaik-Kraftwerke unter besonderer Berücksichtigung langfristiger Variationen des Solarstrahlungs-Potenzials«
Universität Kassel, 2018

Sebastian Nold

»Techo-ökonomische Bewertung neuer Produktionstechnologien entlang der Photovoltaik-Wertschöpfungskette«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Emile Tabu Ojong

»Characterization of the Performance of PEM Water Electrolysis Cells operating with and without Flow Channels, based on Experimentally Validated Semi-empirical Coupled-Physics Models«
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2017

Malte Otromke

»Base Catalysed Hydrothermal Reformation of Kraft Lignin«
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018

Annika Spies

»Numerical Simulations and Advanced Characterization of Organic Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2018

Ursula Wittstadt

»Experimentelle und modellgestützte Charakterisierung von Adsorptionswärmeübertragern«
Technische Universität Berlin, 2018

Annie Zirkel-Hofer

»Enhanced dynamic performance testing method for line-concentrating solar thermal collectors «
Technische Universität Braunschweig, 2018

Frank Zobel

»Entwicklung des Float-Zone-Verfahrens zur Herstellung von Siliziumeinkristallen für solare Anwendungen«
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2018

¹ Ehrung der Promovierten im Rahmen der Jahresversammlung 2018 des Fraunhofer ISE: v. l n.r.: Shankar Bogati, Manuel Lämmle, Ursula Wittstadt, Sebastian Meier-Meybrunn, Andreas Lorenz (Promotion 2017), Emile Tabu Ojong, Björn Müller, Annie Zirkel-Hofer, Mehmet Elci.

STANDORTENTWICKLUNG UND TRENDTHEMEN

Frage: **Herr Henning, Herr Bett, Sie haben sich im vergangenen Jahr mit der Geschäfts- und Standortentwicklung des Fraunhofer ISE auseinandergesetzt. Vor welchem Hintergrund und mit welchen Schwerpunkten?**

Henning: Der Auslöser war tatsächlich, dass sich uns im unmittelbaren Campus-Umfeld die Chance bietet, die Standortentwicklung anzugehen. Gleichzeitig ist die künftige Ausrichtung der FuE-Themen des Fraunhofer ISE getrieben von unseren Energiesystemanalysen und Modellrechnungen zur Energiewende, inklusive der notwendigen Technologiepfade. Der Geschäftsplan orientiert sich also auch an den Fragen: Wie sieht ein zukünftiges nachhaltiges Energiesystem aus? Was sind Schlüsseltechnologien? Welche Technologien betreiben wir am Fraunhofer ISE und wo sollten wir noch einen stärkeren Fokus setzen? In der Zusammenschau all dieser Fragen geht es schließlich darum, die sich bietenden Chancen bestmöglich zu nutzen.

Bett: Fast alle Energiesystemszenerarien zeigen, dass die Photovoltaik neben Wind die wichtigste Säule der zukünftigen Energieversorgung sein wird. Aber auch Fragen der Flexibilisierung, der Sektorenkopplung spielen eine zentrale Rolle. Und wir brauchen auch weiterhin Kohlenwasserstoffe oder andere synthetisch mit erneuerbarem Strom hergestellte Stoffe, ein Thema, bei dem der Energieträger Wasserstoff und die Elektrolyse hohe Bedeutung haben. Dies sind alles Felder, in denen wir bereits arbeiten, aber für die wir perspektivisch unsere Infrastruktur ausweiten wollen.

Frage: **Der Geschäftsplan nennt fünf Trendthemen, die auf die Arbeit des Fraunhofer ISE einen wichtigen Einfluss haben und haben werden. Welche sind das?**

Bett: Das sind Digitalisierung, Sektorenkopplung, Nachhaltige Mobilität, Materialengineering und Ressourceneffizienz sowie Innovative Fertigungsverfahren. Dabei spielt die Digitalisierung in alle Themen hinein. Nehmen wir das Beispiel künftige Produktionstechnologie in der Photovoltaik, dort sind Digitalisierung und nachhaltige Fertigung die großen Treiber. Wenn

wir eine PV-Produktion in Europa haben wollen, spielt dabei die Digitalisierung eine entscheidende Rolle. Wir sprechen hier von der Vernetzung der Maschinen, von maschinellem Lernen, von Interaktion und der Vision einer voll automatisierten Produktion mit extrem guter Qualitätssicherung. Das sind Hightech-Entwicklungen, für die wir am Fraunhofer ISE gut aufgestellt sind.

Frage: **Hat das Trendthema Digitalisierung auch das Potenzial, neue Anwendungsfelder zu beschleunigen?**

Bett: Ja, wir werden eine stärkere Integration der Photovoltaik in unsere bebaute Umwelt sehen. Wir sprechen hier von »xPV«, von integrierter PV, bei der wir über die Betrachtung des einzelnen Moduls hinausgehen. Bislang stand die Zielsetzung der Kostenreduktion im Mittelpunkt, die in der Anwendung über großflächige Installation erreicht wurde. Für den massiven Ausbau an Photovoltaik müssen wir künftig aber auch technische Lösungen anbieten, die in unserer bebauten Umwelt platziert werden können. Das bedeutet, dass auch Themen wie Ästhetik, Akzeptanz durch die Bevölkerung mit zu berücksichtigen sind, dass über den reinen Energieertrag hinaus die Module flexibler gestaltet werden müssen. Im Fokus steht hierbei ein maximaler Energieertrag, der unter gegebenen Randbedingungen realisiert werden kann. Beispiele sind bauwerkintegrierte Photovoltaik, aber auch PV auf Straßen, in Autos, generell in der Mobilität und anderen Sektoren. Dafür wird smarte und flexible Fertigung benötigt, die es heute in der Photovoltaik noch nicht gibt.

Frage: **Die Rolle der Digitalisierung in der Energiewende war auch Schwerpunktthema der diesjährigen Jahrestagung des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien FVEE. Welche Aspekte wurden dort diskutiert?**

Henning: Digitalisierung ist nicht nur bei der Produktionstechnik für Photovoltaik, Batteriefertigung und andere Technologien wichtig, sondern auch für den Betrieb des Energiesystems. Themen sind dabei Prognosen für die



Erzeugung, die den Netzbetrieb beeinflussen, und auch für die Verteilung und den Transport der Energie werden datenbasierte Methoden wichtiger werden. Ganz zentral sind datenbasierte Verfahren für den Handel, den Vertrieb, den Energiemarkt insgesamt. Letztendlich entstehen im Kontext der Digitalisierung die neuen Geschäftsmodelle zur Vermarktung und zum Management von Energieflüssen. Und damit sind auch neue Akteure, bis hin zur Nachfrage- und Verbrauchsseite betroffen. In all diesen Segmenten befasst sich das Fraunhofer ISE mit Digitalisierungsaspekten. Ein vielleicht ganz anschauliches Beispiel ist eine jüngere Ausgründung des Instituts im Bereich der Gebäudetechnologien, die Firma mondas. Das Unternehmen befasst sich damit, in einer Cloud Daten von vielen gleichartigen gebäudetechnischen Anlagen zu sammeln, um über Big Data für einen optimierten Gebäudebetrieb zu lernen.

Frage: Das Fraunhofer ISE setzt sich stark für das Thema Photovoltaik-Produktion in Europa ein. Wie kann dieses Ziel erreicht werden?

Bett: Die rasante Entwicklung des weltweiten PV-Markts ist eine große Chance für die europäische Industrie. Neben den genannten Stichworten »smarte und flexible PV« für neue Anwendungsfelder sind es Nachhaltigkeitsziele, die Europa einen Innovationsvorsprung geben. Nachhaltigkeit muss im gesamten Lebenszyklus des Moduls, bei der Produktion sowie bei den Logistikkosten diskutiert werden. Bei den heute so niedrigen Produktionskosten werden die Logistikkosten und die damit verbundenen Emissionsfaktoren immer relevanter. Ebenso das Recycling der Module, also insgesamt die Kreislaufwirtschaft. Wir haben in Europa die hochwertige Produktionstechnik, um genau diese Themen zu adressieren. Wir haben jetzt die Chance, die Technologiesouveränität und die Innovationskompetenz für diesen so wichtigen Zukunftsmarkt in Europa zu erhalten und gleichzeitig einen wichtigen Beitrag für die Reduktion der CO₂-Emissionen zu leisten.

Frage: Die Fraunhofer-Allianz Energie hat ein Positionspapier zur Technologiesouveränität formuliert. Was ist die Botschaft an die Politik?

Henning: Die wichtige Botschaft ist, dass wir einerseits Klimaschutzziele haben, die prägend dafür sind, wohin sich die Bemühungen von Politik und Gesellschaft entwickeln. Was wir aber auch im Blick behalten sollten, ist das Thema Wettbewerbsfähigkeit. Das aus dem Energiewirtschaftsgesetz abgeleitete »Energiepolitische Dreieck« benennt die Themen Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit. Dabei ist es tatsächlich so, dass man mit dem Begriff Wirtschaftlichkeit im Sinne der niedrigsten Kosten für die Energiebereitstellung zu kurz springt. Wirft man den größeren Blick auf längerfristige Nachhaltigkeit, dann geht es auch darum, die Technologiekompetenz in Europa zu halten, um nicht in Abhängigkeit zu geraten. Im Englischen heißt der entsprechende Begriff tatsächlich ‚competitiveness‘ und meint über die Wirtschaftlichkeit hinaus auch Innovationskompetenz und Wettbewerbsfähigkeit. Und damit ist das Thema prädestiniert für Fraunhofer.

Frage: Herr Henning, Sie sind Sprecher der Allianz Energie und jetzt auch des neu geschaffenen Fraunhofer Clusters of Excellence Integrated Energy Systems INES. Was ist die Aufgabe des Clusters?

Mit Exzellenzclustern hebt Fraunhofer das Synergiepotenzial zwischen thematisch profilierten Einzelinstituten durch strategische Vernetzung. Ziel ist es, Themenfelder international hervorzuheben und in diesen gemeinsam Spitzenforschung zu betreiben. Dafür arbeiten mehrerer Fraunhofer-Institute langfristig in Clustern zusammen; dies geschieht im Rahmen strategischer Roadmaps für systemrelevante Innovationen.

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

ENERGIEWENDE – PARADIGMENWECHSEL UND DIGITALISIERUNG



»Die Energiewende – smart und digital«, so titelte die jüngste Jahrestagung des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien FVEE. Dort diskutierten Deutschlands außeruniversitäre Forschungseinrichtungen für erneuerbare Energien die vielen Facetten und Potenziale der als »Enabler« und gleichzeitig auch »Treiber« der Energiewende bezeichneten Digitalisierung. Sie spielt eine Schlüsselrolle bei der Lösungsfindung für Dezentralisierung und Flexibilisierung sowie für die effiziente Nutzung von Energie und Ressourcen.

Aufgrund der volatilen Stromerzeugung durch Photovoltaik und Wind bringt die Umsetzung der Energiewende einen Paradigmenwechsel des Versorgungsmodells mit sich. So wird die bedarfsgerechte Energiebereitstellung durch Großkraftwerke ersetzt durch ein System, in dem fortwährend ein Ausgleich erfolgt zwischen Bereitstellung und Nutzung durch ein komplexes Zusammenspiel aus zeitlich angepasster Energieerzeugung, der stärkeren Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr, dem temporären Einsatz flexibler Erzeugungsanlagen und von Speichern. Die Einbeziehung moderner Prognosemethoden für Erzeugung und Verbrauch ergänzt Organisation und Management dieses komplexer werdenden Systems. All dies ist schwer vorstellbar ohne die umfangreiche Nutzung von Techniken und Methoden der Digitalisierung.

Digitalisierung ist der »Enabler«, wenn es um die Beherrschung des komplexen Systems und des komplexen Zusammenspiels einer Vielzahl von technischen Komponenten im System und Beteiligten im Markt geht. Sie macht die effiziente, intelligente Nutzung von Infrastruktur und Hardware möglich. Digitalisierung ist der »Treiber«, wenn es darum geht, neue technische Möglichkeiten in die Anwendung zu bringen, neue Services zu bieten und neue Geschäftsmodelle zu eröffnen. Methoden und Anwendungsfelder für Digitalisierung erstrecken sich über alle Bereiche der Energieversorgung, von der Erzeugung über Netze, Handel und Vertrieb bis hin zu Verbrauch und Produktion.

Auch in der Energieforschung spielt die Digitalisierung eine zunehmend wichtige Rolle. Eine Basistechnologie für die Digitalisierung ist die Leistungselektronik. Das Smart Grid erfordert vernetzte Wechselrichtersysteme. Smarte Wechselrichter werden zu Schlüsselementen des zukünftigen elektrischen Energiesystems. Sie gleichen Strukturveränderungen im Stromnetz durch ein integrales Netzengpassmanagement aus. Kommunikation ist erforderlich für Netz, Markt und Anlagenbetrieb. So fragt ein zunehmend dezentrales Netzmanagement nach neuen Systemdienstleistungen für den Netzbetrieb. Simulation, Auslegung und Qualitätssicherung von dezentralen PV-Batterie-Inselnetzen basieren auf Digitalisierung. Batteriesysteme werden über smarte Wechselrichter gesteuert und machen einen erhöhten Autarkiegrad möglich. Auch die Betriebsführungsstrategien von Wasserstoffeinspeiseanlagen sind ohne Digitalisierung schwer denkbar.

In der Photovoltaikproduktion kann durch Verfahren der künstlichen Intelligenz die Produktqualität verbessert werden. So kann eine selbstlernende Bilderkennung die Solarzellen-Parameter vorhersagen. Ertragsanalysen für Zellen und Module werden durch maschinelles Lernen möglich. Bei der Batteriezellenproduktion können über digitale Zwillinge die Produktionsparameter verbessert werden.

Für Anwendungen im »Internet of Things (IoT)« werden Technologien entwickelt, die eine Integration von Energieversorgung und Datenkommunikation in einem Bauelement ermöglichen, mit hocheffizienten Solarzellen oder organischer PV als Energielieferant.

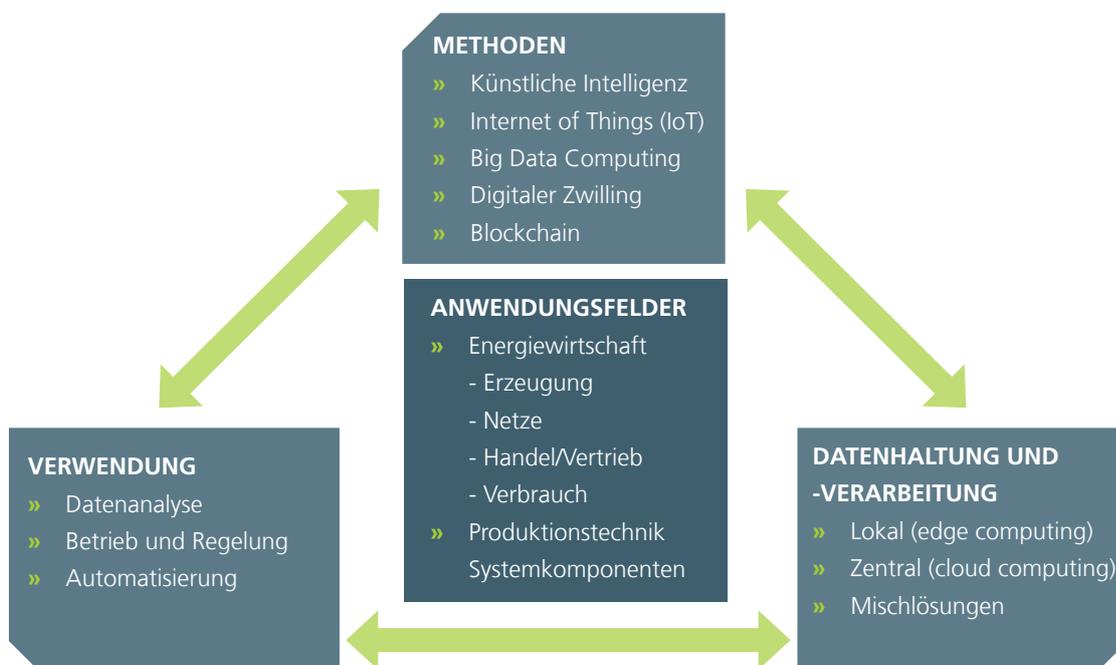
Bei der Gebäudeautomation hilft der »digitale Gebäudezwilling« (Building Information Model, BIM), anhand der Erfassung von Big Data, den technischen Gebäudebetrieb zu optimieren und damit die Anforderungen an Komfort und Energieeffizienz besser zu erfüllen. Der Betrieb von Wärmepumpen in vernetzten Systemen kann durch Digitalisierung optimiert werden, sowohl technisch, ökonomisch als auch ökologisch.

In der Solarthermie können mit maschinellem Lernen, auf der Basis langjähriger Wetterdaten, Fahrpläne für Kraftwerke optimiert werden.

Unabdingbar ist die Digitalisierung bei der Sektorenkopplung auf regionaler Ebene. So ist sie integraler Bestandteil beim Leuchtturmprojekt »EnStadt: Pfaff« in Kaiserslautern, wo unter Einbindung von Reallabors ein nachhaltiges Quartier für Technologie, Gesundheit und Wohnen auf dem Gelände des Nähmaschinenherstellers Pfaff entsteht. Das Fraunhofer ISE ist daran maßgeblich beteiligt.

Die Möglichkeiten, die Digitalisierung sowohl für die Technologieentwicklung als auch für die Sektorenkopplung aufzeigt, sind noch längst nicht ausgeschöpft. In vielen Bereichen steht die Entwicklung erst am Anfang. Und bei all dem spielen übergreifend auch IKT-Sicherheit und Resilienz des Energiesystems eine große Rolle. Im vorliegenden Fraunhofer ISE Jahresbericht haben wir kenntlich gemacht , bei welchen FuE-Themen, über die wir hier berichten, Digitalisierung eine maßgebliche Rolle spielt.

Dimensionen der Digitalisierung



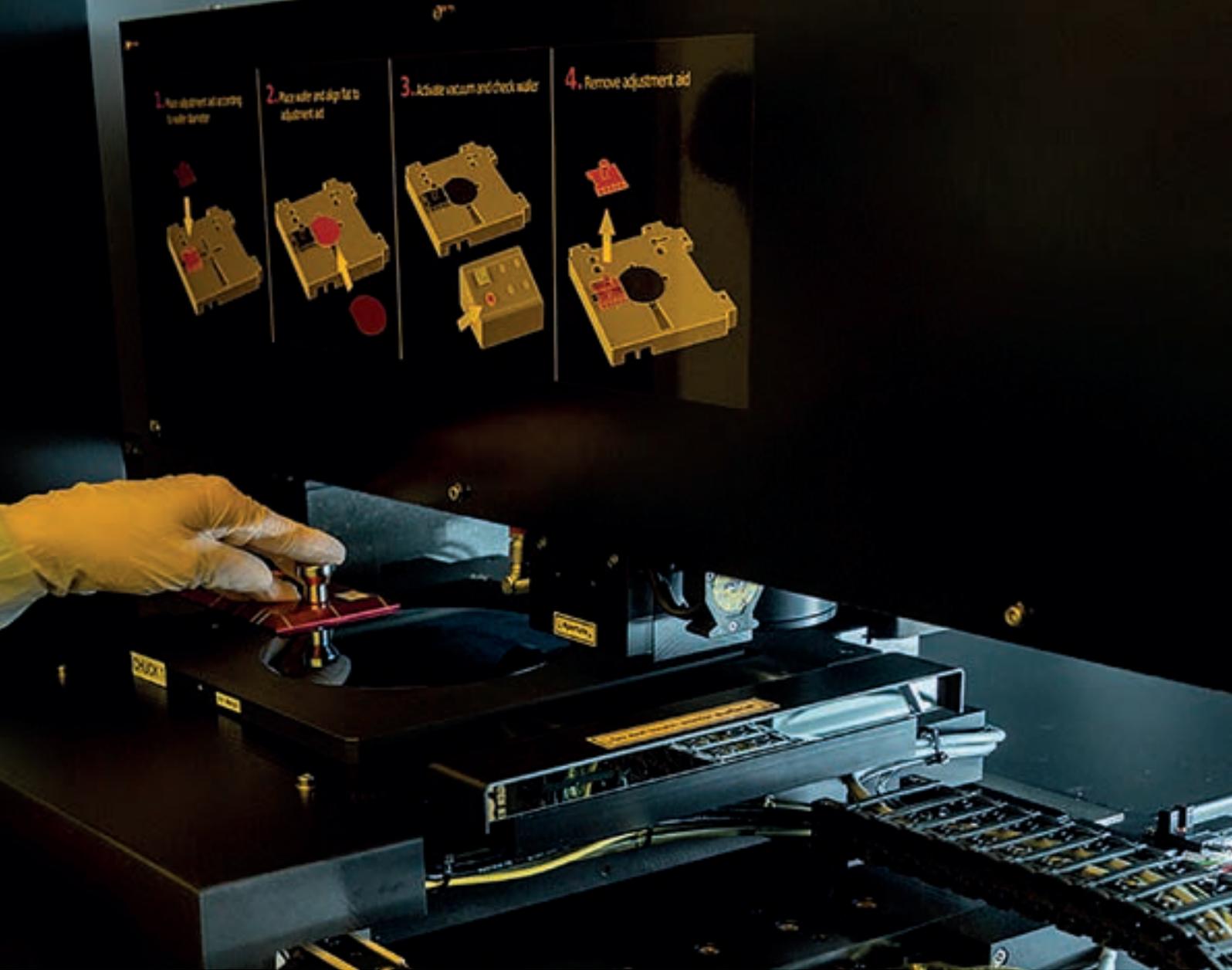


PHOTOVOLTAIK

Der Übergang unseres Energieversorgungssystems von fossilen zu erneuerbaren Energiequellen wurde auf der Klimakonferenz in Paris 2015 auf den Weg gebracht. Dort hat sich die Weltgemeinschaft darauf verständigt, die Erwärmung unserer Atmosphäre auf maximal 1,5°C zu begrenzen und so eine globale Energiewende umzusetzen. Fast alle Energiesystemszenarien zeigen, dass die Photovoltaik (PV) neben Wind die zentrale Säule der zukünftigen Energieversorgung sein wird, unter ökonomischen wie ökologischen Gesichtspunkten. Vor diesem Hintergrund wird der PV-Markt auch weiterhin schnell wachsen. Ende 2017 waren weltweit ca. 400 GW PV-Leistung installiert. Die Global Alliance of Solar Energy Research Institutes (GA-SERI), der das Fraunhofer ISE neben NREL (USA) und AIST (Japan) als Mitglied angehört, hat auf ihrem Treffen 2018 die Einschätzung getroffen, dass innerhalb der nächsten vier Jahre weltweit 1 Terawatt an PV installiert sein wird. Der dominierende Kostenanteil von PV-Kraftwerken, die Investitionskosten, fielen seit 2006 dank technologischen Fortschritts, Skalen- und Lerneffekten im Mittel um ca. 13 % pro Jahr, insgesamt um 75 %. In Deutschland können heute konkurrenzfähige Stromgestehungskosten von 4-5 €cent/kWh erreicht werden.

i *Laserebelichter zur maskenlosen, photolithographischen Strukturierung von Wafern für höchsteffiziente Silicium- und III-V-Solarzellen.*

Forschung und Entwicklung haben an dieser Erfolgsgeschichte ganz wesentlichen Anteil. Das Fraunhofer ISE trägt mit seinen hervorragenden FuE-Ergebnissen zur kontinuierlichen Verbesserung der Wirkungsgrade sowie beim Materialeinsatz bei. Zentrale Stichworte sind die am Institut entwickelte Technologie zur Passivierung der Kontakte (Tunnel Oxide Passivated



Contact – TOPCon) sowie die Entwicklung eines speziellen High Performance Siliciums, das die Grundlage für neue Rekordwirkungsgrade bildet. Auch bei der monokristallinen Materialentwicklung am Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) am Standort Halle konnten große Fortschritte erzielt werden. Unsere FuE-Arbeiten im Themenfeld Wafering führen wir am Technologiezentrum für Halbleitermaterialien (THM) am Standort Freiberg durch. Die Vorlauforschung des Fraunhofer ISE wird in unserem PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center industriell umgesetzt. Im Sommer 2018 konnten wir das im Jahr zuvor durch einen Brand im Hauptlabor zerstörte PV-TEC wieder in Betrieb nehmen.

Das Fraunhofer ISE entwickelt zudem Verfahren zur präzisen Charakterisierung und Ertragsanalyse von Zellen und Modulen erfolgreich weiter. Unser akkreditiertes CalLab PV Modules verfügt über einen weltweit führenden Wert hinsichtlich der Messunsicherheit von nur 1,3 %. In der Konzentrator-technologie zeigen wir bei Mehrfachzellen Spitzenwirkungsgrade

von bis zu 46,1 % und einen Rekordwirkungsgrad für ein Modul von 41,4 %. Unsere langjährigen Erfahrungen mit der Herstellung von Mehrfachsolarzellen nutzen wir, um ein Tandemkonzept zu realisieren, eine monolithische Mehrfachsolarzelle aus GaInP/GaAs // Si; der Wirkungsgrad liegt bei 33,3 %. Diese Technologie ist zukunftsweisend und zeigt, wie das begrenzende Auger-Limit von 29,4 % bei Einfachsolarzellen aus Silicium überwunden werden kann. Auch unsere Arbeiten an organischen und Perowskitsolarzellen eröffnen interessante Perspektiven und Anwendungsmöglichkeiten.

Mit unserem Portfolio sind wir für die Zukunft gut aufgestellt und tragen dazu bei, die Photovoltaik noch effizienter zu machen – in Bezug auf Energieertrag, aber auch in Bezug auf Produktionsverfahren und Materialeinsatz. Eine kostengünstige und gleichzeitig nachhaltige Prozesskette entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist unser ambitioniertes Ziel.

SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

1

Über 90 % aller Solarzellen weltweit werden aus kristallinem Silicium hergestellt. Schlüssel für diese dominierende Marktstellung sind zum einen ein robuster und kostengünstiger Herstellungsprozess und zum anderen der hohe Wirkungsgrad und die große Zuverlässigkeit von siliciumbasierten PV-Modulen. Gerade der Wirkungsgrad spielt für die weitere Kostensenkung der Stromgestehungskosten eine entscheidende Rolle und steht deshalb im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten.



336

Mitarbeitende



97

Zeitschriften- und Buchbeiträge



99

Vorträge und Konferenzbeiträge



7

Neu erteilte Patente

Das Fraunhofer ISE unterstützt die Forschung und Entwicklung von Material-, Modul- und Anlagenherstellern durch eine weltweit einzigartige FuE-Infrastruktur mit über 3000 m² Labor- und Technikumsfläche. Die wissenschaftliche und technologische Kompetenz unserer über 300 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Ingenieure und Ingenieurinnen sowie Techniker und Technikerinnen reicht dabei vom Siliciummaterial über Solarzelle und Modul bis zum System. So können unsere Kooperationspartner nicht nur auf einzelne Technologien zugreifen, sondern über die gesamte Wertschöpfungskette mit uns zusammenarbeiten.

Der Technologiereifegrad unserer Projekte umfasst die gesamte Bandbreite von der Laborforschung bis zur industrienahen Entwicklung. Mit neuen Technologien und Weltrekordwirkungsgraden aus unseren Forschungslabors setzen wir immer wieder wissenschaftliche Trends in der Photovoltaik und geben so wichtige Impulse für Neuentwicklungen. In unseren Technologiezentren PV-TEC und SiM-TEC mit ihrer industrienahen Infrastruktur können wir reifere Konzepte unter realistischen Bedingungen evaluieren sowie innovative und industrienaher Fertigungsprozesse entwickeln. Neben der topaktuellen Technologie ist eine tiefgehende Charakterisierung der zugrundeliegenden Prozesse und eine sorgfältige Qualitätssicherung über die gesamte Wertschöpfungskette für unsere Kunden und Kooperationspartner von großer Bedeutung.

Ausgewählte Meilensteine 2018

- » Ladungsträgerlebensdauer von TOPCon-passivierten Proben erreicht Rekordwert von 225 ms.
- » Tiefgehende Analyse des Transportmechanismus von Ladungsträgern in passivierenden Kontakten.
- » Starke Verbesserung der Unterzelle einer III-V/Silicium-Mehrfachsolarzelle mit passivierenden Kontakten und fortgeschrittenem Light-Trapping erlaubt einen Rekordwirkungsgrad von 33,3 %.

