



Fraunhofer-Institut für Solare
Energiesysteme ISE

Forschen für die Energiewende

Jahresbericht 2024/25

Das Titelbild zeigt die Detailansicht des weltweit ersten Mittelspannungs-Stringwechselrichter für PV-Großkraftwerke (Rückansicht). Der Stringwechselrichter, den wir am Fraunhofer ISE entwickelt haben, weist eine deutliche höhere Ausgangsspannung als bisherige Wechselrichter auf. Die höhere Spannung bedingt einen kleineren Strom, sodass die Durchmesser von Stromkabeln reduziert werden können und gleichzeitig wertvolle Ressourcen geschont werden.

Da der geplante Ausbau der Photovoltaik neue Infrastrukturen wie neu verlegte Kabel und neue Transformatoren erfordert, lassen sich mit dem Mittelspannungs-Stringwechselrichter große Mengen an Rohstoffen einsparen, etwa Kupfer und Aluminium.

Vorwort

Wir leben in unruhigen Zeiten. Täglich erreichen uns Nachrichten über Kriege, Wirtschaftskrisen und weitreichende politische Veränderungen. Dadurch treten der Klimawandel und die Notwendigkeit zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen in der öffentlichen Diskussion vielfach in den Hintergrund. Ein möglichst schnelles Erreichen klimapolitischer Ziele ist jedoch unverändert dringend erforderlich, um drastische Veränderungen der Lebensbedingungen auf der Erde zu verhindern. Für uns am Fraunhofer ISE bedeutet das mehr denn je, zum Voranbringen einer sicheren und stabilen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien beizutragen und unsere Wirtschaft bei der Entwicklung der dazu notwendigen Technologien zu unterstützen. Die Ausrichtung auf angewandte Forschung und unsere Nähe zur Industrie sind dabei unsere Stärken.

Generell musste sich die Energieforschung in Deutschland im vergangenen Jahr auf eine substantielle Reduktion der Fördermittel einstellen, was sich auf Forschungseinrichtungen und Industrie auswirkte. Als eines der führenden Institute in der Energieforschung waren wir von diesen Kürzungen auch massiv betroffen. Trotz sinkender öffentlicher Fördermittel werden wir weiterhin alles daransetzen, Lösungen für offene Fragen zur Transformation des Energiesystems zu entwickeln. Daher freut es uns umso mehr, dass wir im vergangenen Jahr zwei neue Forschungszentren eröffnen konnten. Anfang des Jahres haben wir die Eröffnung des Technologie-Evaluationszentrums »[Module-TEC](#)« gefeiert. Hier können wir für unsere Industriepartner PV-Module in Kleinserien fertigen und bewerten. Und im Oktober konnten wir das neue »[Zentrum für elektrische Energiespeicher](#)« mit einem feierlichen Festakt einweihen. In den modernen Labors forschen wir zur Nachhaltigkeit, Sicherheit und Performance von Batteriespeichern.

Positiv stimmt uns, dass die Photovoltaik immer breiter zum Einsatz kommt, sei es als Agri-PV-Anlagen beim Obst- und Gemüseanbau, als schwimmende Module auf Gewässern oder zur Renaturierung von Mooren. Die Technologien der »[Integrierten Photovoltaik](#)« erschließen ein enormes zusätzliches Flächenpotenzial. Im Zuge der Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes stand im vergangenen Jahr die Wärmepumpe im medialen Fokus. Die politischen Diskussionen um die Wärmepumpe haben die Verbraucher verunsichert. Mit unseren Forschungsarbeiten möchten wir Industrie und Handwerk unterstützen, verloren gegangenes Vertrauen durch Darstellung der Fakten zurückzugewinnen. Gleichzeitig tragen wir durch unsere breite Forschung, insbesondere im Bereich natürlicher Kältemittel und



digitaler Lösungsansätze, zur Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie bei. Mit Stolz haben wir im Sommer das zehnjährige Jubiläum der »[Energy-Charts](#)« gefeiert. Was 2014 als Foliensatz begann, ist inzwischen eine breit genutzte Webseite zu Energiedaten in Deutschland, die pro Jahr rund 100 Millionen Aufrufe verzeichnet.

Besonders gefreut haben wir uns wieder über die zahlreichen Preise und Auszeichnungen, die Forscherinnen und Forscher des Instituts für ihre Arbeiten erhalten haben. Der Erfolg wäre nicht möglich ohne das ungebrochene Engagement und die Leistungen unserer Mitarbeitenden, denen dafür unser großer Dank gebührt. Namentlich möchten wir Dr. Thomas Kroyer, Dr. Oliver Höhn und Andreas Wessels nennen, die für die Entwicklung der MorphoColor®-Beschichtungstechnologie mit dem [Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2024](#) ausgezeichnet wurden.

Dr. Elias Frei ist seit Oktober 2024 neuer Leiter des Bereichs »Wasserstofftechnologien«. Dr. Frei war zuvor bei der BASF tätig, und wir freuen uns sehr, dass wir ihn für unser Institut gewinnen konnten. Seit Dezember vergangenen Jahres forscht Dr. Jasna Jankovic als Gastwissenschaftlerin bei uns am Institut. Die Professorin von der University of Connecticut wurde von der Alexander von Humboldt-Stiftung mit dem Fraunhofer-Bessel-Forschungspreis ausgezeichnet und wird bei uns an Ex-situ-Charakterisierungsmethoden für innovative Brennstoffzellen- und Elektrolyseur-Materialien forschen – eine Ehre und Bereicherung für unser Institut.

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

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Hans-Martin Henning".

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Andreas Bett".

Prof. Dr. Andreas Bett

Inhalt

Daten und Zahlen

Organisationsstruktur	4
Profil	5
Kuratorium	6
Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft	7
Das Institut in Zahlen	8
Unsere Highlights 2024	10
Partner der Industrie	12
Kooperationen	13
Preise und Auszeichnungen	14
Promotionen 2024	15

Strategie und Geschäftsfelder

Verlässliche Leitplanken und Vertrauen in die Transformation des Energiesystems	18
Mittelspannung – ressourceneffizient vernetzt	20
Geschäftsfelder	
Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module	22
Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer	24
Solarkraftwerke und Integrierte Photovoltaik	26
Leistungselektronik und Stromnetze	28
Elektrische Energiespeicher	30
Klimaneutrale Wärme und Gebäude	32
Wasserstofftechnologien	34
Systemintegration	36
Forschung und Entwicklung – Infrastruktur	38
Technologie-Evaluationszentrum »Module-TEC« eröffnet	40
Zentrum für elektrische Energiespeicher eingeweiht	41
Akkreditierte Labors	42

Highlights unserer Forschung

Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module

III-V-Photovoltaik – Vom Weltraum auf die Erde	48
Perowskit-Silizium-Tandemphotovoltaik: Von der Zellentwicklung bis zum zertifizierten Modul	49
Skalierung von Technologien für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen	50
Perowskit-Perowskit-Tandemsolarzellen mit höheren Wirkungsgraden entwickeln	51

Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer

Herstellung von TOPCon-Solarzellen und -Modulen mit M10-Wafern.	52
Solarzellenherstellung: Minimale Strukturbreiten erhöhen den Wirkungsgrad und senken die Materialkosten	53
Ortsaufgelöste, quantitative Inline-Analyse von dünnen funktionalen Schichten auf Basis von Multispektral-Bildern	54
Perspektiven des PV-Recyclings in Deutschland	55

Solkraftwerke und Integrierte Photovoltaik

Outdoor Performance Lab – PV-Module unter realen Bedingungen testen und bewerten	56
Den Markthochlauf der Agri-PV in Deutschland begleiten und unterstützen	57

Leistungselektronik und Stromnetze

Wallbox-Inspektion: Prüfverfahren für solares und netzdienliches Laden von Elektrofahrzeugen.	58
Auf dem Weg zur Klimaneutralität: Die Rolle netzbildender Wechselrichter im zukünftigen Stromnetz.	59

Elektrische Energiespeicher

Natrium-Ionen-Batterien für die Energiewende	60
NRGISE.ONE – eine Produktsuite für die integrierte Planung und Steuerung von Energiespeichern	61

Klimaneutrale Wärme und Gebäude

Entwicklung von PCM-Emulsionen als Wärmeträgerfluide mit hoher Wärmekapazität	62
Industrieprozesse dekarbonisieren: Konzepte für Wärmerückgewinnung und den Einsatz von Wärmepumpen.	63
Lernprüfstand für Hochtemperatur-Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel	64
Digitalisierung für das Heizungsgewerk: Handwerk bei der Umsetzung der Wärmewende unterstützen	65
Gebäude-Wärmepumpen mit Propan – Geräteentwicklungen für den Austausch von Gas- und Ölheizungen	66
Lösungen zur Transformation von Wärmenetzen	67

Wasserstofftechnologien

Optimierung der katalytischen Wasserstofferzeugung aus Ammoniak mit Biomassematerialien	68
Machbarkeitsanalyse zum Import von grünem Ammoniak aus Australien über Rotterdam nach Deutschland.	69
Die Herstellung katalysatorbeschichteter Membranen für die PEM-Wasser-Elektrolyse effizienter gestalten	70
Lokales Betriebsverhalten in automotiven Brennstoffzellen.	71

Systemintegration

EnStadt:Pfaff – ein klimaneutrales Quartier entsteht	72
Wärmepumpen für die Prozessindustrie: Technologieverständnis und Matchmaking	73
Transformation und Investitionen auf Bundeslandebene modellieren und analysieren	74

Veranstaltungen 2025 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE	75
--	-----------

Impressum	76
----------------------------	-----------

Bildnachweise	76
--------------------------------	-----------

Organisationsstruktur

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

In der Außendarstellung operieren wir in acht marktorientierten Geschäftsfeldern:

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

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

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

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

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



Institutsleitung

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

+49 761 4588-5134

Prof. Dr. Andreas Bett

+49 761 4588-5257



Verwaltungsdirektion

Saskia Vormfelde

+49 761 4588-5917



Bereichsleitung Photovoltaik

Prof. Dr. Stefan Glunz

+49 761 4588-5191

PD Dr. Ralf Preu

+49 761 4588-5260



Bereichsleitung Strom

Dr. Harry Wirth

+49 761 4588-5858

Bereichsleitung Wärme und Gebäude

Prof. Dr. Peter Schossig

+49 761 4588-5130



Bereichsleitung Wasserstofftechnologien

Dr. Elias Frei

+49 761 4588-5195

Programmlinie Übergreifende Systemintegration

Prof. Dr. Christof Wittwer

+49 761 4588-5115

Profil

Zielsetzung

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg ist das größte Solarforschungsinstitut Europas. Unsere mehr als 1400 Mitarbeitenden setzen sich für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf Basis erneuerbarer Energien ein. Dazu tragen wir mit unseren Forschungsschwerpunkten Energiebereitstellung, Energieverteilung, Energiespeicherung und Energienutzung bei. Durch herausragende Forschungsergebnisse, erfolgreiche Industrieprojekte, Firmenausgründungen und globale Kooperationen gestalten wir die nachhaltige Transformation des Energiesystems. Das Institut ist nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2015 zertifiziert.

Forschungsansatz

Unser Anspruch ist, konkret umsetzbare technische Lösungen zu entwickeln, die wir unseren Industriepartnern zur Verfügung stellen oder mit ihnen gemeinsam erarbeiten. Damit tragen wir dem Fraunhofer-Prinzip der angewandten Forschung Rechnung und leisten zugleich einen wichtigen Beitrag zur deutschen und europäischen Standortsicherung und Wettbewerbsfähigkeit. Der Erfolg angewandter Forschung erfordert zugleich einen Transfer unseres Know-hows in Politik und Gesellschaft. Daher beziehen wir den Austausch mit relevanten Stakeholdern in unsere FuE-Arbeiten mit ein und haben acht marktorientierte Geschäftsfelder (Seite 22 ff.) etabliert. Unser Forschungsansatz reicht von der Materialforschung über die Entwicklung von Komponenten bis hin zur Systemintegration. Da insbesondere systemische Fragen im Zuge der Energiewende immer relevanter werden, ist unsere Organisationsstruktur so ausgerichtet, dass wir interdisziplinär und vernetzt forschen können.

Der Erfolg unserer Forschung zeigt sich auch anhand der inzwischen 19 Unternehmen, die aus dem Institut heraus gegründet wurden und die neu entwickelte, vielversprechende Technologien vermarkten.

Leistungen

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 22 300 m² Laborfläche – darunter 900 m² Reinraumfläche – sowie hochmoderne Geräte und Anlagen bilden die Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Unsere hochmoderne FuE-Infrastruktur auf höchstem technischen Niveau umfasst acht Forschungs- und Entwicklungszentren sowie drei produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren (Seiten 42 ff.). Darüber hinaus bietet das Institut in seinen nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierten Labors Prüf- und Zertifizierungsleistungen an. Damit sind wir in der Lage, als zuverlässiger Partner zu agieren und FuE-Projekte auf den unterschiedlichen Stufen im Lebenszyklus von Technologien umzusetzen – je nach Auftrag, Bedarf oder Reifegrad.

Unsere Leistungen umfassen:

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



Hauptgebäude des Fraunhofer ISE mit Sonnenterrasse der Kantine.

Kuratorium

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



Mitglieder des Kuratoriums und Gäste trafen sich im Juli 2024 zur Kuratoriumssitzung im Solar Info Center in Freiburg.

Vorsitzender

Burkhard Holder
VDE Group, Alzenau

Mitglieder

Pia von Ardenne
VON ARDENNE Holding SE & Co. KGaA,
Dresden

Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer
Drees & Sommer SE, Stuttgart

Dr. Gunter Erfurt
Meyer Burger AG

Timo Haase
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin

Ministerialdirigentin Sibylle Hepting-Hug
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr.-Ing. Joachim P. Kloock
Ingenieur für Physikalische Technik/Biomedizinische Technik

Prof. Dr. Wolfram Münch
EnBW Energie Baden-Württemberg AG,
Karlsruhe

Prof. Dr. Peter Schäfer
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr.-Ing. Norbert Schiedeck
Vaillant Group, Remscheid

Peter Schneidewind
RENA Technologies GmbH, Gütenbach

Dr. Liudmila Simon
E.ON Group Innovation, Essen

Prof. Dr. Frithjof Staib
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Stuttgart

Dr.-Ing. Ingrid Vogler
GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e. V., Berlin

Prof. Dr. Anke Weidenkaff
Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS, Alzenau

Prof. Dr. Anke Weidlich
Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

(Stand: 12.07.2024)

Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft

Das Fraunhofer ISE bringt sein breites Spektrum an Kompetenzen in unterschiedliche Verbände und Allianzen der Fraunhofer-Gesellschaft ein. Dies stärkt die Bearbeitung systemischer Fragestellungen und dient dem Wissenstransfer.

Verbände und strategische Forschungsfelder

Die Fraunhofer-Institute arbeiten in kompetenzorientierten Verbänden zusammen. Das Fraunhofer ISE ist gemeinsam mit drei weiteren Instituten Mitglied im Fraunhofer-Verbund Energietechnologien und Klimaschutz. Prof. Dr. Hans-Martin Henning ist Vorsitzender dieses Verbunds. Zudem ist das Fraunhofer ISE Gastmitglied im Fraunhofer-Verbund »Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS«.

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

Die Fraunhofer-Allianz Energie präsentierte sich vom 20. bis 22. Februar 2024 auf der Messe E-world in Essen mit einem Gemeinschaftsstand zu Smart Energy.

Leitmarktorientierte Fraunhofer-Allianzen

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

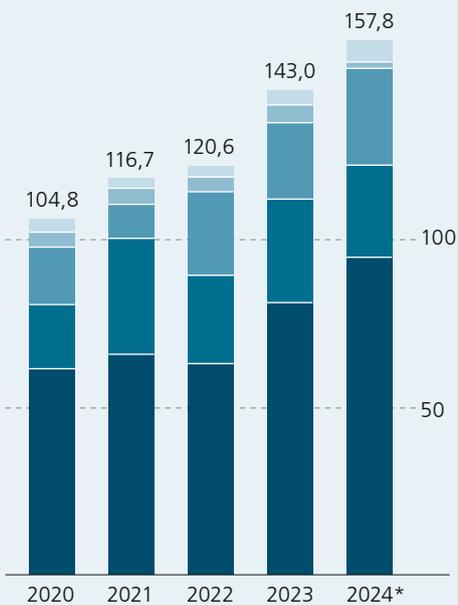
Das Fraunhofer ISE ist eines von 20 Mitgliedsinstituten der Fraunhofer-Allianz Energie und seit deren Gründung im Jahr 2003 Sitz der Geschäftsstelle. Die Fraunhofer-Allianz Energie organisiert den gemeinschaftlichen Marktzugang ihrer Mitgliedsinstitute und bedient die Bedarfe des Leitmarkts Energiewirtschaft. Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett und Prof. Dr. Christian Doetsch, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, vertreten seit Juli 2024 als Sprecher die Ziele der Allianz nach außen. Sie lösen damit Prof. Dr. Hans-Martin Henning ab, der das Amt des Sprechers seit dem Jahr 2016 innehatte.

Zur weiteren Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft zählen die Mitgliedschaften in den Fraunhofer-Allianzen »Bau«, »Batterien«, »SysWasser« sowie »Aviation & Space«. Zudem ist das Fraunhofer ISE im Fraunhofer Cluster of Excellence »Integrierte Energiesysteme CINES« sowie den Fraunhofer-Netzwerken »Nachhaltigkeit« und »Wasserstoff« aktiv.