1 Wafer in Brennofen im PV-TEC des Fraunhofer ISE.



Ansprechpartner

Silicium-Photovoltaik

Prof. Dr. Stefan Glunz, Dr. Ralf Preu
Telefon +49 761 4588-0 | sipv@ise.fraunhofer.de

Feedstock, Kristallisation und Wafering

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

Epitaxie, Si-Folien und SiC-Abscheidungen

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

Charakterisierung von Prozess- und Silicium-Materialien

Dr. Martin Schubert | Telefon +49 761 4588-5660
sipv.characterization@ise.fraunhofer.de

Dotierung und Diffusion

Dr. Jan Benick | Telefon +49 761 4588-5020
sipv.doping@ise.fraunhofer.de

Oberflächen: Konditionierung, Passivierung, Lichteinfang

Dr. Jochen Rentsch | Telefon +49 761 4588-5199
sipv.surface@ise.fraunhofer.de

Kontaktierung und Strukturierung

Dr. Markus Glatthaar | Telefon +49 761 4588-5918
sipv.contact@ise.fraunhofer.de

Herstellung und Analyse von hocheffizienten Solarzellen

Dr. Martin Hermle | Telefon +49 761 4588-5265
sipv.hieta@ise.fraunhofer.de

Pilotherstellung von industrienahen Solarzellen

Dr. Florian Clement | Telefon +49 761 4588-5050
sipv.pilot@ise.fraunhofer.de

Messtechnik und Produktionskontrolle

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

Dünnschicht-Siliciumsolarzellen

Dr. Dietmar Borchert | Telefon +49 209 15539-13
sipv.si-thinfilm@ise.fraunhofer.de

Technologiebewertung

Dr. Ralf Preu | Telefon +49 761 4588-5260
sipv.assessment@ise.fraunhofer.de

Ausgewählte Projekte 2018

 Rock-Star – Evaluation und Entwicklung von Rotationsdruckverfahren für die Herstellung von Si-Solarzellen

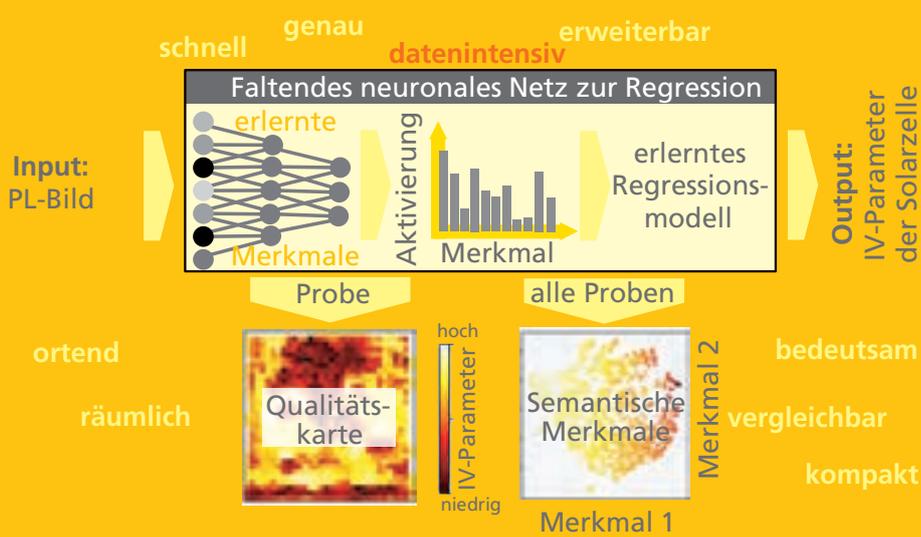
 FINALE – Entwicklung von industriellen Druckprozessen zur Herstellung von Ultra-Feinlinienkontakten für hocheffiziente Siliciumsolarzellen

 INNOMET – Entwicklung innovativer Drucktechnologien für die Feinlinien-Metallisierung von Siliciumsolarzellen

 ATAKAMA – Alternative Kontaktierungsprozesse und Kontaktmaterialien für hocheffiziente Siliciumsolarzellen mit passivierten Kontakten

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-01



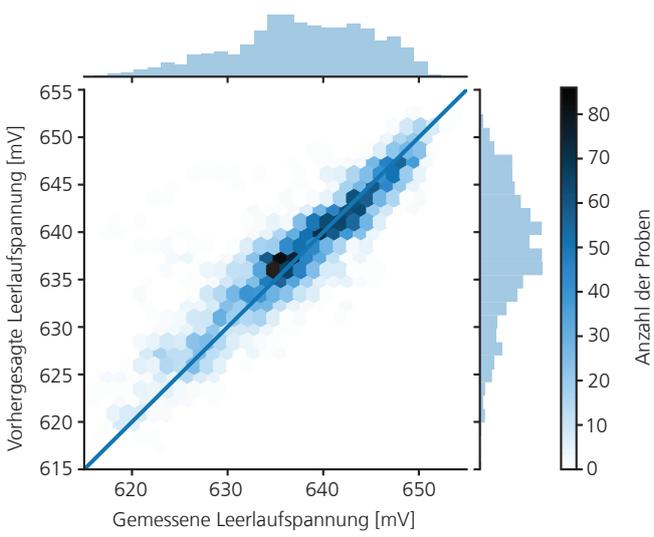


Maschinelles Lernen zur Materialbewertung in der PV-Produktion

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

Neue Technologien des maschinellen Lernens haben im Jahr 2012 erstmals das menschliche Leistungsvermögen bei der Klassierung von Objekten erreicht. Mit zunehmender Kapazität der Produktionslinien gewinnen rein datenbasierte Verfahren zur Produktionskontrolle an Bedeutung, die sich mit diesen Technologien sehr effizient abbilden lassen. Im Rahmen seiner Digitalisierungsinitiative beschäftigt sich das Fraunhofer ISE mit dem Transfer tiefer Lernverfahren in verschiedenste Glieder der PV-Wertschöpfungskette. Für die Bewertung multikristalliner Siliciumwafer wurde in den Projekten »Q-Wafer«^A und »Q-Crystal«^B eine hinreichend große Datenvielfalt geschaffen, um die erwartete Solarzellenqualität anhand von inline-Messungen bereits vor der Solarzellenproduktion vorherzusagen. Neben

einer präzisen Effizienz-Vorhersage mit einer mittleren Abweichung von 0,12%_{abs} hat das Verfahren zusätzliche Vorteile: In unserem Anwendungsbeispiel erlernt ein faltendes neuronales Netz den direkten Zusammenhang zwischen den 2D-Photolumineszenz-Aufnahmen des Wafers und den Strom-Spannungs-Parametern der Solarzelle. Dabei wurden keine menschlichen Vorgaben zur Bewertung der Eingabebilder benötigt. Das Modell ist einfach um zusätzliche Prozess- und Eingabeparameter erweiterbar und die Vorhersage dauert nur wenige Millisekunden. Die korrekte Vorhersage von Wafern aus unbekanntem Säulen zeigt die hohe Generalisierbarkeit, sodass Abweichungen zwischen erwarteter und gemessener Effizienz auf Prozessfehler und Materialanomalien hinweisen, die mit am Fraunhofer ISE verfügbaren Referenzmethoden (z. B. modulum) spezifizierbar sind.



Grafik: Vorhersage der Leerlaufspannung anhand von Photolumineszenz-Aufnahmen des Wafers mittels faltendem neuronalem Netzwerk.

Ein weiterer Vorteil ist die Qualitätskarte, die aus den räumlich aufgelösten Aktivierungen des Netzes abgeleitet werden kann. Sie verrät, wie das Netzwerk die Strukturen in den Eingabedaten bewertet. Somit können Ursachen für die Bewertung identifiziert und lokalisiert werden. Das Fraunhofer ISE bringt damit Licht in die »Blackbox« neuronales Netz.

Ein wichtiger Aspekt verbirgt sich in der gelernten Repräsentation der Daten in den Tiefen des Netzwerks. Dieses komprimiert die Eingabedaten, sodass effizienzlimitierende Muster in den Bilddaten quantifiziert werden. Die Daten können anhand dieser aussagekräftigen Repräsentation miteinander verglichen werden. Wir sehen, was das Netzwerk in den Daten gelernt hat. Über die semantische Repräsentation selbst können wir die Bilddaten effizient speichern. Die Kristallisation können wir bewerten, indem wir die semantischen Repräsentationen verschiedener Kristalle vergleichen. Auch können Schwankungen des Solarzellenprozesses mit Hilfe der extrahierten Materialeigenschaften dedizierter untersucht werden.

¹ Direkte Verarbeitung der Photolumineszenz-Aufnahme eines multikristallinen Si-Wafers zur Vorhersage der Strom-Spannungs-Parameter (IV) der Solarzelle mittels faltendem neuronalem Netzwerk.

^A gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
^B gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)



Epitaktisch gewachsene Siliciumwafer für höchsteffiziente Solarzellen

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

Kostenreduktion und die gleichzeitige Einhaltung höchster Qualitätsstandards sind die beiden wichtigsten Leitplanken in der aktuellen PV-Forschung und -Entwicklung. Das Fraunhofer ISE hat deshalb schon vor einigen Jahren eine Technologie auf den Weg gebracht, die durch eine effizientere Nutzung von sauberem Silicium und einem geringeren Energieverbrauch die Herstellungskosten von hochwertigen Siliciumwafern wesentlich verringert.

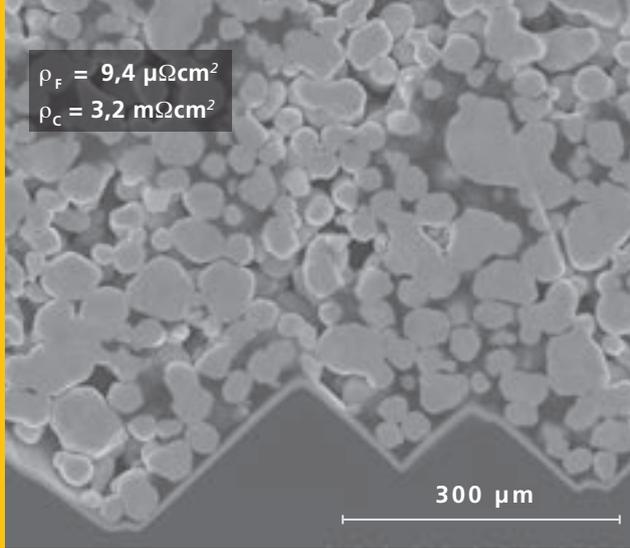
Dies wird durch die Wiederverwendung einer Kristallvorlage und dem epitaktischen Wachstum von Silicium direkt aus Chlorsilanen ermöglicht. Mittels elektrochemischen Ätzens wird ein Schichtstapel aus makroporösen Schichten in einen Siliciumwafer, das sogenannte Muttersubstrat, geätzt. In einem weiteren Schritt wird dieser Schichtstapel thermisch umgeformt und dadurch eine einkristalline Wachstumsvorlage mit einer Sollbruchstelle erzeugt. Dieser Prozess wird Reorganisation genannt. Auf dieser Vorlage wird nun der Silicium-Einkristall Schicht für Schicht mittels Atmosphärendruck-Epitaxie aufgebracht. Sowohl Dicke als auch Dotierstoffkonzentration in der Schicht können während des Wachstums angepasst werden. Nach dem Wachstumsprozess wird nach einem mechanischen Bearbeitungsschritt die Schicht vom Muttersubstrat gelöst und der so erhaltene Wafer (EpiWafer) für die Weiterverarbeitung nachbehandelt. Das Muttersubstrat wiederum wird ebenfalls chemisch behandelt, wieder in die Produktion eingeschleust und durchläuft diesen Zyklus erneut.

Der EpiWafer ist äußerlich kaum von einem monokristallinen Si-Wafer zu unterscheiden und kann ohne weitere Anpassungen der Folgeprozesse zu einer Solarzelle verarbeitet werden. Darüber hinaus kann durch den Einbau von Dotierstoffprofilen und die frei wählbare Dicke der gewachsenen Schichten ein zusätzlicher Mehrwert durch den EpiWafer erzielt werden. So sind die Einsparung von Solarzellenprozessen wie der Emitterdiffusion oder die Herstellung von flexiblen Folien aus Silicium mögliche Weiterentwicklungen der EpiWafer-Technologie.

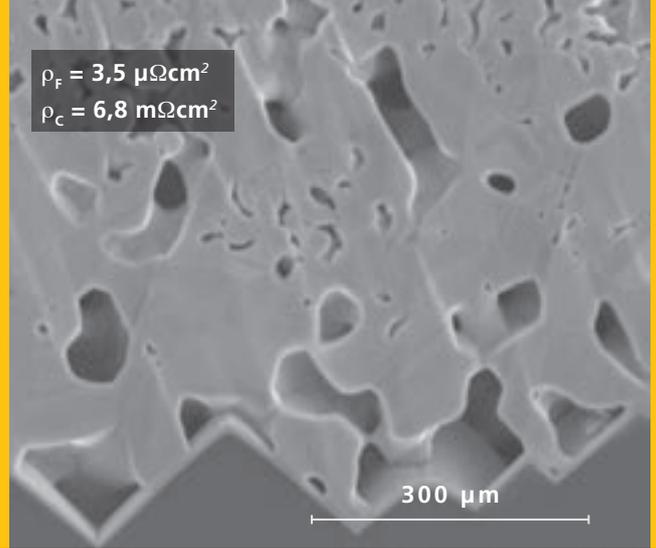
Die beiden Kernprozesse dieser EpiWafer-Technologie sind das elektrochemische Ätzen von Silicium und die Epitaxie von Silicium bei Atmosphärendruck. Obwohl diese Prozesse schon seit vielen Jahren in der Halbleiterindustrie erfolgreich eingesetzt wurden, waren bisher keine hochdurchsatzfähigen Industrieanlagen dafür verfügbar. Am Fraunhofer ISE konnte diese Lücke geschlossen werden und auf der Basis des vorhandenen Know-hows wurde im Jahr 2015 ein spin-off namens NexWafe gegründet. In einer sehr engen Kooperation sind seitdem die Kernpunkte der Forschung und Entwicklung die stetige Steigerung von Qualität und Ausbeute der Prozesse. Im Rahmen dieser gemeinsamen Anstrengungen konnte die Technologie nun bis zur Produktreife geführt werden.

¹ Am Fraunhofer ISE entwickelte kontinuierliche Pilotanlage für die Reorganisation von porösen Schichten und die Epitaxie von Silicium (ProConCVD).

$$\rho_F = 9,4 \mu\Omega\text{cm}^2$$
$$\rho_C = 3,2 \text{m}\Omega\text{cm}^2$$



$$\rho_F = 3,5 \mu\Omega\text{cm}^2$$
$$\rho_C = 6,8 \text{m}\Omega\text{cm}^2$$



1

Passivierende Kontakte – eine zukünftige Schlüsseltechnologie

Frank Feldmann | Telefon +49 761 4588-5287 | sipv.contact@ise.fraunhofer.de

Durch die Einführung der PERC-Technologie in die industrielle Solarzellenproduktion ist die Modulleistung in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Bei der PERC-Technologie werden die in den Solarzellen dominierenden Verluste am Metall-Halbleiterkontakt durch eine Verkleinerung der Kontaktfläche und die Verwendung einer dielektrischen Rückseitenpassivierung verringert. Passivierende Kontakte benötigen keine lokale Strukturierung, da sie die Oberfläche hervorragend passivieren und gleichzeitig geringe Kontaktwiderstände ermöglichen. So können sehr hohe Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Verschlankeung der Herstellung erreicht werden.

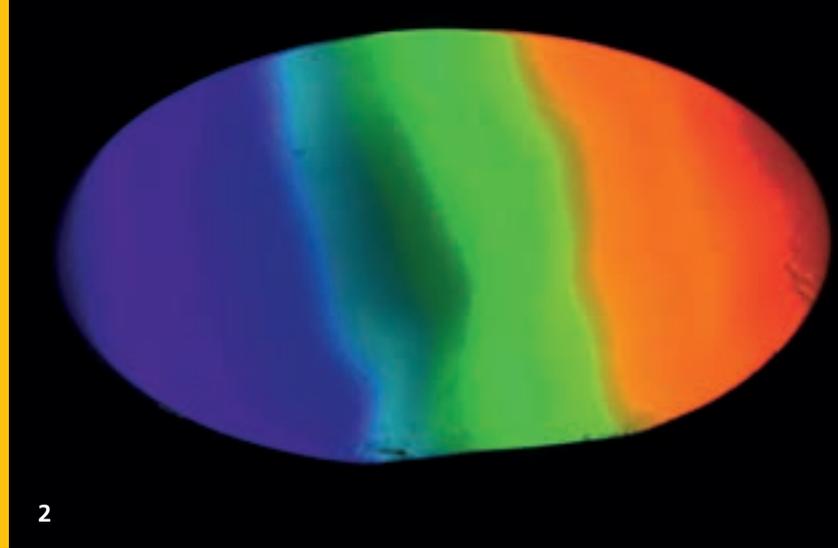
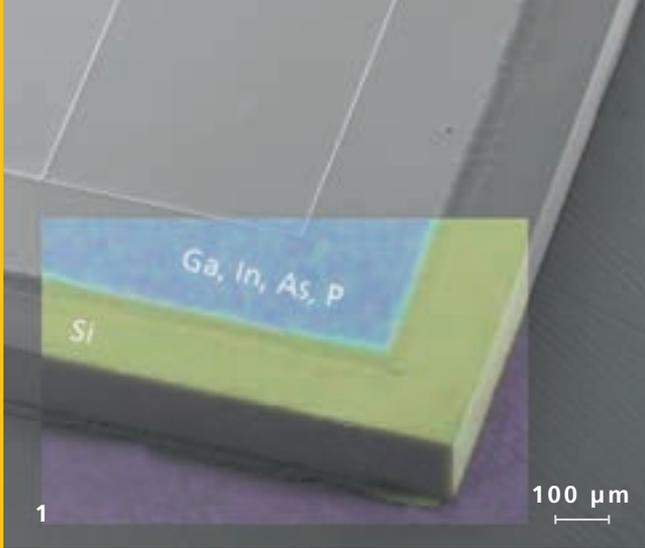
Neben der Heterojunction-Technologie (HJT) wird am Fraunhofer ISE seit einigen Jahren an poly-Silizium-basierten passivierenden Kontakten (TOPCon) geforscht. Das große Potenzial dieser Technologie wurde bereits in Prototyp-Solarzellen, die einen Wirkungsgrad von bis zu 25,8 % erreichen, demonstriert. Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf:

- » Entwicklung von Abscheidprozessen auf Hochdurchsatzanlagen
- » kostengünstige Metallisierungsverfahren
- » Integration in Solarzellen und -module

Neben dem in der Halbleiterbranche für poly-Silizium etablierten LPCVD-Abscheidverfahren evaluieren wir in Zusammenarbeit mit europäischen Anlagenherstellern auch PECVD-Verfahren. Dies ist ein Standardprozess in der Solarzellenproduktion. Wir konnten erfolgreich zeigen, dass die am Fraunhofer ISE entwickelte TOPCon-Technologie auch mit diesen Anlagen realisiert werden kann.

Im Vergleich zur Heterojunction-Technologie ist die höhere Temperaturstabilität der Passivierung ein Vorteil der TOPCon-Technologie. So kann z. B. ein Transparent Conductive Oxide (TCO) bei höheren Temperaturen als bei HJT üblich, abgeschieden werden. Dadurch können bessere Schichteigenschaften erzielt werden. Des Weiteren ermöglichen die höheren Prozesstemperaturen eine bessere Leitfähigkeit der Metallpasten. Der geringere Materialverbrauch bewirkt zudem eine Kostenreduktion. Abb. 1 zeigt exemplarisch den positiven Einfluss einer erhöhten Prozesstemperatur auf die Mikrostruktur der Niedertemperaturpaste. Das Sintern der Metallfinger bei Temperaturen über 300 °C führt zu einer Reduktion des spezifischen Fingerwiderstands ρ_F , der im Bereich derer von Hochtemperaturpasten nach einem typischen Feuerprozess liegt. Die Untersuchung ergab zudem, dass gleichzeitig niedrige spezifische Kontaktwiderstände an der Metall/TCO-Grenzfläche möglich sind.

1 REM-Aufnahmen einer Niedertemperatur-Silberpaste nach thermischem Curing bei 200 °C (links) und 350 °C (rechts).



Optimierte Unterzellen für Silicium-basierte Mehrfachsolarzellen

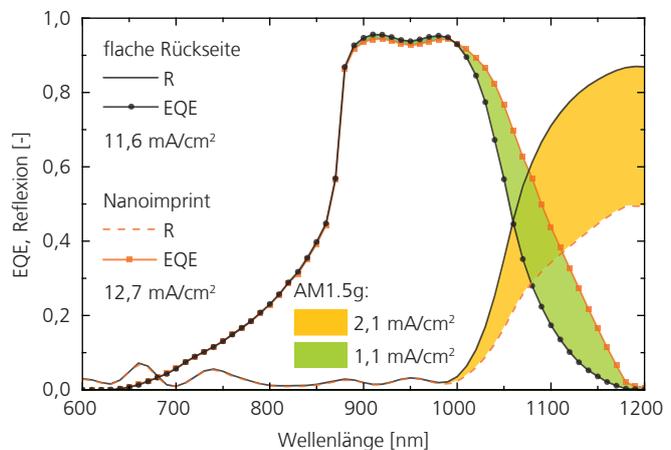
Dr. Jan Christoph Goldschmidt | Telefon +49 761 4588-5475 | emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de

Der meiste Sonnenstrom wird weltweit mit Einfachsolarzellen aus Silicium generiert. Die nächste Generation könnten Mehrfachsolarzellen sein, da mit dieser Technologie das Sonnenspektrum besser ausgenutzt werden kann. Auch für diese Anwendung eignet sich Silicium hervorragend – aufgrund seiner Bandlücke, des geringen Preises und weil es bereits in der Photovoltaikindustrie etabliert ist. Daher arbeiten wir am Fraunhofer ISE daran, Siliciumsolarzellen als Unterzelle und Trägermaterial für den Einsatz in Mehrfachsolarzellen zu optimieren, z. B. in Kombination mit dünnen Oberzellen aus III-V-Verbindungshalbleitern oder Perowskiten.

Die direkte Verbindung von Siliciumsolarzelle und Oberzelle zu einer Mehrfachsolarzelle mit nur zwei elektrischen Anschlüssen ist für die Modulintegration von Vorteil. Allerdings fordert dieses Konzept einen transparenten elektrischen Kontakt zwischen Silicium- und Oberzelle. Zusätzlich muss die Silicium-Oberfläche passiviert werden. Mit den am Fraunhofer ISE entwickelten Tunneloxid-passivierenden Kontakten (TOPCon) steht hier eine neue Technologie zur Verfügung, die beide Anforderungen besonders gut erfüllt. Auf Zellebene konnten wir schon einen Beitrag von 690 mV durch die TOPCon-Siliciumsolarzelle zur GesamtLeerlaufspannung einer Mehrfachsolarzelle zeigen. Eine hervorragende Verbindung zwischen Silicium- und Oberzelle wurde mit direktem Waferbonden hergestellt, aber auch andere günstigere Technologien, wie das leitfähige Kleben, haben sich als vielversprechend erwiesen.

Um den Lichteinfall der Silicium-Unterzelle weiter zu verbessern, haben wir optische Strukturen für die Zellrückseite entwickelt. Diese Strukturen werden mittels Nanoimprintlithographie hergestellt und erhöhen durch Streuung und/oder Beugung den Lichtweg und damit die Absorption in der

Siliciumsolarzelle. Mit Hilfe eines Metall-Kreuzgitters konnten wir z. B. die Kurzschlussstromdichte der Silicium-Unterzelle signifikant steigern (von 11,6 auf 12,7 mA/cm² in einer Dreifachsolarzelle, s. Grafik). Damit ist der Lichteinfall dieser optischen Strukturen ähnlich gut wie bei der gängigen Vorderseitentextur mit Pyramiden. Die erfolgreiche Integration der TOPCon-Technologie sowie photonischer Rückseitengitter ermöglichte die Herstellung einer 2-Terminal-Mehrfachsolarzelle mit dem aktuellen Weltrekordwirkungsgrad von 33,3 %.



Grafik: Einfluss des Rückseitengitters (Nanoimprint) auf die Reflexion der Mehrfachsolarzelle und die Quanteneffizienz der Silicium-Unterzelle.

- 1 Elektronenmikroskop-Aufnahme der Mehrfachsolarzelle. Die Röntgenspektroskopie zeigt die Elemente der Oberzelle (Gallium, Indium, Arsen, Phosphor) und der Unterzelle (Silicium).
- 2 Die durch Nanoimprint erzeugte Struktur auf der Solarzellen-Rückseite bricht das einfallende Licht und spaltet es in die Spektralfarben auf.

III-V- UND KONZENTRATOR- PHOTOVOLTAIK

1



52

Mitarbeitende



21

Zeitschriften- und
Buchbeiträge



24

Vorträge und
Konferenzbeiträge



5

Neu erteilte Patente

In diesem Geschäftsfeldthema bearbeitet das Fraunhofer ISE Anforderungen aus der Weltraum- und Konzentratorphotovoltaik. Weiterhin adressieren wir die effiziente Umwandlung von Licht aus anderen Quellen, wie Lasern, in elektrischen Strom. Wir arbeiten sowohl an Solarzellen der nächsten Generation mit optimierten Strukturen und Wirkungsgraden als auch an der Anpassung dieser Bauelemente an die spezifischen Einsatzbedingungen unserer Kunden. So entwickeln wir z. B. ultra-dünne und leichte Solarzellen, die sich auf gekrümmten Flächen aufbringen lassen, oder Konzentratorsolarzellen mit Flächen zwischen 0,1 mm² und 1 cm², die bei sehr hohen Einstrahlungsdichten arbeiten. In allen Fällen zielen wir auf Bauelemente mit niedrigen Fertigungskosten, hoher Zuverlässigkeit und hohem Wirkungsgrad ab.

Bei der konzentrierenden Photovoltaik decken wir alle Aspekte von der Solarzelle bis zum Modul ab und optimieren das Gesamtsystem. Hierfür setzen wir unsere Expertise in den Bereichen Optik, Aufbau und Verbindungstechnik sowie theoretische Modellierung und Moduldesign ein. So bedienen wir einen heterogenen Markt an Unternehmen, die PV-Systeme mit geringer bis sehr hoher optischer Konzentration entwickeln. Bei letzteren erstreckt sich unsere Expertise auch auf Systemaspekte wie die Nutzung der Wärmeenergie, die Entsalzung von Meerwasser oder die direkte Erzeugung von solarem Wasserstoff. Wir erreichen Innovationen durch systembezogenes Denken und setzen uns das Ziel, die besten Lösungen weltweit für unsere Kunden bereitzustellen. Hierbei können wir auf eine moderne industrierelevante Infrastruktur sowie auf die langjährige Expertise am Institut zurückgreifen.

Ausgewählte Meilensteine 2018

- » Neuer Weltrekord: CPV-Submodul (122 cm²) mit asphärischen Vollglaslinsen und 4-fach Solarzellen der nächsten Generation erreicht einen CSTC-Wirkungsgrad von 41,4 % (39,5 % CSOC).
- » Sechs FLATCON[®] Konzentratormodule mit 1089 cm² Fläche hergestellt. Der Wirkungsgrad liegt mit kommerziellen Solarzellen und Linsen bei 35,1 % CSTC (33,0 % CSOC).
- » Mit einem neuen »EyeCon« Konzentratormodul wandeln wir erstmals neben direktem auch diffuses Licht in Strom und messen in Freiburg Wirkungsgrade bis zu 36,8 % bezogen auf die Globalnormalstrahlung.
- » Mit unseren GaAs-Photovoltaikzellen erreichen wir hohe Datenübertragungsraten von 0,5 Gb/s (3 dB Bandbreite, 24,5 MHz) und monochromatische Wirkungsgrade bis 67 %.
- » Direkt gewachsene III-V/Si-Mehrfachsolarzelle erreicht erstmals 22 % Wirkungsgrad unter AM1.5g Bedingungen.

1 FLATCON[®] Konzentrator-
modul.



www.ise.fraunhofer.de/iii-v-und-konzentrator-pv

Ansprechpartner

III-V- und Konzentrator-Photovoltaik

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

III-V-Epitaxie und Solarzellen

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

Konzentrator-Bauelemente

Maike Wiesenfarth M. Sc. | Telefon +49 761 4588-5470
cpv.assemblies@ise.fraunhofer.de

Konzentrator-Optik

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

Hochkonzentrierende Systeme (HCPV)

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

Niedrigkonzentrierende Systeme (LCPV)

Maike Wiesenfarth M. Sc. | Telefon +49 761 4588-5470
cpv.lowconcentration@ise.fraunhofer.de

Silicium-Konzentratorsolarzellen

Dr. Florian Clement | Telefon +49 761 4588-5050
cpv.silicon@ise.fraunhofer.de

Power-by-Light

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

Ausgewählte Projekte 2018

 LightBridge – Elektroniksystem für die drahtlose Energieversorgung eines subretinalen Mikroimplantats

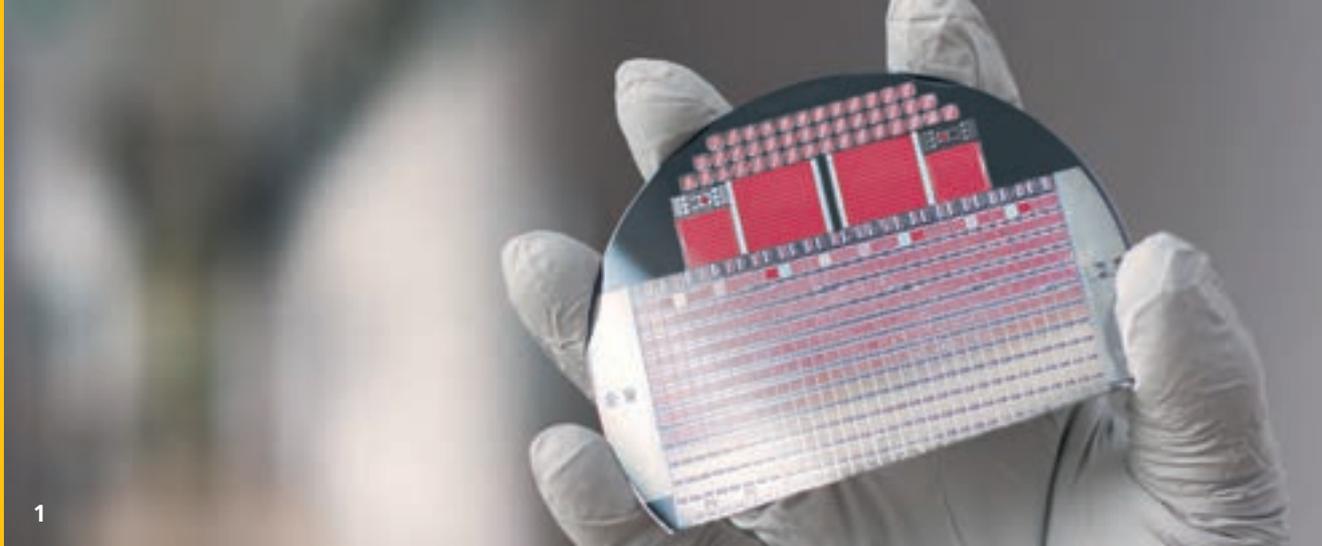
 HeKMod4 – Hocheffizientes Konzentratormodul mit GaSb-basierter Vierfachsolarzelle

 CPVMatch – Modernste Technologien und Zellen für Konzentrator-Photovoltaikmodule ermöglichen höchste Wirkungsgrade

 CPVMod – CPV Modul im modularen Aufbau; Teilvorhaben: Moduldesign und -performance

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-02





1

III-V-basierte Photovoltaik für »Internet of Things« und Innenräume

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



In unserer zunehmend digitalisierten und vernetzten Welt kommt dem »Internet of Things (IoT)« eine wachsende Bedeutung zu. In hohem Tempo entstehenden hier neue Anwendungen für Verbraucher, Gewerbe, Industrie sowie Infrastruktur und Energiesystem. In den meisten Anwendungen sind kleine und kabellose Geräte mit integrierter Sensorik gewünscht, die einfach und überall zu platzieren sind. Zwei entscheidende Faktoren bei der Entwicklung solcher Geräte sind die Realisierung der bidirektionalen Kommunikation und der Energieversorgung. Für Letztere sind selbstversorgende Lösungen interessant, um einen tatsächlich autarken Betrieb ohne externe Energiequelle zu ermöglichen. Dadurch kann sowohl auf Kabel als auch auf Batterien und deren Wartung verzichtet werden. Alternativ kann über eine externe Lichtquelle auch eine drahtlose optische Leistungsversorgung realisiert werden (Power-by-Light).

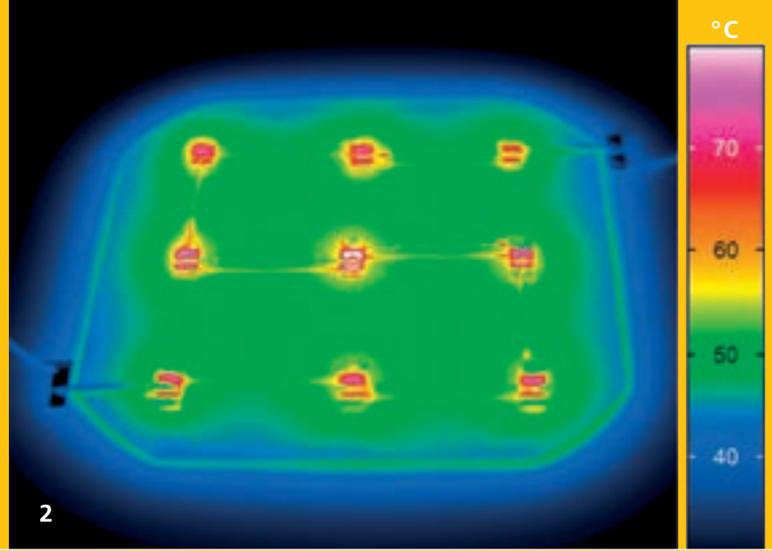
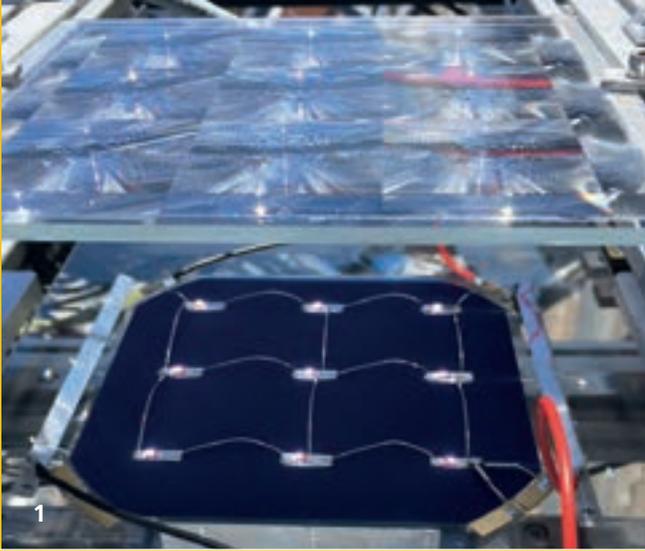
Am Fraunhofer ISE adressieren wir diese Themen mit III-V-basierten Photovoltaikzellen. Photovoltaikzellen auf Basis von Galliumindiumphosphid eignen sich aufgrund ihrer Materialeigenschaften sehr gut zur Nutzung des Raumlichts. Ihr Absorptionsverhalten passt ideal zum Emissionsspektrum künstlicher Lichtquellen (weiße LED-Strahler und Leuchtstofflampen) und aufgrund der hohen Materialqualität weisen die Solarzellen ein ausgezeichnetes Schwachlichtverhalten auf. Mit einer 1 cm² großen Zelle konnten wir in ersten Messungen

einen Wirkungsgrad von 15,5 % unter Schwachlichtbeleuchtung (1,7 W/m² entspricht etwa 210 lux) erzielen.

Für Anwendungen im »Internet of Things (IoT)« arbeiten wir auch an Technologien, mit denen sich Energieversorgung und Datenkommunikation in einem Bauelement integrieren lassen. Dies ermöglicht kompakte Bauformen und spart Kosten. Für die simultane optische drahtlose Daten- und Leistungsübertragung haben wir mit einer am Fraunhofer ISE entwickelten Galliumarsenid-basierten Photovoltaikzelle in Zusammenarbeit mit der Universität von Edinburgh einen Spitzenwert in der Datenübertragungsrate von 0,5 Gb/s (3 dB Bandbreite: 24,5 MHz) erreicht. Unter monochromatischer Bestrahlung weist diese Zelle einen Wirkungsgrad von 42 % (847 nm, 0,46 W/cm²) auf. Mit einer vergleichbaren Zelle, die in Dünnschichttechnik mit Rückseitenspiegel realisiert wurde, konnte sogar ein monochromatischer Spitzen-Wirkungsgrad von 67 % (860 nm, 10 W/cm²) demonstriert werden.

Derzeit arbeiten wir daran – zusätzlich zur hocheffizienten Wandlung der einfallenden Lichtleistung (Photovoltaikzelle) und dem schnellen Datenempfang (Photodiode) – die gleiche Zelle auch als Licht emittierenden Datensender (LED) verwenden zu können. Eine effiziente Lichtausbeute wird dabei durch die hohen strahlenden Wirkungsgrade (Abb. 1) der III-V-Materialien erreicht.

1 Photovoltaikzellen können auch als Datensender verwendet werden: Rotlicht-emittierende GaInP-basierte Zellen auf einem Wafer (um den Effekt zu demonstrieren hier vom Blitzlicht des Fotoapparats zum Leuchten angeregt).



EyeCon-Konzentrator: Strom aus direktem und diffusem Sonnenlicht

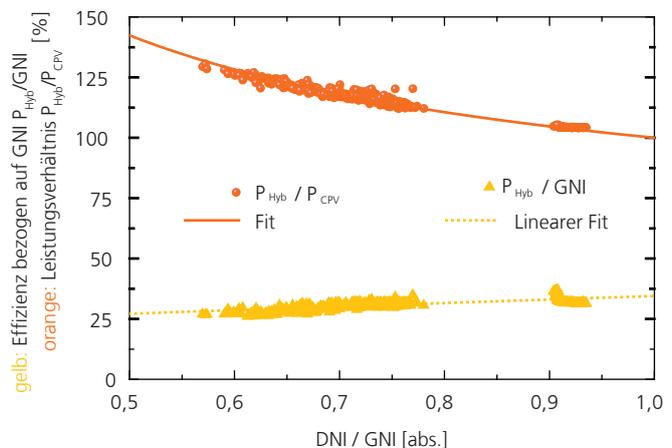
Maike Wiesenfarth | Telefon +49 761 4588-5470 | cpv.highconcentration@ise.fraunhofer.de

Konzentrator-Photovoltaikmodule (CPV), die auf III-V-Mehrfachszellen basieren, erreichen die höchste Effizienz aller PV-Technologien. In früheren Arbeiten wurden am Fraunhofer ISE mit einem FLATCON® Modul unter Konzentration-Standardtestbedingungen bereits 36,7 % des direkten Sonnenlichts in Strom umgewandelt. Solche CPV-Module werden auf einer Nachführeinheit zwei-achsig der Sonne nachgeführt, um das direkte Licht innerhalb des engen Akzeptanzwinkels der Optik ($< 1^\circ$) auf die Zelle zu lenken. Dies erhöht auch den Jahresenergieertrag deutlich. Scheint die Sonne allerdings nicht direkt auf das Modul, wird keine Leistung generiert. Um dies zu ändern, entwickelt das Fraunhofer ISE »EyeCon« – ein innovatives CPV-Hybridmodul. Das Modulkonzept besteht aus III-V-Mehrfachszellen, die auf Siliciumsolarzellen montiert sind. Die hocheffiziente Mehrfachszelle wandelt konzentrierte, direkte Solarstrahlung in elektrischen Strom, während die Siliciumsolarzelle das diffuse sowie gestreute Sonnenlicht absorbiert. Damit erhöht die Hybridisierung die Leistungsdichte und ermöglicht die Anwendung an Standorten mit höherem Diffuslichtanteil. Da die Siliciumsolarzelle gleichzeitig zur Wärmeverteilung genutzt werden kann und die CPV-Zellen somit kein Metallsubstrat zur Wärmeabfuhr mehr benötigen, entstehen kaum höhere Kosten.

Den Nutzen der Wärmeverteilung haben wir durch Finite-Elemente-Simulation, Aufnahmen mit Infrarotthermographie und Außenmessungen bestätigt (Abb. 2). Die Untersuchungen zeigen, dass es möglich ist, die Temperatur der Konzentrationssolarzelle unter 70°C zu halten (bei Standardtestbedingungen mit einem Wärmeeintrag von $1,25\text{ W}$ bei 226-fach konzen-

trierter Strahlung). Das ist in diesem Fall nur 13 K wärmer als in einem Modul mit konventionellem Kupfer-Substrat als Wärmeverteiler.

Prototypenmodule – bestehend aus unseren hocheffizienten Vierfachszellen ($\varnothing = 3\text{ mm}$), montiert auf einer rückseitenkontaktierten Siliciumsolarzelle ($12,5 \times 12,5\text{ cm}^2$) mit einem 3×3 Fresnellinsenarray ($4 \times 4\text{ cm}^2$) – erreichten im Maximum eine Effizienz von $36,8\%$. Der Wert bezieht sich auf die Globalnormalstrahlung und zu dem Messzeitpunkt war das Verhältnis der direkten zur diffusen Strahlung (DNI/GNI) $0,91$ (s. Grafik). Bei DNI/GNI-Verhältnissen in Freiburg von $0,6$ erzeugt das EyeCon-Modul bis zu 25% Mehrertrag durch die Umwandlung des diffusen Lichts in der Siliciumsolarzelle. Dies zeigt das hohe Potenzial dieses Entwicklungsansatzes, den solaren Jahresenergieertrag in Ländern wie Deutschland zu erhöhen.

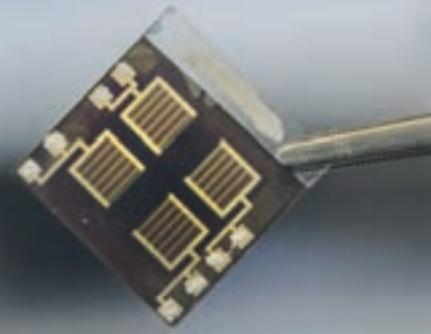


1 EyeCon-Prototypenmodul mit 9 CPV-Zellen montiert auf einer Si-Solarzelle mit $125 \times 125\text{ mm}^2$ Fläche.

2 Aufnahme mit Infrarotthermographie bei einem Wärmeeintrag in die CPV-Zellen von jeweils $1,37\text{ W}$.

Grafik: Umwandlungseffizienz bezogen auf die Globalnormalstrahlung GNI (gelb) und Verhältnis der Leistung des Hybridmoduls im Vergleich zum Standard-CPV-Modul (orange) in Abhängigkeit von dem Verhältnis aus Direkt- zu Globalnormalstrahlung.

NEUARTIGE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN



1



36

Mitarbeitende



21

Zeitschriften- und
Buchbeiträge



15

Vorträge und
Konferenzbeiträge



3

Neu erteilte Patente

Das Geschäftsfeld »Neuartige PV-Technologien« umfasst die Themen Organische, Farbstoff- und Perowskitsolarzellen, Photonenmanagement sowie Mehrfachsolarzellen auf kristallinem Silicium. Ziel ist, mithilfe dieser neuartigen Technologien Optimierungspotenziale in der Photovoltaik zu erschließen und Stromgestehungskosten zu senken. Dazu gehört, den Wirkungsgrad etablierter Solarzellen, z. B. aus kristallinem Silicium, durch verbesserte Absorption und Reflexion mittels fortgeschrittenem Photonenmanagement zu erhöhen. Ein weiterer Ansatz sind alternative Prozesse und Materialien, wie Organische, Farbstoff- und Perowskitsolarzellen, die ein deutliches Kostenreduktionspotenzial aufweisen, was sie trotz der niedrigeren Wirkungsgrade zu vielversprechenden Forschungsobjekten macht.

Unsere Arbeiten an Organischen Solarzellen sind darauf ausgerichtet, flexible, kostengünstige und langzeitstabile organische Solarmodule zu realisieren. Hierfür entwickeln wir zusammen mit Industriepartnern stabile Beschichtungs- und Verkapselungsprozesse auf unserer Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage, um diese anschließend auf große Anlagen zu übertragen.

Im Arbeitsgebiet Perowskitsolarzellen arbeiten wir mit verschiedenen Ansätzen daran, eine ausreichende Langzeitstabilität zu gewährleisten. Neben reinen Perowskitsolarzellen entwickeln wir Silicium-basierte Mehrfachsolarzellen, um das Sonnenspektrum durch Reduktion der Thermalisierungsverluste besser auszunutzen. Diese Strategie verfolgen wir auch mit unseren Arbeiten zu Tandem-Konzepten, d. h. Mehrfachsolarzellen aus einer Kombination von kristallinem Silicium mit III-V-Absorbermaterialien oder Silicium-Nanokristallmaterialien mit einstellbarer Bandlücke. Dazu nutzen wir insbesondere unsere Konzepte zum Photonenmanagement, um eine gute Stromanpassung der Teilzellen zu gewährleisten.

1 *Glassubstrat mit vier semitransparenten Perowskitsolarzellen, hergestellt am Fraunhofer ISE.*



www.ise.fraunhofer.de/neuartige-pv-technologien

Ansprechpartner

Neuartige Photovoltaik-Technologien

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

Farbstoffsolarzellen

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

Organische und Perovskitsolarzellen

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

Photonenmanagement

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

Tandemsolarzellen auf kristallinem Silicium

Dr. Stefan Janz | Telefon +49 761 4588-5261
emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de

Ausgewählte Projekte 2018

 ESPResSo – Effiziente Strukturen und Prozesse für zuverlässige Perovskit-Solarmodule

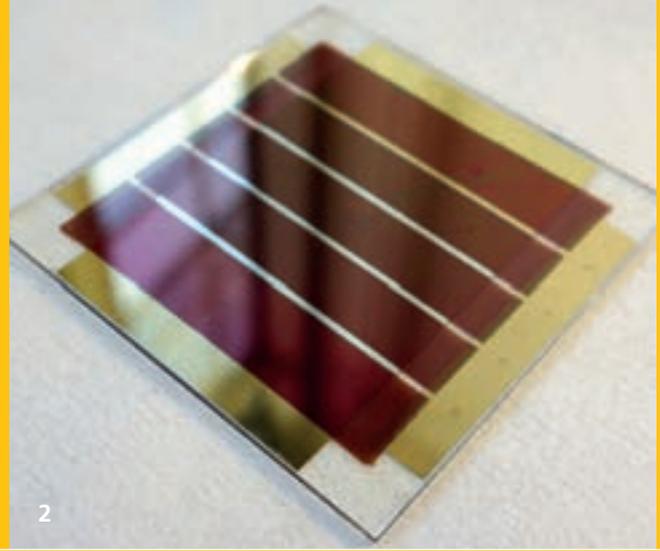
 APOLO – SmArt Designed Full Printed Flexible ROust Efficient Organic HaLide PerOvskite solar cells

Mehr Informationen zu Projekten:
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-03





1



2

Organische Photovoltaik für das »Internet of Things«

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



Digitalisierung, Industrie 4.0 und speziell das »Internet of Things (IoT)« gelten als bedeutende Wachstumsmärkte. Es wird erwartet, dass im Jahr 2020 »Things«, also Sensoren sowie allgemein Geräte und Komponenten der Consumer Electronics, in zweistelliger Milliardenanzahl mithilfe des Internets miteinander verknüpft sein werden. Diese müssen dann alle möglichst kostengünstig mit Energie versorgt werden. Dies kann u. a. durch »Energy Harvesting« geschehen. Dabei werden kleine Energiemengen aus Bewegung oder Wärme gesammelt, vor allem aber die photovoltaische Energiekonversion von Umgebungsbeleuchtung genutzt. Da viele Sensoren bzw. elektronische Kleinbauteile innerhalb von Gebäuden eingesetzt werden, müssen Solarzellen für deren Versorgung unter sehr niedrigen Beleuchtungsstärken arbeiten. Zudem unterscheiden sich typische Beleuchtungsspektren in Innenräumen erheblich vom Sonnenspektrum, da sie dem menschlichen Auge angepasst sind. Hier ist Organische Photovoltaik (OPV) im Vorteil. Das Absorptionsspektrum der organischen Absorber ist aufgrund der im Vergleich zu kristallinem Silicium deutlich höheren Bandlücke sehr gut für den Einsatz in Innenräumen geeignet. Zudem können sie durch entsprechende Materialsynthese gezielt auf die Umgebungsbedingungen angepasst werden. Nicht zuletzt können die dünnen OPV-Folien sehr einfach integriert werden. Das Fraunhofer ISE verfügt über langjährige Erfahrung bei der Erforschung der dafür notwendigen physikalischen und technologischen Fragestellungen. Wir entwickeln auch produktionsrelevante Zell- und Modulkonzepte. Mithilfe unserer elektrischen Modelle können wir Modulstrukturen speziell für das »Internet of Things (IoT)« optimieren.

1 *Flexibles organisches Solarzellenmodul in einem Layout, das eine hohe Flächenausnutzung von 87 % erlaubt.*

Rakelbeschichtung planarer Perowskitsolarzellen und Minimodule

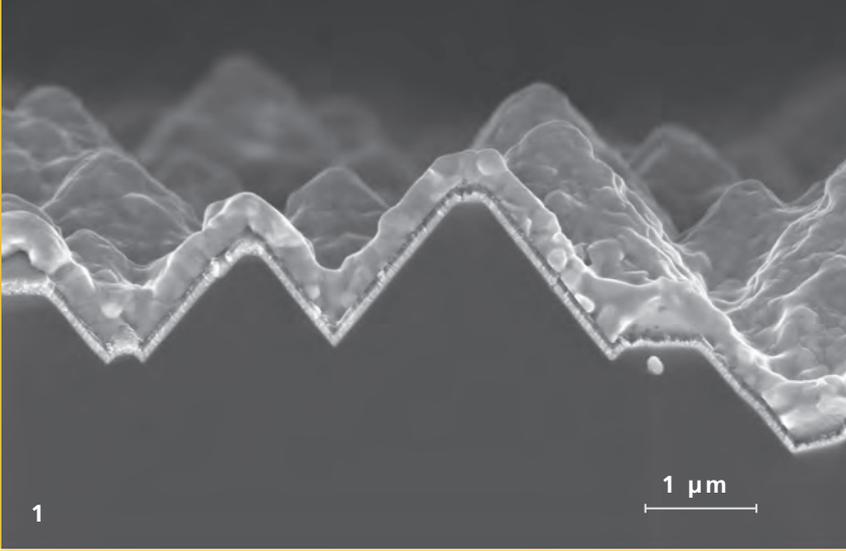
Dr. Uli Würfel | Telefon +49 761 203-4796 |
emergingpv@ise.fraunhofer.de

Perowskitsolarzellen werden meist mit Rotationsschleuderbeschichtung (spin coating) auf kleinen Flächen hergestellt. Dies funktioniert zwar gut, die Methode eignet sich jedoch nicht zur Aufskalierung auf große Flächen. Das Fraunhofer ISE hat daher Lösungsansätze untersucht, bei denen der Perowskitabsorber durch Rakelbeschichtung aufgebracht wurde. Dabei zeigte sich, dass die Qualität der Schichten, und damit auch der Wirkungsgrad der daraus hergestellten Solarzellen, entscheidend von der Trocknungsdynamik abhängt. Wir haben Proben, die wir zur Trocknung einem Stickstofffluss ausgesetzt hatten, mit solchen verglichen, bei denen dies nicht gemacht wurde. Bei der Röntgen-Diffraktometrie zeigte sich, dass der gerichtete Stickstofffluss zu mehr Ordnung in der multikristallinen Perowskitschicht führte, was sich auch in der höheren Photolumineszenz der so behandelten Proben ausdrückte.

Bei den in der sogenannten »p-i-n-Architektur« mit PEDOT:PSS (Poly-3,4-Ethylendioxythiophen) als Lochtransportschicht realisierten Solarzellen schlug sich die bessere Ordnung in der Absorberschicht in höheren Werten für die Konversionseffizienz nieder. Auf einer aktiven Fläche von 1,1 cm² wurden bis zu 11,8 % Wirkungsgrad erreicht. Dieser Wert konnte durch den Einsatz von gesputtertem NiO_x als Lochtransportschicht auf 12,4 % gesteigert werden.

Erste Minimodule mit drei seriell verschalteten Solarzellen auf einer aktiven Fläche von 5,9 cm² und PEDOT:PSS als Lochtransportschicht zeigten mit 9,7 % Wirkungsgrad ein vielversprechendes Ergebnis.

2 *Mit Rakelbeschichtung hergestelltes Perowskitsolarmodul aus drei seriell verschalteten Zellen.*



Von der Tandem-Rekordzelle zur Ertragsanalyse

Nico Tucher | Telefon +49 761 4588-2638 | emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de



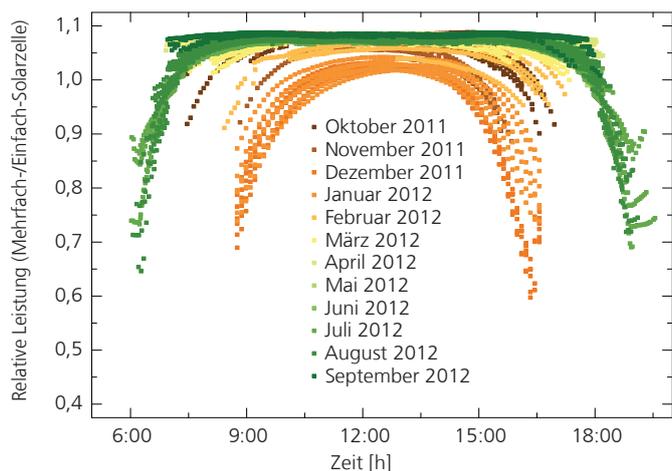
Mit 33,3 % Wirkungsgrad wurde am Fraunhofer ISE mit einer III-V-auf-Silicium-Tandemsolarzelle ein eindrucksvoller Rekord für Silicium-basierte Mehrfach-solarzellen erzielt. Doch wie verhält sich eine solche Zelle auf Modulebene? Und welchen Ertrag liefern Module mit Mehrfach-solarzellen im Vergleich zu Einfach-solarzellen, wenn ein komplettes Jahr und die Sonneneinstrahlung eines konkreten Standorts berücksichtigt werden? Diese Fragen sind auch für die aufstrebenden Perowskit-auf-Silicium-Tandemsolarzellen von höchster Bedeutung.

In einem simulationsbasierten Ansatz zur Beantwortung dieser Fragen wurden die beiden am Fraunhofer ISE entwickelten Tools »OPTOS« und »YieldOpt« miteinander verknüpft. Mit »OPTOS« können Tandemsolarzellen mit einer beliebigen Anzahl von Schichten und unterschiedlichen Oberflächenstrukturen auf Zell- und Modulebene effizient optisch modelliert werden. Wichtige Entscheidungen bezüglich der Auswahl von Materialien oder Strukturparametern können bereits auf dieser Basis getroffen und optimiert werden. Die mit »OPTOS« berechnete spektral aufgelöste Absorption ist zudem ein wichtiger Baustein für die weiterführende Analyse mit »YieldOpt«. Dieses Tool verknüpft die Simulation der elektrischen Leistung der Solarzelle mit dem einfallenden solaren Spektrum, das durch Messungen oder Simulationen bestimmt wird. So können unterschiedliche Solarzellenkonzepte unter realistischen Bedingungen modelliert sowie deren Ertrag im Feld abgeschätzt und verglichen werden.

1 REM-Aufnahme einer Perowskitschicht – konformal abgeschieden auf einer Zufallspyramiden-Oberfläche eines monokristallinen Siliciumwafers.

2 Schematische Darstellung einer verkapselten Perowskit-Silicium-Solarzelle.

Die bisherigen Modellierungen haben zu drei wichtigen Erkenntnissen geführt. So hat die Optimierung der Rückseitenstrukturen großes Potenzial, die Rekorderffizienz für III-V-auf-Silicium-Tandemsolarzellen weiter zu steigern. Zudem reduzieren Vorderseitentexturen für Perowskit-auf-Silicium-Tandemsolarzellen die Reflexionsverluste auf Zell- und Modulebene deutlich – eine Bestätigung, den eingeschlagenen Weg aufgedampfter Perowskitschichten zur Anwendung auf texturierten Siliciumzellen weiter zu verfolgen. Darüber hinaus können sowohl III-V-auf-Silicium-, als auch Perowskit-auf-Silicium-Tandemsolarzellen den Ertrag für verschiedene Standorte und Einstrahlungsbedingungen gegenüber Einfach-Silicium-solarzellen deutlich steigern.



Grafik: Relative Leistung einer verkapselten Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle im Vergleich zu einer reinen Siliciumzelle über ein Jahr, dargestellt für verschiedene Tageszeiten.

PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND KRAFTWERKE

1



123

Mitarbeitende



9

Zeitschriften- und
Buchbeiträge



34

Vorträge und
Konferenzbeiträge



2

Neu erteilte Patente

1 Satellitendaten ermöglichen ein zeitnahes, hochaufgelöstes Bild der Einstrahlung und der Einspeisung von Solarstrom sowie Prognosen der PV-Stromerzeugung bis zu einigen Stunden im Voraus.

Modultechnologie verwandelt Solarzellen in ein beständiges Produkt für den sicheren Betrieb in PV-Kraftwerken. Im Module-TEC – Module Technology Evaluation Center steht eine große Bandbreite an modernen Prozess- und Analyseplattformen für die Verschaltung und Lamination von Solarzellen bereit, besonders zur Materialerprobung, Produkt- und Prozessentwicklung. Wir analysieren Zelle-zu-Modul-Bilanzen (CTM) über Messungen und Simulationen und bieten Lizenzen für das Berechnungstool »SmartCalc.CTM« an.