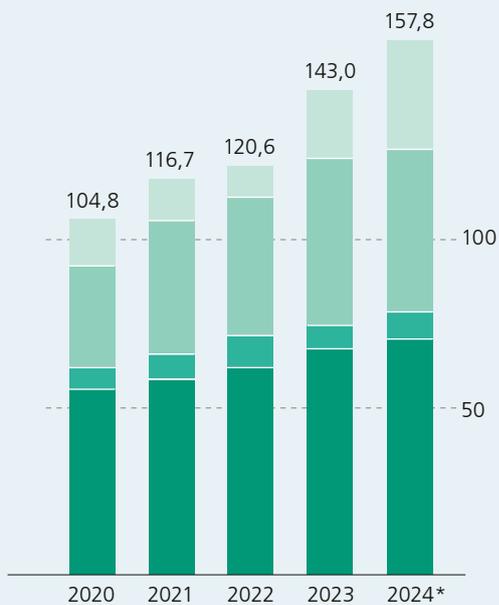
Das Institut in Zahlen

Entwicklung der Erträge in Mio €



- EU
- Sonstige
- Grundfinanzierung/FhG-Sonderprogramme
- Industrie
- Bund, Land BaWü/NRW

Entwicklung der Ausgaben in Mio €



- Invest
- Sachausgaben
- Bachelorand*innen, Masterand*innen, Praktikant*innen, Wissenschaftliche Hilfskräfte, Werkverträge
- Personal TVöD

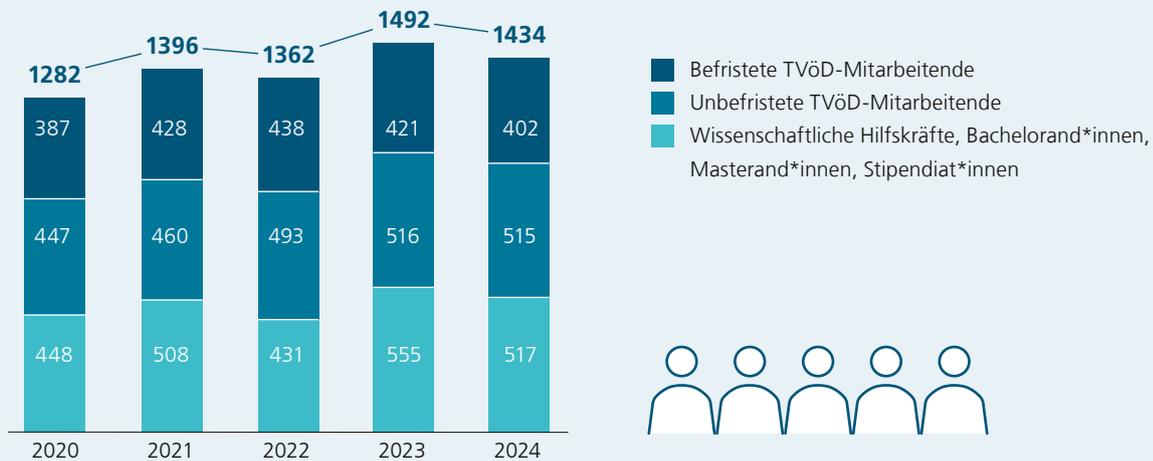
*vorläufig



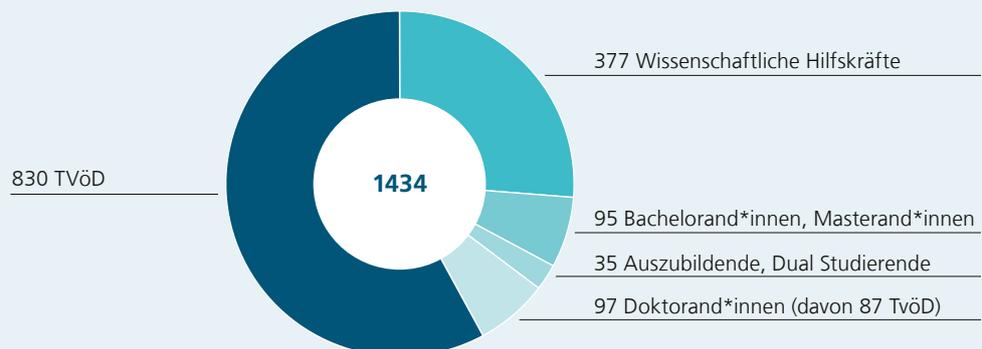
Patente



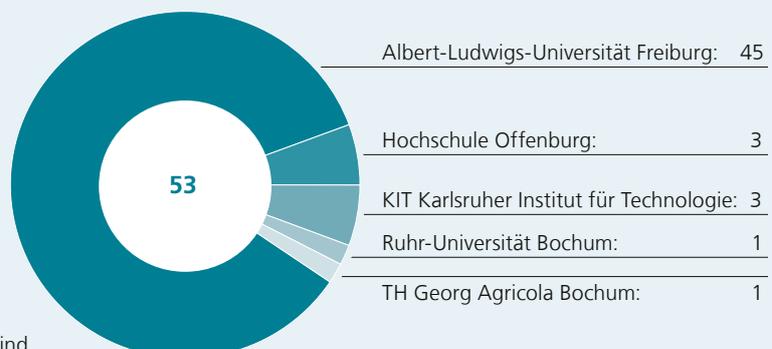
Entwicklung der Mitarbeitendenzahlen



Personalstruktur



Lehrveranstaltungen



37 Wissenschaftler*innen des Fraunhofer ISE sind neben ihrer Forschungsarbeit auch in der Lehre tätig.

Unsere Highlights 2024



Bundeskanzler Olaf Scholz zu Besuch

Olaf Scholz besuchte am 27. Februar das Fraunhofer ISE. Er informierte sich über neue Technologien für energieeffiziente Gebäude und intelligente Ladeinfrastruktur.

Februar

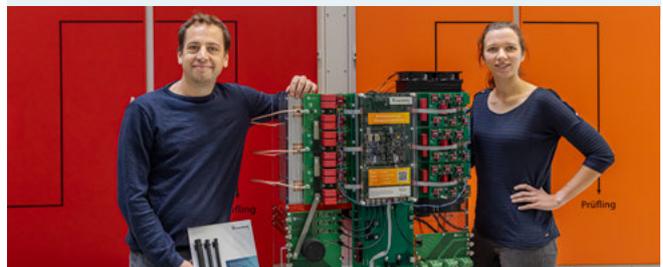
Mai

Juni

Zukunftspreis für

Mittelspannungs-Stringwechselrichter

Das Fraunhofer ISE hat den 2. Platz beim Zukunftspreis der Privaten Stiftung Ewald Marquardt für Wissenschaft und Technik, Kunst und Kultur belegt. Wir haben den Preis für die Entwicklung des weltweit ersten Mittelspannungs-Stringwechselrichters für die Photovoltaik erhalten. Langfristig setzen wir auf das Thema Mittelspannung, um das Energiesystem ressourceneffizient zu gestalten (S. 20).



Eröffnung »Module-TEC«

Das Fraunhofer ISE eröffnete im Februar das auf über 1 000 Quadratmeter neu aufgestellte Technologie-Evaluationszentrum »Module-TEC«. In der Entwicklungs- und Fertigungsumgebung für PV-Module werden Prototypen bis hin zu Kleinserien gefertigt und getestet (S. 40).



Joseph-von-Fraunhofer-Preis

Dr. Thomas Kroyer, Dr. Oliver Höhn und Andreas Wessels sind mit dem Joseph-von-Fraunhofer-Preis ausgezeichnet worden. Die Forscher erhielten den Preis für die Entwicklung der MorphoColor®-Beschichtungstechnologie.

ise.link/fraunhofer-preis

Mit Propan-Wärmepumpen den CO₂-Ausstoß von Industrieanlagen reduzieren

Gemeinsam mit Partnern haben wir eine Wärmepumpe mit Propan-Kältekreis für die Industrie entwickelt. Die Anwendung in einer Reinigungsmaschine führte zu erheblichen Einsparungen an Strom und CO₂ und zeigt beispielhaft, wie die Transformation der Industrie vorangetrieben werden kann.

ise.link/waermepumpe-industrie

Hans-Martin Henning im Beirat des 8. Energieforschungsprogramms

Prof. Dr. Hans-Martin Henning wurde von Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz Robert Habeck in den Beirat des 8. Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums berufen.



»Energy-Charts« feiern 10-jähriges Jubiläum

Fakten statt Fake News: Vor zehn Jahren stellten wir die Datenplattform »Energy-Charts« online, um die Diskussion zur Energiewende zu versachlichen. Die Webseite bietet heute interaktive Daten rund um die deutsche Stromerzeugung, Emissionen und Preise sowie Stromerzeugungs- und Börsendaten für 42 europäische Länder.
www.energy-charts.info



Studie »Klimaneutrales Energiesystem« veröffentlicht

Die neue Studie zeigt Wege auf, wie auf der Ebene der Bundesländer die Transformation des Energiesystems hin zur Klimaneutralität im Jahr 2045 technologisch aussehen könnte.

ise.link/klimaneutrales-energiesystem

Juli

November

Dezember



Einweihung Zentrum für elektrische Energiespeicher

Wir forschen seit Jahren entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Batterien. Mit unserem neuen »Zentrum für elektrische Energiespeicher« stehen uns nun modernste Labors für Spitzenforschung zur Verfügung. Im Mittelpunkt der Forschung steht die Verbesserung von Nachhaltigkeit, Sicherheit und Performance von Batteriespeichern (S. 41).

Erfolgreiche Promotionen

15 Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler haben im Jahr 2024 ein Promotionsvorhaben am Fraunhofer ISE erfolgreich abgeschlossen (S. 15). Wir wollen die Ausbildung von Promovierenden weiter fördern und die Attraktivität für Promotionsvorhaben steigern.



Partner der Industrie

Welche Lösungen und Technologien sind erforderlich, um die Energiewende umzusetzen? Wie können Innovation, Nachhaltigkeit, Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Wirtschaft gesteigert werden? Als erfahrener Sparringspartner der Wirtschaft unterstützt das Fraunhofer ISE seine Partner dabei, Innovationen rund um erneuerbare Energietechnologien erfolgreich auf den Markt zu bringen und klimaneutrale Industrieprozesse voranzutreiben.

Wir folgen dem Fraunhofer-Modell der angewandten Forschung und bieten ein umfassendes FuE-Leistungsangebot in acht marktorientierten Geschäftsfeldern an. Eine partnerschaftliche Zusammenarbeit mit unseren Industriepartnern ist zentral für uns. Wir nehmen uns Zeit für den Austausch in Meetings oder Webinaren, laden unsere Partner zu Workshops ans Institut ein oder besuchen unsere Industriekunden an ihrem Standort.

Im Bereich Photovoltaik unterstützen wir Unternehmen, die ihre Produktionskapazitäten aufbauen möchten, beispielsweise durch die passende Technologieauswahl, und helfen bei der Prozessentwicklung sowie bei Produktdesign, Fabriklayout und Fabrikhochlauf. Darüber hinaus begleiten wir Industriekunden bei der Transformation, indem wir z. B. Lösungen für einen klimafreundlichen Betrieb industrieller Liegenschaften anbieten.



Reallabore – Innovationen in der Praxis erproben

Zusammen mit der Vattenfall Wärme Berlin AG, der EnBW und mehreren Stadtwerken erproben wir an fünf Standorten die Anbindung von Großwärmepumpen an Fernwärmenetze. Die Ergebnisse des Reallabor »[Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen](#)« sollen die Konzeption von Wärmepumpensystemen für die Anwendung in kommunalen Wärmenetzen unterstützen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) fördert das Verbundprojekt bis 2026.



Zurzeit forschen wir in über 1 200 Projekten für Industrie und öffentliche Hand an zukunftsweisenden Technologien. Darüber hinaus sind wir in zahlreichen Gremien in Politik, Industrie und Verbänden vertreten und beteiligen uns an der Regulierung und Standardisierung neuer Verfahren, um die Planungssicherheit und Qualitätssicherung zu steigern.

Wir führen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Industrie und öffentliche Hand aus. Darüber hinaus unterstützen wir eine erfolgreiche Markteinführung.

Kooperationen

Wissenschaftliche Exzellenz lebt vom fachlichen Austausch. Das Fraunhofer ISE ist sowohl national als auch international in ein aktives Forschungsnetzwerk eingebunden.



universität freiburg



Kooperationen mit Hochschulen

Ein starker Fokus des Fraunhofer ISE liegt auf der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Derzeit sind 37 Mitarbeitende in der Lehre tätig; am Institut arbeiten ca. 230 Bachelor-, Master- und Promotionsstudierende. Zudem engagiert sich das Fraunhofer ISE in zahlreichen Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen in Deutschland und weltweit.

Besonders intensiv ist die Zusammenarbeit mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Eine enge Kooperation besteht mit dem Physikalischen Institut und dem [Institut für Nachhaltige Technische Systeme \(INATECH\)](#) der Technischen Fakultät, dessen Schwerpunkte nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz sind. Das INATECH basiert auf einer engen Partnerschaft zwischen der Universität Freiburg sowie den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten. Dieses Fundament macht das INATECH einzigartig in der Forschungslandschaft und ermöglicht es, die gesamte Bandbreite von der Grundlagenforschung bis hin zur industriellen Anwendung abzudecken. Ergänzt wird diese Kooperation durch das »[Leistungszentrum Nachhaltigkeit](#)«, das die Vernetzung mit Unternehmen, Verbänden und weiteren Akteuren aus der Region im Themenfeld Nachhaltigkeit fördert.

Auch bei vielen anderen zentralen Institutionen und Aktivitäten der Universität Freiburg bringt sich das Fraunhofer ISE ein. So tragen wir mit unserer Expertise im Bereich der Photovoltaik zum laufenden Exzellenzcluster »livMatS« bei. Seit mehr als zwei Jahrzehnten besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem Freiburger Materialforschungszentrum (FMF), in dem beispielsweise Aktivitäten zur Organischen Photovoltaik und Batterieforschung angesiedelt sind. Ebenso besteht traditionell eine enge Kooperation mit den Fakultäten für Umwelt und Natürliche Ressourcen sowie für Chemie.

Zu den von der Universität Freiburg mit Unterstützung des Fraunhofer ISE auf den Weg gebrachten Studiengängen zählen der Bachelor- und Masterstudiengang »Sustainable Systems Engineering« sowie der Masterstudiengang »Solar Energy Engineering«.

Memoranda of Understanding

Zudem hat das Fraunhofer ISE im Jahr 2024 weltweit 7 Memoranda of Understanding mit Unternehmen, Organisationen und Forschungseinrichtungen abgeschlossen. Auf nationaler wie internationaler Ebene ist das Institut in Forschungs- und Branchenverbänden gut vernetzt.

Forschen für die Zukunft: Das Fraunhofer ISE engagiert sich auch in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses.



Preise und Auszeichnungen

Fraunhofer ISE

- BestChance Award 2024, Fraunhofer-Gesellschaft
- Deutscher Nachhaltigkeitspreis, Nominierung in der Kategorie Forschung und Wissenschaft
- ESG Transparency Award, EUPD Research

Cornelius Armbruster, Florian Bierwirth, Samuel Hohler

Pfiffikus Gründerideenpreis 2024, EDENenergy, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Stephan Armbruster

Innovationspreis, Bachelorarbeit »Ex-situ Visualisierung und Analyse der Zweiphasenströmung in PEM-Wasserelektrolyse-Zellen«, Deutscher Wasserstoff-Verband (DWV)

Oussama Er-Raji

Student Award »Tailoring Perovskite Crystallization and Interfacial Passivation in Efficient Fully-Textured Perovskite Silicon Tandem Solar Cell«, EU PVSEC 2024

Michael Geiss, David Derix, Andreas Hensel, Jürgen Thoma, Dirk Kranzer

Zukunftspreis, 2. Platz, Entwicklung Mittelspannungs-Stringwechselrichter, Private Stiftung Ewald Marquardt

Dr. Sebastian Gölz

TOMMI Award, »Little Impacts«, Büro für Kindermedien FEIBEL.DE

Dr. Oliver Höhn, Dr. Thomas Kroyer, Andreas Wessels

Josef-von-Fraunhofer-Preis 2024, MorphoColor®-Beschichtungstechnologie, Fraunhofer-Gesellschaft

Dr. Robin Lang

Best Oral Presentation Award, 35. International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Japan

Dr. Alexander Morgenstern, Norbert Pfanner

IEA SHC 2024 Solar Award, Shortlist, Projekt »SolCoolDry«

Anna Rothenhäusler

Gerda Ruf Preis, Masterarbeit »Control of Battery Systems with Reinforcement Learning«, Fritz Hüttinger Stiftung

Dr. Torsten Rößler

SiliconPV Award 2024, »Industrial Scale Perovskite Silicon Tandem Module with 24.4 % Module Efficiency«

Christian Schmiga

Poster Award, »Optimizing Mechanical and Electrical Properties of Ni/Cu/Ag-Plated Contacts on i-TOPCon Solar Cells«, EU PVSEC 2024

Dr. Patrick Schygulla

Dr. Fritz Ruf-Preis, Doktorarbeit »III-V-Semiconductor Subcell Absorbers in Silicon-Based Triple-Junction Solar Cells«, Fritz Hüttinger Stiftung

Jeannette Wapler, Huang Mu, Sebastian Helmling

EHPA DecarBuilding Award, Projekt »HAPPENING«, European Heat Pump Association

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

Anahí Romero Arellano

»Development and Optimization of a Slot-die Coating Process to Produce Anode Catalyst Layers for PEM Water Electrolysis«

Vera Büttner

»Untersuchung der Ammoniakadsorption unter PtX-Synthesebedingungen«

Alain Cerny

»Prelithiated Silicon as Anode Material for All-Solid-State-Batteries«

Anna Damm

»Vergleich der Hydrogenisierungs-Eigenschaften für passivierende Kontakte mit n- und p-dotiertem polykristallinem Silizium«

Tom Hoger

»Effects of Structural Changes in Metal Meshes on the Flow of Shear-Thinning Fluids Using CFD Simulation«

Jenny Norberg

»Folienbasierte Nanoimprintlithographie für photonische Strukturen in der Photovoltaik«

Promotionen 2024

Saed Al-Hajjawi

»Inline and Offline Characterization of Epitaxial Wafers for Industrial Application«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Rodrigo Delgado Andrés

»Organic Solar Cells in Photo-Electrochemical Storage Devices«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Christian Diestel

»Photosupercapacitors – Development & Advanced Characterisation«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Malte Gierse

»Development of a Power to Liquids Process for the Production of Dimethyl Ether by Dehydration of Methanol in a Reactive Distillation Column«

Karlsruher Institut für Technologie

Sina Herceg

»Assessment of the Ecological Lifetime of Photovoltaic Systems Considering Aging Effects, End-of-Life and Early Replacement«

Technische Universität Darmstadt

Leonie Jakob

»Through-mask Electrochemical Machining for Conductor Track Manufacturing: Fundamental Insights and Practical Implications«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Özde Şeyma Kabaklı

»Optimization of the Perovskite Top Solar Cell in Monolithic 2-Terminal Perovskite Silicon Tandem Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Stephan Maus

»Untersuchung und Modellierung der Ladungsträgerrekombination durch Sauerstoffpräzipitatbildung in Cz-Si während Hochtemperaturprozessen in photovoltaischer Anwendung«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

David Müller

»Fabrication, Optimization and Characterization of ITO-Free Organic Solar Cells and Modules for Indoor Applications«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Tabea Obergfell

»Evaluation der Langzeitfunktionalität von paraffinbasierten Phasenwechselmaterialien in Gebäudeanwendungen«

Karlsruher Institut für Technologie

Jan Paschen

»Neue Konzepte zur Solarzellenverschaltung mittels Laserfügen von dünnen Aluminiumfolien«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Sebastian Praß

»CO and H₂S in H₂: Contamination, Recovery and Mitigation Strategies in PEMFCs with Ultra-low Pt Loaded Anode Electrodes«

Universität Stuttgart

Matti Sprengeler

»Prescriptive Urban Analytics – The Case of Electric Vehicle Charging Infrastructure«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Raphael Vollmer

»Sanierungspfade zur Einbindung von Wärmepumpen-Heizsystemen in Mehrfamilien-Bestandsgebäude«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Andreas Wessels

»Spektral selektive photonische Strukturen für die farbige Gestaltung von integrierten Photovoltaiksystemen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Strategie und Geschäftsfelder





Unser Anspruch: exzellente Forschung für unsere Wirtschaftspartner zur Umsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung.«

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

Verlässliche Leitplanken und Vertrauen in die Transformation des Energiesystems

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

Die Umsetzung der Energiewende hat in den letzten Jahren deutlich an Fahrt aufgenommen. Wirkt sich dies positiv auf das Fraunhofer ISE aus?