Die Zuverlässigkeit von Modulen prüfen wir in unserem akkreditierten TestLab PV Modules für die Zertifizierung nach internationalen Normen und im Hinblick auf besondere Klimalasten und spezifische Degradationsrisiken. Wir unterstützen unsere Kunden bei der Qualifikation von Materialien und bieten umfassende Analysen von Degradations- und Schadensfällen an Modulen. Höchste Präzision bietet auch unser akkreditiertes Kalibrierlabor CalLab PV Modules, das mit nur 1,3 % Messunsicherheit bei kristallinen Modulen das weltweit führende Labor ist.

Für PV-Kraftwerke bieten wir eine umfassende Qualitätssicherung in allen Projektphasen bis zum laufenden Betrieb. Unter Einbeziehung von Standort- und Klimafaktoren erstellen wir präzise Ertragsprognosen und beraten bei der projektspezifischen Auswahl hochwertiger Komponenten. Wir entwickeln zuverlässige, probabilistische Methoden für die Leistungsprognose von PV-Anlagen und liefern Echtzeitstrahlungsdaten für PV-Strom-Hochrechnungen sowie für das Monitoring von PV-Systemen.

Auf Basis unseres Know-hows in den Gebieten der Photovoltaik, der Bauphysik und der Energieversorgung von Gebäuden bieten wir Lösungen zur Integration von PV in die Gebäudehülle. Für spezielle Anwendungen wie die Fahrzeug- und Geräteintegration entwickelt unser Team maßgeschneiderte Solarmodule.

Ausgewählte Meilensteine 2018

- » Erfolgreiche Inbetriebnahme des ersten industriellen Stringers für leitfähiges Kleben von Solarzellen im Module-TEC; Herstellung eines geklebten 320-W-Moduls mit 60 Heterojunction-Zellen.
- » Neues Produktionskonzept für bauwerkintegrierte Solarmodule senkt Herstellungskosten für individuell angepasste Module in Serienfertigung.
- » Deutliche Effizienzsteigerung mit bifazialen Schindelmodulen: Die Effizienz liegt um 30 %_{rel} höher als bei herkömmlichen Modulen.
- » Entwicklung eines globalen Belastungs-Klassifikationssystems für solartechnische Materialien, um hohe Belastungen, u. a. durch UV-Strahlung, Korrosion und Feuchtigkeit, zu kategorisieren.



www.ise.fraunhofer.de/photovoltaische-module-und-kraftwerke

Ansprechpartner

Photovoltaische Module und Kraftwerke

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

Modultechnologie

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

Modulkalibrierung

Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger | Telefon +49 761 4588-5280
pvmod.callab@ise.fraunhofer.de

Gebrauchsdauer und Schadensanalyse

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

Photovoltaische Kraftwerke

Dipl.-Ing. (BA) Boris Farnung | Telefon +49 761 4588-5471
pvmod.powerplant@ise.fraunhofer.de

Agrophotovoltaik

Stephan Schindele | Telefon +49 761 4588-5961
pvmod.apv@ise.fraunhofer.de

Bauwerkintegrierte Photovoltaik

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

PV for Mobility

Dr. Martin Heinrich | Telefon +49 761 4588-5024
pvmod.mobility@ise.fraunhofer.de

Solare Einstrahlungs- und Leistungsprognosen

Dr. Elke Lorenz | Telefon +49 761 4588-5015
pvmod.forecast@ise.fraunhofer.de

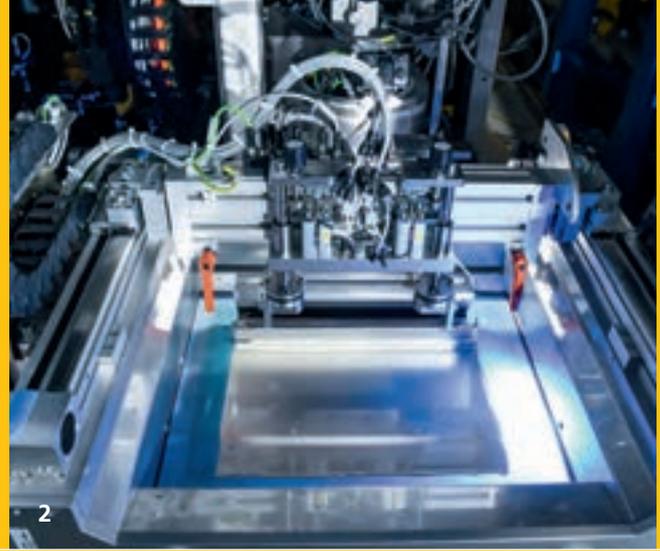
Ausgewählte Projekte 2018

 CPVMatch – Modernste Technologien und Zellen für Konzentrador-Photovoltaikmodule ermöglichen höchste Wirkungsgrade

 SCOPE – Projektdatenumgebung und Modellierung multifunktionaler Bauprodukte mit Fokus auf die Gebäudehülle

Mehr Informationen zu Projekten:
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-04





Kleben statt Löten – schonende Verschaltungstechnologie für Solarzellen

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

Elektrisch leitfähige Klebstoffe (Electrically Conductive Adhesives (ECAs)) haben sich als wichtige Alternative zu Lötverbindungen in der industriellen Produktion etabliert. Gemeinsam mit dem Anlagenhersteller teamtechnik wurde im Forschungsprojekt »KleVer«^A die Klebetechnologie für die Verbindung von Solarzellen zur Marktreife entwickelt. Im Verlauf des Forschungsprojekts wurde ein Stringer mit Klebeeinheit am Fraunhofer ISE erfolgreich in Betrieb genommen und umfänglich erprobt. Der Stringer ist in der Lage, Solarzellen mit bis zu fünf Busbars als Voll- oder Halbzelle mit einem Durchsatz von etwa 1600 Zellen pro Stunde zu verbinden. Damit ist die Taktrate in der industriellen Produktion nur geringfügig niedriger als beim Verlöten der Zellen. Neuartige ECA-Produkte härten in weniger als 20 Sekunden mit einer Schälffestigkeit von größer 1 N/mm aus und ermöglichen so den hohen Durchsatz.

1 Solarzelle ohne Busbars: Der leitfähige Klebstoff wird senkrecht zu den Kontaktfingern auf die Zelle aufgedruckt und ermöglicht die Verschaltung mit Zellverbindern.

2 Klebeeinheit des Stringers für die Verschaltung von Solarzellen.

Klebeverbindung für HJT- und Schindelmodule

Die im Vergleich zum Löten wesentlich niedrigeren Prozess-temperaturen reduzieren den thermischen und mechanischen Stress auf die empfindlichen Solarzellen. Vor allem temperatur-sensitive Hocheffizienzzellen (Heterojunction-Zellen (HJT)), sehr dünne Zellen und Schindelzellen können schonend mit ECA elektrisch verschaltet werden. Die Prozesstemperatur beim Aushärten des Klebers bleibt unter der für HJT-Zellen kritischen Temperatur von 200 °C. Für die Schindelverschaltung von Solarzellen ist das leitfähige Kleben die geeignete Verbindungstechnologie. Die thermomechanischen Spannungen im PV-Modul können durch die geringere Steifigkeit der Klebeschicht abgebaut werden. Damit sinkt die Gefahr von Mikrorissen und Brüchen in den Zellen.

Im Gegensatz zu herkömmlich eingesetzten Loten enthalten ECAs kein Blei. Der Silberanteil der leitfähigen Klebstoffe konnte signifikant gesenkt werden. In Kombination mit der Optimierung des Kleberauftrags im Siebdruck-Verfahren ist es gelungen, kosteneffiziente Lösungen für Klebeverschaltungen zu realisieren. Im akkreditierten TestLab PV Modules wurde die Zuverlässigkeit der Klebeverbindung durch Klimakammertests und detaillierte Analysen überprüft.



Maximale Erträge und höchste Zuverlässigkeit mit bifazialen PV-Modulen

Dr. Christian Reise | Telefon +49 761 4588-5282 | pvmmod.powerplant@ise.fraunhofer.de



Bifaziale PV-Module nutzen die rückseitige Einstrahlung für zusätzlichen Stromgewinn. Abhängig von Produktdesign, Montage und Umgebung lassen sich zusätzliche Erträge von typischerweise 5 bis 15 % erzielen. Damit unsere Kunden dieses Potenzial heben können, haben wir die Besonderheiten der bifazialen Technologie von der Solarzelle bis ins System umfassend analysiert.

Moduldesign

Die erhöhte Stromdichte verlangt Anpassungen im Zell- und Verbinder-Design. Am Fraunhofer ISE wurde das Berechnungstool »SmartCalc.CTM« auf bifaziale Module erweitert. Das Werkzeug erlaubt die Optimierung von Modulleistung und -effizienz über eine Vielzahl von Material- und Design-Parametern. Modulhersteller benötigen nur wenige Mausklicks, um ihr Produkt zu verbessern.

Charakterisierung und Prüfung

Im CallLab PV Modules des Fraunhofer ISE wurden Methoden zur Charakterisierung bifazialer Module bei simultaner Bestrahlung und zur Bestimmung des Bifazialitätsfaktors entwickelt. Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis des Wirkungsgrads von Rückseite zu Vorderseite und wird für die Produktspezifikation und die Ertragsprognose benötigt. Im TestLab PV Modules haben wir Methoden für die Prüfung bifazialer Module und für die Anpassung der gängigen Prüfnormen IEC 61215 und IEC 61730 entwickelt. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Rolle der rückseitigen Bestrahlung und partiellen Verschattung in der Hot-Spot-Prüfung.

Ertragsanalyse und -optimierung

Der Ertrag eines bifazialen PV-Kraftwerks hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Ihr komplexes Zusammenwirken kann mithilfe von Methoden zur Strahlverfolgung (Raytracing) präzise modelliert werden. Mit dem Raytracing nutzen wir einen Algorithmus, der die auftreffenden Lichtstrahlen im dreidimensionalen Raum berechnet. Damit erzielen wir viel genauere Ergebnisse als gängige Näherungen über Raumwinkelverfahren. Unser Werkzeug ermöglicht nicht nur die Analyse und Optimierung des Anlagendesigns, z. B. des Modulabstands oder der Bodenbeschaffenheit (Albedo). Hersteller erhalten auch Hinweise zum Design von Modulen und Montagegestellen, um eine kritische Teilverschattung der Modulrückseite zu vermeiden. Über das Monitoring bifazialer Module an verschiedenen Standorten konnten die Ertragsprognosen überzeugend validiert werden. Installationsbetriebe und Investoren nutzen unsere Prognosen, um den Mehrwert bifazialer Technologie darzustellen.

1 Testanlage des Fraunhofer ISE zur Kalibrierung von bifazialen PV-Modulen.



ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME

i In dieser Membrandestillationszelle entwickelt das Fraunhofer ISE Wasseraufbereitungsverfahren, um stark toxische Substanzen abzutrennen. Anwendungsfälle sind z. B. Abwässer oder Prozessfluide aus der Galvanikindustrie oder der Halbleiterproduktion.

Die Energiewende ist in ihre zweite Phase getreten, und zwar nicht nur in Deutschland, sondern in vielen Ländern, die eine ähnlich hohe Durchdringung der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien erreicht haben. Wesentliche Entwicklungen und Kostensenkungen im Bereich der wichtigsten Wandler erneuerbarer Energien, besonders zur Nutzung von Windenergie, Solarenergie und Biomasse für die Stromerzeugung, haben in der ersten Phase der Energiewende dazu geführt, dass eine bezahlbare Transformation unseres Energiesystems hin zu einer dominanten Versorgung auf Basis erneuerbarer Energiequellen überhaupt erst vorstellbar geworden ist. Ein deutlicher Ausbau der entsprechenden Anlagen in den vergangenen Jahren führte dazu, dass der Anteil erneuerbarer Energien zur Stromversorgung im Jahr 2018 in Deutschland auf 40 % gesteigert werden konnte. Die Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie hinken allerdings noch stark hinterher. So beheizen wir unsere Gebäude nach wie vor überwiegend mit Erdgas und Heizöl und Fortbewegung basiert größtenteils auf fossilen Kraftstoffen. Insofern steht nun – in der nächsten Phase – eine umfassende Integration erneuerbarer Energien an, die zugleich eine viel stärkere Kopplung der Sektoren – Strom, Wärme, Verkehr – benötigt. Viel spricht für eine stärkere Elektrifizierung all dieser Sektoren. In zahlreichen Anwendungsfeldern kann Strom, der zunehmend auf Basis erneuerbarer Quellen hergestellt wird, sehr effizient direkt genutzt werden, wie z. B. in Wärmepumpen oder batterieelektrischen Fahrzeugen. Bereiche,



die einer direkten Stromnutzung schwerer zugänglich sind, wie Schwerlast-, Schiffs- und Luftverkehr oder auch Industrieprozesse, können dagegen in wachsendem Maß mit erneuerbaren, chemischen Energieträgern versorgt werden. Auf Grund der begrenzten Biomasseressourcen wird hier Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen, der entweder durch Rückkonversion in Strom in stationären oder mobilen Brennstoffzellen oder direkt in Industrieprozessen genutzt werden kann. Wasserstoff kann zudem mit CO₂ in erneuerbare synthetische Brenn- und Kraftstoffe oder Chemikalien für die Industrie weiter konvertiert werden.

Das Fraunhofer ISE hat sich seit seiner Gründung mit vielen Technologien und Fragestellungen befasst, die in dieser anstehenden zweiten Phase der Energiewende von höchster Relevanz sind und die im Bereich »Energietechnologien und -systeme« mit seinen Geschäftsfeldern »Energieeffiziente

Gebäude«, »Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse«, »Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeichersysteme« und »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme« adressiert werden. Bei den vielen nachfolgend und darüber hinaus auf unseren Internet-Seiten dargestellten Projekten und Ergebnissen haben wir ein besonderes Augenmerk auf das Thema »Digitalisierung« gelenkt, das immer mehr Relevanz für die Technologiefelder der Energiewende gewinnt. Bei der Gebäudeeffizienz spielen Big Data für das Lernen zur optimalen Betriebsführung eine zentrale Rolle. In der Solarthermie hilft die Digitalisierung, die Effizienz von Kraftwerken zu steigern. Effizienzgewinn bringt sie auch bei der Systemintegration von Speichern in PV-Inselanlagen, aber auch beim Netzmanagement im Stromnetz. Bei der Wasserstoff-Einspeisung ins Gasnetz hilft sie, die Betriebsführungsstrategien zu optimieren.

ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE

1



195
Mitarbeitende



27
Zeitschriften- und
Buchbeiträge



45
Vorträge und
Konferenzbeiträge



8
Neu erteilte Patente

Energieeffiziente Gebäude spielen eine zentrale Rolle beim Klimaschutz: Über 40 % der Endenergie entfällt in Deutschland auf den Gebäudesektor. Für den Betrieb von Gebäuden müssen wir den Energiebedarf senken und diesen dann weitestgehend mit erneuerbaren Energien decken. Genau da setzt das Fraunhofer ISE an: Von der Planung der Gebäude über die Erstellung bis zu deren Betrieb bieten wir Unterstützung für die konsequente Umsetzung dieser Vision an.

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

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

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

Ausgewählte Meilensteine 2018

1 *Berieselungsanlage zur akustischen Auskopplung der Luftströmung bei einer Wärmepumpe.*

- » Akkreditierung TestLab Heat Pumps and Chillers.
- » Methodik zur digitalen Beschreibung von Regelungskonzepten zur Betriebsüberwachung von TGA-Anlagen in BIM implementiert.
- » Neues, kostengünstigeres Produktionskonzept für bauwerkintegrierte Solarmodule entwickelt.



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 von Gebäuden

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. Wolfgang Kramer | Telefon +49 761 4588-5096
soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de

Wärmepumpen

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

Thermische Speicher für Gebäude

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

Lüftungs- und Klimatechnik

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

Ausgewählte Projekte 2018

-  InDeWaG – Industrial Development of Water Flow Glazing Systems
-  RenoZEB – Fördern von energetischen Sanierungslösungen für Nullenergiegebäude und Wohngebiete
-  NEK-Quartiere – Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien für die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte in Energiekonzepten für Gebäude und Quartiere
-  SolSys – Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme

-  SCOPE – Projektdatenumgebung und Modellierung multifunktionaler Bauprodukte mit Fokus auf die Gebäudehülle

-  SysWärme – Systemische Herausforderung der Wärmewende

-  WCS-energy – Energetische Betriebsüberwachung von Nasskühltürmen durch Online-Monitoring

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





Neue, architektonisch attraktive Solarthermie-Konzepte

Dr. Bruno Bueno | Telefon +49 761 4588-5377 |
building.envelope@ise.fraunhofer.de

Gemeinsam mit Architekten, Fassadenplanern, Herstellern von Fassadenkomponenten und Handwerkern arbeitet das Fraunhofer ISE an neuen Solarthermie-Konzepten für die Gebäudehülle. Gemeinsames Merkmal der neuen Solarkollektoren ist ein hohes Maß an Flexibilität. Dadurch sind diese bereits im architektonischen Entwurfsprozess nachhaltiger Bauprojekte ein sowohl gestalterisch als auch energetisch attraktives Element.

Um dies zu erreichen, verfolgen wir verschiedene Ansätze. Im Projekt »ArKol«[^] haben wir die Wärmeübertragung vom Absorber zum Sammelkanal mit der »trockenen Anbindung« von Heat-Pipes realisiert. Dadurch ist eine freie Positionierbarkeit (Streifenkollektor) bzw. Beweglichkeit (solarthermische Jalousie) einzelner Kollektoren bzw. Absorber möglich. Im Projekt »TABSOLAR II«[^] wurden mithilfe unseres Membran-Vakuumtiefziehverfahrens durchströmbare solarthermische Fassadenelemente aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC) hergestellt. Mit diesen ergeben sich viele Gestaltungsmöglichkeiten wie Reliefstrukturen, Farben und spektralselektive Beschichtungen.

Um die neuen Konzepte erfahrbar zu machen und die solarthermischen Erträge an unseren Testständen messen zu können, haben wir unsere Muster erfolgreich vom Labor- in den Technikumsmaßstab übertragen und Demonstratoren gefertigt. Zukünftig sollen weitere Optionen, z. B. farbige Beschichtungen oder Verglasungen, betrachtet werden, um die architektonische Gestaltungsfreiheit weiter zu erhöhen.

1 Im Projekt »ArKol« gefertigter Demonstrator eines Fassadenkollektors mit Heat-Pipes.

Nachhaltige Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern im Bestand

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

Bis 2050 wird eine Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % im Verhältnis zum Referenzjahr 1990 angestrebt. Der Gebäudesektor spielt eine entscheidende Rolle, um diese Klimaschutzziele zu erreichen. Dazu ist eine Kombination aus der Nutzung der Gebäudehülle für die Energiegewinnung und der Senkung von CO₂-Emissionen bei der Wärmeversorgung erforderlich. Ein zentraler Baustein hierfür sind LowEx-Technologien wie Umweltenergie nutzende Wärmepumpen. Während ihr Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern längst Standard ist, sind Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern unterrepräsentiert. Dies gilt besonders für Mehrfamilienhäuser im Bestand.

Im Verbundprojekt »LowEx im Bestand«[^] entwickelt das Fraunhofer ISE geeignete Lösungsansätze unter anderem für den Bedarf an effizienter Wärmeversorgungstechnik, die hygienische Bereitstellung von Trinkwarmwasser, die eingeschränkte Quellenverfügbarkeit im innerstädtischen Raum und den Wunsch nach Sanierungsoptionen, die im bewohnten Zustand durchführbar sind. Zusammen mit unseren Industriepartnern entwickeln wir Wärmepumpen und Lüftungstechnik für diese Fragestellungen. Wir erarbeiten und bewerten ganzheitliche Systemkonzepte für den Einsatz dieser Technologien in Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlichen Sanierungsstandards. Dabei berücksichtigen wir die Nutzungsmöglichkeiten bestehender Hydraulik und Wärmeübergabesysteme. Die Machbarkeit wird durch die Demonstration ausgewählter Lösungen in realen Gebäuden nachgewiesen.

2 Erneuerbare Wärmeversorgung eines sanierten Mehrfamiliengebäudes aus der Gründerzeit in Freiburg.

[^] gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)



Digitale Methoden für die energetische Betriebsführung von Gebäuden

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



Das »Internet of Things (IoT)« und der »digitale Gebäudezwilling« (Building Information Model, BIM) sind die nächsten Evolutionsstufen im Bereich der Gebäudeautomation. Diese Technologien ermöglichen es, zusätzliche Informationen über den Zustand von Anlagen zu erfassen, zu verbreiten und digital zu verwalten. Sie bringen auf diese Weise mehr Übersicht in die steigende Komplexität der Gebäude und ermöglichen es, die Anforderungen an Komfort und Energieeffizienz besser zu erfüllen.

Zudem liefern sie hochaufgelöste Messdaten und Metadaten für innovative Analyse- und Diagnosemethoden. Damit können Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens, die den Betrieb von Anlagen und Komponenten kontinuierlich überwachen, trainiert und angewandt werden. Im Gebäudebetrieb werden dadurch Fehler und suboptimale Betriebszustände zeitnah erkannt und Gebäudebetreiber erhalten frühzeitig alle für eine Behebung des Problems relevanten Informationen über geeignete Webplattformen wie »Mondas« oder »TOPAs«.

Neben dem Cloud-Computing ermöglichen numerische Dekompositionsverfahren die dezentrale Integration der Überwachungsmethoden auf kostengünstige Rechereinheiten. Das Fraunhofer ISE entwickelt und testet innovative Methoden zur Fehlererkennung und Diagnose von TGA-Anlagen, die mit BIM verknüpft sind und zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebetrieb beitragen.

1 *Überwachung des Betriebs der Wärmerückgewinnung einer raumlufttechnischen Anlage.*

Innovative Betriebsführung eines nahwärmeversorgten Quartiers

Axel Oliva | Telefon +49 761 4588-5698 |
building.concepts@ise.fraunhofer.de

Das Fraunhofer ISE untersucht umfassend die zukünftige Rolle der Solarthermie für die städtische Wärmeversorgung. Dafür ist die dezentrale Einbindung von solarthermischen Anlagen in ein auf einem Blockheizkraftwerk (BHKW) basierendes Nahwärmesystem von entscheidender Bedeutung. Den Betrieb der BHKWs optimieren wir dabei hinsichtlich der bestmöglichen Interaktion mit dem Stromnetz. Den Betrieb des Nahwärmenetzes betrachten wir mit dem Ziel einer Minimierung der Verteilverluste. Ziel ist, allgemeingültige Regeln für die langfristige Nutzung von Solarthermie in Wohnquartieren abzuleiten, besonders vor dem Hintergrund einer sich massiv ändernden Energieversorgungsstruktur.

Ein Beispiel für diesen Konzeptansatz ist das Demonstrationsvorhaben »Freiburg-Gutleutmatten«^A. Hierfür wurde ein Versorgungskonzept mit den erforderlichen Betriebsführungsstrategien auf Basis von numerischer Systemsimulation detailliert ausgearbeitet. Aktuell werden die dabei entwickelten Betriebsmodi in der Regelung für das Quartier hinterlegt sowie zur optimalen Fahrweise mit einer modellbasierten, prädiktiven Regelung (MPC) kombiniert. Ein wesentliches Merkmal stellt die modulierende Betriebsweise des gesamten Nahwärmenetzes unter aktiver Einbindung der in den einzelnen Häusern installierten Warmwasserspeicher dar. Die einzelnen Gebäude können durch die solarthermischen Anlagen in der Sommerzeit für längere Zeiträume mit ausreichend Wärme versorgt werden, so dass das Nahwärmenetz dann außer Betrieb genommen werden kann. Zudem kann solarthermische Wärme in das Nahwärmenetz eingespeist und weiter verteilt werden.

2 *Quartier Freiburg-Gutleutmatten.*

^A gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE UND INDUSTRIEPROZESSE

1



75

Mitarbeitende



13

Zeitschriften- und Buchbeiträge



25

Vorträge und Konferenzbeiträge

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

Thermische Speicher bieten auch in industriellen Prozessen große Chancen, Prozesse effizienter und Energieflüsse flexibler zu gestalten. Neben konkreten Speicherlösungen und Energieeffizienzmaßnahmen arbeiten wir an der Einbindung solarer Prozesswärme in die Wärmeversorgung industrieller Prozesse. Die effiziente Wandlung und Übertragung thermischer Energie kann weitere Beiträge zur Dekarbonisierung von Industrieprozessen liefern. Deshalb bilden auch effiziente Wärmeübertrager sowie Materialien und Komponenten hierfür einen Schwerpunkt unserer Arbeiten. Fragen der Be- und Entfeuchtung bilden den Übergang zu unseren Arbeiten zur Wasseraufbereitung. Neben der Gewinnung von Trinkwasser aus Meer- oder Brackwasser arbeiten wir verstärkt an der Reinigung oder Aufkonzentrierung von Reststoffen in industriellen Abwässern. Am Fraunhofer ISE verfügen wir über profunde Kompetenzen in Materialwissenschaften, Komponentendesign, Charakterisierung und Prüfverfahren, theoretischer Modellierung und Simulation, Anlagenregelung und Systementwicklung und können dabei auf langjährige Erfahrungen aus Projekten für Anwendungen in solarthermischen Kraftwerken und in verschiedenen Industriezweigen zurückgreifen.

Ausgewählte Meilensteine 2018

1 *Flexibel einsetzbarer Teststand zur Charakterisierung und Untersuchung von Eintank-Speicherkonzepten auf Salzsammelzebasis für Temperaturen bis 550 °C.*

- » Einweihung des ersten CSP-Parabolrinnen-Kraftwerks mit Salzsammelze als Wärmeträgerfluid und Speichermedium im Projekt »MATS«.
- » Konferenz zur Wassereinsparung in CSP-Kraftwerken im Projekt »MinWaterCSP«.
- » Erfolgreicher Projektabschluss »DASTII« zur Nutzung solarer Prozesswärme in industriellen Prozessen der Lebensmittelindustrie in Tunesien.



Ansprechpartner

Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

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

Solarthermische Kraftwerke

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

Konzentrierende Kollektoren

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

Wasseraufbereitung und Stofftrennung

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

Thermische Speicher für Kraftwerke und Industrie

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

Industrieprozesse und Prozesswärme

Dr. Pedro Horta | Telefon +49 761 4588-2126
soltherm.process@ise.fraunhofer.de

Effiziente Wärmeübertrager

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

Ausgewählte Projekte 2018

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

 AVUS – Automatisierte In-situ Messung von Verschmutzungsraten und -spektren

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2-00





Digitalisierung transformiert Betrieb solarer Turmkraftwerke

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



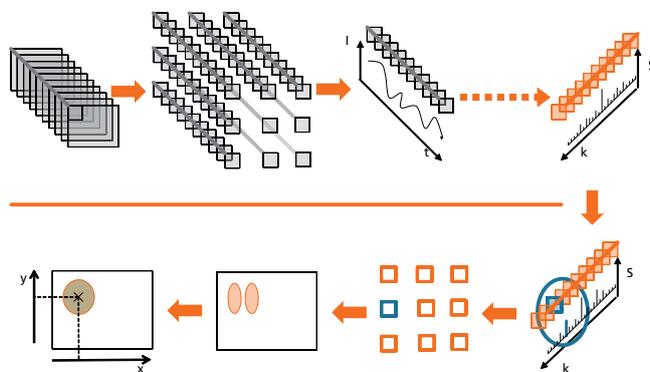
Turmsysteme sind eine vielversprechende Technologie für solarthermische Kraftwerke. Dabei verursacht das Heliostatenfeld, das die einfallende Solarstrahlung auf einen Empfänger am Turm konzentriert, bis zu 50 % der Investitionskosten. Eine hohe optische Qualität der Heliostate und ihre präzise Nachführung sind daher maßgeblich für die Kraftwerkseffizienz und die Stromgestehungskosten.

Die zunehmende Digitalisierung solarthermischer Kraftwerke ermöglicht es, Effizienzpotenziale besser zu nutzen und technische Herausforderungen erfolgreich zu meistern. Unsere Forschungsansätze führen zu einer Verzahnung der Produktion und Steuerung des Solarfelds mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik.

So haben wir z. B. das bildgebende Regelungssystem »HelioControl« zur präzisen Überprüfung der Ist-Zielpunkte von Heliostaten im laufenden Betrieb entwickelt. Einzelnen Heliostaten wird hierbei zusätzlich zur Ausrichtung nach der Sonne eine periodische Bewegung mit sehr kleiner

Amplitude aufgeprägt, die im kumulierten Brennfleck auf dem Strahlungsempfänger von Kameras aufgenommen und digital analysiert wird. Dabei wird der tatsächliche Ist-Zielpunkt der Heliostaten ermittelt und – bei Abweichung des Ist-Zielpunkts vom in der Steuerung hinterlegten Soll-Zielpunkt – zur Korrektur der tatsächlichen Ausrichtung verwendet.

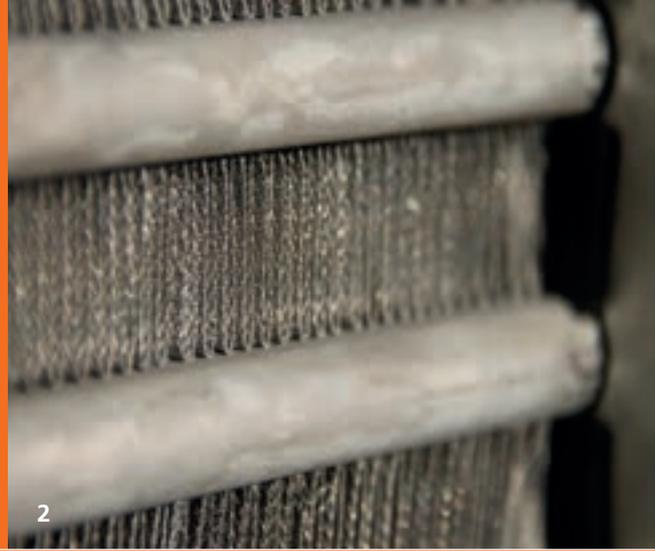
Die Methodik wurde im Labormaßstab sowie in ersten Feldtests im realen Heliostatenfeld erprobt und demonstriert. Gegenüber der derzeit üblichen sequenziellen »Kalibrierung« der Heliostaten-Zielpunkte auf einer separaten optischen Zielfläche wird der Zeit- und Kostenaufwand für die Zielpunkt-Kontrolle tausender Heliostaten in einem großen Feld deutlich reduziert. In Simulationen konnten wir erhebliche Einsparungen feststellen, weil durch die bessere Zielkontrolle weniger Heliostaten aufgebaut werden müssen, um dieselbe Leistung zu erzielen. Weitere Kostensenkungen erhoffen wir uns durch Einsparungen am Heliostat selbst, der durch die quasi-kontinuierliche Zielkontrolle auch bei weniger akkurater Bauweise sehr präzise betrieben werden kann.



Im nächsten Schritt wird ein Plug-In-System mit der Industrie entwickelt, das die Integration in neue und bestehende Heliostatenfeldsteuerungen ermöglichen soll. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von »HelioControl« ist die Erstkalibration eines neuen Solarfelds bei der Inbetriebnahme. Die Nutzung von »HelioControl« kann hier bis zu einer hundertfachen Verkürzung führen.

Grafik: Schema der digitalen Bildauswertung des »HelioControl« Systems zur Überprüfung und Anpassung von Zielpunkten, das als geschlossener Regelkreis (Closed-Loop) in Form eines Plug-In für bestehende kommerzielle Solarfeldsteuerungen eingesetzt wird.

- 1 »Focal Spot«-Test am Heliostatenteststand des Fraunhofer ISE.
- 2 »HelioControl« Plug-In-System im Test auf der Demonstrationsanlage THEMIS von CNRS-PROMES in Frankreich.



Effiziente Wärmeübertrager für Industrieprozesse

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

Für den Erfolg der Energiewende ist ein stärkerer Einsatz von effizienten Wärmeübertragern in Industrieprozessen essenziell. Im Industriesektor werden deutschlandweit jedes Jahr ca. 1700 Petajoule Prozesswärme und -kälte benötigt. Schon geringe Effizienzsteigerungen bei der Wärmeübertragung können somit einen großen Effekt bewirken.

Das Fraunhofer ISE untersucht die gesamte Bandbreite von grundlegenden thermodynamischen Prozessen der Wärmeübertragung bis hin zu messtechnischen Untersuchungen in Labor und Feld. Auf der grundlegenden Ebene optimieren wir Wärmeübertrager, um eine höhere energetische Effizienz, einen verringerten Bauraum und eine kleinere Masse zu erzielen. Innovative Ansätze zur Verwendung metallischer Drahtstrukturen als Oberflächenvergrößerung bei Luft-Fluid-Wärmeübertragern haben experimentell eine deutlich gesteigerte Kompaktheit um bis zu 50 % bei gleicher Übertragungsleistung gezeigt. Die Drähte werden dabei gezielt parallel angeordnet und bilden eine gerichtete poröse Struktur. Durch diese strömt die Luft und gibt über die Drähte Wärme ab oder nimmt sie auf. Gleichzeitig konnten starke Materialeinsparungen für die Oberflächenvergrößerung erzielt werden, was sich positiv auf das Gewicht der Wärmeübertrager auswirkt. Hinsichtlich fluid- und thermodynamischer Berechnungen im Musterbau und bei der Vermessung haben wir im Projekt »MinWaterCSP«[^] Wärmeübertrager-Designs für Luftkondensatoren entwickelt, die 10 % weniger Masse der Verrohrung bei gleichzeitiger Oberflächenvergrößerung aufweisen.

Auch für thermische Energiespeicher sind Wärmeübergangsprozesse und Oberflächenvergrößerungen von zentraler Bedeutung, um Wärme und Kälte zeitversetzt oder an einem anderen Ort effizient bereitstellen zu können. Die Leistungsfähigkeit von Latentwärmespeichern z. B. ist durch eine geringe Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Phasenwechselmaterials limitiert. Wärmeübertrager basierend auf Mikrorohren mit metallischem Drahtgewebe kompensieren die geringe Wärmeleitfähigkeit und ermöglichen eine bessere Ankopplung des Speichermediums in Richtung des Drahtgewebes. Mithilfe von transienten thermodynamischen Simulationen untersuchen und optimieren wir die Effektivität derartiger Wärmeübertrager für Latentwärmespeicher.

Weitere Optimierungen haben wir für Ein-Tank-Wärmespeicher mit Salzschnmelze als Speichermedium erzielt. Diese Speicherlösungen werden in Industrie- und Kraftwerksanwendungen eingesetzt. An einer Versuchsanlage am Fraunhofer ISE konnten wir zeigen, dass durch eine entsprechende Auslegung des Einlaufs die Durchmischung von warmem und kaltem Fluid minimiert werden kann. Dabei wurde eine Schichtung mit einem Temperaturgradienten von mehr als 120 K innerhalb von 8 cm erreicht. Mit unserer Systemsimulationssoftware »ColSim« haben wir zudem deutlich verbesserte Betriebsstrategien und ein verbessertes Speichermanagement identifiziert, wobei eine Speicherausnutzung von rund 93 % erzielt wurde.

¹ *Flexibel einsetzbarer Teststand am Fraunhofer ISE zur Charakterisierung und Untersuchung von Ein-Tank-Speicherkonzepten auf Salzschnmelzebasis für Temperaturen bis 550 °C.*

² *Oberflächenvergrößerung eines Flachrohr-Wärmeübertragers mit metallischer Gewebestruktur auf Basis von Drahtdurchmessern von 180 µm.*

WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN UND ELEKTRISCHE ENERGIESPEICHER

1



131

Mitarbeitende



16

Zeitschriften- und Buchbeiträge



26

Vorträge und Konferenzbeiträge



4

Neu erteilte Patente

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

Für Batteriematerialien, -zellen, -module und -systeme bieten wir FuE-Leistungen basierend auf gängigen und zukünftigen Technologien an. Dies umfasst die Analyse und die Erforschung neuer Materialzusammensetzungen und Zellarchitekturen, die Untersuchung neuer Fertigungsverfahren, des Aufbaus von Batteriezellen sowie deren Formierung und Charakterisierung. Wir analysieren Alterungsmechanismen und Möglichkeiten, die Zyklenfestigkeit und die kalendarische Lebensdauer zu steigern. Wir entwickeln auch komplette Batteriesystemprototypen inklusive thermischem Management und Batteriemangement. Darüber hinaus begleiten wir unsere Partner im Rahmen von Feldprojekten bei der Integration in die verschiedensten Anwendungen und bei der zugehörigen Qualitätssicherung. Dazu zählen stationäre gewerblich und industriell genutzte Batteriespeicher genauso wie die Elektromobilität, angefangen von elektrischen Leichtfahrzeugen über PKWs bis hin zur Elektrifizierung beziehungsweise Hybridisierung von Schiffen.

Ausgewählte Meilensteine 2018

- » Neue Studie vorgestellt: Wasserelektrolyse hat Potenzial zur Gigawatt-Industrie.
- » Inbetriebnahme einer Wasserstoff-Einspeiseanlage in Freiburg.
- » Hochleistungs-Batteriesystem mit 140 kW bei 5,5 kWh Energieinhalt entwickelt und aufgebaut.
- » Batterien mit wässrigem Elektrolyten als kostengünstige, umweltfreundliche und langlebige Alternative für stationäre Anwendungen entwickelt.
- » Simulationsbasierte Auslegung und Optimierung eines PV-Batteriesystems zur Direkt-Einspeisung ins Straßenbahnnetz als Beispiel für eine zukunftsweisende Sektorenkopplung.

1 *Batteriezellentwicklung – Zusammenbau einer Knopfzelle.*



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

Ansprechpartner

Wasserstofftechnologien

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 2018

 Ressourceneffizienz – Entwicklung von Gasdiffusions-schichten für Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen auf Basis umweltfreundlicher und energiesparender Rohstoffe

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





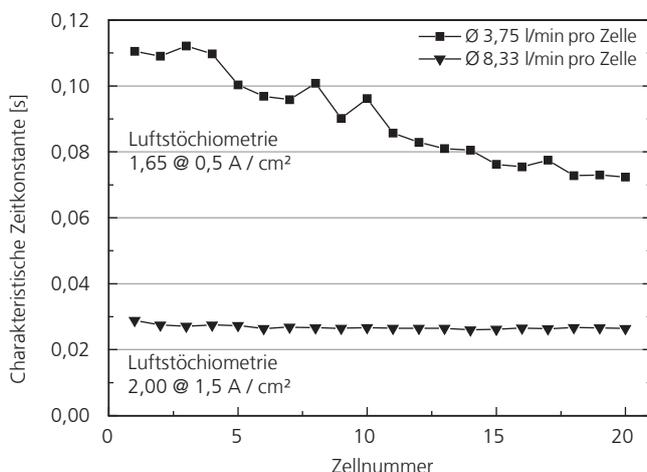
Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stapeln

Stefan Keller | Telefon +49 761 4588-5207 | h2fc.systems@ise.fraunhofer.de

Brennstoffzellen ermöglichen emissionsfreie Mobilität mit langen Reichweiten bei kurzen Betankungszeiten. Die zentrale Komponente ist der Brennstoffzellen-Stapel, der für den automobilen Antrieb aus über 400 Einzelzellen bestehen kann. Wir bieten eine wissenschaftlich fundierte Charakterisierung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit sowie der Langzeitstabilität von Kurzstapeln mit Leistungen bis 20 kW_{el} an.

Die Leistungsfähigkeit eines Brennstoffzellen-Stapels ist wesentlich durch die Sensitivität gegenüber den Betriebsparametern wie Gasversorgung, Gasfeuchte, Betriebstemperatur, Gasdrücke auf Anode und Kathode sowie durch die Verpressung bestimmt. Das Fraunhofer ISE führt deshalb entsprechende Sensitivitätsanalysen durch. Einzigartig ist eine 28-Kanal-Impedanzanlage, mithilfe derer Impedanzspektren an 28 Einzelzellen oder Zellpaketen gleichzeitig aufgenommen werden kann, um Inhomogenitäten innerhalb des Stapels zu erfassen und zu analysieren. Dies ist besonders wichtig, wenn

sogenannte »Rainbow Stacks« mit unterschiedlichen Membranelektrodeneinheiten charakterisiert werden sollen. Unter Verwendung entsprechender Kontaktierungen können auch Unterschiede von Gaseinlass zu Gasauslass der Einzelzellen im Stapel vermessen werden. Die Impedanzdaten ermöglichen eine genauere Analyse der gleichzeitig ablaufenden physikalischen und elektrochemischen Prozesse als eine einfache Spannungsmessung. So werden Leistungsverluste besser verstanden und Lösungsmöglichkeiten zu deren Vermeidung aufgezeigt. Im letzten Jahr ist es uns gelungen, durch eine innovative Analyse der Einzelzell-Impedanzspektren die charakteristischen Zeitkonstanten der Einzelzellen eines Zellstapels zu identifizieren. Dies erlaubt eine vergleichende Abschätzung der Durchströmung aller Einzelzellen im Zellstapel. Somit werden mögliche Inhomogenitäten in der Gasversorgung (s. Grafik) im Zellstapel in Abhängigkeit der Betriebsführung deutlich.



Grafik: Charakteristische Zeitkonstanten für einen Zellstapel mit 20 Einzelzellen in Abhängigkeit der Luftstöchiometrie: Bei niedriger Stöchiometrie signifikante Inhomogenitäten in der Durchströmung.

In unserer begehbaren Klimakammer können wir Froststartstrategien bis zu -40°C und das Betriebsverhalten bis $+80^\circ\text{C}$ untersuchen. Im Projekt »AutoStack-CORE«^A haben wir erfolgreich Froststartversuche bis -20°C durchgeführt. Hierzu wurde ein spezieller Kühlkreislauf in unserer Klimakammer aufgebaut. Mit Hilfe der Impedanzspektroskopie entwickelten wir geeignete Konditionierungsprozesse, um den Brennstoffzellenstapel für einen Froststart vorzubereiten. So erreichte der Stapel während eines Froststarts bei -20°C bereits nach 13 Sekunden die halbe Nennleistung. Das Projektziel von 30 Sekunden wurde deutlich unterschritten.

1 Teststand für NT-PEMBZ-Kurzstapel bis 20 kW_{el} , Klimakammer und Mehrkanal-Anlage zur elektrochemischen Impedanzspektroskopie.

^A gefördert von der Europäischen Union (Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative)



Methanol aus Prozessgasen der Stahlindustrie

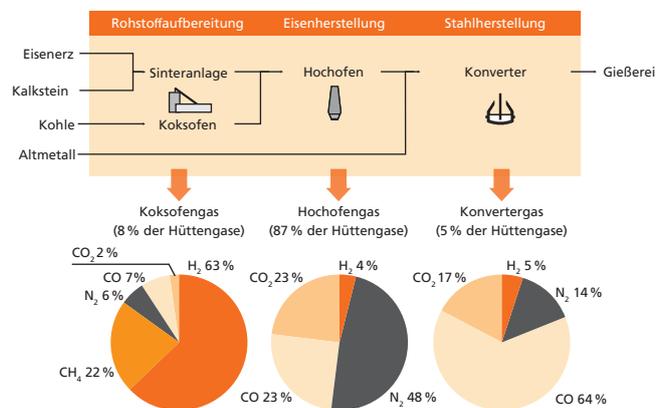
Max Hadrich | Telefon +49 761 4588-2207 | h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

Stahlwerke sind für ca. 6 % der deutschen CO₂-Emissionen verantwortlich. Unter dem Sammelbegriff »Hüttengase« gefasst, entstehen in verschiedenen Teilschritten des Verhüttungsprozesses große Mengen an Prozessgasen, die reich an Wasserstoff und Kohlenoxiden (CO₂ und CO) sind. So gibt es Koksofengas, Hochofengas und Konvertergas. Aktuell werden Hüttengase vor allem thermisch, also zur Strom- und Wärmegewinnung genutzt. Im Projekt »Carbon2Chem®«^A untersuchen Partner aus Industrie und Forschung verschiedene Szenarien, um diese Hüttengase stofflich zu nutzen und den Kohlenstoffkreislauf zu schließen. Das Fraunhofer ISE betrachtet dabei die Methanolsynthese. Methanol, eine wichtige Grundchemikalie und potenzieller Kraftstoff, wird aktuell fast ausschließlich aus fossilen Quellen (Erdgas, Kohle) hergestellt. Bei einer Synthese unter Nutzung von Hüttengasen gibt es drei besondere Herausforderungen: Erstens müssen die Hüttengase aufgereinigt werden. Zweitens macht ihr hoher CO₂-Gehalt sie zu einem ungewöhnlichen Ausgangsstoff für Methanol. Drittens stellt die Verwendung von Hüttengasen besondere Anforderungen an die Anlagendynamik, da Mengen und Zusammensetzungen erheblich schwanken können.

Das Fraunhofer ISE untersucht das Thema mit Simulationen und Experimenten. Das dynamische Verhalten der Methanolsynthese ist dabei die größte Unbekannte, denn, wie fast alle großtechnischen Synthesen, wird sie auf dem aktuellen Stand der Technik unter fast unveränderten Bedingungen betrieben. Da die Hüttengase jedoch die Dynamik des Stahlwerks abbilden und fluktuierende erneuerbare Energien eingekoppelt werden sollen, muss geklärt werden, welche Anlagenteile einer gesonderten Betrachtung bedürfen.

¹ *Detailansicht des Methanol-Miniplant. Der Reaktor ist mit mehreren Temperatursensoren ausgestattet. Die Isolationsjacke wird zur Beheizung genutzt.*

Parallel finden dazu in einer vollautomatisierten Miniplant-Syntheseanlage, die vom Fraunhofer ISE ausgelegt, aufgebaut und in Betrieb genommen wurde, Experimente mit zunächst synthetischen Hüttengasen statt. Erkenntnisse aus der Simulation können so direkt getestet und umgekehrt auch die Simulation experimentell validiert werden. Die Anlage ist mit einem zweistufigen, quasi-adiabaten Reaktorsystem ausgestattet, wodurch im Gegensatz zu isothermen Reaktoren der Kühlkreislauf eingespart wird. Nicht umgesetzte Edukte werden abgetrennt und dem Prozess erneut zugeführt. Es wird ein pelletierter, kommerzieller CuZnAl-Katalysator des Projektpartners Clariant verwendet.



Grafik: Quellen, Mengenverhältnisse und Zusammensetzungen der Hüttengase aus der Stahlerzeugung.

Nach der Testphase am Fraunhofer ISE soll die Anlage am Stahlwerk der thyssenkrupp AG in Duisburg unter realen Bedingungen betrieben werden. Dort werden die Hüttengase vorher in einer Gasreinigung von Katalysatorgiften befreit und zusätzlicher Wasserstoff aus einer Elektrolyse bereitgestellt.

^A gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)



Wasserstoffeinspeisung: Teil von Elektrolyse-Geschäftsmodellen

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



Ein großer Vorteil bei der Verwendung von Wasserstoff im Gasnetz liegt darin, dass die benötigte Speicher- und Verteilinfrastruktur bereits vorhanden ist. Wasserstoff kann in das deutsche Erdgasnetz mit seiner bereits enormen und sehr kostengünstigen Speicherkapazität eingespeist werden. Zudem ist grüner Wasserstoff aus mindestens 80 % Ökostrom im EnWG (und damit der Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV) dem Biogas gleichgestellt, was die wirtschaftlichen Randbedingungen und die Betriebsflexibilität für eine Wasserstoff-Einspeisung deutlich verbessert.

Um Power-to-Gas-Anlagen im kommunalen Kontext zu erproben und möglichst wirtschaftlich und systemdienlich betreiben zu können, hat das Fraunhofer ISE zusammen mit weiteren Partnern das Projekt »Kommunaler Energieverbund Freiburg«^A durchgeführt. Dabei wurde eine modular aufgebaute Wasserstoff-Einspeiseanlage vom Fraunhofer ISE am lokalen Gas-Verteilnetz installiert.

Herzstück der Anlage ist ein Elektrolyseur mit einer elektrischen Anschlussleistung von 120 kW und ein kleiner Wasserstoff-Speicher (der Inhalt entspricht rund 300 kWh chemisch gespeicherter Energie), der eine leichte zeitliche Entkoppelung von Strom- und Gasnetz ermöglicht. Standort, Aufbau und Steuerung der Anlage sind darauf ausgerichtet, auch künftig als Forschungsplattform zu dienen und neue Erdgas- oder Wasserstoff-Komponenten, Betriebsstrategien oder gasnetzzeitige Innovationen unter Realbedingungen zu testen und zu erproben.

Für die Betriebsführung der Anlage wurden bereits mehrere Betriebsstrategien entwickelt, in Simulationsumgebungen optimiert und auf die Realanlage übertragen. Der eingesetzten Betriebsführung liegt hierbei die Methode der modellprädiktiven Regelung zur optimierten Nutzung von Speicher, Einspeisekapazitäten und Day-Ahead-Stromeinkauf zugrunde. Das Betriebsziel ist die Nutzung von günstigem »überschüssigem« Strom in Kombination mit Anreizen zur Verwertung von lokal erneuerbar erzeugtem Strom, um möglichst system- und netzdienlich unter Berücksichtigung ökonomischer Randbedingungen zu arbeiten. Die Regelalgorithmen haben die Anlage über mehrere Monate hinweg gesteuert. Sie zeigten aufgrund eines gleitenden Berechnungshorizonts einen sehr robusten Betrieb und konnten auch Prognoseabweichungen sowie Störungen und zeitweise Ausfälle von Anlagenteilen gut tolerieren.

Das Gasnetz mit seinen äußerst kostengünstigen Speichern ist ein wesentlicher Baustein der Energiewende. Mit der Einspeisung in das Erdgasnetz steht dieser Speicher kleinen und mittleren Wasserstoff-Anlagen auch heute schon bilanziell zur Verfügung. Die Nutzung der Gasnetzeinspeisung als Teil der Gasvertriebsstrategie ermöglicht es, kostengünstig mehr Flexibilität zu schaffen. Mit der Installation dieser Forschungsplattform kann das Fraunhofer ISE anwendungsnah weitere Forschung in diesem für die zuverlässige Versorgung mit erneuerbaren Energien wichtigen Bereich durchführen.

¹ *Wasserstoff-Einspeiseanlage in das Erdgasverteilstnetz am Fraunhofer ISE.*



Wasserelektrolyse: Potenzial für eine Gigawatt-Industrie

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

Die Wasserelektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff auf Basis von regenerativ erzeugtem Strom entwickelt sich immer mehr zu einer Kerntechnologie der Energiewende. Der steigende Anteil volatilen Wind- und Solarstroms kann in Form von Wasserstoff saisonal gespeichert, rückverstromt oder zu Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen weiterverarbeitet werden.

In einer Studie für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) haben wir zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie und Automatisierung IPA und dem Beratungsunternehmen E4tech einen Fahrplan für die Etablierung der Wasserelektrolyse in Deutschland entwickelt. Die Studie zeigt auf, wie die notwendigen industriellen Fertigungskapazitäten für Elektrolyseure in den nächsten Jahren aufgebaut werden können und welche Herausforderungen beim Aufbau einer Gigawatt-Elektrolyse-Industrie in Deutschland bestehen.

Der künftige Elektrolysebedarf für die Sektoren Verkehr, Wärme und Strom wurde mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Tool »REMod-D« in einer Energiesystemsimulation für Deutschland ermittelt. Es wurden mehrere Ausbauszenarien betrachtet, um die Bandbreite der in der Industrieumfrage ermittelten Leistungsparameter zu berücksichtigen. Mit der Annahme, dass das deutsche Klimaziel einer Absenkung der energiebedingten CO₂-Emissionen um mindestens 80 % ohne einen großskaligen Import von synthetischen Energieträgern erreicht wird, ergibt sich ein Ausbaukorridor im hohen zweistelligen bis dreistelligen Gigawattbereich an installierter Elektrolysekapazität im Jahr 2050. Bereits in der zweiten Hälfte des kommenden Jahrzehnts muss die Zubaurate ein Gigawatt

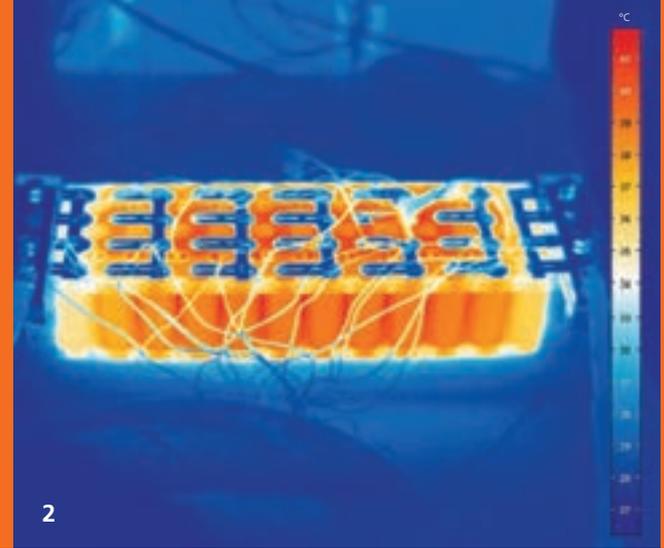
Neuinstallation pro Jahr deutlich übersteigen. Ab den 2030er Jahren gehen die Szenarien dann von mehreren Gigawatt Neuinstallation pro Jahr aus.

Bereits heute befinden sich die alkalische und die PEM-Elektrolyse in einem fortgeschrittenen technischen Zustand. Obwohl sich zukünftig die Investitionskosten noch auf unter 500 €/kW halbieren müssen und die Lebensdauer durch kontinuierliche Weiterentwicklung erhöht werden soll, können beide Verfahren auch heute schon großskalig eingesetzt werden. Auch aus produktionstechnischer Sicht haben wir nur wenige hinderliche Aspekte identifiziert, da die zur Produktion der Komponenten nötigen Verfahren bereits in anderen Branchen großindustriell angewendet werden.

Handlungsbedarf besteht vor allem auf Seiten des Gesetzgebers: der Markthochlauf, der für die weitere Technologieentwicklung und Kostenreduktion der zentrale Hebel ist, muss durch Anpassungen des regulatorischen Rahmens, besonders beim Strombezug, unterstützt werden, damit Elektrolyseanwendungen wirtschaftlich werden können. Es wird daher ein »Marktaktivierungsprogramm Wasserelektrolyse« vorgeschlagen, das den Herstellern und Anwendern Planungssicherheit für Investitionen bietet.

Die Studie steht auf der Webseite der NOW GmbH kostenlos zu Verfügung:
<https://www.now-gmbh.de/de/service/publikationen>

1 *Fertigung von Hochtemperaturzellen, wie sie auch für die Wasserelektrolyse eingesetzt werden.*



Umweltfreundliche Zink-Ionen-Batterie der nächsten Generation

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

Die zunehmende Menge an Energie aus erneuerbaren Quellen im deutschen Stromnetz führt bei guten Ertragsbedingungen und niedrigem Verbrauch im Tagesverlauf zu Stromüberschüssen im Versorgungsnetz. Um diese wertvollen Energieressourcen voll nutzen zu können, werden geeignete stationäre Stromspeicher für die Stromversorgung und Versorgungssicherheit immer wichtiger. Für die Speicherung des Überschussstroms im Tagesverlauf sind Batteriespeicher besonders geeignet.

Ziel unseres Forschungsvorhabens ist, sichere und umweltfreundliche Batteriezelltechnologien zu identifizieren, zu charakterisieren und hinsichtlich ihrer Zyklierbarkeit und Produzierbarkeit zu erforschen. Wässrige Batteriezellchemien sind inhärent sicher und können aus kostengünstigen Materialien hergestellt werden. Zink als Anode und als Ladungsträger hat den Vorteil, dass für die Herstellung der Anode keine weiteren Aktivmaterialien als ein Zinkblech verarbeitet werden müssen.

Auf Seiten der Kathode werden Manganoxide untersucht und dabei mit verschiedenen Additiven zu druckbaren Pasten verarbeitet, wobei wir hierzu verschiedene Fertigungsverfahren erproben. Besonderes Augenmerk richten wir auf die Entwicklung eines passenden Elektrolyten, da dieser zentrale Bedeutung für die Zyklenfestigkeit der Batteriezelle hat. Die preiswerten, hochverfügbaren Rohstoffe und der Verzicht auf kostenintensive Fertigungsschritte würde ermöglichen, diese Zellchemie flächendeckend und kostengünstig als stationären Stromspeicher herzustellen und einzusetzen.

1 Am Fraunhofer ISE entwickelter Batteriespeicher mit wässriger Zink-Ionen-Zelltechnologie.

Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher zur Pufferung von Lastspitzen

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

Viele Geräte, die am Stromnetz betrieben werden, erfordern hohe Anschlussleistungen. Die auftretenden Lastspitzen müssen dabei meist nur in kurzen Intervallen zur Verfügung gestellt werden. Durch die Integration eines eingebauten Hochleistungsspeichers auf der Basis von Lithium-Ionen-Zellen kann die benötigte Anschlussleistung um ein vielfaches verringert werden. Dadurch wird es möglich, Geräte, die gewöhnlich eine feste Installation an einem Drehstromanschluss erfordern, an einer gewöhnlichen Haushaltssteckdose zu betreiben. Je nach Auslegung ist auch ein netzunabhängiger Betrieb für eine bestimmte Zeitspanne möglich.

Für die Integration in bestehende Geräte besteht die Herausforderung darin, die Speicher kompakt und hochleistungsfähig aufzubauen und gleichzeitig die Abfuhr entstehender Verlustwärme sicherzustellen. Ziel ist, jederzeit einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten und die Alterung der verwendeten Lithium-Ionen-Zellen zu minimieren.

Das Fraunhofer ISE charakterisiert geeignete Lithium-Ionen-Zellen sowohl elektrisch als auch thermisch und entwickelt auf dieser Basis Hochleistungssysteme mit zugehöriger Betriebsführungsstrategie. Jüngst wurde ein entsprechendes Speichersystem mit einem Energieinhalt von 5,5 kWh aufgebaut, das eine Maximalleistung von 140 kW zur Verfügung stellen kann. Der Batteriespeicher arbeitet dabei mit einer Systemspannung von 550 V und kommuniziert über einen CAN-Bus.