Henning: »Es ist richtig, dass der Zubau, insbesondere bei der Photovoltaik, enorm zugenommen hat. Die Firmen, die den Ausbau umsetzen, sind allerdings eher nicht die Kunden des Fraunhofer ISE. Die herstellende Industrie, die mit uns Forschung und Entwicklung betreibt, hat derzeit in Deutschland eher Mühe. Das gilt für PV-Hersteller, aber auch für andere Branchen, etwa bei Batterien, wo sich die Hoffnungen der europäischen Unternehmen sehr eingetrübt haben. Auch die Heizungsbranche hat zu kämpfen, weil der Wärmepumpenhochlauf nicht so stattfindet wie geplant. Es ist natürlich positiv, dass wir schon so viel erneuerbare Energien im System haben, dennoch stehen wir vor allem in den Verbrauchssektoren – also Gebäude, Verkehr und Industrie – eher noch am Anfang. Die vor uns liegende Transformation ist eine große Aufgabe und sie erfordert erhebliche Investitionen. Deshalb braucht es das Vertrauen von Gesellschaft und Politik, dass Investitionen in den Strukturwandel zur Erreichung von Klimazielen notwendig sind, aber auch helfen, wirtschaftlich unsere Zukunft zu sichern.«

Die Zurückhaltung der Politik zeigte sich auch in der Kürzung der Forschungsförderung im Energiebereich um 30 Prozent. Welche Auswirkungen hatte und hat das auf das Institut?

Bett: »Besonders die Kürzung der Mittel aus dem Klima- und Transformationsfonds hat sich stark ausgewirkt, nicht nur auf das Fraunhofer ISE, sondern für die Branche insgesamt. Bei uns und bei unseren Kunden konnten in der Folge weniger FuE-Projekte umgesetzt werden. Aufgrund der Bundestagswahl Anfang 2025 wird es zudem Verzögerungen geben, bis wieder ein belastbarer Haushalt und eine Forschungsförderstrategie steht. Somit werden weitere geplante Forschungsprojekte nicht genehmigt werden können. Insofern erleben wir gerade – und sicher auch noch 2025 – finanziell schwierige Zeiten. Das hat für das ISE zur Folge, dass wir stärker konsolidieren und fokussieren. Wir prüfen genau, in welchen Bereichen der Markt für uns nicht mehr ausreichend vorhanden ist und welche Themen wir nicht mehr weiterführen werden. Aber auch bei Themen,

von denen wir überzeugt sind, dass die Forschungs- und Entwicklungsfragen für den Erfolg der Energiewende hoch relevant sind, müssen wir Anpassungen vornehmen und können geplante Vertragsverlängerungen bei unseren Mitarbeitenden vermehrt nicht mehr vornehmen.«

Auch viele deutsche und europäische Hersteller sind in einer schwierigen Lage und investieren weniger in FuE. Woran liegt das in der aktuellen Transformationsphase?

Henning: »Einen großen Anteil daran haben die schwierigen Bedingungen für die Wirtschaft generell: die Energiepreise, die Bürokratie, der Fachkräftemangel in unterschiedlicher Form. Die Kosten für den erforderlichen Netzausbau tragen maßgeblich zu hohen Stromkosten bei. Bei diesen Infrastrukturkosten sollten andere Lösungen gefunden werden, wie das auch beim Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur geschieht. Gerade in der Photovoltaik und Batterietechnik macht es die internationale Konkurrenzsituation den deutschen Herstellern schwer. Ein Problem ist aber auch die Verunsicherung im politischen Raum: Bleibt es bei den CO₂-Reduktionszielen und der vorgesehenen Umsetzungsgeschwindigkeit? Wichtig ist hier vor allen Dingen Verlässlichkeit, damit Unternehmen Investitionen in die Zukunft tätigen.«

Bett: »Im Rahmen des Green New Deal ermöglicht es die Europäische Union, einen Fokus auf wirtschaftliche Resilienz zu setzen. Es ist eine Realität, dass in China und anderen asiatischen Staaten viele Komponenten kostengünstiger produziert werden können. Wir müssen Lösungen finden, um eine gewisse technologische Souveränität und Unabhängigkeit in Europa zu gewährleisten. Bei den Green-Tech-Technologien geht es auch um die zukünftigen wirtschaftlichen Chancen. Unser Institut sieht bei verschiedenen Technologien riesige Potenziale und wir wollen der Industrie mit verbesserten Prozessen zu geringeren Kosten helfen, industrielle Produktion in Europa umzusetzen.«

Es gibt kaum noch PV-Herstellung in Deutschland. Warum hat das Institut trotzdem 2024 das neue »Module-TEC« eingeweiht?

Bett: »Die Integrierte Photovoltaik, die wir seit vielen Jahren am Institut voranbringen, zeigt uns, dass es nicht nur auf die

Massenproduktion von günstigen Silizium-Standardmodulen ankommt, sondern dass eine Vielfalt von Modultypen für Spezialanwendungen im zweistelligen Gigawatt-Bereich gebraucht werden. Das ist ein Markt, den europäische Hersteller sehr gut bedienen können. Darüber hinaus arbeiten wir im »Module-TEC« an Produktionsverfahren für neue Technologien wie Tandem-Solarzellen, die bereits in den Markt drängen.«

Wie kann das neu eröffnete Zentrum für elektrische Energiespeicher die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Batterieproduktion steigern?

Henning: »Der Ausbau besonders auch der stationären Speicherinfrastruktur ist enorm wichtig für die Transformation des Energiesystems. Gleichzeitig besteht bei Batterien noch ein großer Forschungs- und Entwicklungsspielraum – von der Optimierung auf Material- und Zellebene, über die Verbesserung der Produktionsprozesse bis hin zur besseren Steuerung der Systeme in mobilen und stationären Anwendungen. Mit dem Zentrum für elektrische Energiespeicher haben wir eine gute Basis geschaffen, um hier beizutragen. Auch in den letzten Jahren haben wir in der Batterietechnologie wichtige Meilensteine erzielt, beispielsweise bei der Anodentechnik oder beim Einsatz von nachhaltigeren Batteriematerialien wie Natrium oder Zink. Insofern sind wir sehr zuversichtlich, deutsche und europäische Unternehmen unterstützen zu können, wettbewerbsfähige Produkte auf den Markt zu bringen.«

Das Fraunhofer ISE hat das Leitthema »Mittelspannung« gestartet. Warum ist das ein strategisches Thema für das Institut?

Bett: »Unser Energiesystem wird künftig immer stärker auf Strom basieren. Der dafür erforderliche Ausbau der Netzinfrastruktur benötigt große Mengen an elektrischen Leitungen und Komponenten und damit enorm viele Rohstoffe wie Kupfer und Aluminium. Bei der Energiewende ist uns das Verständnis einer »umfassenden Nachhaltigkeit« wichtig; das heißt unter anderem, dass wir die Ressourceneffizienz beachten. Daher sehen wir in der Anwendung von Mittelspannung z. B. in den Komponenten in PV-Kraftwerken und der Verbindungstechnik zwischen den Modulen bis hin zum Einspeisepunkt große Chancen. Durch die höhere Spannung sinken die Widerstandsverluste und damit ist weniger Material erforderlich. Dies spart Kosten und Ressourcen. Daher kooperieren wir mit der Industrie, um Mittelspannungskomponenten und -leitungen zum Durchbruch zu verhelfen.«

Als Speichermedium und für die Transformation von Industrieprozessen wird Wasserstoff eine große Rolle spielen. Die Politik hat erste Weichen für die Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland gestellt. Wo steht das ISE?

Henning: »Es stimmt, zukünftig werden große Mengen an Wasserstoff in verschiedenen Bereichen gebraucht und importiert werden. Am Fraunhofer ISE forschen wir unter anderem daran, Wasserstoff in höherwertige Moleküle zu synthetisieren,



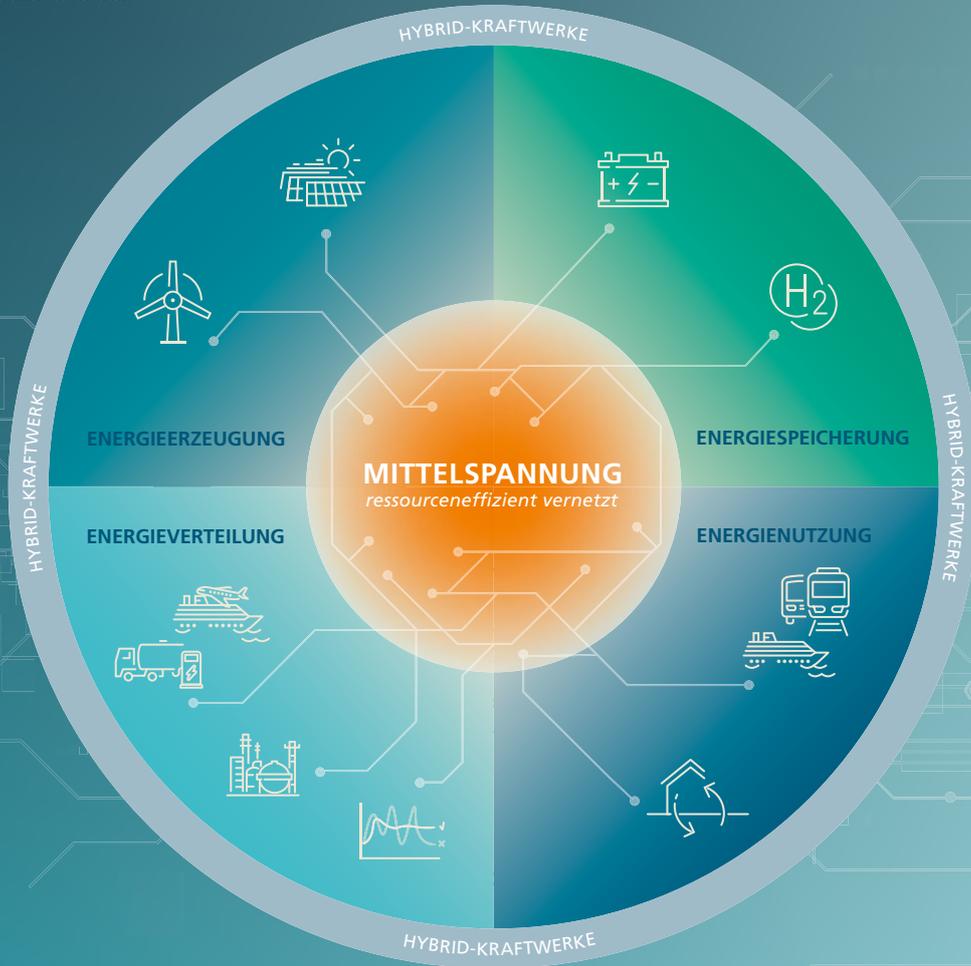
Die Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning (links) und Prof. Dr. Andreas Bett (rechts).

um den kostengünstigen und effizienten Transport zu ermöglichen. Auf der anderen Seite entwickeln wir Technologien weiter, um grünen Wasserstoff kostengünstig herzustellen und in Brennstoffzellen einzusetzen. Ganz konkret planen wir, nächstes Jahr neue Anlagen zur Entwicklung der Produktionstechnik für die Membranelektroden-Einheit in Brennstoffzellen zum Einsatz zu bringen. Damit wollen wir die Produktionskosten für die Wandler – in Brennstoffzellen und in Elektrolyseuren – deutlich senken, indem sie industriell großskalig hergestellt werden. Es sind die Anlagenkosten, die künftig den Preis für grünen Wasserstoff bestimmen werden. Hier wollen wir unseren Beitrag leisten.«

Welche anderen Themen sind für Sie 2025 relevant?

Henning: »Ein wichtiges Thema werden weiterhin Wärmepumpen sein und unsere Forschung zu Propan als klimafreundlichem Kältemittel. Hier geht es darum, diese Technologie nun in die breite Anwendung zu bringen, beispielsweise durch den Ersatz von Gasetagenheizungen durch Wärmepumpen.«

Bett: »Nächstes Jahr erwarten wir den Start einer Labor-Fertigungslinie für Perowskit-Silizium-Tandemzellen auf industrieller Wafergröße, um diese Technologie mit hohen Wirkungsgraden noch stärker in den Markt zu bringen. Wir investieren kontinuierlich weiter in den Ausbau unserer Infrastruktur zu den zentralen FuE-Fragestellungen, denn wir sind überzeugt, dass unsere Kompetenzen an vielen Stellen gebraucht werden, um die Transformation unseres Energiesystems erfolgreich umzusetzen.«



Mittelspannung – ressourceneffizient vernetzt



Für den Umbau des Energiesystems sind große Rohstoffmengen nötig. So sind etwa Kupfer und Aluminium für die Leitungen nötig, mit denen erneuerbare Erzeuger ans Stromnetz angebunden werden. Einen vielversprechenden Weg, den Rohstoffbedarf in diesem Bereich zu senken, zeigt das Fraunhofer ISE auf: Die Produktion, Übertragung und Nutzung erneuerbaren Stroms könnte statt wie bisher in der Niederspannungsebene zukünftig verstärkt auf der Mittelspannungsebene erfolgen. Insbesondere bei Photovoltaik-Großkraftwerken sehen wir ein enormes Einsparpotenzial durch höhere Systemspannungen. Daher planen wir bereits Pilotkraftwerke und streben gemeinsam mit der Industrie eine breite Markteinführung an. Um die Bedeutung des Themas zu unterstreichen, legen wir einen Forschungsschwerpunkt in den kommenden Jahren auf »[Mittelspannung](#)«.

Bis 2050 wird allein der geplante weltweite Zubau von über 70 Terawatt installierter Photovoltaik-Leistung eine starke Nachfrage nach Rohstoffen mit sich bringen. Laut »[Global Critical Minerals Outlook 2024](#)« der Internationalen Energie-Agentur wird ab 2025 der Kupferbedarf das angekündigte Angebot übersteigen. Mit einer Erhöhung der Systemspannung lässt sich hier gegensteuern, denn durch das damit verbundene Absinken der Ströme können erhebliche Rohstoffeinsparungen erzielt werden: Eine Erhöhung der Ausgangsspannung von 800V_{AC} auf 1500V_{AC} führt bei gleicher Leistung zu einer Einsparung beim Kabelquerschnitt um ca. 75 %. Zudem lassen sich Kabel mit kleinerem Umfang einfacher verlegen und anschließen, wodurch die Installationskosten sinken.

Insgesamt wird Strom aus erneuerbaren Energiequellen immer günstiger: Dank technologischem Fortschritt und Skaleneffekten sind die PV-Modulkosten seit 2010 um 90 Prozent gesunken; nun bieten Installation und Balance-of-System-Komponenten die größten Einsparungspotenziale. Durch den Schritt

aus der Nieder- in die Mittelspannung kann auch die Leistung der Subsysteme wesentlich erhöht werden: Bei einer Spannung von 1 500V sind bereits 10 bis 12 MVA statt der heute üblichen 3 bis 5 MVA in einem Transformator möglich. Bei gleicher Kraftwerksgröße werden dadurch weniger Transformatoren und Schaltanlagen benötigt, sodass die spezifischen Bau- und Installationskosten abnehmen.

Technologische Weichen sind gestellt

Der Schritt in die Mittelspannung wurde erst durch die Entwicklung hochsperrender Siliziumkarbid (SiC)-Bauelemente mit hohen Schaltgeschwindigkeiten möglich gemacht. Aktuell sind SiC-Bauteile bis zu 3,3 kV marktverfügbar. Basierend auf diesen Bauelementen hat das Fraunhofer ISE im Projekt »MS-LeiKra« den weltweit ersten Mittelspannungs-PV-Stringwechselrichter entwickelt und erfolgreich am Netz in Betrieb genommen. Der zweistufig aufgebaute Wechselrichter hat eine Ausgangsspannung von 1 500 V_{AC} bei einer Leistung von 250 kVA. Damit konnten wir demonstrieren, dass technologisch die Weichen für den Weg in die Mittelspannung gestellt sind. Da das Interesse aus der Industrie an dieser Technologie sehr groß ist, sind wir am Fraunhofer ISE von der Relevanz des Themas überzeugt. Jetzt gilt es zu klären, wer die ersten Akteure in diesem vielversprechenden Markt sein werden.

Hemmnisse gemeinsam überwinden

Im Rahmen eines Workshops rund um das Thema Mittelspannungs-PV haben wir bereits ein europäisches Konsortium gegründet. Vertreter aller an einem PV-Großkraftwerk beteiligten Gewerke tauschen sich hier aus, um die für den Sprung in die Mittelspannung nötigen technologischen und normativen Voraussetzungen gemeinsam voranzubringen. Mit diesem Konsortium, das für weitere Interessenten offensteht,

gehen wir die bestehenden Hürden gemeinsam an. Unser Ziel ist es, die europäischen Hersteller bei diesem wichtigen technologischen Schritt zu vernetzen und mit aktueller Forschung zu unterstützen. So können europäische Hersteller hier eine Führungsrolle übernehmen und den Markt nicht nur für PV-Module, sondern für die komplette PV-Systemtechnik sichern. Um die Machbarkeit auch im Feld zu demonstrieren, strebt das Konsortium den Bau von Pilotkraftwerken auf Basis des am Fraunhofer ISE entwickelten Mittelspannungs-PV-Stringwechselrichters an.

Auch im Bereich der Normung wird intensiv an dem Thema gearbeitet. So liegen für Teilkomponenten bereits erste Normentwürfe bis 3 kV vor und es findet ein Austausch der verschiedenen Gremien statt. Auch auf internationaler Ebene setzen wir uns für eine Mittelspannungsnorm zur Integration erneuerbarer Energien ein.