2 Wärmebildaufnahme eines Batteriemoduls zur Evaluierung der Wärmeentwicklung in Abhängigkeit der Entladeleistung.



PV-Batterie-Inselnetze: Simulation, Auslegung, Qualitätssicherung

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



Erneuerbar gespeiste Inselnetze mit einem netzbildenden Batteriewechselrichter können vor allem in entlegenen Regionen die Stromgestehungskosten deutlich senken. Dabei ist die Errichtung großer Inselnetze, wie für Industrieparks, aber auch für ganze Städte, besonders komplex, da die Verteilung der Stromerzeuger und Batteriespeicher netztopologisch unter Berücksichtigung von Grundstücks- und Infrastrukturkosten optimiert werden muss.

Unabhängige Studien während der Planungsphase zur Systemauslegung und Qualitätssicherung können das Risiko für Projektentwickler, Investoren und Versicherer deutlich senken. Dies bildet die Basis für die Finanzierbarkeit, aber auch die Versicherung des Betriebs (Garantie und Performance) von derartigen kapitalintensiven elektrischen Infrastrukturen.

Im Projektvorhaben »Square Kilometre Array (SKA)« wird auf einer Fläche von mehr als 1500 km² in Westaustralien ein Radioteleskop mit mehr als 130 000 Antennen errichtet. Die geographische Verteilung der Last sowie auch der gesamte Energieverbrauch von ca. 25 GWh im Jahr soll über mehrere große Inselnetze realisiert werden. Das Fraunhofer ISE hat für dieses Projekt ein optimiertes Systemdesign inklusive der dafür benötigten Simulation der PV-Batterie-Stromversorgung sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Des Weiteren haben wir durch Empfehlungen zur Komponentenwahl und Optimierungen bei der Systemintegration eine ganzheitliche Qualitätssicherung für das Projekt auf der Planungsseite erzielt.

1 *Energieversorgung des Murchison Radioastronomy Observatory (MRO) in Westaustralien mit großem Inselnetz.*

Innovative Photovoltaik-DC-Ladeinfrastruktur mit Pufferspeicher

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

Da der deutliche Zuwachs an Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge lokal zu Versorgungsgespässen in den Verteilnetzen führen kann, werden vor allem Schnellladestationen verstärkt mit lokalen Pufferspeichern ausgestattet. Bei einem Solarcarport mit integriertem Pufferspeicher und Schnellladeinfrastruktur wird der von der PV-Anlage erzeugte Gleichstrom bis zu viermal wechsel- bzw. gleichgerichtet, um seinen Weg vom PV-Modul über den Pufferspeicher in die DC-Ladesäule zu finden. Dabei entstehen unnötige Verluste.

Das Fraunhofer ISE untersucht und demonstriert im Verbundvorhaben »EnStadt Pfaff«^A eine rein DC-gekoppelte Schnellladeinfrastruktur. Ziel ist, die Effizienz dieser Art der Sektorenkopplung deutlich zu erhöhen. Hierzu wird im Real-laborzentrum in Kaiserslautern (s. Seite 67) ein DC-Netz bestehend aus innovativen DC-Schnellladesäulen, PV-Generatoren, einem Batteriesystem mit hoher Entladeleistung sowie einem bidirektionalem Wechselrichter zur Netzanbindung als Backup aufgebaut. Im Rahmen des Demonstrationsbetriebs wird diese Infrastruktur evaluiert und optimiert.

Das Fraunhofer ISE unterstützt Industriepartner bei innovativen Lösungen durch Design, Auslegung und Optimierung solcher konduktiven, aber auch induktiven Schnellladesysteme mit Batterie-Pufferspeichern für neuartige Anwendungen. Hierzu gehören auch Ladeinfrastrukturen für maritime Anwendungen und für die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs.

2 *Direkte und effiziente Sektorenkopplung von Photovoltaik und E-Mobilität sind wichtig für die Energie- und Verkehrswende.*

^A gefördert von den Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Bildung und Forschung (BMBF)

LEISTUNGSELEKTRONIK, NETZE UND INTELLIGENTE SYSTEME

1



148

Mitarbeitende



14

Zeitschriften- und
Buchbeiträge



25

Vorträge und
Konferenzbeiträge



1

Neu erteiltes Patent

Im Geschäftsfeld »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme« befassen wir uns überwiegend mit Forschungsthemen aus dem Bereich Elektrizität. Wir arbeiten daran, das Zusammenspiel zwischen der effizienten Gewinnung erneuerbarer Energien, der sicheren Versorgung der Verbraucher, der Energiespeicherung und dem stabilen Stromnetzbetrieb zu optimieren. Darüber hinaus stellt die Sektorenkopplung – z. B. mit dem Verkehrs- oder Gebäudesektor – einen weiteren, wichtigen Schwerpunkt unserer Aktivitäten dar. Die Leistungselektronik entwickelt sich immer mehr zu einer Schlüsseltechnologie für die zukünftige Energieversorgung. Durch den Einsatz disruptiver Technologien, z. B. Halbleiter aus Siliciumkarbid oder Galliumnitrid, entwickeln wir deutlich kompaktere, effizientere und kostengünstigere Wechselrichter. Neben den erneuerbaren Energien profitiert davon auch die Elektromobilität in Form von leistungsstarken und netzfreundlichen Ladeinfrastrukturen sowie von höheren Reichweiten durch effizientere on-board Wandler. Durch die wachsende Verbreitung von Photovoltaik, Wärmepumpen und Elektroautos gelangt das Stromnetz an vielen Stellen an die Grenze seiner Belastbarkeit. Dadurch treten zunehmend Engpässe sowie dynamische Instabilitäten auf. Wir arbeiten daher verstärkt an einer verbesserten Netzintegration von dezentralen Anlagen. Der netzdienliche Betrieb von z. B. PV- oder Batterieanlagen beruht sowohl auf der Einhaltung geforderter Richtlinien als auch auf einer optimalen Integration solcher Anlagen in den Energiemarkt.

Dafür spielt auch die Digitalisierung eine wichtige Rolle. Neben der Simulation und Optimierung von Stromnetzen für eine höhere Aufnahmefähigkeit forschen wir auch an neuartigen Informations- und Kommunikationstechniken einschließlich der Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz. Unser Ziel ist, die Anlagen in die Lage zu versetzen, sich untereinander eigenständig zu organisieren, um unter anderem anwendungs- sowie systembezogene Herausforderungen gemeinsam zu bewältigen. Darüber hinaus entwickeln wir digitale Modelle zur ganzheitlichen Energiesystemanalyse. Diese liefern techno-ökonomisch optimierte Transformationspfade zur sektorenübergreifenden Energiewende und haben sowohl in Smart Cities als auch im regionalen und transnationalen Kontext eine große Bedeutung.

Ausgewählte Meilensteine 2018

- » Entwicklung einer ultraschnellen Ladesäule für Elektroautos.
- » Inbetriebnahme der neuen Anlagen im Multi-Megawatt Lab.
- » Planungsarbeiten zum künftigen Digital Grid Lab haben begonnen.
- » Neuen Hochvolt-Siliciumkarbid-Wechselrichter für die Stabilisierung von Mittelspannungsverteilsystemen vorgestellt.
- » Entwicklung einer dynamischen Stromtarifizierung auf Basis der Rundsteuertechnik.

1 2 kW PV-Wechselrichter.



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

Ansprechpartner

Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

Dr. Olivier Stalter | Telefon +49 761 4588-5467
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

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

Intelligente Netze

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

Energiesystemanalyse

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

Ausgewählte Projekte 2018

 Sozio-E2S – Einfluss von soziokulturellen Faktoren auf Transformationspfade des deutschen Energiesystems

 NEK-Quartiere – Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Energien für die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte in Energiekonzepten für Gebäude und Quartiere unter Berücksichtigung der Gebäudeenergieeffizienz

 EDGE – Erhöhung der Gesamteffizienz von Eigenverbrauchssystemen

 DiGO – Distribution Grid Optimization

 DyConPV – Hochdynamische Regelung von Photovoltaik-Wechselrichtern

 SysWärme – Systemische Herausforderung der Wärmewende

 HiPolnd – High Power Inductive – Automatisierte, kabellose Schnellladetechnologie für autonome mobile Roboter und Flurförderzeuge

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:
www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/5-00





1



2

Neues Laborzentrum nimmt Betrieb auf

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

Am neuen Standort Zinkmattenstraße in Freiburg hat das Fraunhofer ISE im Rahmen des »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« (s. Seite 83) drei neue Labors in Betrieb genommen. Im Power Converters Labs, Multi-Megawatt Lab und Medium Voltage Lab stehen nun weltweit einzigartige Möglichkeiten für Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Leistungselektronik und dynamischen Netzregelung zur Verfügung. Unser Institut stärkt so seine führende Position in der internationalen Forschungslandschaft und ist damit in der Lage, die kommenden Herausforderungen im Stromsektor zu bewältigen.

Eigener Anschluss ans Hochspannungsnetz

Der neue Laborstandort verfügt über einen Anschluss an das 110-kV-Hochspannungsnetz. Ein eigener 40-MVA-Umspanntransformator speist ein proprietäres Forschungsnetz, das ohne die Beeinträchtigung Dritter erlaubt, u. a. die Auswirkungen von Spannungsänderungen, die Ausbreitung von Oberschwingungen zwischen dem Nieder-, Mittel- und dem Hochspannungsnetz sowie besondere Netzsituationen, z. B. Inselnetze, zu untersuchen. Zur Versorgung der Prüffelder am Laborstandort stehen derzeit zehn Mittelspannungstransformatoren mit verschiedenen Leistungen bis 6,4 MVA sowie variablen Spannungen zwischen 260 V und 36 kV zur Verfügung.

1 Außenansicht des neuen Standorts Zinkmattenstraße, Freiburg.

2 Innenansicht des neuen Multi-Megawatt Labs.

3 Mittelspannungsschaltanlage für den Anschluss der Prüffeldtransformatoren und Prüfeinrichtungen.

Leistungselektronik im Multi-Megawatt-Bereich in der Nieder- und Mittelspannung

Im Niederspannungsbereich hat das Fraunhofer ISE die technischen Voraussetzungen geschaffen, um Prüflinge mit Leistungen bis in den Multi-Megawatt-Bereich zu betreiben. Damit sind wir für aktuelle und zukünftige Leistungsentwicklungen von z. B. PV- und Batteriewechselrichtern gerüstet. Darüber hinaus erlauben spezielle, sicherheitstechnisch ausgestattete Labors die Entwicklung von Leistungselektronik mit Direktanschluss an die Mittelspannung. Zur Untersuchung von Zuverlässigkeits- und Lebensdauerfragen können Geräte in einem großen Klimaraum bei Temperaturen von -30°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ bei einstellbarer Feuchte untersucht werden. Im Fokus der Aktivitäten stehen hier effiziente, kompakte und zuverlässige Wechselrichteransätze für Netzanwendungen, aber auch Bahn- oder Medizintechnik sowie neuartige Anlagenkonzepte z. B. für PV- und Wind-Kraftwerke, Batteriesysteme, Elektrolyseure oder größere Stromversorgungssysteme.

Wechselrichter für sicheren Netzbetrieb

Moderne Wechselrichter können das Stromnetz stabilisieren und müssen zu zukünftigen Garanten eines sicheren Netzbetriebs weiterentwickelt werden. Entscheidend hierfür sind deren elektrische Eigenschaften. Mit unserem hochdynamischen 1-MVA-Netzsimulator lässt sich nicht nur die Reaktion von Wechselrichtern auf dynamische Änderungen von Netzfrequenz und Netzspannung untersuchen, sondern auch ihr Oberschwingungsverhalten, z. B. durch Impedanzspektroskopie, analysieren. Ferner kommen bei der Untersuchung des Inselnetzverhaltens RLC-Schwingkreisprüfeinrichtungen zum Einsatz. Unsere neue, leistungsstarke »Fault Ride Through«-Prüfeinrichtung ermöglicht den Test des dynamischen Verhaltens von Erzeugungsanlagen nicht nur bei kurzzeitigen



Anforderungen an intelligente Netze

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

Spannungseinbrüchen (UVRT), sondern auch bei Spannungsanhebungen (OVRT). Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt dabei liegt auf der Entwicklung von spannungseinprägenden und netzerhaltenden Wechselrichtern für zukünftige Stromnetze mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien, sowie der Erprobung von Micro-Grid-Anwendungen und Verbesserungen der Regelungstechnik.

Bündelung der Kompetenzen und Dienstleistungen im Bereich Leistungselektronik

Auch die Aktivitäten im mittleren und niedrigen Leistungsbe- reich sind nun am neuen Standort angesiedelt. Dies umfasst die Erforschung, Entwicklung und Erprobung von neuen Bau- teilen und Technologien, von seriennahen Umrichtersystemen sowie von Leistungselektronik in Netzen. Diese gebündelten Kompetenzen setzen wir in vielfältigen Anwendungen ein, u. a. auf den Gebieten Photovoltaik, Energiespeicher, Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität, Stromnetze, Bahn sowie Luft- und Raumfahrt. Auch unser akkreditiertes Testlab Power Electronics (s. Seite 75) profitiert vom neuen Standort durch eine Erweiterung des abgedeckten Leistungsbereichs sowie des Umfangs der angebotenen Charakterisierungen und Prüfungen. Durch die vorhandene hochpräzise Leistungsmess- technik können die elektrischen Eigenschaften der Prüflinge genauestens analysiert werden.

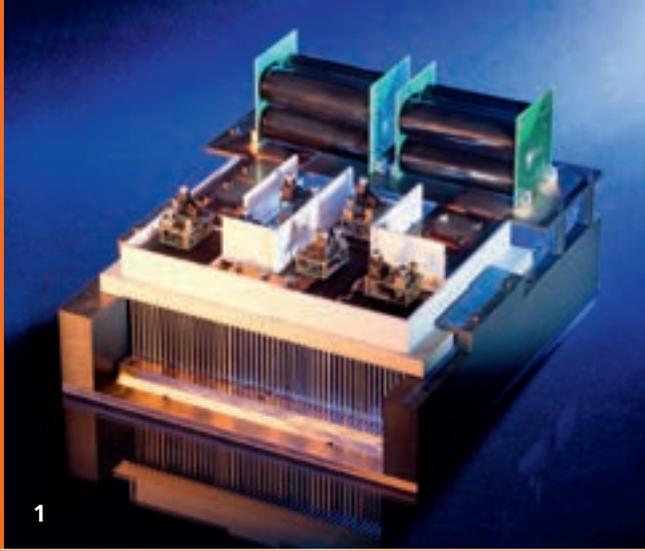
Für das Vorhaben wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) insgesamt dem Fraunhofer ISE rund 10 Mio. Euro zur Verfü- gung gestellt. Das Fraunhofer ISE investierte bisher weitere 5 Mio. Euro in das neue Labor.



Der Umbau der Stromversorgung hin zu einem maßgeblichen Anteil an erneuerbaren Energien stellt Stromnetz, Netzkomponenten und deren Betriebsführung vor große Herausforderungen. Es ändern sich dabei sowohl die elektrischen als auch die kommunikativen Anforderungen an diese Netzbestandteile. Zudem wächst der Bedarf, sie mit lokaler, aber gleichzeitig vernetzter Intelligenz auszustatten. Die Erprobung und Weiterentwicklung dieser Komponenten im laufenden Netzbetrieb ist jedoch nur im Einzelfall möglich.

Das Fraunhofer ISE wird deshalb seine Kompetenzen im Bereich Netzsimulation und Echtzeit-Kommunikationsumge- bungen erweitern. Unser Ziel besteht darin, komplexe Netz- abschnitte und Betriebsituationen flexibel im Labormaßstab nachzubilden und das Verhalten von Geräten oder Anlagen an Netzknotenpunkten ausführlich untersuchen zu können. Die Testumgebungen sollen sowohl stationäre als auch dynami- sche Versuche in einem Leistungsbereich bis mehrere hundert Kilowatt ermöglichen.

Damit wird das Fraunhofer ISE seinen wichtigen Forschungs- schwerpunkt »Digitalisierung« auf die Betriebsführung von Komponenten erweitern. Auch die Analyse der Wechsel- wirkungen zwischen Komponenten und Stromnetz kann damit weiter ausgebaut werden. Besonders die Netzkopplung von Infrastruktur für Elektromobilität, die Aspekte der System- technik und Betriebsführung von Micro-Grids sowie die Auto- matisierung von Netz- und Anlagenbetrieb rücken stärker in unseren Fokus.



Stabilisierung von Mittelspannungsverteilstnetzen

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

Durch den Einsatz von neuen Siliciumkarbid (SiC)-Transistoren mit 15 kV Sperrspannung hat das Fraunhofer ISE einen neuen Wechselrichter entwickelt, der ohne Transformator direkt in das Mittelspannungsnetz einspeisen kann. Aufgrund der hohen Sperrspannung der Transistoren konnte eine im Vergleich zu konventionellen Ansätzen einfache Dreipunktschaltung gewählt werden. Kommerziell erhältliche Geräte müssen hingegen komplexe Mehrpunktschaltungen mit einem sehr hohen Bauteilaufwand einsetzen, um die benötigten Betriebsspannungen zu erreichen. Die verwendeten SiC-Transistoren haben zudem sehr geringe Schaltverluste, was hohe Schaltfrequenzen ermöglicht. Die passiven Bauelemente können dadurch kleiner dimensioniert werden, was zu Material- und Gewichtseinsparungen bei Kondensatoren und Drosselpulen führt. Ein weiterer Vorteil dieser Technik ist die höhere Regeldynamik des Wechselrichters. Durch die hohe Taktfrequenz kann er als aktives Filter eingesetzt werden, um z. B. Oberschwingungen im Mittelspannungsnetz zu kompensieren. Dies ist mit Wechselrichtern nach Stand der Technik nur bedingt möglich, da diese einen 50 Hz-Transformator verwenden, der als Tiefpassfilter wirkt. Der Einsatz der hochsperrenden SiC-Transistoren bringt aber auch neue Herausforderungen mit sich. Die extrem hohen Spannungssteilheiten während der Schaltvorgänge der Transistoren können Störungen verursachen oder auch zu Teil- und Gleitentladungen in den Isolationen führen. Die Leistung des Demonstrators zur Einspeisung in das dreiphasige 10 kV-Netz beträgt 100 kVA und wird in Zukunft tendenziell steigen. Die Schaltfrequenz liegt mit 16 kHz etwa um den Faktor 10 höher als bei Mittelspannungsumrichtern mit konventionellen Transistoren.

1 Einphasiger Leistungsstack mit 15 kV SiC-MOSFETs, Treibern und anteiligen Zwischenkreiskondensatoren.

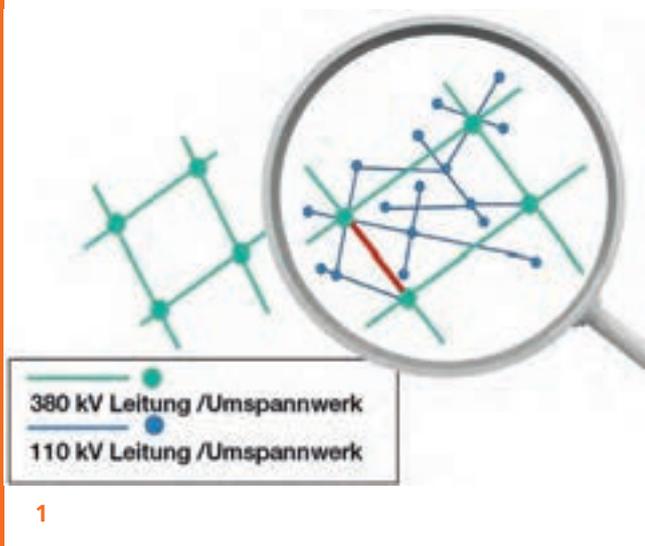
Hybrider Wechselrichterregler für den Netz- und Inselbetrieb

Dr. Christoph Siedle | Telefon +49 761 4588-5420 |
 energysystem.converters@ise.fraunhofer.de

Speisten Umrichter bisher in starre Netze ein, müssen sie künftig diese Netze selbst bilden und stabil betreiben können. Hierfür ist eine Abkehr von konventionellen Stromreglern hin zu einem neuen Ansatz erforderlich. Da herkömmliche Netze von Synchrongeneratoren gebildet werden, ist es naheliegend, den Umrichtern ein ähnliches regelungstechnisches Verhalten aufzuprägen. Sogenannte »Virtuelle Synchronmaschinen« bilden die komplizierte physikalische Struktur des realen Pendants detailliert mathematisch ab, was jedoch leistungsfähige Prozessoren in den Wechselrichtern erfordert und ihre Konfiguration aufwendig macht. Außerdem sind sie meist nicht auf einphasigen Systemen implementierbar.

Der neue Ansatz hingegen betreibt den Wechselrichter spannungsgeregelt mit einer zusätzlichen künstlichen ohmsch-induktiven Impedanz. Zur Synchronisation mit dem Netz oder für den Parallelbetrieb mit anderen Erzeugern ist eine netzkompatible Statik überlagert. Diese Struktur benötigt nur wenige Parameter und stellt keine hohen Anforderungen an die Rechenleistung. Die künstliche Impedanz wirkt dämpfend und ermöglicht ein stabiles Arbeiten parallel geschalteter Umrichter bei definierter Lastaufteilung. Die Implementierung kann ein- oder mehrphasig erfolgen. Das Konzept eignet sich ebenfalls für den Einsatz in unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV), bei der die angeschlossenen Verbraucher bei Netzausfall tatsächlich ohne Lücke weiterversorgt werden können. Bei Netzwiederkehr können sie erneut ohne Unterbrechung wieder mit dem Netz verbunden werden.

2 Entwicklung von modellbasierten Regelungsverfahren für Umrichter am Fraunhofer ISE.



1



2

Integrales Netzengpassmanagement im Stromnetz

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



Infolge des Zubaus von Wind- und PV-Anlagen wird ein stabiler Netzbetrieb in Deutschland derzeit durch ein sogenanntes »Engpassmanagement« sichergestellt. Das Ziel dabei ist, die Abregelung von erneuerbarem Strom zu minimieren und Flexibilitäten im Stromnetz zu nutzen. Die Kosten für das nationale Engpassmanagement belaufen sich aktuell auf über 1,4 Mrd EUR und werden über die Netzentgelte vom Endkunden getragen. Die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) sind für die Netzstabilität verantwortlich und binden die Verteilnetzbetreiber (VNB) durch die sogenannte »Abstimmungskaskade« in das Engpassmanagement ein. Die Ermittlung des Flexibilitätspotenzials aus den unterlagerten Netzen spielt eine zentrale Rolle, wobei die herkömmliche Rückmeldung von VNBs nicht mehr den wachsenden Anforderungen genügt.

Im Rahmen des SINTEG-Schaufensterprojekts »C/sells«^A hat das Fraunhofer ISE ein komplexes Simulationsmodell des deutschen Höchst- und Hochspannungsnetzes mit über 8500 Knoten entwickelt. Es bildet die räumlich verteilten Lasten und die Erzeugung knotenscharf ab. Die Daten und Modelle basieren auf den publizierten Quellen »osmTGmod« und der »OpenEnergy«-Plattform. Wir haben zudem Simulationsstudien zum Netzbetrieb mit »Engpassszenarien« mit und ohne Berücksichtigung des unterlagerten 110 kV Netzes durchgeführt: Dabei zeigte sich, dass der Einfluss des Hochspannungsnetzes relevant ist und somit in Zukunft deutlich geringere Korrekturen des Kraftwerkbetriebs erforderlich sein könnten.

1 *Höchstspannungsnetz mit unterlagerten Hochspannungstopologie.*

Entwicklung von Smart-City-Technologien in Reallaboren

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



Zukunftsfähige Stadtquartiere benötigen ein hocheffizientes Energiesystem, nutzen die lokalen erneuerbaren Energien möglichst umfassend und greifen zusätzlich auf regionale Wind- und Biomassepotenziale zu. Dies erfordert die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Kälte und Mobilität, die Nutzung von Flexibilitäten und ein intelligentes Energiemanagement. Darüber hinaus verknüpft die Digitalisierung die Infrastrukturen und ermöglicht einen optimalen Betrieb der diversen Energiesektoren sowie neue Geschäftsmodelle für Energieversorger und Prosumer.

Die zunehmende Komplexität der kommunalen Versorgungssysteme erfordert deren Entwicklung, Evaluierung und Optimierung in sogenannten »Reallaboren«. Stadtquartiere sind hierfür bevorzugte Experimentierräume, da sie komplexe Infrastrukturen und verschiedenste Akteure aufweisen, so dass Synergieeffekte durch optimierte Interaktion und intelligente Steuerung untersucht und erschlossen werden können.

Das Fraunhofer ISE konzipiert und koordiniert Reallabor-Projekte und hat u. a. die wissenschaftliche Leitung des Leuchtturmprojekts »EnStadt: Pfaff«^{A,B} in Kaiserslautern. Neun Partner kooperieren, um das ehemalige Produktionsgelände der Nähmaschinenfabrik Pfaff zu einem nachhaltigen Quartier für Technologie, Gesundheit und Wohnen zu entwickeln. In den Bereichen Energieversorgung, Gebäude, Elektromobilität und Digitalisierung findet Technologieentwicklung begleitet von sozialwissenschaftlichen Untersuchungen statt.

2 *Im Reallabor-Zentrum des Projekts »EnStadt: Pfaff« werden Lösungen mit den Nutzern optimiert.*

^A gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

^B gefördert von den Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF)



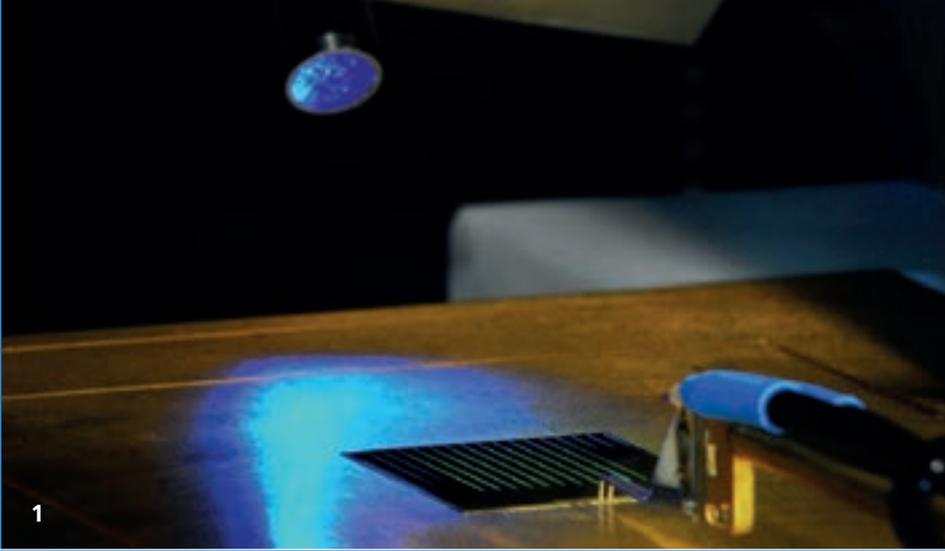
AKKREDITIERTE LABORS

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

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



Wechselrichtertest im TestLab Power Electronics.



Kalibrierung von Solarzellen

cells@callab.de

Das CaLab 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 präziser Messungen für neue Technologien. 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 CaLab PV Cells ist als Labor für die Solarzellenkalibrierung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle DAkkS akkreditiert. In Kooperation mit PV-Herstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung der Messunsicherheiten und der Entwicklung neuer Messverfahren. Entwicklungsarbeiten wurden bei bifazialen Solarzellen und der Kontaktierung neuartiger Metallisierungsstrukturen durchgeführt. Dabei haben wir eine neue Methode zur Kontaktierung von Rückkontakt-, Schindel- und bifazialen Solarzellen entwickelt, die zuverlässige und kostengünstige individuelle Lösungen für die rückseitige Kontaktierung ermöglicht.

Des Weiteren wurde eine Messmethodik entwickelt, um meta-stabile Solarzellen wie Perowskitsolarzellen (PSC) vergleichbar zu anderen Technologien zu bewerten. Auf der Grundlage unserer langjährigen Erfahrung im Bereich von Mehrfachsolarzellen können wir nun auch PSC/Si-Mehrfachsolarzellen verlässlich vermessen. Verschiedene Mehrlichtquellensimulatoren ermöglichen uns Messungen von Mehrfachsolarzellen unter nahezu beliebigen Normbedingungen, wie für Weltraum- und für Konzentratoranwendungen. In einem neuen Arbeitsgebiet beschäftigen wir uns mit der Vermessung von Laserleistungssolarzellen und dabei im Besonderen mit Zellen, die aus identischen monolithischen Zellstapeln von bis zu 12 pn-Übergängen bestehen.