PV-Großkraftwerke in der Mittelspannung zu betreiben, sehen wir nur als ersten Schritt an – auch Ladeinfrastruktur, Industriernetze, Großwärmepumpen, Batteriespeicher, Elektrolyseure oder Windkraftanlagen sind interessante Anwendungsgebiete für die niedrige Mittelspannungsebene. Denn höhere Systemspannungen ermöglichen neben erheblichen Material-, Kosten- und Flächeneinsparungen auch völlig neue Systemarchitekturen regenerativer Hybrid-Kraftwerke, deren Einzelbausteine über die Mittelspannung miteinander verknüpft sind. Dank unserer langjährigen Erfahrung und interdisziplinärer Kompetenz bieten wir unseren Kundinnen und Kunden von Forschung und Entwicklung über Charakterisierung und Prüfung von Komponenten und Anlagen bis zur Konzeption von Hybrid-Kraftwerken alle Dienstleistungen aus einer Hand.

Minimale Kabelquerschnitte für 250 kVA bei verschiedenen Spannungen im Vergleich.



Weltweit erster Mittelspannungs-Stringwechselrichter für PV-Großkraftwerke.



Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module

Position im Markt

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

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

 **172** Mitarbeitende

 **57** Zeitschriften- und Buchbeiträge

 **89** Vorträge und Konferenzbeiträge

 **4** Patent-Erstanmeldungen

Leitung

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

Themen

Siliziummaterial und Halbleitersubstrate

Dr. Charlotte Weiss, +49 761 4588-5591

Siliziumsolarzellen und -module

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

Siliziumbasierte Tandemsolarzellen und -module

Dr. Martin Hermle, +49 761 4588-5265

Perowskit-Dünnschichtphotovoltaik

Dr. Markus Kohlstädt, +49 761 203-96796

Organische Photovoltaik

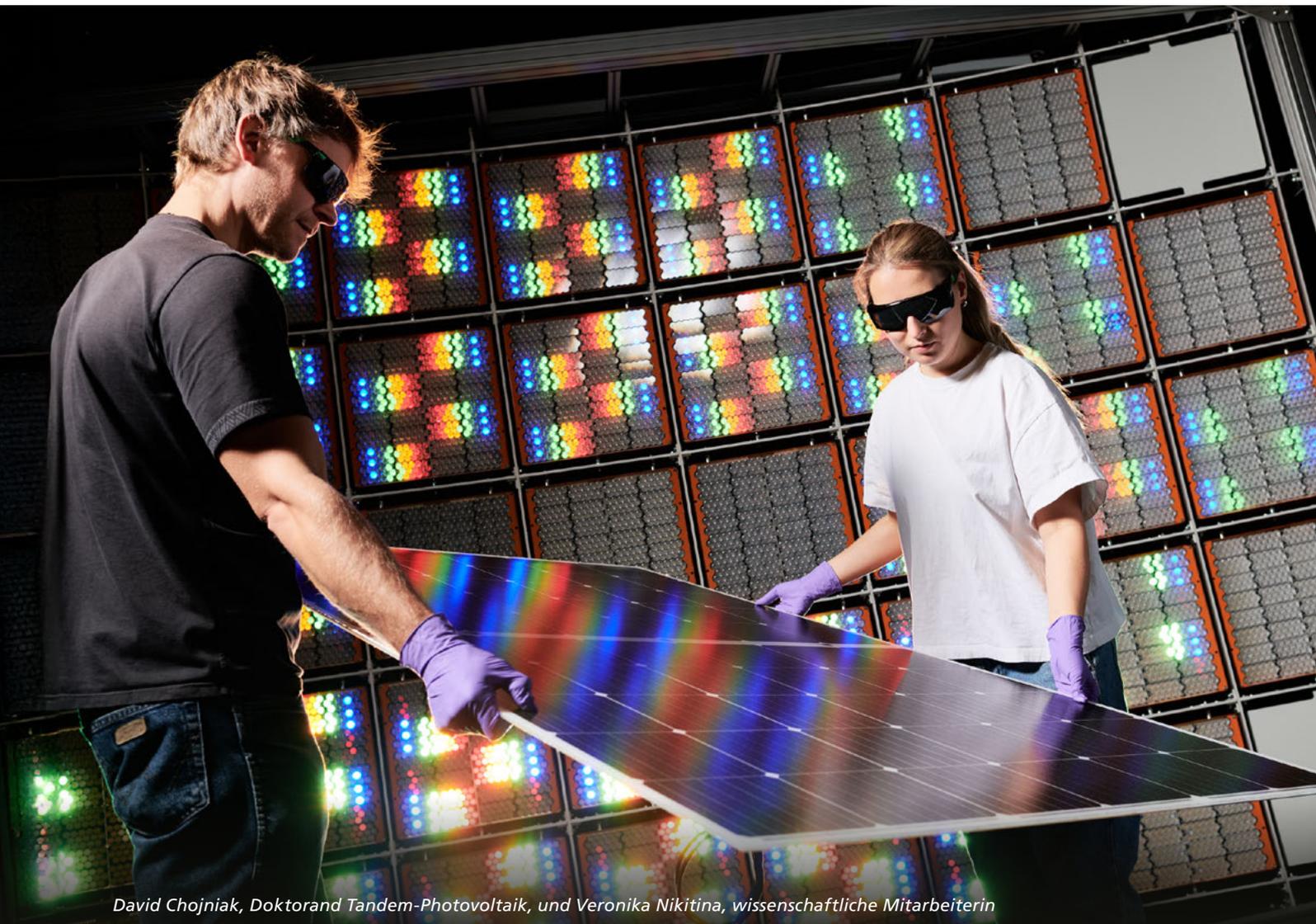
Dr. Uli Würfel, +49 761 203-4796

III-V-Solarzellen, Module und konzentrierende Photovoltaik

Dr. Frank Dimroth, +49 761 4588-5258

Photonische und leistungselektronische Bauelemente

Dr. Henning Helmers, +49 761 4588-5094



David Chojniak, Doktorand Tandem-Photovoltaik, und Veronika Nikitina, wissenschaftliche Mitarbeiterin



Wir entwickeln innovative Konzepte und Materialien für effizientere, stabilere und günstigere Solarzellen und -module.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer

Position im Markt

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

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

 **214** Mitarbeitende

 **14** Zeitschriften- und Buchbeiträge

 **49** Vorträge und Konferenzbeiträge

 **5** Patent-Erstanmeldungen

Leitung

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

Themen

Materialtechnologien

Dr. Charlotte Weiss, +49 761 4588-5591

Metrologie und Simulationsmethoden

Dr. Martin Schubert, +49 761 4588-5660

Beschichtungstechnologien und Hochtemperaturprozesse

Dr. Marc Hofmann, +49 761 4588-5051

Nass- und trockenchemische Verfahren

Dr. Martin Zimmer, +49 761 4588-5479

Laser- und Drucktechnologien

Dr. Jan Nekarda, +49 761 4588-5563

Verbindungs- und Einkapselungstechnologien

Dr. Holger Neuhaus, +49 761 4588-2579

Künstliche Intelligenz und Datenmanagement

Dr. Stefan Rein, +49 761 4588-5271

Technologiebewertung und -transfer

Dr. Jochen Rentsch, +49 761 4588-5199



René Haberstroh, Ingenieur



Unsere Technologien machen PV-Module nachhaltiger – durch Materialeinsparung, Effizienz- und Produktivitätssteigerung.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Solkraftwerke und Integrierte Photovoltaik

Position im Markt

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

Entlang der Phasen des ISE-Qualitätszirkels – Development, Engineering, Procurement, Commissioning and Operation – gewährleisten wir eine umfassende Qualitätssicherung. Unter Einbeziehung von Standort- und Klimafaktoren untersuchen wir mit unseren Simulationstools das Potenzial und die Machbarkeit neuer Technologien. Darüber hinaus charakterisiert unser Team die Leistung neuer Modultechnologien und prüft deren Zuverlässigkeit in Labor und Feld. Unsere Forschung deckt auch solarthermische Kraftwerke und deren Kombination mit Photovoltaik und Power-to-X-Technologien ab.

 **150** Mitarbeitende

 **28** Zeitschriften- und Buchbeiträge

 **48** Vorträge und Konferenzbeiträge

Leitung

Dr. Anna Heimsath, +49 761 4588-5944

Themen

Modulanalyse und Zuverlässigkeit

Daniel Philipp, +49 761 4588-5414

Photovoltaische Kraftwerke

Dr. Anna Heimsath, +49 761 4588-5944

Integrierte Photovoltaik

Dr. Harry Wirth, +49 761 4588-5858

Solarthermische Kraftwerke

Dr. Gregor Bern, +49 761 4588-5906

Solare Energiemeteorologie

Dr. Elke Lorenz, +49 761 4588-5015





Maddalena Bruno, Doktorandin in der Abteilung Photovoltaische Kraftwerke



**Effiziente Flächennutzung:
Unsere integrierten PV-Technologien bringen mehr
Solarenergie in Stadt und Land.«**

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen
und Themen des Geschäftsfelds:



Leistungselektronik und Stromnetze

Position im Markt

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

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



86 Mitarbeitende



4 Zeitschriften- und Buchbeiträge



19 Vorträge und Konferenzbeiträge

Leitung

Christian Schöner, +49 761 4588-2078

Themen

Stromrichter

Stefan Reichert, +49 761 4588-5476

Hochleistungselektronik und Systemtechnik

Andreas Hensel, +49 761 4588-5842

Digitaler Netzanschluss

Marco Mittelsdorf, +49 761 4588-5446

Netzplanung und Netzbetrieb

Dr. Bernhard Wille-Haußmann, +49 761 4588-5443

Stromrichterbasierte Netze und Systemstabilität

Roland Singer, +49 761 4588-5948





Henrike Köhler, Doktorandin in der Abteilung Leistungselektronik und Netze



Leistungselektronik und die Digitalisierung der Stromnetze sind Schlüsseltechnologien für eine sichere Energieversorgung.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Elektrische Energiespeicher

Position im Markt

Die Energie- und Verkehrswende erfordert sichere, nachhaltige und leistungsfähige Batteriespeicher und der Bedarf an entsprechenden Technologien steigt exponentiell. Skalierungseffekte und neue Technologien, an deren Entwicklung wir intensiv arbeiten, tragen dazu bei, die Kosten weiter schnell zu senken. Digitalisierung und der Einsatz künstlicher Intelligenz in den Bereichen Entwicklung, Produktion, Nutzungsphase und End of Life (EOL) spielen dabei eine zentrale Rolle.

Die im Rahmen des Batteriepasses definierten Anforderungen, wie die Transparenz hinsichtlich Zustand und Restlebensdauer von Batterien, geben Anlass zur Weiterentwicklung und Akzeptanz von Speichertechnologien. Wir unterstützen unsere Partner durch unsere Entwicklungen dabei, die entsprechenden Regularien einhalten zu können.

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

 **96** Mitarbeitende

 **18** Zeitschriften- und Buchbeiträge

 **18** Vorträge und Konferenzbeiträge

 **2** Patent-Erstanmeldungen

Leitung

Dr. Daniel Biro, +49 761 4588-5246

Themen

Batteriematerialien und -zellen

Dr. Lea Eisele, +49 761 4588-2585

Batteriesystemtechnik

Dr. Nina Kevlishvili, +49 761 4588-2042

Produktionstechnologie für Batterien

Marc Kissling, +49 761 4588-2838

Batterieintegration und -betriebsführung

Nils Reiners, +49 761 4588-5281

Technologiebewertung für Batterien

Manuel Bergmann, +49 761 4588-2818

Digitalisierung in Batterieforschung und -produktion

Dr. Moritz Kroll, +49 761 4588-2554





Nikolaus Lang, Laborleiter Batterie-Abuse-Bereich



Für die Energie- und Verkehrswende verbessern wir elektrische Energiespeicher und deren Integration auf allen Ebenen.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Klimaneutrale Wärme und Gebäude

Position im Markt

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

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

 **221** Mitarbeitende

 **30** Zeitschriften- und Buchbeiträge

 **46** Vorträge und Konferenzbeiträge

 **4** Patent-Erstanmeldungen

Leitung

Sebastian Herkel, +49 761 4588-5117

Themen

Gebäudesystemtechnik

Dr. Peter Engelmann, +49 761 4588-5129

Betriebsführung von Gebäuden, Liegenschaften, Industrie

Nicolas Réhault, +49 761 4588-5352

Gebäudehülle

Dr. Bruno Bueno, +49 761 4588-5377

Wärmepumpen

Dr. Marek Miara, +49 761 4588-5529

Wärme- und Kältespeicher

Dr. Sebastian Gamisch, +49 761 4588-5468

Lüftung, Klima, Kälte

Dr. Lena Schnabel, +49 761 4588-5412

Wasseraufbereitung und Stofftrennung

Dr. Joachim Koschikowski, +49 761 4588-5294

Solarthermie: Anlagen und Komponenten

Dr. Korbinian Kramer, +49 761 4588-5139





Timo Methler, Teamleiter Gebäudewärmepumpen



Wir unterstützen die Industrie bei der Wärmewende – durch intensive Forschung an integrierten Prozessen und Technologien.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Wasserstofftechnologien

Position im Markt

Grüner Wasserstoff und darauf basierende Derivate wie Methanol, Ammoniak und Dimethylether (DME) können fossile Energieträger in vielfältigen Anwendungen ersetzen: als Energieträger, Reduktionsmittel und Basischemikalien in der Stahl-, Düngemittel-, Zement- oder Chemieindustrie. Auch als Kraftstoff in der Mobilitätsbranche, als Brennstoff für Kraftwerke und für Hochtemperaturanwendungen besitzen grüne Wasserstofftechnologien großes Potenzial.

Mit unserer Expertise unterstützen wir Industrie- und Forschungspartner bei der Entwicklung effizienter Technologien über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Dabei liegt unsere Kernkompetenz in der Entwicklung, Produktion und Charakterisierung katalytisch wirksamer Komponenten – sei es der Reaktor zur Herstellung von Wasserstoffderivaten oder die Membranelektrodeninheit in Membran-Elektrolyseuren bzw. -Brennstoffzellen. Zusätzlich führen wir Lebenszyklus- und techno-ökonomische Analysen durch, mit denen wir die Nachhaltigkeit und Kosten für die Produktion, Speicherung und bedarfsgerechte globale und lokale Verteilung von Wasserstoff und dessen Derivaten ermitteln und bewerten.

 **152** Mitarbeitende

 **23** Zeitschriften- und Buchbeiträge

 **26** Vorträge und Konferenzbeiträge

 **4** Patent-Erstanmeldungen

Leitung

Dr. Elias Frei, +49 761 4588-5195

Themen

Brennstoffzelle

Ulf Groos, +49 761 4588-5202

Elektrolyse und Wasserstoffinfrastruktur

Dr. Tom Smolinka, +49 761 4588-5212

Nachhaltige Syntheseprodukte

Dr. Achim Schaadt, +49 761 4588-5428

Robert Szolak, +49 761 4588-5319





Emma Verkama, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Thomas Cholewa, Doktorand Power-to-X-Technologien



Wir entwickeln Wasserstofftechnologien, die die Speicherung von und den weltweiten Handel mit erneuerbaren Energien möglich machen.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Systemintegration

Position im Markt

Für den Wandel zu einem klimaneutralen Energiesystem ist die Systemintegration zentral. Viele Komponenten für die Bereitstellung emissionsfreier Energie sind heute wettbewerbsfähig, doch ihre Integration in ein sektorenübergreifendes Energiesystem bleibt aufgrund langsamen Netzausbaus, stockender Digitalisierung und regulatorischer Anpassungen eine große Herausforderung. Die Sektoren Wärme, Strom und Mobilität werden zukünftig immer stärker ineinandergreifen müssen. Dies betrifft dezentrale Energiesysteme, die zur Flexibilisierung von Verbrauch, Erzeugung und Speicherung beitragen, ebenso wie den Ausbau von Strom-, Wärme- und Gasnetzen.

Eine intelligente Systemintegration erfordert die Einhaltung vieler Zielkriterien, darunter Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit. Für die klimaneutrale Industrieproduktion erschließt sie große Potenziale zur Flexibilisierung, wenn beispielsweise rückspeisefähige E-Fahrzeuge Produktionsspitzen aus der lokalen PV-Anlage glätten sowie teure Lastspitzen im Netz reduzieren. Die vorausschauende Betriebsführung bei der Speicherung erneuerbarer Energien bietet durch die Kopplung von Strom- und Wärmesektor ein hohes Nutzungspotenzial, weil günstige thermische Speicher genutzt werden können. Auch die Verwendung von Wasserstoff durch Elektrolyse stellt einen wichtigen Ansatz dar. Wir erforschen und entwickeln entsprechende Gesamtlösungen mit unseren Industriepartnern für die Energiewende direkt vor Ort und erproben sie gemeinsam in Reallaboren.



60 Mitarbeitende



19 Zeitschriften- und Buchbeiträge



36 Vorträge und Konferenzbeiträge

Leitung

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

Themen

Energiesystemanalyse

Dr. Christoph Kost, +49 761 4588-5750

Integrierte Energieinfrastrukturen: Strom, Fernwärme, Gas

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

Energiedaten und Monitoring

Nicolas Réhault, +49 761 4588-5352

Flexibilitätsmanagement von Energieanlagen

Arne Surmann, +49 761 4588-2225

Energiekonzepte für die Industrie

Dr. Thomas Fluri, +49 761 4588-5994

Klimaneutrale Städte, Quartiere, Vor-Ort-Systeme

Dr. Annette Steingrube, +49 761 4588-5062

Elektromobilität

Dr. Robert Kohrs, +49 761 4588-5708

Reallabore

Gerhard Stryi-Hipp, +49 761 4588-5686





Jan Körber, Masterand



Eine intelligente Systemintegration ist für die Energieversorgung aus erneuerbaren Energien essenziell.«

Mehr Informationen über Projekte, Publikationen und Themen des Geschäftsfelds:



Forschung und Entwicklung – Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 22 300 m² Laborfläche – darunter 900 m² Reinraumfläche – sowie hochmoderne Geräte und Anlagen bilden die Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Unser Ziel ist es, zukunftsweisende technologische Lösungen zu erschließen und diese in Wirtschaft und Gesellschaft zu transferieren. Unsere Partner aus der Industrie profitieren dabei vom Know-how unserer Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen ebenso wie von dem kontinuierlichen Ausbau unserer technischen Infrastruktur. Besonders kleine und mittelständische Unternehmen ohne eigene FuE-Abteilung erhalten durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE Zugang zu einer hochleistungsfähigen Laborinfrastruktur und exzellenten Forschungsleistungen.

In seinen sieben akkreditierten Labors bietet das Institut Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen verschiedene Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügen wir über zwei Kalibrier- und fünf Testeinrichtungen mit modernster Ausstattung und Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) (Seite 40 ff).

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

Forschungsarbeiten im Zentrum für elektrische Energiespeicher.