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

CaLab
PV Cells



Silicium-, Dünnschicht-, Perowskit-, Organische Solarzellen

Dr. Jochen Hohl-Ebinger

Telefon +49 761 4588-5359

Wendy Schneider

Telefon +49 761 4588-5146

Mehrfach- und Konzentratorzellen

Dr. Gerald Siefer

Telefon +49 761 4588-5433

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » AM1.5g (IEC 60904-3)
- » AM0 (ISO 15387)
- » AM1.5d (ASTM G173-03)

1 *Spektrale Empfindlichkeitsmessung einer Mehrfachsolarzelle am Gittermonochromator-Messplatz. Zusätzlich zum grünen Testlicht ist blaues Biaslicht zu sehen, mit dem die zu messende Teilzelle in Strombegrenzung gebracht wird.*



Performance-Tests und Ertragsmonitoring von PV-Modulen

modules@callab.de

Callab
PV Modules



Für die Rendite von PV-Kraftwerken sind die Ertragseigenschaften der PV-Module von entscheidender Bedeutung. Die exakte Leistung und das Schwachlichtverhalten der Module sind wichtige Grundlagen für die Simulation der Erträge am Standort des PV-Kraftwerks.

Mit unseren höchst präzisen Performance-Tests im akkreditierten Kalibrierlabor ermitteln wir die Leistung der Module für relevante Betriebsbedingungen. Damit kann die Unsicherheit bei der Ertragssimulation deutlich reduziert werden. Mit nur 1,3 % Messunsicherheit können PV-Module bei Standard-Test-Bedingungen gemessen werden. Durch Optimierung des Sonnensimulators für Power-Rating-Messungen (IEC 61853) haben wir die Genauigkeit besonders bei Schwachlicht weiter verbessert. Für Investoren von PV-Kraftwerken ergibt sich dadurch mehr Sicherheit.

Wir vergleichen unsere Labormessungen mit hochaufgelösten DC-Messdaten (I-U-Kurven) aus unserem Modulmonitoring im Feld. Damit erhöhen wir die Genauigkeit der Ertragssimulation. Mehrerträge von bifazialen PV-Modulen z. B. lassen sich so sehr präzise ermitteln. Durch die kontinuierliche Erfassung der Daten können wir auch Degradationseffekte über längere Zeiträume sehr genau bestimmen.

Über unser Qualitäts-Benchmarking unterstützen wir mit individuellen Prüfverfahren sowohl die Auswahl von Modullieferanten für große PV-Projekte als auch die Qualitätssicherung beim Einkauf großer Modulchargen. Auch bei Schadensfällen können unsere unabhängigen Messungen helfen, Abweichungen zur Leistungsgarantie präziser zu ermitteln.

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

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

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Kalibrierung von PV-Modulen mit einer Messunsicherheit von nur 1,3 %
- » Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit auf Modul- und Zellebene von 300 nm bis 1200 nm
- » Präzisionsmessung gemäß IEC 60904-3 mit einer Messunsicherheit von nur 1,5 %
- » Power-Rating-Messungen gemäß IEC 61853
- » Modulmonitoring mit hochaufgelösten DC-Messdaten (I-U-Kurven)
- » Bewertung von CPV-Modulen gemäß IEC 62670-3 bei CSOC und CSTC

1 *Präzise Ertragsmessung von unterschiedlichen PV-Modulen.*



Qualitätssicherung von PV-Modulen

tlpv@ise.fraunhofer.de

TestLab
PV Modules



Das TestLab PV Modules bietet seit 2006 ein breites Spektrum an Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprüfungen an. In unserem akkreditierten Labor betreiben wir modernste und innovative Prüfanlagen, deren Anwendungsbereich deutlich über die Standardprüfungen hinausgeht.

Wir beraten unsere Kunden bei der Definition von kosten- und zeiteffizienten Prüfprogrammen und individuellen Qualitätskriterien. Die Prüfungen dienen dazu, potenzielle Schwachstellen von Modulen aufzuspüren, verschiedene Modultypen im Benchmarking zu vergleichen oder spezielle Modultechnologien für besondere Einsatzbedingungen zu qualifizieren. Für neue Technologien (z. B. bifaziale Module) entwickeln wir Standardtestverfahren weiter, um unter Berücksichtigung der technologischen Besonderheiten aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Mithilfe innovativer und modernster Analysemethoden untersuchen wir Fehlerbilder wie Schneckenspuren, Potenzialinduzierte Degradation (PID) und Light and elevated Temperature Induced Degradation (LeTID) systematisch. Das TestLab PV Modules bietet für viele typische Fehlerbilder zielgerichtete Prüfungen und Prüfsequenzen an. Unsere Plattformen liefern genaueste Messwerte und präzise reproduzierbare Versuchsdurchführungen für eine umfassende Charakterisierung.

Hochpräzise Leistungsmessungen werden in unserem akkreditierten Kalibrierlabor CalLab PV Modules mit einer weltweit führenden Messunsicherheit von nur 1,3 % durchgeführt. In Kooperation mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut führen wir Zertifizierungen entsprechend internationaler Qualitäts- und Sicherheitsstandards durch. Zudem haben wir das Qualitätszertifikat »VDE Quality Tested« entwickelt, das eine laufende Qualitätssicherung der Modulproduktion von unabhängiger Seite auf hohem Niveau ermöglicht.

Wir bieten modellbasierte Langzeitstabilitätstests an, die besondere klimatische Herausforderungen in Wüsten oder an tropischen Standorten berücksichtigen, um PV-Module und Komponenten für den Einsatz in diesen Gebieten zu qualifizieren.

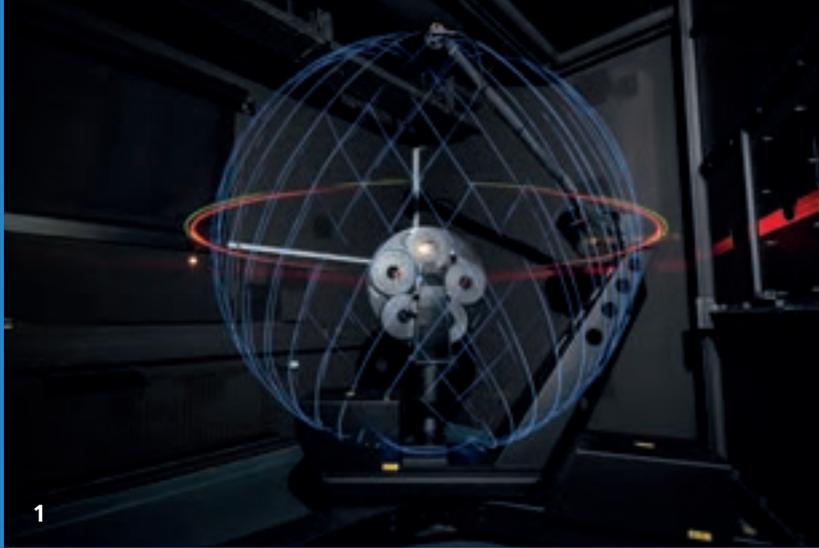
Dipl.-Ing. (FH) Daniel Philipp
Telefon +49 761 4588-5414

Standards und Spezifikationen

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

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

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



1



2

Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de

TestLab
Solar Façades



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

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

Wir verfügen über umfangreiche Forschungserfahrung im Bereich der Sonnenschutzsysteme, der bauwerkintegrierten Photovoltaik (BIPV) und der bauwerkintegrierten Solarthermie (BIST). Wir sind spezialisiert auf die mathematische und physikalische Modellierung optischer, thermischer und PV-elektrischer Prozesse in sonnenbestrahlten Fassaden sowie auf die Analyse ihrer Effekte auf die energetischen Eigenschaften des Gebäudes. Goniometrisch ermittelte BSDF-Datensets (Bi-Directional Scattering Distribution Function) werden in Simulationsprogrammen zur Bewertung von Tageslichtnutzung und Blendung, z. B. für Büroräume mit komplexen Fenster- und Sonnenschutzsystemen, genutzt. Studien zu Nutzerpräferenzen und visuellem Komfort werden in drehbaren Tageslicht-Testeinrichtungen durchgeführt.

1 3D-Scanning-Photogoniometer für BSDF-Messungen.

2 Prüfung der gesamtenergetischen Gewinne eines Fassadenelements mit integrierter solarthermischer Jalousie auf einem Außenteststand.

g-Wert Prüfung, U-Wert Prüfung

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Amann
Telefon +49 761 4588-5142

BIPV, Sonnenschutz

Dr. Tilmann Kuhn
Telefon +49 761 4588-5297

Solarthermische Fassaden

Dr. Christoph Maurer
Telefon +49 761 4588-5667

Spektrometrie, Goniometrie, SRI und Farbmessung

Dr. Helen Rose Wilson
Telefon +49 761 4588-5149

Tageslichtmessräume

Dr. Bruno Bueno
Telefon +49 761 4588-5377

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Transmission, Reflexion und g-Wert nach DIN EN 410, ISO 9050, DIN EN ISO 52022, DIN EN 14500, DIN EN 14501
- » Wärmeleitfähigkeit und U-Wert nach ISO 8302, DIN EN 673, DIN EN 674
- » Solar Reflectance Index (SRI) nach ASTM E1980



Prüfung von Kollektoren, Speichern und Systemen

testlab-sts@ise.fraunhofer.de

Im Leistungsangebot des TestLab Solar Thermal Systems sind sämtliche Bauarten von Sonnenkollektoren und Wärmespeichern sowie Komplettsysteme abgedeckt. Auch bei innovativen Ansätzen unterstützen wir Kunden mit unseren Prüfmöglichkeiten bei der Entwicklung von solarthermischen Heizungssystemen.

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

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

Unser Indoor-Teststand mit Solarsimulator liefert eine hohe Wiederholgenauigkeit, was besonders auch im Entwicklungskontext von hoher Bedeutung ist. Mit der Weiterentwicklung von in situ Charakterisierung ergeben sich im TestLab Solar Thermal Systems für unsere Kunden auch Möglichkeiten, die Anlagen im Feld zu vermessen, z. B. Nahwärmenetze. Wir prüfen grundsätzlich nach der aktualisierten EN ISO 9806:2018. Diese kann direkt für alle in den Anwendungsbereich aufgenommenen Technologien sowie die Änderungen in den Testmethoden innerhalb unseres Akkreditierungsumfangs angeboten werden.

TestLab
Solar Thermal
Systems



in situ Vermessung

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

Kollektoren

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

Speicher, Systeme

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

Standards und Spezifikationen

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

1 Kollektor im Hagelteststand.



Vermessung und Prüfung von Wärmepumpen

testlab_heatpumps@ise.fraunhofer.de

TestLab
Heat Pumps
and Chillers



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

In einer kalorimetrischen Doppelklimakammer können Prüflinge bis zu 100 kW Wärme- oder Kälteleistung (50 kW im kalorimetrischen Betrieb) bei Temperaturen von -25 °C bis +50 °C und relativen Luftfeuchten von 25 % bis 95 % vermessen werden. Für die Konditionierung von Wasser oder Sole stehen mehrere Anlagen zu Verfügung, die das entsprechende Medium auf Temperaturen von -25 °C bis +95 °C im Leistungsbereich bis 75 kW thermisch bereitstellen können. In den drei Luftstrecken kann der Luftstrom (80 m³/h bis 5000 m³/h) im Temperaturbereich von -15 °C bis +50 °C bei relativer Luftfeuchtigkeit von 15 % bis 95 % konditioniert werden.

In unserem Labor können Anlagen nach allen gängigen Normen und Regelwerken vermessen werden. Im Februar 2018 wurde es nach ISO/IEC 17025 zum TestLab Heat Pumps and Chillers akkreditiert. Über die standardisierten Methoden hinaus entwickeln wir zusammen mit unseren Kunden individuelle Messverfahren, durch die sich Entwicklungs- und Optimierungsprozesse von Geräten und komplexeren Systemen durch realitätsnahe, dynamische Prüfabläufe, inkl. »Hardware-in-the-Loop«, zeit- und kosteneffizienter gestalten lassen. Wir konzipieren und betreiben auch komponentenspezifische Teststände (z. B. Verdichterteststand, diverse Wärmeübertrager-Teststände), bei denen modernste Mess- und Analysetechnik für spezifische Fragestellungen aus den Bereichen Strömungsmechanik, Akustik, Vibrationen und Gasanalyse zum Einsatz kommen (z. B. Particle Image Velocimetry, Laser Doppler Anemometry, Shadowgraphie, Gaschromatographie, Scanning Vibrometrie).

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

Standards und Spezifikationen

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

1 Untersuchung der Leckagevorgänge an einem Propan-Kältekreis.



Charakterisierung leistungselektronischer Geräte

testlab-pe@ise.fraunhofer.de

TestLab
Power Electronics



Durch die neuen Multi-Megawatt-Laboranlagen am Standort Zinkmattenstraße in Freiburg hat sich der Leistungsbereich und der Umfang der vom akkreditierten TestLab Power Electronics angebotenen Prüfungen deutlich erweitert. Die Ausstattung des neuen Labors ermöglicht unter anderem die Prüfung von Wechselrichtern nach heutigen Netzanschlussrichtlinien sowie die Durchführung von kundenspezifischen Klimatests. Wir prüfen vor allem PV- und Batterie-Wechselrichter, aber auch Verbrennungskraftmaschinen wie BHKWs oder Lasten, z. B. Ladesäulen für die Elektromobilität. Am neuen Standort stehen unter anderen Transformatoren für den Anschluss von Prüflingen sowie Testeinrichtungen zur Prüfung ihres dynamischen Netzverhaltens (UVRT und OVRT) bis zu einer Leistung von 10 MVA zur Verfügung. Am neuen Standort des »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« in der Zinkmattenstraße in Freiburg verfügen wir über eine umfangreiche Ausstattung (s. Seite 83).

Darüber hinaus bieten wir unseren Kunden auch Vermessungen im Feld, etwa in großen PV-Kraftwerken oder Windparks. Hierfür können sechs Messsysteme mit je 16 Messkanälen räumlich verteilt angeordnet und synchronisiert werden. Mit unserem 4,5-MVA-LVRT-Testcontainer können wir auch größere Erzeugungseinheiten, wie BHKWs, direkt bei unseren Kunden oder im Feld prüfen. Des Weiteren steht uns in unserem Outdoor-Testfeld ein variabel konfigurierbarer PV-Generator mit einer Leistung von 1 MWp zur Verfügung. Dieser wird besonders für Wechselrichtertests unter realen Bedingungen verwendet.

Wir prüfen Erzeugungseinheiten nach internationalen Einspeiserichtlinien (z. B. für Deutschland, China, Großbritannien) und bestimmen hochgenau den Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte. Darüber hinaus unterstützen wir unsere Kunden bei der Modellierung von Erzeugungseinheiten sowie von Kraftwerken mit ihrem Netzanschluss zur Beurteilung der dynamischen Stabilität. Bei der Planung und Durchführung von Messkampagnen reagieren wir jederzeit flexibel auf die Bedürfnisse unserer Kunden und bieten auch im Vorfeld ausführliche Beratung und Unterstützung.

Roland Singer M. Eng.
Telefon +49 761 4588-5948

Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » FGW TR4: Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen.
- » DIN EN 61400-21: Messung und Bewertung der Netzverträglichkeit von netzgekoppelten Windenergieanlagen
- » DIN EN 61683: Photovoltaische Systeme – Stromrichter – Verfahren zur Messung des Wirkungsgrads
- » DIN EN 50530: Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik-Wechselrichtern
- » TLPE-HV-001: Bestimmung der Umwandlungseffizienz von bidirektionalen Umrichtern basierend auf DIN EN 50530
- » TLPE-HV-002: Bestimmung des Wirk- und Blindleistungs-Verhaltens bidirektionaler Umrichter basierend auf TR3
- » TLPE-HV-003: Bestimmung des Frequenz-Wirkleistungs-Verhaltens (P(f)) von bidirektionalen Umrichtern basierend auf TR3

¹ *Programmierung der PV-Simulatoren für einen Wechselrichtertest.*



PV-TEC: Durchlauf-Ätzanlage
zur ozon-basierten Waferreinigung
sowie einseitigen Emittententfernung.

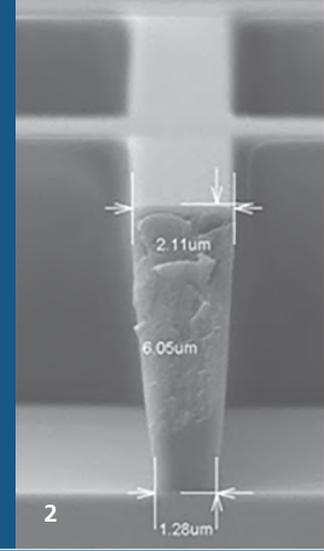


FuE-INFRASTRUKTUR

Eine Besonderheit des Fraunhofer ISE ist seine hervorragende technische Infrastruktur. Über 16 000 m² Laborfläche und hochmoderne Geräte und Anlagen sind Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Darunter sind derzeit 650 m² zertifizierte Reinraumfläche. Die FuE-Infrastruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich in acht Laborzentren sowie vier produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren:

- » Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- » Zentrum für neuartige PV-Technologien
- » Zentrum für Optik und Oberflächenforschung
- » Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse
- » Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien
- » Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme
- » Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe
- » Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- » SiM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center
- » PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center
- » Module-TEC – Module Technology Evaluation Center
- » Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center

Die technische Infrastruktur wird kontinuierlich weiter entwickelt, so dass das Institut für seine Kunden stets Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf dem neuesten Stand der Technik durchführen kann. So wurde im Jahr 2018 das PV-TEC – Photovoltaik Technology Evaluation Center nach einem Brand modernisiert und wieder eröffnet. Zudem hat das Fraunhofer ISE das Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze um einen neuen Standort in der Zinkmattenstraße in Freiburg erweitert. Hier stehen nun hochmoderne Anlagen für die Entwicklung und Prüfung von leistungselektronische Komponenten bis in den Multi-Megawatt-Bereich zur Verfügung.



Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen

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

Im »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« entwickeln wir Technologien, mit denen es möglich ist, höchste Solarzellenwirkungsgrade zu erreichen und implementieren diese auf internationalem Spitzenniveau. Zu den Anwendungsmöglichkeiten von Höchsteffizienz solarzellen gehören neben herkömmlichen Solarmodulen auch die Stromversorgung von Satelliten, Elektroautos, autarken Sensoren sowie elektronischen Geräten. Das Fraunhofer ISE hält im Bereich der höchsteffizienten Solarzellen mehrere Weltrekorde, wie den Wirkungsgradrekord für das weit verbreitete multikristalline Silicium (22,3 %) und den absoluten Wirkungsgradrekord von 46,1 %, basierend auf einer III-V-Mehrfachzellenarchitektur.

Um diese Spitzenstellung weiter auszubauen, haben wir 2017 den Grundstein für ein neues Laborgebäude gelegt, das über eine an die künftigen technologischen Herausforderungen angepasste Reinraumausstattung verfügen wird. Im neuen »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« können auf mehr als 1000 m² modernster Laborfläche fortschrittliche Halbleiter-

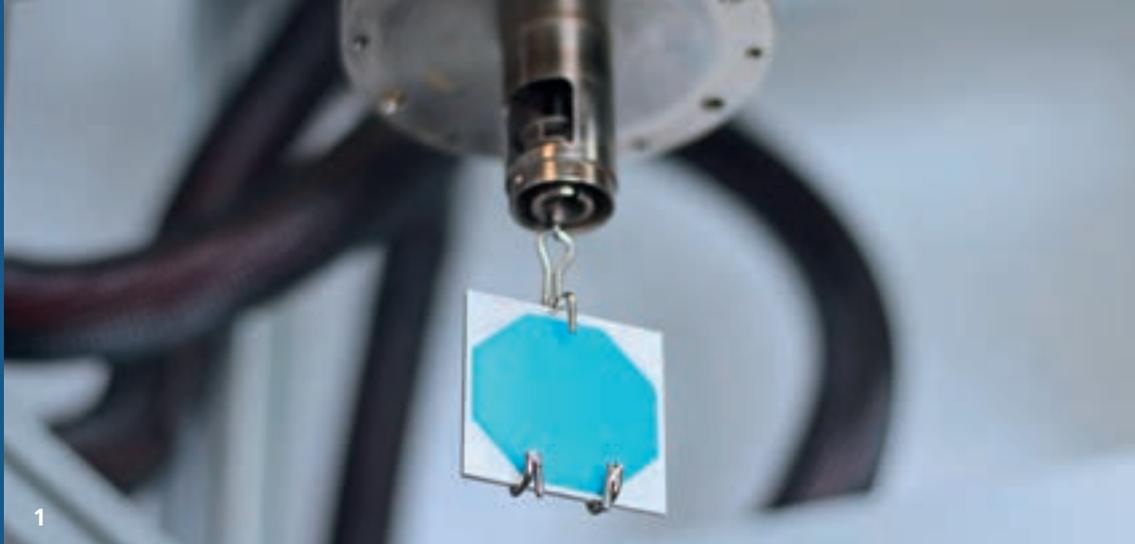
Technologien für die PV, Sensorik und andere Anwendungsgebiete getestet und optimiert werden. Dort sollen innovative Prozesse und Technologien für den künftigen Einsatz in der Industrie erforscht werden. Neben der Weiterentwicklung der Silicium- und III-V-Technologie, liegt ein Fokus des neuen Zentrums auf höchsteffizienten Silicium-basierten Mehrfachzellen: Die Kombination von Silicium mit anderen Halbleitermaterialien ist eine der vielversprechendsten Zukunftstechnologien der Photovoltaik. Mit dem neuen Laborgebäude will das Fraunhofer ISE auch in Zukunft wegweisende neue Solarzellentypen und -technologien entwickeln und zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie beitragen.

1 *Laserbelichter zur maskenlosen, photolithographischen Strukturierung von Wafern für höchsteffiziente Silicium- und III-V-Solarzellen.*

2 *Mit Laserbelichter in Photolack hergestellte Mikrostruktur.*

Technische Ausstattung

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



Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse

Dr. Karl-Anders Weiß | Telefon +49 761 4588-5474 | PV-Module: Daniel Philipp | Telefon +49 761 4588-5414 |
 PV-Zellen: Dr. Martin Schubert | Telefon +49 761 4588-5660

Im »Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse« bündelt das Fraunhofer ISE seine technischen Kompetenzen zur Prüfung und Vermessung einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die für die aktive und passive Nutzung der Solarenergie, Energiespeicherung und in der Gebäudetechnik eingesetzt werden.

Ein Schwerpunkt ist die umfassende Ermittlung der Materialeigenschaften. Wir verfügen über besondere Expertise für die Untersuchung von Halbleitermaterialien, Solarzellen, Photovoltaikmodulen, thermochemischen und porösen Materialien (z. B. Zeolithe), Phasenwechselmaterialien (PCM), Wärmeträgerflüssigkeiten, Polymeren sowie Beschichtungen

auf Glas und Metallen. Wir entwickeln zudem geeignete, neue Methoden zur Materialcharakterisierung, insbesondere zerstörungsfreie Analyseverfahren. Für die Untersuchung von Materialien unter Anwendungsbedingungen und verschiedenen Belastungsfällen, z. B. in unterschiedlichen Klimazonen, haben wir besondere Kompetenzen. Um die Leistungsfähigkeit und Gebrauchsdauer von Materialien in diesen verschiedenen Anwendungen abzuschätzen, nutzen wir Daten aus analytischen Messungen, dem Realbetrieb und aus beschleunigten Altersprüfungen. Wir erarbeiten zudem Modelle zur Berechnung des Materialverhaltens und der Degradation.

1 *Thermowaage zur Bestimmung der Wasserdampfaufnahmekapazität großer Verbundproben in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.*

Technische Ausstattung

Materialcharakterisierung

- » Dilatometer
- » Differenzkalorimeter (10 µl bis 10 ml, -90 bis 700 °C)
- » Temperatur-Stufen-Kalorimeter (bis 100ml, -10 bis 180 °C)
- » Plattenapparatur (bis zu 50 cm x 50 cm) zur Bestimmung der temperaturabhängigen Wärmekapazität von plattenförmigen Proben
- » Laser-Flash- und Hitzdraht-Apparturen zur Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit (-90 °C bis 500 °C)
- » Lock-in-Thermographie und Elektrolumineszenz
- » BET-Porosimetrie zur Ermittlung von Porenstruktur und Oberfläche hochporöser Materialien
- » Röntgendiffraktometer (XRD) zur Kristallstrukturbestimmung
- » Konfokales Raman-Mikroskop mit AFM
- » Rotationsrheometer zur Bestimmung des Fließverhaltens von Materialien im Temperaturbereich -20 °C bis 600 °C

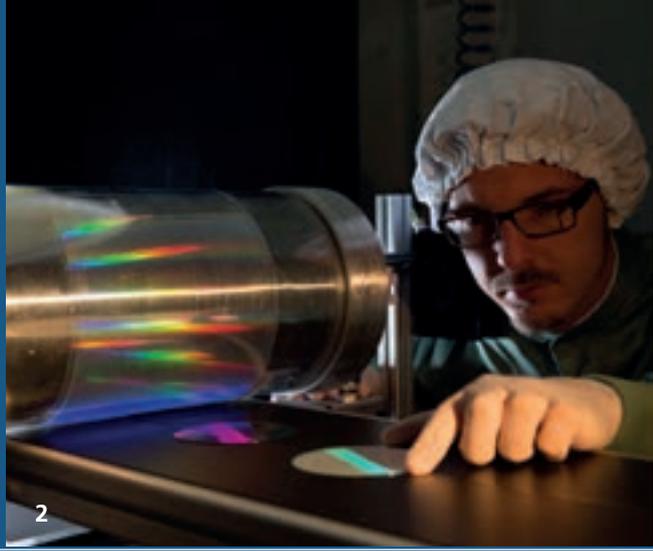
- » Massenspektrometer für die temperaturabhängige Ermittlung der Permeationseigenschaften von Barrierematerialien
- » FT-IR-Spektrometer mit integrierenden Kugeln (UV/Vis, IR)
- » Photolumineszenz-, Thermographie- und elektrische Verfahren für die orts aufgelöste und quantitative Analyse von Siliciummaterialqualität und Solarzellen

Gebrauchsdaueranalyse

- » Freibewitterungsanlagen mit umfassendem Monitoring in verschiedenen Klimazonen
- » Temperaturwechselprüfungen von PCM und hydrothermales Zyklieren von Adsorbens-Verbundproben
- » Prüfaufbauten zur Degradationsuntersuchung von Materialien und Komponenten für HL-Materialien, Solarzellen und Module



1



2

Zentrum für Optik und Oberflächenforschung

Dr. Thomas Kroyer | Telefon +49 761 4588-5968 | Dr. Benedikt Bläsi | Telefon +49 761 4588-5995 |
 Anna Heimsath | Telefon +49 761 4588-5944

Im »Zentrum für Optik und Oberflächenforschung« entwickeln wir optisch-funktionale Oberflächen für eine Vielzahl von Anwendungen und unterstützen Entwicklungen unserer Kunden. In der Beschichtungstechnologie erarbeiten wir Lösungen basierend auf dem Sputterverfahren für die Bereiche Solarthermie, Photovoltaik, Energieeffizienz, Dünnschichtbatterien und Wasserstofftechnologie. Die Anwendungen umfassen z. B. Spiegel und Absorber für solarthermische Kraftwerke, transparente Elektroden und farbige Abdeckscheiben für Photovoltaik, Low-Emissivity und Solar Control-Coatings sowie optisch schaltbare Systeme für energieeffiziente Gebäude. Zusätzlich zur Optimierung der optischen Eigenschaften maßschneidern wir Schichtsysteme für die jeweiligen Anforderungen des Endprodukts (z. B. Langzeitstabilität und industrielle Skalierbarkeit). Unser Leistungsspektrum umfasst Machbarkeitsstudien, Kleinserienfertigungen sowie Produktentwicklungen bis hin zum fertigen industriellen Prototypen. Die Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen ermöglicht verschiedenste optische wie auch nicht-optische Funktionalitäten. Die großflächige Herstellung maßgeschneiderter Oberflächenstrukturen ist die Grundlage für eine industrielle Umsetzbarkeit.

In Solarzellen führen photonische Strukturen zu verbesserter 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 nichtoptischer Eigenschaften spielen Mikro- und Nanostrukturen eine Rolle, z. B. bei der Beeinflussung der Benetzbarkeit, Haftung oder Reibung. Für die konzentrierende Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke entwickeln und qualifizieren wir optische Komponenten. Neben der Entwicklung bilden dabei die Bewertung von Konzentratoren sowie die Verschmutzungsanalyse und Reinigungsmöglichkeiten weitere Schwerpunkte. Dafür quantifizieren wir z. B. die Strahlaufweitung durch Streuung und die Formtreue, um zur Optimierung und Qualitätssicherung beizutragen.