Laborzentren

- Zentrum für elektrische Energiespeicher
- Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe
- Zentrum für funktionale Oberflächen
- Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- Zentrum für Organische und Perowskit-Photovoltaik
- Zentrum für Outdoor Performance
- Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien



Technologie-Evaluationszentren

- **Con-TEC**
Concentrator Technology Evaluation Center
- **Module-TEC**
Module Technology Evaluation Center
- **PV-TEC®**
Photovoltaic Technology Evaluation Center



Technologie-Evaluationszentrum »Module-TEC« eröffnet

Das Fraunhofer ISE entwickelt und testet seit über 40 Jahren neue Produktideen für die PV-Branche. Im Februar 2024 eröffnete das Institut sein neu aufgestelltes »Module-TEC«. Hier können auf über 1000 Quadratmetern in der PV-Modul-Entwicklungs- und Fertigungsumgebung Prototypen bis hin zu Kleinserien auf Industrieanlagen produziert und getestet werden. Mit dem neuen »Module-TEC« möchte das Institut insbesondere europäische Material-, Modul- und Anlagenhersteller bei der Markteinführung von technologisch exzellenten und nachhaltigen PV-Produkten unterstützen.

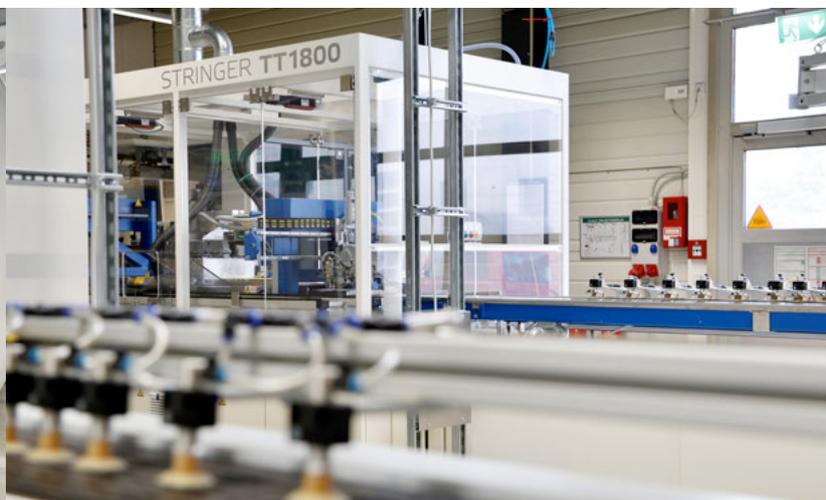
Kurze Innovationszyklen und neue Anwendungsfelder erfordern schnelle Designänderungen von Photovoltaikmodulen. Um in diesem dynamisch wachsenden und volatilen Markt erfolgreich zu sein, ist es notwendig, stets den aktuellen Stand der Technologie abzubilden, effizient zu testen und Innovationen in neuen Produkten zügig umzusetzen. Dank einer jahrelangen Zusammenarbeit mit führenden Equipment- und Materialherstellern aus der gesamten PV-Wertschöpfungskette verfügen wir am Fraunhofer ISE über ein breites Wissens- und Erfahrungsspektrum. Im »Module-TEC« können wir auf Industrieanlagen zur Zellverschaltung, mit Laminatoren und der großen Auswahl an Materialien und Solarzelltechnologien neue PV-Modultechnologien entwickeln. Darüber hinaus bietet die Infrastruktur Tools zur Analyse und Auswertung.

Hohe Flexibilität

Zusammen mit dem »TestLab PV Modules« sind wir mit dem »Module-TEC« in der Lage, unterschiedlichste Modulgrößen und Designs umzusetzen. Dabei kann jedes Modul individuell gestaltet werden. Unser interdisziplinäres Team begleitet Aufträge von der virtuellen Analyse über die gemeinsame Designentwicklung, den Bau von Prototypen und Kleinserien bis zur Bewertung der Langzeitstabilität. Durch eine große Auswahl an Verbindungstechnologien und Modulmaterialien (Solarzellen, Gläser, Einkapselungsmaterialien, Rückseitenfolien, Verbinder, etc.) sind unterschiedliche Aufbauten in kurzer Zeit realisierbar. Effiziente interne Abläufe mit akkreditierten Testlaboren erlauben es uns, die Entwicklung neuer Module und deren Zertifizierung parallel durchzuführen.

Das neue »Module-TEC« – hier ein Bild von der Eröffnungsfeier – unterstützt Hersteller bei der Entwicklung von PV-Modulen bis zur Marktreife. Der Autoklav im Vordergrund ermöglicht eine 3D-Laminierung von gebogenen PV-Modulen.

Das Bild rechts zeigt einen von mehreren Stringern, mit denen alle gängigen Zellformate verschaltet werden können.



Zentrum für elektrische Energiespeicher eingeweiht

Batterien sind ein zentraler Baustein für das Gelingen der Energiewende – sei es für die Elektrifizierung des Verkehrs oder die Stabilisierung des Stromnetzes. Das Fraunhofer ISE forscht seit Jahren entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Batterien. Mit seinem neuen »Zentrum für elektrische Energiespeicher«, das im Oktober 2024 eingeweiht wurde, stehen ihm nun Labors für internationale Spitzenforschung zur Verfügung. Wir wollen damit die Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandorts Deutschland stärken und der Energiewende zum Erfolg verhelfen.

Im Fokus: Nachhaltigkeit, Sicherheit, Performance

Zusammen mit unseren Industriepartnern treiben wir die Entwicklung nachhaltiger, sicherer und leistungsstarker Energiespeicher voran. Auf etwa 3 700 m² Laborfläche bieten wir im neuen Forschungszentrum modernste Fertigungs- und Charakterisierungsanlagen für alle Wertschöpfungsstufen von Batterien an. Neben der in den Laboren vorhandenen Anlagentechnik verfügen unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über umfassende Kompetenzen im Bereich Simulation, Technologiebewertung und Datenmanagement. Unsere Leistungen werden in unterschiedlichen Labors erbracht.

Lab Battery Materials and Cell Production

Für Industriekunden entwickeln wir Prozesse im Labormaßstab und helfen dabei, diese bis hin zum Pilotmaßstab zu skalieren und weiter zu optimieren. Dabei konzentrieren wir uns auf nachhaltige Prozesse wie Trockenbeschichtungen oder die Entwicklung und den Einsatz von Mini-Environments, um die Produktionskosten von Batteriezellen weiter zu senken.

Lab Characterization and Post-Mortem Analysis

Wir führen umfangreiche Material- und Post-Mortem-Analysen durch. So können wir z. B. die Ursachen von Leistungsproblemen oder Ausfällen identifizieren und die Sicherheit von Batteriezellen signifikant erhöhen. Unsere Ausstattung ermöglicht es uns, von der Öffnung der Zelle bis hin zur Analyse unter inerten Bedingungen zu arbeiten.

Lab Battery Engineering, Production and Testing

Wir beschäftigen uns mit optimierter Zellformierung sowie angepasster elektrischer und thermischer Charakterisierung von Batterien, darüber hinaus mit optimierter Temperierung,



Rund hundert Gäste aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft nahmen an der Einweihung des neuen »Zentrums für elektrische Energiespeicher« teil.

Alterungsmodellierung, Prototypenbau, 2nd-Life-Speichern, innovativen Schnellladetechniken sowie zerstörenden und nicht zerstörenden Sicherheitsuntersuchungen.

Lab Energy Storage Application and Innovation

Dank unserer Laborausstattung können wir speichergestützte Energiesysteme nachbilden und mithilfe von Energiemanagementsystemen steuern. Damit bieten wir unseren Partnern eine optimale Umgebung zur Entwicklung und Qualifizierung von Managementstrategien für Speichersysteme.

Finanziert wurde das Zentrum für elektrische Energiespeicher durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das baden-württembergische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus, die jeweils neun Millionen Euro beigetragen haben. Als »Living-Lab« dient auch das Gebäude selbst der Forschung: Im Projekt »Haid-Power«, das vom Land Baden-Württemberg mit drei Millionen Euro gefördert wurde, erhielt das Zentrum einen modularen Hybrid-Batteriespeicher mit 836 kWh Kapazität, der gemeinsam mit einer 850-Kilowatt-Photovoltaikanlage auf dem Flachdach die Energieversorgung des Gebäudes unterstützt. Unter realen Betriebsbedingungen können so batteriegestützte Lösungen für den gewerblichen und industriellen Einsatz und neue Betriebsstrategien getestet werden.



Teststand zur Charakterisierung von Verdichtern für Kältekreise in Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Akkreditierte Labors

CalLab
PV Cells



Silizium-, Dünnschicht-, Perowskit- und organische Solarzellen

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

Mehrfach- und Konzentratorzellen

Dr. Gerald Siefer, +49 761 4588-5433

cells@callab.de



Kalibrierung von Solarzellen

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

In den letzten Jahren haben wir unsere Messmöglichkeiten weiter ausgebaut und können somit auch Leistungsparameter perowskitbasierter Solarzellen ermitteln. In aktuellen Arbeiten wird die Kalibrierung auf großflächige Mehrfachsolarellen mit mehr als zwei pn-Übergängen ausgeweitet. Dabei bauen wir auf unsere langjährige Erfahrung speziell im Bereich III-V-Tandemsolarzellen auf. Hier stehen vor allem Weltraum-, Konzentrator-, und Laserleistungszellen im Fokus.

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

Kalibrierung von PV-Modulen

Das [CalLab PV Modules](#) ist das einzige akkreditierte Kalibrierlabor für Photovoltaik-Module in Deutschland. Mit dem Spitzenwert von 1,1 % Messunsicherheit für monofaziale PV-Module, bestätigt von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS), kalibrieren wir Referenzmodule und dienen Modulherstellern und Projektentwicklern als eines der wichtigsten Referenzlabors. Ein Meilenstein konnte mit der Senkung der Messunsicherheit für großformatige, bifaziale Module im Herbst 2024 auf 1,4 % erreicht werden. Regelmäßige Messvergleiche, darunter mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), garantieren höchste Zuverlässigkeit und bestätigen eine exzellente Übereinstimmung.

Eine weitere Besonderheit des CalLab PV Modules und zentrales Element zur Validierung der Ergebnisse ist das nachweisbar langjährig stabile Kalibrier-niveau. Dieses erlaubt es uns auch, Langzeittrends bzgl. der wesentlichen Leistungscharakteristika statisch aufzubereiten und zu verfolgen. 2024 haben wir beispielsweise einen signifikanten Trend hin zu negativen Abweichungen zwischen Nominalleistung (Labelwert des Herstellers) und tatsächlich gemessener Leistung festgestellt und konnten den PV-Markt für dieses relevante Thema sensibilisieren.

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

CalLab PV Modules



Martin Kaiser

+49 761 4588-5786

modules@callab.de



TestLab PV Modules



Daniel Philipp

+49 761 4588-5414

tlpv@ise.fraunhofer.de



Qualitätssicherung von PV-Modulen

Das [TestLab PV Modules](#) prüft die Qualität und Zuverlässigkeit von PV-Modulen. In unserem akkreditierten Labor betreiben wir moderne und innovative Anlagen, deren Anwendungsspektrum deutlich über die Standardprüfungen hinausreicht. Wir beraten unsere Kunden zu kosten- und zeiteffizienten Prüfprogrammen und individuellen Qualitätskriterien. Gemeinsam mit unserem Partner VDE bieten wir die Produktzertifizierung nach internationalen Standards an.

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

Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

Im [TestLab Solar Façades](#) charakterisieren wir transparente, transluzente und opake Materialien, prüfen Fassadenkomponenten und bewerten die energetischen, thermischen und optischen Eigenschaften von Fassaden. Herstellern, Gebäudeplanenden, Architektinnen und Bauverantwortlichen stehen wir bei der Optimierung von Gebäudehüllen und bei der Entwicklung von neuen Fassadenkomponenten zur Seite.

Wir verfügen über umfangreiche Erfahrung in folgenden Anwendungsbereichen:

- Glas im Bauwesen
- Sonnenschutzsysteme
- bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV)
- bauwerkintegrierte Solarthermie (BIST)

Für die messtechnische und rechnerische Prüfung von Transmission, Reflexion, g-Wert und U-Wert sind wir nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Darüber hinaus sind wir eine notifizierte Prüfstelle des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Im Bereich Energieeinsparung und Lärminderung prüfen wir Bauprodukte. Dabei haben wir uns auf Glas im Bauwesen spezialisiert.

Das Fraunhofer ISE ist außerdem der europäische Regional Data Aggregator (RDA) für das amerikanische Fenestration Rating Council (NFRC). Deutsche und europäische Hersteller, die ihre Produkte an den nordamerikanischen Markt adressieren möchten, unterstützen wir bei der Prüfung von Bauprodukten. Unsere Prüfungsdienstleistungen bieten sich auch für Bereiche an, die keinen Bezug zu Fassaden haben, z. B. Beton-Pflastersteine (Solar Reflectance Index (SRI)) oder Dämmstoffe (U-Wert).

TestLab Solar Façades



Johannes Hanek

+49 761 4588-5673

testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de



TestLab Solar Thermal Systems



Stefan Mehnert

+49 761 4588-5741

testlab-sts@ise.fraunhofer.de



Prüfung von Kollektoren, Speichern und Systemen

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

Unser Indoor-Solarsimulator liefert beste Wiederholgenauigkeit, was besonders im Entwicklungskontext von Bedeutung ist. Unsere Outdoor-Teststände sind sowohl auf die Prüfung von Großflächenkollektoren als auch auf konzentrierende Kollektoren ausgelegt. Die mechanische Widerstandsfähigkeit von Montagesystemen, PV-Modulen und Solarthermiekollektoren prüfen wir individuell und zusätzlich zu den normativen Testbedingungen je nach Kundenbedarf in Temperaturbereichen von -40°C bis $+60^{\circ}\text{C}$. Mit der In-situ-Charakterisierung können wir auch im Feld Anlagen für unsere Kunden vermessen. Im Rahmen des Zertifikats »Solar Keymark« führen wir außerdem weltweit Werksinspektionen, auch im Remote-Verfahren, durch.

TestLab Heat Pumps and Chillers



Urs Gumbel

+49 761 4588-2071

testlab-hpc@ise.fraunhofer.de



Vermessung und Prüfung von Wärmepumpen und Kältemaschinen

Im nach ISO/IEC 17025:2018 akkreditierten [TestLab Heat Pumps and Chillers](#) entwickeln, vermessen und charakterisieren wir Wärmepumpen und Kältemaschinen sowie deren Komponenten. Das modulare Prüfstandkonzept ermöglicht es, verschiedene Technologien und Systemkonfigurationen unter einer Vielzahl von Betriebsbedingungen mit verschiedenen Wärmeträgermedien (Luft, Wasser, Sole) zu testen. Neben Anlagen mit elektrischem Antrieb können auch thermisch, mit Wärme, Erd- oder Prüfgas, angetriebene Geräte vermessen werden.

Zusätzlich zu den Leistungs- und Effizienzmessungen führen wir auch akustische und schwingungstechnische Messungen durch. Das TestLab ist bei DIN CERTCO, BRE, RI.SE und COCH als Prüflabor für Heat Pump KEYMARK-Messungen gelistet und zudem von der European Heat Pump Association (EHPA) für die Durchführung von EHPA-Gütesiegelprüfungen zugelassen. Wir engagieren uns aktiv für die Weiterentwicklung von Prüfverfahren und -normen innerhalb internationaler Arbeitsgruppen. Neben den Messungen und Prüfungen nach gängigen Normen und Regelwerken bieten wir auch maßgeschneiderte Messungen an, einschließlich Hardware-in-the-Loop-Systemkonfigurationen.

Das Labor verfügt über ein umfassendes Sicherheitskonzept, das die Vermessung von Komponenten und Systemen mit brennbaren Kältemitteln oder Ammoniak ermöglicht. Es können Luft- oder Sole(wasser)-Wasser-Wärmepumpen bis zu einer Wärme- bzw. Kälteleistung von 75 kW bei Lufttemperaturen von -25°C bis 50°C sowie Wasser- bzw. Soletemperaturen von -25°C bis 95°C vermessen werden.

Charakterisierung leistungselektronischer Geräte

Das akkreditierte [TestLab Power Electronics](#) bietet die Prüfung von elektrischen Einheiten und Anlagen im Leistungsbereich bis ca. 10MW an. Dabei können unsere Mitarbeitenden auf die umfangreiche Ausstattung des »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« zurückgreifen. Des Weiteren ermöglicht die Laborausstattung die Prüfung von Umrichtersystemen hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften, die Charakterisierung nach heutigen Netzanschlussrichtlinien sowie die Durchführung von kundenspezifischen Klimatests.

Wir prüfen vor allem PV- und Batteriewechselrichter, aber auch Verbrennungskraftmaschinen wie BHKWs und Lasten, darunter Schnellladesysteme für Elektromobilität. In unserem Labor stehen verschiedene Transformatoren, Prüfeinrichtungen zur Simulation von Netzfehlern (bis 10MVA), Netzsimulatoren (bis 1 MVA), DC-Quellen (je 1 MW), Schutzprüfgeräte sowie eine Schwingkreis-Testeinrichtung für Anti-Islanding-Tests (400kVA) zur Verfügung. Darüber hinaus bieten wir unseren Kunden Vermessungen im Feld, etwa in großen PV-Kraftwerken oder Windparks, an. Hierfür können wir auf sechs Leistungsmesssysteme mit je 16 Messkanälen zurückgreifen, die wir räumlich verteilt anordnen und synchronisieren können. Wir prüfen Erzeugungseinheiten nach internationalen Einspeisrichtlinien (z. B. für Deutschland, China oder Großbritannien) und bestimmen hochgenau den Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte.

TestLab Power Electronics



Steffen Eyhorn

+49 761 4588-5957

testlab-pe@ise.fraunhofer.de



Highlights unserer Forschung



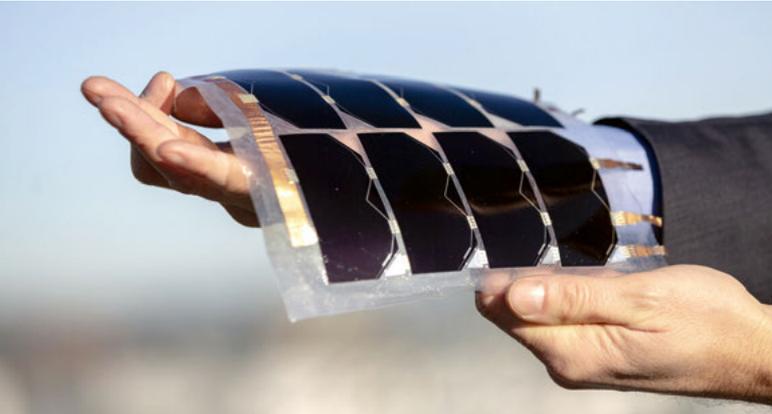


Beiträge, die im Hinblick auf Nachhaltigkeit besonders relevant sind, sind mit dem Logo der Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen gekennzeichnet.