1 *Horizontale Sputteranlage, bestückt mit bis zu 10 Planar- und Doppelrohrkathoden sowie einer Plasmaätzstation.*

2 *Rollen-Nanoimprint-Anlage zur Übertragung von Mikro- und Nanostrukturen auf starre Substrate.*

Technische Ausstattung

- » Moderne Sputteranlagen mit einer Beschichtungsfläche bis zu 1,5 x 4 m² 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 µm homogen auf Flächen bis 1,2 x 1,2 m²
- » Nanoimprint- und Heißpräge-Anlagen, um Mikro- und Nanostrukturen auf Prototypen zu übertragen
- » Plasmaätzanlagen zur Übertragung von per Imprint hergestellten Strukturen in nichtpolymere Materialien
- » Charakterisierung der optischen und mikrostrukturellen Eigenschaften: Fourierspektrometer, Rasterelektronenmikroskopie (REM), Rasterkraftmikroskopie (AFM), Goniometrie zur Quantifizierung von Streuung bzw. Strahlaufweitung (Scanning 3D Goniometer, VLABS: Very low angle beam spread)
- » Deflektometrie zur Bestimmung der Formtreue von Formwerkzeugen und Konzentratoroptiken



Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien

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

Im »Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien« bündelt das Fraunhofer ISE seine technischen Kompetenzen zur Prüfung und Charakterisierung einer Vielzahl von Geräten und Komponenten für den Einsatz in der Gebäudetechnik. Durch eine umfangreiche und modulare Infrastruktur decken wir unterschiedliche Leistungsklassen und Fragestellungen in der Untersuchung von Geräten und deren Komponenten ab. Schwerpunktthemen sind:

- » Untersuchung und Bewertung neuartiger Wärmeübertrager für die Lüftungs- und Klimatechnik, Adsorptions- und Kältetechnik
- » Untersuchung und Bewertung von natürlichen Kältemitteln
- » Untersuchung und Bewertung von Kältekreisbauteilen (Verdichter, Ventile)
- » Werkzeuge und Methoden zur Entwicklung von Sicherheitskonzepten

So analysieren und bewerten wir Wärmeübergang und Druckverlust an charakteristischen Strukturausschnitten sowie an maßstabsgetreuen Wärmeübertragern mit unterschiedlichen Fluiden bis hin zur Vermessung von Verdichtern, Wärmepumpen und Kältemaschinen nach verschiedenen Normen und Regelwerken.

Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung und Bewertung von Komponenten für natürliche Kältemittel, wie u. a. Propan. Unser gesamtes Labor ist daher für Arbeiten mit brennbaren Kältemitteln ausgestattet und erlaubt uns die Entwicklung und Optimierung von Komponenten für Propan-Kältekreisläufe. Dies betrifft sowohl Teststände zur Vermessung von Kompressoren und Wärmeübertragern mit reduzierter Kältemittelmenge als auch Klimakammern für die Leistungsmessung gesamter Geräte nach den entsprechenden Normen.

1 *Eine der drei Luftkonditionierungsstrecken.*

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 von 80 bis 5000 m³/h, Heizleistungen von 2 bis 50 kW, Kühlleistung von 2 bis 15 kW und Temperaturbereich von -15 °C bis +50 °C
- » Teststände zur Kältemittelverteilung
- » Teststand zur 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



Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme

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

Das Fraunhofer ISE setzt im »Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme« einen besonderen Schwerpunkt auf die Batterietechnologie. So arbeiten wir mit neuartigen Materialien und an innovativen Produktionsverfahren für Batteriezellen und beschäftigen uns mit neuen Ansätzen für die Batteriesystemtechnik – von der Zelle über das Modul bis zum Batteriespeicher inklusive Batteriemangement und thermischem Management. Wir optimieren Verfahren zur Ladezustands- und Alterungsbestimmung sowie zur Lebensdauervorhersage. Zudem entwickeln wir optimierte Lade- und Betriebsführungsstrategien sowie Batteriesystemprototypen für verschiedenste Anwendungsgebiete.

Zu unseren Tätigkeiten gehören auch die Modellierung und Simulation von Batterien. Dabei arbeiten wir mit elektrischen, elektrochemischen und thermischen Modellen auf Material-, Zell- und Systemebene. Wir führen umfassende Tests und Prüfungen von Batterien durch, darunter Performance- und

Alterungsuntersuchungen (kalendarisch, zyklisch), thermische Untersuchungen, Abuse-Tests sowie Post-Mortem-Analysen. Wir verfügen darüber hinaus über die Kompetenzen, um verschiedene PV-Speichersysteme, wie Pico-PV-Systeme, Solar-Home-Systeme, PV-Hybridsysteme, netzgekoppelte PV-Batteriespeicher und Speichersystemkomponenten (Laderegler, Energiemanagementsysteme, etc.) zu testen und zu prüfen.

Wir beschäftigen uns mit der umfassenden Qualitätssicherung elektrischer und thermischer Speichersysteme. Die hierfür eingesetzten Methoden reichen von der simulationsbasierten Systemauslegung und -optimierung über Systemtests im Labor und Feld bis hin zum Anlagenmonitoring. Im Bereich der thermischen Speicher umfasst dies sowohl Wärme- als auch Kältespeicher.

1 *Entwicklungs- und Prüfzentrum für Batterietechnik.*

Technische Ausstattung

- » Basisprozesskette zur Herstellung und Verarbeitung von Materialien für Batteriezellen
- » Testkreise für die Zyklisierung von kleinen Batteriezellen und Messsysteme für die elektrochemische Charakterisierung von neuen Batteriechemien
- » Batterietestkreise bis zum System mit 250 kW (1000 V, 600 A)
- » Klimakammern mit Schutzeinrichtungen
- » Isothermes Batterie-Kalorimeter
- » Hochgenauer Coulombmetrie-Teststand
- » Teststände für komplette PV-Heimspeichersysteme bis 15 kW (Hardware-in-the-loop)
- » Testeinrichtungen für DC-Anwendungen, z. B. für Leuchtmittel
- » Elektroniklabor für die Entwicklung von Batteriemangementsystemen und Elektronik für PV-Kleinsysteme
- » Off-Grid-Labor: Test- und Prüfeinrichtungen für die 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
- » Teststände zur Charakterisierung von thermischen Speichern im Temperaturbereich von -30 bis 550 °C
- » Monitoringsysteme zur energetischen Analyse von thermischen Speichern in der Anwendung
- » Testeinrichtung zur Vermessung von Speichern nach EN 12977-3



Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe

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

Im »Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe« werden Komponenten und Subsysteme der Wasserstofftechnologie in den Bereichen PEM-Elektrolyse, PEM-Brennstoffzellen (besonders für die automobiler Anwendung), Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Liquid bzw. auch Power-to-Chemicals getestet und mit wissenschaftlich fundierten Methoden charakterisiert.

1 *Differenzielle Testzelle zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten. Eine Entwicklung des Fraunhofer ISE gemeinsam mit balticFuelCells GmbH.*

Technische Ausstattung

PEM-Elektrolyse

- » Zwei Teststände zur Charakterisierung von Elektrolysestacks (200 kW und 1 MW)
- » Einspeiseanlage von Wasserstoff in eine Erdgaspipeline zur Untersuchung der PtG-Technologie
- » Mehrere Einzelzelmessstände und Teststände für Shortstacks zur vollautomatischen Charakterisierung von PEM-Elektrolysezellen in einem weiten Betriebsfenster
- » Wasserstofftankstelle als Forschungsplattform zum Testen neuer Sensorik und Verfahren

PEM-Brennstoffzellensysteme

- » Anlage zur Mehrkanal-Impedanzspektroskopie für die orts aufgelöste Charakterisierung (automobiler) Einzelzellen
- » Mehrkanal-Impedanzspektroskopie zum simultanen Einzelzellmonitoring für (automobiler) Kurzstapel

- » Vollautomatisierter Teststand zur Charakterisierung von (automobiler) Kurzstapeln bis 20 kW/1000 A mit der Möglichkeit zur Einbindung von Peripheriekomponenten für systemnahe Tests
- » Mehrere hochwertige, vollautomatisierte Einzelzellteststände zur in situ Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten und Einzelzellen
- » Begehbare Klimakammer mit einem Temperaturbereich von -40 °C bis +80 °C und einem Feuchtebereich von 5 bis 95 % relativer Feuchte

Synthetische Kraftstoffe

- » Bestimmung von Zündverzugszeiten flüssiger und/oder gasförmiger Kraftstoffe
- » Vollautomatisierte Miniplant-Anlage inkl. Rezyklierung nicht umgesetzter Edukte zur Synthese flüssiger Kraftstoffe wie Methanol aus CO₂-reichen Feedgasen und Wasserstoff



1



2

Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze

Dr. Olivier Stalter | Telefon +49 761 4588-5467

Das Fraunhofer ISE verfügt in diesem Zentrum über eine weltweit einmalige Infrastruktur. Dank eines eigenen Hochspannungsanschlusses können wir Wechselrichter und deren Auswirkungen auf das Stromnetz bis in den Multi-Megawatt-Bereich erforschen sowie ihre Konformität mit neuesten Netzanschlussrichtlinien (s. Seite 75) prüfen. Des Weiteren steht die Entwicklung innovativer Leistungselektronik für die Nieder- und Mittelspannung im Zentrum unserer Aktivitäten.

Darüber hinaus bietet das Zentrum eine umfangreiche Ausstattung an intelligent vernetzten Energieanlagen. Wir können damit sowohl Einzellösungen als auch komplexere Systeme in einer realitätsnahen Umgebung erproben. Unsere Forschungsaktivitäten fokussieren dort auf Digitalisierung und intelligente Betriebsführung sowie auf nachhaltige Netze und verstärkte Sektorenkopplung.

- 1 *Smart Energy Lab am Fraunhofer ISE.*
- 2 *Multi-Megawatt Lab am neuen Standort in der Zinkmattenstraße.*

Technische Ausstattung

Power Converters Lab

- » Bidirektionale DC-Quellen (bis 1000 V / 600 A)
- » Maschinenemulator (160 kVA) und Netzsimulator (30 kW)
- » Lastwiderstand für DC und AC Spannungen (200 kW)
- » Programmierbare nicht-lineare Lasten (3-ph, 230 V / 16 A)
- » Hochauflösende, breitbandige Oszilloskope und Tastköpfe
- » Mehrkanalmesssysteme u. Präzisions-Leistungsmessgeräte
- » Messequipment EMV-Störungen (bis 200 A_{AC} / 400 A_{DC})
- » Hochauflösende, hochfrequente Wärmebildkamera (Videos)
- » Präzisions-Induktivitätsmessgerät und Impedanzanalysator
- » Mehrtoriger Vektor-Netzwerkanalysator
- » Hardware-in-the-Loop (HIL) System von OPAL-RT
- » Dampfphasen-Reflow-Lötssystem
- » Fineplacer Mikroskop-Lötstation inkl. Dispenseinheit
- » Teststand zur Charakterisierung von SiC/GaN-Halbleitern

Multi-Megawatt Lab

- » Eigener Anschluss ans 110-kV-Netz (20 kV / 40 MVA Trafo)
- » Hochpräzise, breitbandige Messung bis zur 110-kV-Ebene
- » Prüffelder bis 7 MVA und von 260 V bis 1000 V
- » PV-Simulator (2000 V / 1,4 MW)
- » Bidirektionaler Batteriesimulator (750 V / 1 MW)
- » Hochdynamischer, rückspeisefähiger Netzsimulator (1 MVA)
- » UVRT- und OVRT-Testeinrichtung für Prüflinge bis 10 MVA

- » Mobiler UVRT-Testcontainer (4,5 MVA)
- » L- und C-Lasten (7 MVA)
- » Anti-Islanding-Prüfstand (400 kVA)
- » Klimakammer für Großgeräte (-30 °C bis +80 °C)
- » Hochgenaue Leistungsmessgeräte (1000 V / 5000 A)

Medium Voltage Lab

- » Testfeld mit Mittelspannungsanschluss (20 kV / 20 MVA)
- » Mittelspannungs-DC-Quelle (40 kV / 660 kW)
- » Mittelspannungswiderstand (20 kV / 1 MW)
- » Mittelspannungstransformator (3 bis 30 kV / 2,5 MVA)
- » Bahntransformator (16,6 Hz / 15 kV / 200 kVA)
- » Halbleiter-Teststände zur Charakterisierung von Leckströmen (bis 30 kV), Avalanche-Effekten (bis 4 kV / 100 A) und Schaltverlusten (bis 20 kV / 1000 A)

Smart Energy Lab

- » Simulator für variable, elektrische Lastprofile
- » PV-Simulator für dynamische UI-Charakteristiken
- » HIL-System zur Abbildung thermoelektrischer Lastgänge
- » Teststand für Batteriemanagementsysteme
- » Vernetzte Ladestationen für Elektrofahrzeuge
- » IT-Monitoring-Plattformen für Reallabore und Feldversuche



SiM-TEC – Silicon Material Technology Evaluation Center

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

Das SiM-TEC ist das Forschungszentrum am Fraunhofer ISE, das neue Technologien für die Produktion von Siliciumwafern für die Photovoltaik entwickelt und die dazu eingesetzten Materialien evaluiert. Für die Herstellung von multikristallinen Wafern umfassen die Arbeiten im SiM-TEC die Evaluation neuer Feedstock-Materialien, die Weiterentwicklung der gerichteten Erstarrung multikristalliner Blöcke sowie die Herstellung von Wafern basierend auf Sägeprozessen. Im Bereich des Kerfless Wafering untersuchen wir Prozesse zur elektrochemischen Porosifikation und die Abscheidung von Silicium mit Atmosphärendruck-Epitaxie im Hochdurchsatzverfahren. Alle genannten Technologieschritte begleiten wir durch eine Vielzahl von Analytikmöglichkeiten und Simulationen.

Um bei der Herstellung multikristalliner Wafer den Eintrag von Verunreinigungen zu minimieren, forschen wir an Tiegelssystemen und Beschichtungen mit erhöhter Reinheit. Die Kristallisation erfolgt als gerichtete Erstarrung nach dem

Vertical Gradient Freeze (VGF) Verfahren mit Schwerpunkten auf der Entwicklung qualitativ hochwertiger Wafer durch Prozesse mit und ohne Keimvorgabe sowie der Erhöhung von Materialhomogenität und Durchsatz durch Nachführen (»Feeden«) von Silicium während der Kristallisation.

Als weiteren Technologieschwerpunkt entwickeln wir die Epitaxie von hochreinem Siliciummaterial mittels des CVD-Verfahrens (Chemical Vapour Deposition) in einem kontinuierlichen Prozess. Dies wird z. B. für das Wachstum epitaktischer Wafer eingesetzt (s. Seite 29). Für die elektrochemische Prozessierung von Siliciumwafern verfügen wir über eine Inline-Ätzanlage, die in mehreren elektrisch voneinander getrennten Becken verschiedene vollflächige (156 x 156 mm²) Ätzprozesse durchführen kann.

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

Technische Ausstattung

- » Kristallisationsanlage PVA Tepla VGF 623 Multicrystallizer
- » Multidrahtsäge Meyer Burger DS 265
- » Säulendurchleuchtungsanlage Intego Orion Super High Resolution
- » Blockcharakterisierungsanlage Semilab WT-2000D
- » Inline-Porosifikationsanlage IporSi
- » Kontinuierliche Epitaxie Anlage ConCVD
- » Kontinuierliche Epitaxie Anlage ProConCVD
- » Optischer Schichtdickenscanner CyberTechnologies CT-250T



1



2

PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center

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

Das PV-TEC dient dazu, die Lücke zwischen Laborforschung und industrieller Anwendung zu schließen. Nach einem schweren Laborbrand im Februar 2017 wurde das Großlabor im Juli 2018 nicht nur wieder eröffnet, sondern auch modernisiert. Wir verfügen dort über topaktuelle Prozess- und Charakterisierungsgeräte für die Entwicklung von Siliciumsolarzellen.

Wir sind fokussiert auf Kernthemen der Produktionstechnologie und Messtechnik für kristalline Siliciumsolarzellen:

- » Evaluation und Entwicklung von Herstellungsprozessen und Prozesstechnologiekomponenten
- » Entwicklung und Fertigung von fortgeschrittenen industriellen Solarzellenstrukturen
- » Charakterisierung und Entwicklung von Materialien und Solarzellen
- » Schulung und Training für PV-Technologie
- » Prozesstransfer mit Vor-Ort-Unterstützung
- » Ökonomische Kostenstudien

1 *Beschichtungssystem im PV-TEC.*

2 *Neue Siebdrucklinie im PV-TEC.*

Das PV-TEC bedient Unternehmen aus allen Bereichen der PV-Wertschöpfungskette, wie Solarzellen- und Modulhersteller, Anlagen- und Materialhersteller.

Hocheffiziente industriennahe Siliciumsolarzellen

Im PV-TEC arbeiten wir an der Weiterentwicklung und Optimierung des Standardprozesses zur Herstellung von Si-Solarzellen und erweitern diesen z. B. um Diffusions- und Laserprozesse zur Erzeugung selektive Emittierer oder Druckprozesse für Feinlinienkontakte mit Kontaktbreiten unter 30 µm. Damit steht im PV-TEC ein hochwertiger, kontinuierlich optimierter Baseline-Prozess zur Verfügung, der die Referenz für die Prozessentwicklungen darstellt. Wir können auch teilprozessierte Solarzellen für alle industrieüblichen Formate verwenden sowie ausgewählte Prozesse und Prozesssequenzen evaluieren. Ein Fokus der Arbeiten liegt dabei derzeit auf der PERC-Solarzelle (PERC: passivated emitter and rear cell), die aktuell von zahlreichen Firmen in den Markt eingeführt wird. Ein weiterer Schwerpunkt sind Solarzellen mit passivierten Kontakten, die mit einem Wirkungsgradpotenzial von über 25 % der nächste Schritt der Entwicklung sind.

Technische Ausstattung

PV-TEC Front-End

- » Automatisierte Waferinspektionsanlage
- » 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)

PV-TEC Back-End

- » Vollautomatisierte Laser- und Druckanlagen zur Strukturierung und Metallisierung
- » Hochdurchsatz-Rotationsdruckanlage
- » Multi-Düsen-Dispenstechnologie für die Feinlinien-vorderseitenmetallisierung
- » Druckprozessentwicklung mit diversen Drucktechnologien
- » Laserprozessentwicklungslabor mit verschiedenen Strahlquellen
- » Innovative Durchlauföfen für Kontaktausbildung und Regeneration



Module-TEC – Module Technology Evaluation Center

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

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 werden Module vom Einzeller bis zum Vollformat gefertigt.

Für die Zellverbindung werden neben den üblichen drei bis fünf Bändchen pro Zelle auch Runddrähte (Multi-Wire), strukturierte Verbinder oder leitfähige Rückseitenfolien verarbeitet. Alternativ können wir Modul-Strings in Schindelaufbauweise herstellen, mit überlappenden Zellkanten. Neben Zellen im Vollformat (ca. 156 mm x 156 mm) können auch Halb- und Teilformate zu Strings verbunden werden. Unsere Stringer nutzen Infrarotstrahlung, Induktion oder Heißluft zur Erwärmung der Fügestellen. 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 Heterojunction-Solarzellen, für besonders dünne Solarzellen und für Schindelverbindungen.

Die Einkapselung erfolgt in unseren Laminatoren im Glas-Folie- oder Glas-Glas-Aufbau. Dreidimensionale Lamine für die Modulintegration sind ebenso möglich wie randversiegelte Glas-Glas-Module ohne flächige Lamination (TPedge).

Unsere Kunden nutzen die Angebote des Module-TEC bei der Modulintegration neuer Materialien und Hocheffizienzzellen sowie bei der detaillierten Analyse und Optimierung der Moduleffizienz. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung anwendungsspezifischer Module zum Beispiel für die Gebäude- (BiPV) und die Fahrzeugintegration.

- 1 *Industrieller Stringer für die Verschaltung von Solarzellen.*
- 2 *Schindelverbindung von Solarzellen mit ECA auf strukturierter Slimline-EVA-Folie.*

Technische Ausstattung

- » Voll- und halbautomatisierte Anlagen zur elektrischen Zellverschaltung (IR, Kontakt, Induktion)
- » Rückkontaktstringer zur vollautomatisierten Verschaltung von Zellen verschiedener Formate mit beiden Kontaktpolen auf der Zellrückseite (MWT, IBC)
- » 6-Achs-Roboter für automatisiertes Layup der Solarzellenstrings, Herstellung von Rückkontakt-Zellen mit leitfähiger Rückseitenfolie, Dispensprozesse, Pick-and-Place-Aufgaben und kontrollierte UV-Aushärtung
- » 3D-Röntgencomputertomographie
- » Laminatoren in industriellem Maßstab für Einkapselungsprozesse von Solarzellen, adaptiert für dickere Aufbauten und sphärisch gewölbte Module
- » Equipment zur Herstellung von metallografischen Schliffproben und Querschliffen von Modulen
- » Digitalmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie für die Analyse von Fügestellen
- » Messgeräte zur mechanischen Charakterisierung von Modulmaterialien (statisch und dynamisch) sowie zur Adhäsionsprüfung
- » Elektrolumineszenz und Gelgehaltsanalyse für die Qualitätsbestimmung von Produktionsprozessen



Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center

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

Unsere Aktivitäten zu Konzentratormodulen fassen wir im Con-TEC zusammen. Hier entwickeln wir neue Generationen von hoch- und niedrigkonzentrierenden PV-Modulen und testen Komponenten und Produktionsprozesse. Weitere Forschungsschwerpunkte liegen in der Zuverlässigkeit und in der Materialanalytik. Auf semiautomatischen Produktionsanlagen haben wir bereits linsenbasierte FLATCON®-Module mit Wirkungsgraden von bis zu 36,7 % (CSTC) demonstriert. Wir unterstützen Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der konzentrierenden Photovoltaik.

Im Con-TEC nutzen wir unsere produktionsnahen Fertigungsprozesse, um Konzentratormodule mit höchster Effizienz zu produzieren und Wege zur Kostenreduktion aufzuzeigen. Wir stellen Prototypen in Kleinserien her, um neue Komponenten, Designs und Prozesse zu evaluieren. Einzigartig sind auch unsere Möglichkeiten und Erfahrungen in der Auswahl und Ver-

arbeitung von optischen Silikonem, die wir für die Herstellung von Optiken, zur optischen Ankopplung von Sekundäroptiken oder Verkapselung von Solarzellen nutzen.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung der Zuverlässigkeit einzelnen Baugruppen. In der Konzentratorphotovoltaik ist besonders die thermische Anbindung der Solarzelle an das Substrat entscheidend, da durch die konzentrierte Strahlung sehr hohe Energieströme übertragen werden. Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Module oder Komponenten werden beschleunigte Alterungstests durchgeführt.

1 *Ausricht- und Fügeanlage für die präzise Montage der Bodenplatte und der Linsenplatte eines Konzentratormoduls.*

Technische Ausstattung

- » Hochpräzise Bestücker von Solarzellen und Baugruppen auf kleinen und großen Flächen (klein: <math>< 250 \times 300 \text{ mm}^2</math> mit Setzgenauigkeit - » Löten unter Luft- oder Stickstoffatmosphäre, kontrolliertes Aushärten von Leitklebern
- » Vakuumlöten von Flächen bis zu - » Löten ohne Flussmittel mit Ameisensäure oder Formiergas-Aktivierung
- » Dünn- und Dickdrahtbonder für Gold- und Aluminiumdrähte
- » Anlage zur Ausrichtung der Primäroptik zur Solarzelle
- » Dispenseinheiten für das Auftragen von Klebern und dickflüssigen Montagematerialien
- » Koordinatenmessplatz MarVision OMS 1000/350 mit großem Messbereich (- » Abzugs- und Schertester Dage Series 4000
- » Klimakammern zur Auslagerung unter Temperatur oder Temperaturwechseln mit oder ohne zusätzlicher Beanspruchung durch erhöhte Luftfeuchtigkeit, Test von Solarzellenbaugruppen mit angelegter Rückwärtsspannung und Bestrahlung von optischen Komponenten oder Verkapselungsmaterialien mit konzentrierter UV-Bestrahlung

IMPRESSUM

Redaktion

Christina Lotz, Karin Schneider (verantwortlich)

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme ISE
Presse und Public Relations
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg
Telefon +49 761 4588-5150
Fax +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, 2019

Hier halten wir Sie auf dem Laufenden

-  www.ise.fraunhofer.de
-  blog.innovation4e.de
-  Twitter: [FraunhoferISE](https://twitter.com/FraunhoferISE)
-  Facebook [FraunhoferISE](https://www.facebook.com/FraunhoferISE)
-  <https://www.youtube.com/c/FraunhoferISE-official>

Gestaltung und Druck

netsyn, Joachim Würger, Freiburg
www.netsyn.de

BILDNACHWEISE

Copyrights

Stadt Freiburg i. Br. – Vermessungsamt, „dl-de/by-2-0“, www.govdata.de/dl-de/by-2-0, bearb. Fraunhofer ISE: Titelbild
Sandra Meyndt / Universität Freiburg: Seite 11
EUMETSAT 2018: Seite 40/41
Stadt Freiburg / Grafikbüro Gebhard / Uhl: Seite 48 Abb. 2
Schwarzenbach Fotografie: Seite 59
CSIRO Australien: Seite 61 Abb. 1
Juan Enrique del Barrio / Shutterstock.com: Seite 61 Abb. 2
Astoc / Mess: Seite 67 Abb. 2
Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

Fotografen

Auslöser Fotodesign Kai-Uwe Wuttke: Seite 3
Simon Braungardt: Seiten 46/47
Michael Eckmann: Seiten 29, 43, 73
Markus Feifel: Seite 34
Joscha Feuerstein: Seiten 56, 58, 82
Guido Kirsch: Seite 13
Dirk Mahler: Seiten 24/25, 26/27, 36/37, 44/45, 50/51, 53 Abb.1, 54/55, 64 Abb. 2, 75, 76, 77 Abb.1, 79 Abb. 2, 81, 83, 85, 86 Abb.1, 87
Marek Miara: Seite 74
Sönke Rogalla: Seiten 64 Abb.1, 65
Bernd Schumacher Photodesign: Seiten 8, 21
Timo Sigurdsson: Seiten 19, 72 Abb.1, 78
Gesche Wilhelmi: Seite 66 Abb. 2

VERANSTALTUNGEN 2019

MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER ISE

BAU München

München, 14.–19.01.2019

Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien

Berlin, 30.–31.01.2019

E-World

Essen, 05.–07.02.2019

BAMB-CIRCPATH 2019

Brüssel, Belgien,
05.–07.02.2019

PV-Module Forum

Köln, 12.02.2019

IEWT TU Wien

Wien, Österreich,
13.–15.02.2019

ISEC 2019

Pune, Indien,
14.–16.02.2019

SiliconFOREST

Falkau, 24.–27.02.2019

Internationale Sanitär- und Heizungsmesse (ISH)

Frankfurt,
11.–15.03.2019

Energy Storage Europe

Düsseldorf, 12.–14.03.2019

Forum Bauwerk-integrierte Photovoltaik

Kloster Banz, Bad Staffelstein, 18.03.2019

Symposium Photo-voltaische Solarenergie

Kloster Banz, Bad Staffelstein, 19.–21.03.2019

15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems

Fes, Marokko,
25.–27.03.2019

Hannover Messe Industrie

Hannover, 01.–05.04.2019

Solarex

Istanbul, Türkei,
04.–06.04.2019

Silicon PV

Leuven, Belgien,
08.–11.04.2019

Intersolar Europe / Electrical Energy Storage

München, 15.–17.05.2019

EVS 32

Lyon, Frankreich,
19.–22.05.2019

Berliner Energietage

Berlin, 20.–22.05.2019

Symposium Thermische Solarenergie

Kloster Banz, Bad Staffelstein, 21.–23.05.2019

Urban Future Global Conference

Oslo, Norwegen,
22.–24.05.2019

Hydrogen Fuel Cell Summit

Vancouver, Kanada,
22.–23.05.2019

13th REHVA World Congress CLIMA 2019

Bukarest, Rumänien,
26.–29.05.2019

9th SOPHIA Workshop PV-Module Reliability 2019

Graz, Österreich,
28.–29.05.2019

13th SNEC PV POWER

EXPO Shanghai, China,
03.–05.06.2019

International Conference on Electricity Distribution (CIRED)

Madrid, Spanien,
03.–06.06.2019

International Conference on Electrolysis

Loen, Norwegen,
09.–13.06.2019

46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference

Chicago, USA,
16.–21.06.2019

Electrical Energy Storage North America

San Francisco, USA,
09.–11.07.2019

16th IAEE European Conference

Ljubljana, Slowenien,
25.–28.08.2019

16th IPSA International Conference and Exhibition, Building Simulation 2019

Rom, Italien, 02.–04.09.2019

CISBAT 2019

EPFL Lausanne, Schweiz,
04.–06.09.2019

35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)

Marseille, Frankreich,
09.–13.09.2019

f-cell 2019

Stuttgart, 10.–11.09.2019

25th SolarPaces 2019

Daegu, Südkorea,
01.–04.10.2019

Building Simulation Conference 2019

Rom, Italien
02.–04.10.2019

5th International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems, IMPRES2019

Kanazawa, Japan,
20.–23.10.2019

Advanced Building Skins

28.–29.10.2019, Bern,
Schweiz

Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH) 2019

Chicago, USA,
28.10.–2.11.2019