III-V-Photovoltaik – Vom Weltraum auf die Erde



Ultraleichtes Modul aus höchsteffizienten III-V-Mehrfachsolarzellen.

III-V-Mehrfachsolarzellen versorgen seit mehr als zwanzig Jahren Satelliten im Weltraum zuverlässig mit Strom und erreichen dabei die höchsten Wirkungsgrade aller Photovoltaiktechnologien. Zwei bis sechs Teilzellen aus III-V-Verbindungshalbleitern bzw. Germanium werden dabei übereinandergestapelt, um das Sonnenlicht in allen Spektralbereichen (sichtbar bis infrarot) optimal zu nutzen. Diese Mehrfach- bzw. Tandemsolarzellen sind höchsteffizient, robust und langzeitstabil, im terrestrischen Massenmarkt haben sie sich aber bisher trotzdem nicht durchgesetzt, da Material- und Herstellungskosten etwa zwei Größenordnungen über denjenigen heutiger Standardsolarzellen liegen. Die hohen Kosten verteilen sich dabei zu etwa gleichen Teilen auf die Herstellung von Germaniumsubstraten, die Epitaxie von III-V-Halbleiterschichten sowie die Prozessierung der Wafer zu Solarzellen.

Die Herstellung folgt etablierten Verfahren aus der Mikro- bzw. Optoelektronik und setzt auf Prozesse mit geringem Durchsatz unter Verwendung teils teurer Ausgangsstoffe. Dies könnte sich in Zukunft ändern, wenn wir es schaffen, einige der

Innovationen aus der Siliziumsolarzellenfertigung auf III-V-Mehrfachsolarzellen zu übertragen, ohne dabei die Effizienz der Zellen zu beeinträchtigen. Wir arbeiten konkret daran, Germaniumsubstrate so zu gestalten, dass diese mehrfach für die Abscheidung von III-V-Schichten genutzt werden können. Die wenige Mikrometer dünnen Absorberschichten trennen wir nach der Epitaxie vom Wachstumssubstrat und prozessieren sie zu ultradünnen flexiblen Foliensolarzellen. Dabei setzen wir kostengünstige Metalle wie Kupfer ein und verwenden Prozesse wie Galvanik, Sprühen, Sputtern oder Tintenstrahldruck, um die klassische Photolithographie und das Aufdampfen von Metallen zu ersetzen.

Um die Epitaxiekosten weiter zu senken, entwickeln wir mit Partnern aus der Industrie eine neue Hochdurchsatzanlage für die metallorganische Gasphasenepitaxie. Hierdurch sollen Prozesszeiten von mehreren Stunden auf wenige Minuten reduziert werden. Kombiniert man diese Entwicklungen, so können III-V-Mehrfachsolarzellen zukünftig deutlich kostengünstiger gefertigt werden. Dies eröffnet neue Märkte im Weltraum für Konstellationen in erdnahe Umlaufbahn, aber auch terrestrische Märkte z. B. im Automobilbereich. Überall, wo eine hohe Effizienz besonders von Vorteil ist, können III-V-Mehrfachsolarzellen einen Mehrwert bieten. In Ländern mit hoher direkter Sonneneinstrahlung werden die Zellen zudem unter 500- bis 1000-fach konzentriertem Sonnenlicht in der sogenannten konzentrierenden Photovoltaik eingesetzt. Auch hier sind die Herstellungskosten der Solarzellen ein wesentlicher Bestandteil der Wirtschaftlichkeit, die wir in den kommenden Jahren deutlich verbessern wollen. Damit werden III-V-Mehrfachsolarzellen nicht nur im Weltraum konkurrenzfähig, sondern auch auf der Erde.

Mikro-CPV-Module erreichen Wirkungsgrade über 36% und sind damit die weltweit effizienteste Photovoltaiktechnologie.

Kontakt

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



Perowskit-Silizium-Tandemphotovoltaik: Von der Zellentwicklung bis zum zertifizierten Modul

Die Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle gilt als vielversprechendes Solarzellenkonzept auf dem Weg zur Marktreife und findet derzeit international große Beachtung. Die prinzipiell einfachen Herstellungsprozesse sowie die herausragenden optischen und elektronischen Eigenschaften des Perowskit-Halbleiters ermöglichen nicht nur höchste Wirkungsgrade, sondern auch günstige Produktionskosten. Am Fraunhofer ISE arbeiten wir an der gesamten Entwicklungskette der Perowskit-Silizium-Tandemphotovoltaik, von Materialien über Solarzellen bis zu Modulen.

Bei der Zellentwicklung fokussieren wir uns auf industriell umsetzbare Prozesstechnologien, um einen schnellen Transfer vom Labor in eine Produktionsumgebung zu ermöglichen. Eine zentrale Entwicklung ist hierbei die Abscheidung des Perowskitabsorbers mittels der zweistufigen Hybrid-Methode. Mit dieser Methode konnten wir im Labormaßstab bereits einen zertifizierten Rekordwirkungsgrad von 31,6 % realisieren. In den Projekten »[LiverPool](#)« und »[Pero-Si-SCALE](#)« entwickeln wir hochdurchsatzfähige Prozesse, um mittels Vakuumabscheidung und nasschemischer Verfahren kostengünstige und effiziente Perowskitabsorber auf texturiertem Silizium abzuscheiden.

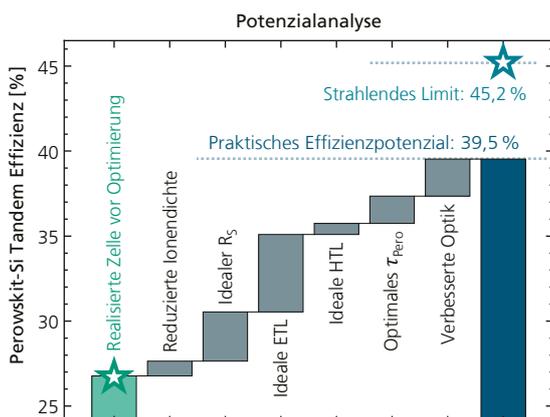
Durch die enge Verzahnung der Technologieentwicklung mit der Charakterisierung und Simulation können wir gezielt die Verluste an unseren Tandemsolarzellen analysieren. Durch die Kombination unterschiedlichster Charakterisierungsmethoden wie spektral aufgelöste Photolumineszenz zur Analyse der Material- und Grenzflächeneigenschaften, Suns- V_{oc} -Messungen sowie der Strom-Spannungs-Metrik können wir die Zellen sehr genau analysieren. Mittels fortgeschrittener optoelektronischer Simulationen und deren Abgleich mit den Messergebnissen lassen sich die einzelnen Verlustkanäle der Zelle quantifizieren und gezielte Optimierungsstrategien entwickeln (siehe Grafik unten).



LED-Modulsimulator zur Charakterisierung und Zertifizierung von großflächigen Tandemphotovoltaik-Modulen.

Neben der Zellentwicklung sind die Entwicklung von [Modultechnologien](#), die Modulanalyse und die [Zertifizierung der Module](#) ein entscheidender Erfolgsfaktor für eine Markteinführung von Perowskit-Silizium-Tandemphotovoltaik. Gemeinsam mit Industriepartnern haben wir erfolgreich Prozesse zur Verschaltung und Einkapselung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen entwickelt und industriennahe Module hergestellt. Für die temperatursensible Perowskit-Zelle mussten wir Nieder-temperaturprozesse entwickeln, die besonders schonend für die Zellen und gleichzeitig für die industrielle Massenfertigung geeignet sind. Die hergestellten Module konnten wir anschließend mit den im Projekt »[KATANA](#)« für einen LED-Sonnensimulator entwickelten Messroutinen vermessen (siehe Abb.).

Mit diesem Portfolio und unserer Expertise, Laborergebnisse in industriennahe Prozesse zu überführen, sind wir in der Lage, den Transfer der Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellentechnologie in die industrielle Produktion voranzutreiben.



Die Projekte »[LiverPool](#)«, »[Pero-Si-SCALE](#)« und »[KATANA](#)« wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Optoelektronische Simulation einer Perowskit-Silizium-Tandemzelle, ihrer kumulativen Verlustkanäle und deren jeweiliger Effizienzgewinne in Richtung des praktischen Effizienzpotenzials von 39,5 %.

Kontakt

Dr. Martin Hermle
Telefon +49 761 45 88-5265
martin.hermle@ise.fraunhofer.de

Skalierung von Technologien für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen

Die aus Siliziumwafern und mittels Hochtemperaturprozessen hergestellten Solarzellen waren und sind die dominanten Zellstrukturen am weltweiten Photovoltaikmarkt. Auch wenn in den nächsten Jahren noch weitere Wirkungsgradsteigerungen zu erwarten sind, stoßen wir bei der Siliziumsolarzelle an ihre praktischen und physikalischen Grenzen. Für eine effiziente Ressourcennutzung ist jedoch eine weitere Wirkungsgradsteigerung über das Silizium-Limit hinaus notwendig. Tandemsolarzellen werden als Nachfolgetechnologie die größten Erfolgchancen eingeräumt. Neben III-V- und Perowskit-Tandemkonzepten setzen wir am Fraunhofer ISE dabei auf die Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle.

Die Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle setzt direkt auf der etablierten Silizium-Zelltechnologie auf. Für die Verwendung als Unterzelle des Tandemstapels müssen wir in der Forschung weitere Entwicklungsschritte vornehmen: In den Projekten »EpoPOC« und »RIESEN« haben wir am Fraunhofer ISE daher untersucht, welche Anpassungen an Solarzellen basierend auf dem sogenannten TOPCon-Prozess notwendig sind. Insbesondere die sehr hohen Ansprüche an die Partikelfreiheit der Oberflächen haben wir als große Herausforderung ausgemacht. Ebenso ist die Aufbringung der Metallkontakte an der Zellrückseite eine Prozesssequenz, die Schwierigkeiten mit sich bringen kann. Wir konnten erfolgreich zeigen, dass mit einer entsprechenden Nachreinigung der bereits mit Metallkontakten versehenen Unterzelle die Aufbringung der Oberzelle gelingen kann. Beide Herausforderungen rühren daher, dass bei der Pero-Si-Tandemsolarzelle eine Hochtemperatur-Wafer-technologie mit einer Niedertemperatur-Dünnschichttechnologie kombiniert wird. Mit dem von uns entwickelten sehr industrienahen Prozess für die TOPCon-Unterzelle konnten wir eine Tandemsolarzelle mit einem Wirkungsgrad von 27,3 % herstellen.

Die Oberzelle, weniger als 1 µm dünn, besteht aus mehreren nanometerdünnen Schichten, die entweder aus der Lösung oder mittels Vakuumprozessen auf die Unterzelle aufgebracht werden. Am ISE verfolgen wir für die Abscheidung des Perowskitabsorbers einen sogenannten Hybridprozess, der beide Beschichtungsmethoden kombiniert. Dieser Ansatz erlaubt es uns, auf industriell texturierten Silizium-Unterzellen die Perowskit-Oberzelle oberflächenkonform aufzubringen und so höhere Wirkungsgrade und Energieerträge zu erzielen. In den Projekten »Presto«, »LiverPool« und »MaNiTU« konnten wir nachweisen, dass ein aufgedampftes Gerüst aus den anorganischen Komponenten, das mit einer Lösung aus organischen Komponenten infiltriert wird, die besten Ergebnisse auf texturierten Oberflächen zeigt. Mit diesem hybriden Ansatz haben wir Wirkungsgrade bis zu 31,6 % erzielt. Insbesondere die Skalierung der lösungsbasierten Beschichtung wird bei uns sowohl mit einem Dispensverfahren als auch mittels Sprühbeschichtung erfolgreich durchgeführt.

Mit dem Pero-Si-SCALE-Labor am Fraunhofer ISE entsteht zurzeit eine Plattform, auf der wir erstmalig alle für die Herstellung von Perowskit-Oberzellen notwendigen Anlagen in einem Großlabor betreiben werden. Dies wird auf dem Waferstandard der Si-Photovoltaik-Industrie von 210x210mm² erfolgen und Kleinserien von 50 Wafern am Tag ermöglichen. Damit sind wir auf einem sehr guten Weg, die angewandte Forschung der Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle im Pilotbereich voranzutreiben und die europäische Industrie bei der Entwicklung von Materialien, Anlagen und Prozessen zur Herstellung disruptiver Photovoltaikprodukte zu unterstützen.

Die Projekte »RIESEN«, »LiverPool« und »Presto« wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Eine großflächige Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle, die am Fraunhofer ISE hergestellt wurde.

Kontakt

Dr. Stefan Janz
Telefon +49 761 4588-5261
stefan.janz@ise.fraunhofer.de





Perowskit-Perowskit-Tandemsolarzellen mit höheren Wirkungsgraden entwickeln

Mit unseren Forschungsarbeiten zur Tandem-Photovoltaik möchten wir höhere Wirkungsgrade bei Solarzellen erzielen und die Energieausbeute pro Fläche erhöhen. Neue Materialien wie Perowskite helfen uns dabei, sehr leistungsstarke Solarzellen zu entwickeln. So konnten wir etwa zeigen, dass die Kombination von zwei Perowskit-Absorbermaterialien mit unterschiedlichen Bandlücken zu höheren Wirkungsgraden führt. Dies liegt, wie auch z. B. bei Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen, daran, dass die Thermalisierungsverluste sinken, also an der effizienteren Umwandlung von Photonen mit höheren Energien in elektrische Energie.

Ein Vorteil von reinen Perowskit-Tandemsolarzellen ist, dass sie bei niedrigen Temperaturen prozessiert werden können, wodurch sie in einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Verfahren auf flexiblen Substraten hergestellt werden können. Dies ermöglicht potenziell sehr niedrige Produktionskosten. Für die dem Licht abgewandte Halbzelle mit niedriger Bandlücke werden nach dem Stand der Technik Perowskite auf der Basis von Blei-Zinn-Mischungen verwendet (hier $\text{FA}_{0,7}\text{MA}_{0,3}\text{Pb}_{0,5}\text{Sn}_{0,5}\text{I}_3$), die Bandlücken bis hinunter zu etwa 1,2 eV erlauben. Aus diesem Grund wird in der der Lichtquelle zugewandten ersten Halbzelle ein Perowskit mit einer Bandlücke von 1,75 bis 1,77 eV eingesetzt. Wir verwenden hier $\text{Cs}_{0,17}\text{FA}_{0,83}\text{Pb}(\text{I}_{0,6}\text{Br}_{0,4})_3$. Im Folgenden möchten wir darstellen, wie die Bauteile optimiert werden.

Unser erster Schritt bestand darin, eine Alternative zur bisher eingesetzten PEDOT:PSS-Schicht zu finden, die als Löchertransportschicht für den Perowskit mit niedriger Bandlücke funktioniert. Es zeigte sich, dass eine neue PEDOT:PSS-Formulierung, die wasserfrei ist und einen geringeren PSS-Gehalt aufweist, zu einer leicht erhöhten offenen Klemmenspannung und zu einem deutlich erhöhten Füllfaktor führt. Entsprechend konnte der Wirkungsgrad von rund 20 % auf 23 % gesteigert werden.

Um Perowskite mit hoher Bandlücke zu erhalten, werden Halogenidmischungen eingesetzt. Dies führt allerdings häufig zu einem Stabilitätsproblem, da die beiden Halogenide segregieren und sich somit iodid- bzw. bromidreiche Domänen ausbilden, was wiederum zum Absinken der Spannung der Solarzelle führt. Experimente ergaben, dass sich dieser Effekt mit einem Alkylamin-Additiv unterdrücken lässt und die Stabilität des Perowskits mit hoher Bandlücke somit verbessert werden kann.

Dennoch waren die Werte der Leerlaufspannung von Perowskit-solarzellen mit hoher Bandlücke noch zu gering. Es zeigte sich, dass dafür u. a. die Grenzfläche des Absorbers mit der Elektronentransportschicht verantwortlich ist. Aus diesem Grund untersuchten wir in einer weiteren Serie von Experimenten verschiedene Passivierungen und konnten ein Propan-Diammonium-Iodid als sehr gut geeignetes Material identifizieren. Damit waren wir in der Lage, die Leerlaufspannung und den Füllfaktor deutlich zu steigern, was sich in einem von 16,5 % auf 19 % verbesserten Wirkungsgrad für Einzelsolarzellen mit hoher Bandlücke widerspiegelt.

Ag
ETL 3: BCP
ETL 2: SnO_x
ETL 1: C_{60}
NBG Perowskit
HTL: PEDOT:PSS
ITO
ETL 2: SnO_x
ETL 1: PCBM
WBG Perowskit
HTL: 4PADCB
Indium-Zinn-Oxid (ITO)
Glas-Substrat

Schematischer Aufbau einer Perowskit-Tandemsolarzelle. HTL steht für Löcher-, ETL für Elektronentransportschicht, WBG steht für große, NBG für kleine Bandlücke.

Kontakt

Dr. Uli Würfel
 Telefon +49 761 2034796
uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de

Herstellung von TOPCon-Solarzellen und -Modulen mit M10-Wafern

Siliziumsolarzellen mit passivierenden Kontakten, insbesondere die am Fraunhofer ISE entwickelte TOPCon-Technologie (Tunnel Oxide Passivated Contact), sind aufgrund der hohen Wirkungsgrade mittlerweile die dominierende Zellarchitektur in der industriellen Herstellung. Mit dem Ziel, die spezifischen Herstellungskosten zu senken, findet aktuell ein Wechsel zu größeren Wafern statt. Um diesem Trend Rechnung zu tragen, haben wir am Fraunhofer ISE den Fertigungsprozess weiterentwickelt: Wir sind nun als erstes Forschungsinstitut Europas in der Lage, Wafer mit dem Industriemaß M10 (Kantenlänge 182 mm) im Großraumlabor PV-TEC zu prozessieren. Mit ausschließlich an industriellen Großanlagen prozessierten TOPCon-Solarzellen konnten auf dieser Wafergröße sehr schnell Wirkungsgrade von aktuell 24 % erreicht werden (Solarzellenfläche 330,3 cm², unabhängig am ISFH CalTec kalibrierte Messung). Die Dicke der n-dotierten Poly-Si-Schicht beträgt lediglich 80 nm. Hervorzuheben ist, dass eine mittels lichtunterstützter Galvanik aufgebrauchte Metallisierung zum gleichen Wirkungsgrad führt wie das sonst eingesetzte Flachbett-Siebdruckverfahren. Der Durchsatz von etwa hundert Wafern pro Stunde an jeder Anlage ermöglicht unseren Kunden somit

ein Benchmarking ihrer Produktionsanlagen, ihrer Materialien und anderer Produkte auf einer Pilotlinie mit hohem Wirkungsgradpotenzial.

Neben der Zellentwicklung betreiben wir Forschung im Bereich der Modultechnologie. Für die Herstellung von Vollformatmodulen stehen in unserem Produktionslabor Module-TEC industrielle Großanlagen zur Verfügung. Hierbei spielt insbesondere die Entwicklung einer verlustarmen Verschaltung sowie die Entwicklung einer zuverlässigen und langzeitstabilen Einkapselung der Solarzellen eine wichtige Rolle. Mit ausschließlich am Fraunhofer ISE hergestellten TOPCon-Solarzellen mit Kantenlänge 156,75 mm wurde ein Vollformatmodul aus 120 Halbzellen hergestellt. Eine Besonderheit ist die Metallisierung der Solarzellen, die ausschließlich aus dünnen Kontaktfingern ohne Busbars besteht, wodurch die Verwendung von Silber reduziert werden kann. Um die Solarzellen zu verschalten, haben wir anstelle des in der industriellen Modulfertigung gängigen Lötprozesses das leitfähige Kleben angewendet. Da die Zellen keine Busbars aufweisen, kontaktieren die Verbinder direkt die dünnen Metallfinger. Durch erste Prozessoptimierungen konnte der Strom des Moduls gesteigert und so eine Modulleistung von 99 % der Ausgangsleistung der Zellen (CTM_{Power}) erzielt werden. Das Modul hat einen thermischen Zyklustest mit 200 Zyklen erfolgreich bestanden.

Zukünftig werden wir uns darauf konzentrieren, die einzelnen Prozesse weiterzuentwickeln und größere bei uns am Institut hergestellte TOPCon-Zellen mit höherer Effizienz einzusetzen.

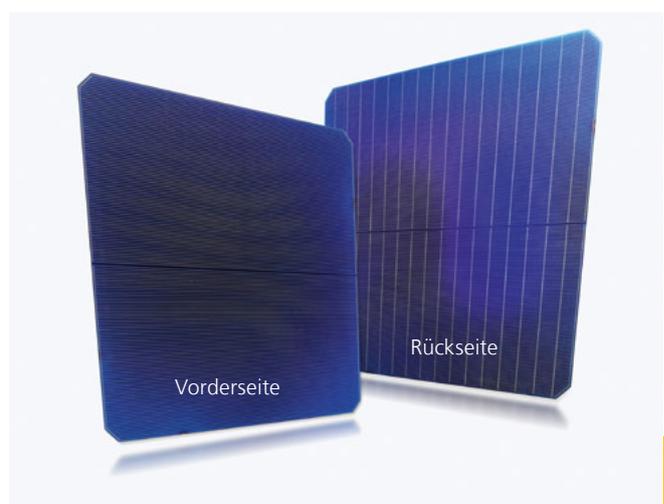


Am Fraunhofer ISE hergestelltes Vollformatmodul. Die Zellverbinder sind direkt mit den Kontaktfingern verklebt.

Vorder- und Rückseite einer im PV-TEC des Fraunhofer ISE hergestellten, bifazialen TOPCon-Solarzelle aus einem M10 Wafer.

Kontakt

Dr. Sebastian Mack
Telefon +49 761 4588-5048
sebastian.mack@ise.fraunhofer.de





Solarzellenherstellung: Minimale Strukturbreiten erhöhen den Wirkungsgrad und senken die Materialkosten

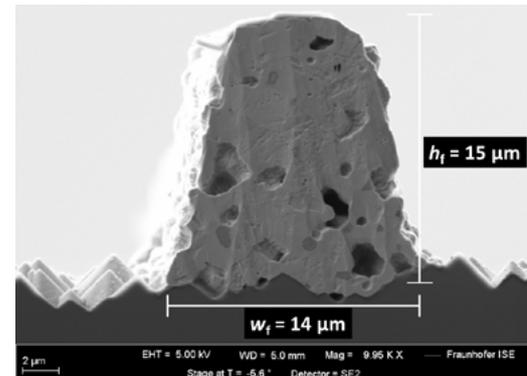
In der heutigen Solarzellenherstellung sind präzise und kosten-effiziente Strukturierungsverfahren von großer Bedeutung, vor allem für die Realisierung feinsten Metallkontakte auf der Vorderseite der Solarzelle. Am Fraunhofer ISE setzen wir auf innovative Laser- und Drucktechnologien, um minimale Strukturbreiten zu erreichen.

In unserem Großlabor ([PV-TEC Back-End](#)) wenden wir hierzu verschiedene Drucktechnologien an. Dazu zählen der klassische Siebdruck sowie innovative Ansätze wie Extrudieren mit Multi-Düsen-Dispens-Druckköpfen, eine Technologie, die wir zusammen mit unserem Spin-off [Highline Technology](#) kontinuierlich weiterentwickeln. Beide Technologien ermöglichen Kontaktbreiten im Bereich von 15 μm , wobei die Dispens-Technologie aufgrund der sehr homogenen Kontaktform eine um 10 % bis 20 % verbesserte Ausnutzung des gedruckten Metalls (z. B. Silber) erlaubt. Zusätzlich haben wir mit FlexTrail ein neues Druckverfahren implementiert und patentiert, das das Verdrukken von unterschiedlichen Materialien mit Strukturbreiten im Bereich von 10 μm erlaubt. Dabei werden spezifische, flexible Glaskapillaren eingesetzt, die wir ebenfalls am Institut entwickelt haben. Aktuell fokussieren unserer FuE-Arbeiten die Verwendung von Kupfer anstelle von silberhaltigen Medien. Damit wollen wir die Materialkosten signifikant senken, ohne die Wirkungsgrade der Solarzellen zu reduzieren.

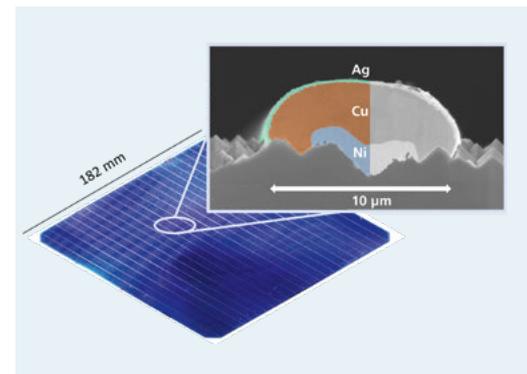
Im Bereich der Lasertechnologien wenden wir verschiedene Laserverfahren an, um feinste Strukturgrößen im Bereich von 5 μm bei der Öffnung von dielektrischen Schichten zu realisieren. Dies ist entscheidend für die sich anschließenden Galvanik-Prozesse, in denen sehr feine Metallkontakte mit Strukturbreiten im Bereich von 10 bis 15 μm erzeugt werden. Die realisierten Metallkontakte bestehen primär aus Kupfer, es sind in der Regel lediglich dünne Schichten aus Nickel zur Kontaktierung des Siliziums und Silber als Schutzschicht auf der Kontaktoberfläche nötig. Galvanische Prozesse ermöglichen folglich eine fast vollständige Substitution des hochpreisigen Silbers. Als Alternative zu Laserverfahren entwickeln wir zur lokalen Definition von galvanischen Kontakten auch Inkjet-Verfahren (»Mask&Plate«-Ansatz).

Ein aktuell sehr relevantes Forschungsgebiet ist die Herstellung von hochpräzisen Siebdruckformen mit minimalen Öffnungs-breiten unter Verwendung von Laserverfahren. Hier vereinen wir unsere Kompetenzen im Bereich Laser- und Drucktechnologie.

Aufnahme eines siebgedruckten Feinlinienkontakts mit dem Rasterelektronenmikroskop.



Nahaufnahme eines galvanisch erzeugten Feinlinienkontakts.



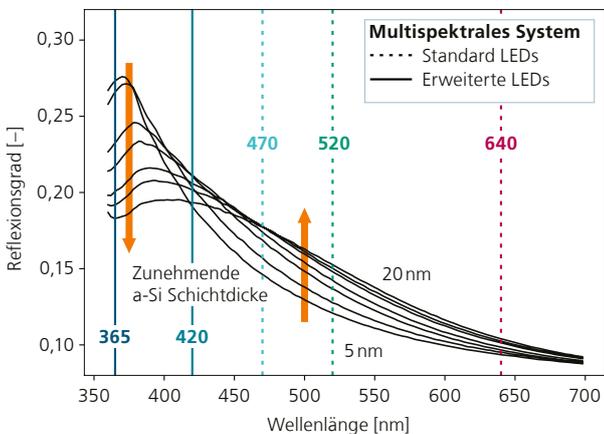
Die hier erwähnten technologischen Lösungen zeigen vielseitige Möglichkeiten auf, Kontaktbreiten auf Werte im Bereich 10 bis 20 μm zu reduzieren. Die Erzeugung solcher feiner Strukturbreiten führt nicht nur zu höheren Wirkungsgraden aufgrund der geringeren Abschattung des Sonnenlichts durch die Kontakte, sondern auch zu signifikanten Materialeinsparungen von kostenintensiven Metallen wie Silber, ein wichtiger Aspekt auf dem Weg zu einer nachhaltigen Fertigung von Solarzellen.

Kontakt

Dr.-Ing. Florian Clement
Telefon +49 761 4588-5050
florian.clement@ise.fraunhofer.de

Ortsaufgelöste, quantitative Inline-Analyse von dünnen funktionalen Schichten auf Basis von Multispektral-Bildern

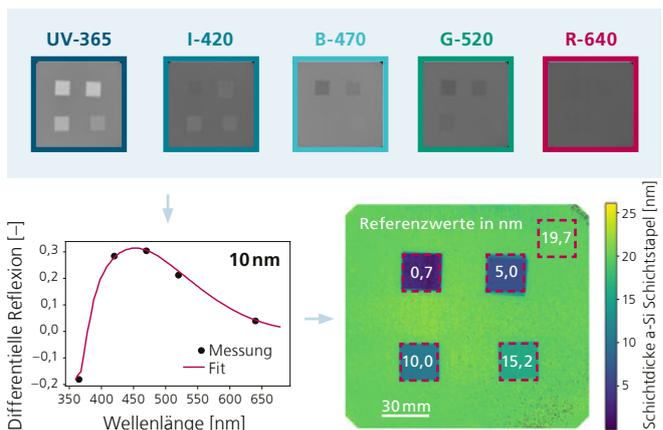
Hocheffiziente Solarzellentechnologien wie die Silizium-Heterojunction (SHJ)-Technologie gewinnen für die Massenfertigung rasant an Bedeutung. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades weisen diese Technologien allerdings eine höhere Empfindlichkeit gegenüber kleinen Defekten und Inhomogenitäten auf. Werden diese frühzeitig erkannt, lassen sich Prozesse schnell nachregeln und defekte Proben aussortieren und so geringe Wirkungsgradschwankungen gewährleisten. Hierzu bedarf es ortsaufgelöst messender Inline-Messverfahren, da insbesondere die Randbereiche des Wafers anfällig für Inhomogenitäten sind. Ein für die Oberflächenpassivierung und Ladungsträgerselektivität wichtiges Strukturelement der SHJ-Technologie sind die 10 bis 20 nm dünnen Schichten aus amorphem Silizium (a-Si). Die Dicke dieser a-Si-Schichten hat starken Einfluss auf die Kontaktwiderstände (elektrische Verluste) sowie auf die Reflexion an und die parasitäre Absorption in den Schichten (optische Verluste) und ist daher ein wichtiger Qualitätsparameter.



Simulation der spektralen Reflexion für verschiedene a-Si-Schichtdicken (texturierte Oberfläche). Wellenlängen des Multispektralsystems mit UV-Erweiterung.

Im Projekt »SALSA« haben wir gezeigt, dass eine schnelle Dickenmessung mittels Inline-Spektrophotometrie möglich ist, indem man die Reflexionsspektren optisch modelliert (Abb. 1 links), und auch auf texturierten Oberflächen hohe Genauigkeiten erreicht werden, wenn man die differentielle Reflexion betrachtet. Da die Spektrophotometrie nur Spur-Messungen mit geringer Ortsauflösung ermöglicht, haben wir das Verfahren auf multispektrale Bilddaten übertragen. Diese können mit einem Inline-Messsystem zur Farbinspektion unseres Partners ISRA Vision bei bis zu 5 Wellenlängen in unter 1 s Messzeit aufgenommen werden (Abb. 2). Die genaue Betrachtung des Reflexionsverhaltens unterschiedlich dicker a-Si-Schichten zeigt, dass die Reflexion im UV-Bereich am empfindlichsten und im Blau-Bereich invers auf die Schichtdicke reagiert, weshalb das Standardmesssystem um zwei Wellenlängen bei 365 und 420 nm erweitert wurde (Abb. 1). Wie Abb. 2 zeigt, stehen damit nach Kalibrierung der Grauwertbilder in jedem Pixel 5 Reflexionswerte zur Verfügung, die sich optisch sehr gut modellieren lassen, sodass sich aus den 5 Bildern eine Dickentopographie ableiten lässt. Dabei stimmen die mit dem Multispektralfit bestimmten Dicken sehr gut mit Referenzwerten aus der Spektrellipsometrie überein, wie für eine Probe mit gezielter a-Si-Dickenvariation dargestellt.

Dies macht deutlich, dass eine ortsaufgelöste Messung der a-Si-Schichtdicken anhand von Multispektraldaten möglich ist. Mithilfe theoriegestützter Machine-Learning-Verfahren lässt sich die aufwendige Modellierung auf den erforderlichen Sekundentakt beschleunigen. Damit steht für neue Produktionslinien eine kostengünstige Inline-Messtechnik und ein Analyseverfahren zur Verfügung, das auch auf andere funktionale Schichten übertragen werden kann.



Kontakt

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

Siliziumwafer mit a-Si-Schichtdicken-Variation: multispektrale Bilder (oben), pixelweise Reflexionswerte mit optischer Modellierung (links), Schichtdickentopographie (rechts).



Perspektiven des PV-Recyclings in Deutschland

In den vergangenen Jahrzehnten ist die installierte PV-Kapazität in Deutschland enorm gestiegen: 2023 betrug die PV-Leistung in Deutschland rund 82 GWp. So erfreulich diese Entwicklung auf der einen Seite ist, produziert Photovoltaik andererseits auch eine erhebliche Menge an Abfall, da die Module bisweilen nach 20 Jahren ausgetauscht werden. Um mit Solarenergie langfristig CO₂-armen Strom ressourcenschonend bereitstellen zu können, braucht es eine Kreislaufwirtschaft. Derzeit landen in Deutschland jedes Jahr mehr als 10 000 Tonnen an alten Photovoltaik-Modulen auf dem Recyclingmarkt. Aufgrund der zunehmenden Installation von PV-Modulen rechnen wir ab 2030 bereits mit mehr als 500 000 Tonnen pro Jahr. Da in PV-Modulen wertvolle Materialien verbaut sind, ist ein Recycling im Sinne einer nachhaltigen Wirtschaft zwar sinnvoll – allerdings befindet sich ein effektives Recycling erst im Aufbau.

Am Fraunhofer CSP in Halle/Saale haben wir einen innovativen Recyclingprozess entwickelt, der die Rückgewinnung von Silber aus Solarzellen und die Reinigung von Silizium ermöglicht, um neue Siliziumkristalle aus 100 % recyceltem Silizium zu produzieren. Diese Kristalle wurden in Wafer verarbeitet und für die Herstellung von PERC-Zellen mit einer maximalen Effizienz von 19,7 % verwendet. Eine Übersicht der in den installierten PV-Modulen verwendeten Materialien zeigt, dass eine erhebliche Menge an wertvollen Rohstoffen, insbesondere Silber und Silizium, enthalten ist. Denn laut Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-Richtlinie) müssen nur 80 % der Materialien recycelt werden. Die rechtlichen Anforderungen werden oft durch das Recycling von Aluminiumrahmen und Glas erfüllt, während andere seltene Materialien nicht zurückgewonnen werden.

Material	Menge [t]	Gesamtwert [Mio. €]	Anteil des Gesamtwerts [%]
Glas	3 400 000	170	6,0
Aluminium	624 000	1060	37,7
Kunststoffe	480 000	–	–
Silizium	144 000	288	10,2
Kupfer	24 000	108	3,8
Silber	1700	1190	42,3

In Deutschland installierte PV-Module enthalten unterschiedliche Rohstoffe, die in der Tabelle nach Menge, Materialwert und Anteil am Gesamtwert der Rohstoffe gelistet sind.

Während unseres Recyclingprozesses werden die PV-Module mechanisch zerkleinert und nach Partikelgröße, Leitfähigkeit und Dichte getrennt. Im Rahmen von Forschungsarbeiten haben wir insgesamt 627 kg gebrochene Zellen aus End-of-Life-PV-Modulen behandelt; nach der Demetallisierung blieben 547 kg Silizium und 6,18 kg metallisches Silber übrig. Nach dem Abätzen des Emitters aus dem gereinigten Silizium wurden 370 kg reines Silizium erhalten.

Den Ingot haben wir in Wafern verarbeitet – aus diesen haben unsere Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer ISE in Freiburg PERC-Solarzellen hergestellt. Diese Solarzellen haben wir anschließend in einem Demonstrationsmodul verbaut, das derzeit auf dem Testfeld unseres Standorts in Halle (Saale) installiert ist. Die Wafer hatten einen Basiswiderstand im Bereich von $\rho_{Si} = 0,5$ bis $1 \Omega \text{cm}$, die Dicke der Wafer betrug $180 \mu\text{m}$, das M2-Format wurde verwendet und die Wafer waren jeweils alkalisch strukturiert. Die Effizienz der Zellen erreichte Werte bis 19,7 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass Silber aus alten PV-Modulen zurückgewonnen und Silizium so gereinigt werden kann, dass neue Solarzellen hergestellt werden können. Dies erhöht die Recyclingquote und ermöglicht die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe.

Die Ergebnisse sind im Rahmen der Projekte »ReModul«, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), und »Apollo«, gefördert von der Europäischen Union, entstanden.



Cz-Kristall, der aus 100 % Recycling-Silizium hergestellt wurde.

Kontakt

Dr. Frank Zobel
 Telefon +49 761 4588-5600
frank.zobel@csp.fraunhofer.de

Outdoor Performance Lab – PV-Module unter realen Bedingungen testen und bewerten



Belegte und freie Messplätze für Einzelmodule auf dem Testfeld des Fraunhofer ISE in Merdingen.

Photovoltaik-Module und -systeme bieten ein erhebliches Potenzial für weitere Innovationen und Optimierungen. Ein wichtiger Aspekt dabei ist das Testen und Bewerten neuer Technologien. In unserem [Outdoor Performance Lab](#) können wir diese FuE-Leistung anbieten: Hier testen wir unter realen Bedingungen PV-Module und bewerten ihre Langzeitstabilität, um eine zuverlässige und effiziente Stromerzeugung zu gewährleisten und die Investitionssicherheit zu erhöhen. Derzeit laufen rund zehn verschiedene Messprojekte im Outdoor Performance Lab, sowohl im direkten Auftrag der Industrie als auch mit (anteiliger) öffentlicher Unterstützung.

Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt auf dem Benchmarking von PV-Modulen verschiedener Zelltechnologien. Durch kontinuierliche Freilandmessungen und spezifische Tests zur Verschattungstoleranz ermitteln wir die Leistungsfähigkeit und die Ausfallsicherheit der Module. Diese Daten sind entscheidend für die Marktakzeptanz und die Investitionssicherheit neuer Modultechnologien. Die Module werden dabei unter verschiedenen Umweltbedingungen und gegen verschiedene

Referenzen getestet, um ihre Leistung und Zuverlässigkeit zu validieren. Dazu gehören Tests in unterschiedlichen Montage- bzw. Integrationssituationen und unter verschiedenen klimatischen Bedingungen an unseren Teststandorten in Merdingen bei Freiburg, auf Gran Canaria und in der Wüste Negev. Ein wichtiger Aspekt ist dabei, Messunsicherheiten in der Modulcharakterisierung so weit wie möglich zu reduzieren. Dieser Herausforderung begegnen wir, indem wir präzise Messmethoden sowohl im Labor als auch im Freiland entwickeln und beide Messansätze kombinieren.

Unsere Untersuchungen beschränken sich dabei nicht nur auf PV-Module. Unter dem Begriff der Integrierten Photovoltaik vermessen wir auch Anwendungen in Fahrzeugbauteilen, Überdachungen, Lärmschutzwänden, Gebäudehüllen und anderen Strukturen. Desgleichen sind wir auch daran beteiligt, neue Anwendungsfelder wie Agri-Photovoltaik und schwimmende PV-Kraftwerke zu optimieren.

Im Projekt »[MiMoRisk](#)« legen wir den Schwerpunkt auf die Entwicklung von Modellen, die die technologie- oder modul-spezifische Degradationskinetik beschreiben. Diese Modelle ermöglichen es, die Langzeiterträge und Ertragsrisiken präzise vorherzusagen und somit die Planung und den Betrieb von PV-Anlagen zu optimieren. Durch die Integration dieser Modelle in softwaregestützte Werkzeuge können wir die Genauigkeit der Ertragsprognosen weiter erhöhen und die Risiken für die PV-Industrie minimieren. Dies erhöht die Planungssicherheit und dient der Versicherung von PV-Anlagen, da genaue Vorhersagen der Ertragsentwicklung und der damit verbundenen Risiken entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen sind.

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

Kontakt

Dr. Christian Reise
Telefon +49 761 4588-5282
christian.reise@ise.fraunhofer.de

Aufständigung für bifaziale PV-Module, die sich an alle Modulformate und Rahmengrößen anpassen lässt, ohne die Modulrückseite zu verschatten.



Den Markthochlauf der Agri-PV in Deutschland begleiten und unterstützen

Agri-Photovoltaik (Agri-PV) ermöglicht die gleichzeitige Produktion regenerativer Energie und landwirtschaftlicher Erzeugnisse auf derselben Fläche – damit gilt sie als Schlüsseltechnologie, um Flächenkonkurrenzen zu entschärfen. Im Projekt »SynAgri-PV« begleiten wir den nationalen Markthochlauf. Gemeinsam mit einem interdisziplinären Konsortium aus zehn Partnern verfolgen wir das Ziel, naturschutzfachliche, rechtliche, wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen zu evaluieren und Handlungsbedarfe zu benennen.

Einen Überblick über die Agri-PV-Anlagen in Deutschland bietet die interaktive [Karte](#) unserer Datenbank (www.agri-pv.org). Von insgesamt 18 vollständig dokumentierten Anlagen befinden sich neun im Ackerbau, sieben im Gartenbau und zwei im Dauergrünland (siehe Tabelle). Anlagenbetreiber und -besitzerinnen können einen [Fragebogen](#) ausfüllen, um die Datenbank zu ergänzen.

Die Vielfalt der Agri-PV lässt sich auch anhand unseres virtuellen Demonstrators erleben (siehe Abb.), den wir bereits auf mehreren Veranstaltungen präsentiert haben, z. B. auf der AgriVoltaics 2024 in Denver, CO. Die Visualisierung von vier unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten der Agri-PV und ihre Integration in eine Agrarlandschaft der Zukunft bietet eine Diskussionsgrundlage und soll auf spielerische Weise die Akzeptanz für die Technologie fördern.

Gemeinsam mit dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) veranstalteten wir im Mai 2024 das zweite »Nationale Forum Agri-PV« im Fraunhofer-Forum Berlin. Das Forum ermöglichte den Austausch über die kurz vorher fertiggestellte Vornorm DIN SPEC 91492, die Anforderungen an die Tierhaltung bei Agri-PV regelt und eine Abgrenzung

zur Freiflächen-PV schafft. Sie ergänzt die DIN SPEC 91434, die die allgemeinen Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung definiert. Angesichts der Verweise auf die erste Vornorm im Erneuerbare-Energien-Gesetz und Baugesetzbuch bleibt abzuwarten, ob die DIN SPEC 91492 ebenso als Grundlage für den Markteintritt der Agri-PV mit Nutztierhaltung dienen wird. Außerdem steht zur Debatte, ob die drei Jahre alte DIN SPEC 91434 zu einer Norm weiterentwickelt werden soll. Mit dem Forum wollen wir ein dauerhaftes Austauschformat etablieren.

Anhand der Maßnahmen zur Vernetzung und Begleitung des Markthochlaufs wollen wir mit »SynAgri-PV« dafür sorgen, Agri-PV nachhaltig und synergetisch in die Landwirtschaft zu integrieren, und so einen Beitrag zur erfolgreichen Agrar- und Energiewende leisten.



Mit dem virtuellen Demonstrator lässt sich ein hochaufgeständertes System mit Sonderkulturen testen.

Anlagenarten	Anzahl (n)	Leistung in kW _p	Ø installierte Leistung (kW _p /n)
Vollständige Umfragedaten	18	13 047	767
Dauergrünland	2	2 422	1 211
Gartenbau	7	1 160	166
Ackerbau	9	9 508	1 056
Unvollständige Umfragedaten	9	38 526	4 281
Insgesamt	27	51 573	1 433

Das Projekt »SynAgri-PV« wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Kontakt

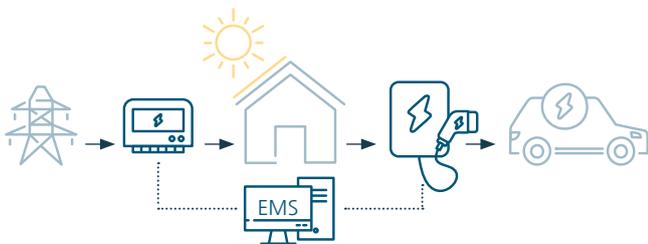
Überblick über die verschiedenen Agri-PV-Anlagenarten in Deutschland (Stand April 2024). Die Angaben werden unter www.agri-pv.org laufend ergänzt und aktualisiert

Agnes Katharina Wilke
Telefon +49 761 45 88-2501
agnes.katharina.wilke@ise.fraunhofer.de



Wallbox-Inspektion: Prüfverfahren für solares und netzdienliches Laden von Elektrofahrzeugen

Den eigenen Solarstrom im Elektrofahrzeug speichern, später im Haushalt nutzen und dabei das Stromnetz unterstützen – diese Lösung klingt vielversprechend. Mit unserem Projekt »Wallbox-Inspektion« wollen wir diese Entwicklung unterstützen, indem wir an neuen Verfahren forschen, die die Qualität von uni- und bidirektionalen Wallbox-Lösungen für privat geladene Elektrofahrzeuge bewerten. Langfristig wollen wir daraus einen Industriestandard etablieren. Im Mittelpunkt unseres Prüfverfahrens steht ein Qualitätsvergleich, der die Bewertung von Effizienz und Regelgüte für smartes solares Laden und bidirektionales Laden umfasst.



Gesamtsystem für die Prüfungen der Wallbox-Inspektion inkl. Stromzähler, Energiemanagementsystem und Wallbox.

Smartes solares Laden bedeutet, dass das Auto vorrangig mit selbst erzeugtem Strom aus der PV-Anlage geladen wird und sich damit netzdienlich verhält. Da die Stromerzeugung aufgrund von Witterungsverhältnissen schwankt und der Verbrauch im Haushalt variiert, ist es von Vorteil, wenn die Ladestation schnell und präzise den Ladestrom regelt. Daher haben wir einen Prüflaufplan für unidirektionales solargesteuertes Laden erstellt, der Testverfahren u. a. für die Ermittlung des Stand-by-Verbrauchs, der Regelgüte und der Umschaltung zwischen ein- und dreiphasigem Laden beschreibt. Prüfgegenstand sind solargesteuerte Ladelösungen für den Heimbereich, bestehend aus der Wallbox selbst, einem

Energiemanagementsystem und einem dedizierten Stromzähler. Letzterer wird hinter den offiziellen Stromzähler installiert und misst als Regelgröße die Leistung am Netzanschlusspunkt. Ziel ist, den solaren Anteil am Stromverbrauch zu maximieren und dadurch das Stromnetz zu entlasten.

In unserem [Digital Grid Lab](#) haben wir verschiedene Wallbox-Lösungen installiert und gemäß Prüflaufplan getestet. Für die Prüfungen haben wir den digitalen Fahrzeugzwilling »ev twin« im Labor genutzt, um ein Elektrofahrzeug inklusive realer Leistungsflüsse vorzugeben. Die solare Erzeugung haben wir über eine elektrische Quelle nachgebildet. Damit steht eine reproduzierbare und frei parametrierbare Prüfumgebung für Wallboxen zur Verfügung.

Ein wesentliches Ziel der Wallbox-Inspektion ist es, Optimierungspotenzial aufzuzeigen und so zu einer möglichst effizienten Solarnutzung beizutragen. Bereits ein erster Vergleich zeigte, dass die Regelgüte bei den Lösungen sehr unterschiedlich ist. Ein Beispiel: Verändert sich die Überschusserzeugung erheblich, kann es bei einigen Wallbox-Lösungen rund zwei Minuten dauern, bis das Wallbox-System nachregelt. Diese Größe ist entscheidend für die Ausnutzung der verfügbaren Sonnenstrahlung, da sich an bewölkten Tagen innerhalb der Regelzeit die verfügbare Leistung ändert. Dies und weitere Ergebnisse werden in der finalen Wallbox-Inspektion unter www.wallbox-inspektion.de veröffentlicht.

Das Projekt »Wallbox-Inspektion« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Kontakt

Dr.-Ing. Bernhard Wille-Haussmann
Telefon +49 761 4588-5443
bernhard.wille-haussmann@ise.fraunhofer.de

Testumgebung für Ladelösungen im Digital Grid Lab mit dem digitalen Fahrzeugzwilling »ev twin«.



Auf dem Weg zur Klimaneutralität: Die Rolle netzbildender Wechselrichter im zukünftigen Stromnetz

Die europäischen Staaten betreiben mit dem synchron gekoppelten Stromverbundnetz in Kontinentaleuropa eine der größten Maschinen der Welt. Darüber sind ca. 1 000 GW an installierten Erzeugungskapazitäten vernetzt, die jährlich mehr als 2 500 TWh an elektrischer Energie übertragen und mehr als 400 Millionen Menschen versorgen. Derzeit werden dabei mehr als 500 Millionen Tonnen CO₂-Emissionen pro Jahr erzeugt, die durch das Verbrennen fossiler Energieträger in konventionellen Kraftwerken entstehen. Um diese Emissionen zu senken, strebt die EU bis 2050 als erster Kontinent [Klimaneutralität](#) an, plant bis 2040 eine nahezu vollständige Dekarbonisierung des [Stromsektors](#) und will bis 2030 eine [installierte PV-Leistung](#) von 600 GW erreichen.



Vorbereitung eines netzbildenden Wechselrichters zur Vermessung im Multi-Megawatt-Lab.

Für den Erfolg der Energiewende ist nicht nur der Ausbau erneuerbarer Energien notwendig, sondern auch die Gewährleistung der Systemstabilität. Aktuell wird ein stabiler Netzbetrieb, also die Bereitstellung der Netzspannung mit stabiler Amplitude und Frequenz, nahezu ausschließlich durch konventionelle Großkraftwerke garantiert. Zukünftig müssen Stromrichteranlagen netzbildende Eigenschaften jedoch auch in Kraftwerken aufweisen, die mit erneuerbaren Energien betrieben werden, sowie in Speicherkraftwerken. Dazu sind z. B. in PV-Großkraftwerken hochzuverlässige und langlebige Stromrichter erforderlich.

Bislang fehlen Leitplanken zum dynamischen Verhalten netzbildender Anlagen für ein systemdienliches Verhalten; auch existiert kein allgemeingültiges Verfahren zur Nachweisführung netzbildender Eigenschaften. Dies hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in der Roadmap



Prüfanforderungen für netzbildende Wechselrichter (schematische Darstellung).

»[Systemstabilität](#)« festgehalten (Prozess F6 »Prüfgrundlage für Zertifizierung von netzbildenden Stromrichtern«). Die Roadmap formuliert einen Fahrplan für einen sicheren Betrieb des zukünftigen Stromversorgungssystems mit 100 % erneuerbaren Energien.

Im Projekt »[GFM-Benchmark](#)« entwickeln und erproben wir am Fraunhofer ISE verschiedene Testverfahren für netzbildende Wechselrichter (NBWR). Ziel ist, den aktuellen Stand der Technik als Grundlage für Ausschreibungen zu ermitteln, NBWR anhand eines messtechnischen Vergleichs weiterzuentwickeln sowie Black-Box-Nachweisverfahren für weitere Normungsaktivitäten zu erproben und zu optimieren. Zukünftig werden NBWR nicht nur im Normalbetrieb, sondern auch bei Großstörungen die Netzstabilität gewährleisten. Im Projekt »[StABIL](#)« analysieren wir am ISE zukünftige Belastungen von NBWR in PV-Großkraftwerken, um Erkenntnisse für die optimierte Auslegung von Hard- und Software zu gewinnen. Dabei legen wir den Fokus auf eine hohe Lebensdauer der eingesetzten Ressourcen, die durch Labor- und Feldtests erprobt und anschließend in Auslegungsvorschriften für lebensdaueroptimierte PV-Wechselrichter überführt wird. So tragen wir zum sicheren und robusten Betrieb einer der größten Maschinen der Welt bei.

Kontakt

Roland Singer
Telefon +49 761 4588-5948
roland.singer@ise.fraunhofer.de



Natrium-Ionen-Batterien für die Energiewende

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) dominieren aktuell den Markt bei Batteriespeichern. Allerdings wird sich das Marktgefüge in den kommenden Jahren ändern, da neben sozioökonomischen und ökologischen Problemen LIB mit Rohstoffknappheiten zu kämpfen haben (z. B. bei Lithium und Kobalt). Stattdessen wird die Natrium-Ionen-Batterietechnologie (NIB) aufgrund geringerer Rohstoffkritikalität immer interessanter. Zudem sind für NIB die Rohstoffe günstiger und die Temperaturstabilität und Schnellladefähigkeit höher. Aufgrund der etwas höheren Potenziallage gegenüber Lithium weisen NIB jedoch eine inhärent geringere Energiedichte als LIB auf.

Ähnlich wie bei LIB basieren die bisherigen Herstellungsprozesse für NIB-Elektroden überwiegend auf lösungsmittelbasierten Beschichtungsverfahren, die hohe Kosten für Trocknung, Kalandrieren und Rückgewinnung der kritischen Lösemittel verursachen. Am Fraunhofer ISE forschen wir zusammen mit universitären und industriellen Partnern aus Baden-Württemberg

in den Projekten »[PRONTO](#)« und »[VORAN](#)« an lösungsmittel-freien Beschichtungsverfahren und am Transfer der NIB-Technologie in die Anwendung.

In »[PRONTO](#)« entwickeln wir optimierte Aktivmaterialien und leistungsfähige Batteriezellarchitekturen für NIB. Die Aktivmaterialentwicklung übernehmen dabei Forschende vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Basierend auf den Vorerfahrungen des Fraunhofer ISE im Bereich der Trockenprozessierung von Batterieelektroden konnten wir erfolgreich poröse Dickschichtelektroden im Millimeter-Bereich validieren, die die Schichtdicken der etablierten lösungsmittelbasierten Verfahren um ein Vielfaches übertreffen. Dabei treten jedoch Herausforderungen hinsichtlich der Na⁺-Transportprozesse innerhalb der Batteriezelle auf. Um die geforderte Performance trotz erhöhter Schichtdicke sicherzustellen, haben die Projektpartner von der Universität Stuttgart den Na⁺-Transportprozess innerhalb der Elektroden modelliert und daraus Empfehlungen für die Elektrodenauslegung abgeleitet.

Im Projekt »[VORAN](#)« wollen wir die Voraussetzungen für die Großserienproduktion von NIB für stationäre und mobile Anwendungen schaffen. Als Basis dient uns eine innovative Technologieplattform, die wir zusammen mit den Industriepartnern acp systems AG und Helmut Hechinger GmbH initiiert haben. Außerdem konnten wir in Kooperation mit acp systems AG die angestrebte modulare Batteriezellarchitektur als Bestandteil eines »Design-for-Recycling«-Konzepts und die Elektrodenstruktur auf Basis von Trockenprozessierung im anwendungsorientierten Größenmaßstab validieren. Darauf aufbauend haben wir begonnen, Recyclingprozesse für die Batteriematerialien zu entwickeln.

Bis zum Projektende von »[PRONTO](#)« (Ende 2025) und »[VORAN](#)« (Ende 2026) werden wir die Prozesstechnologie und Materialentwicklung für die NIB-Module weiterentwickeln und skalieren sowie mit entsprechender Batteriesystemtechnik kombinieren. Beide Projekte stellen zentrale Schritte in Richtung einer Großserienproduktion dar, deren Realisierung die Helmut Hechinger GmbH plant.



In den Batterieforschungslaboren am Fraunhofer ISE werden Präkursoren für Kathodenaktivmaterialien für Natrium-Ionen-Batterien synthetisiert.

Kontakt

Dr.-Ing. Oliver Fitz
Telefon +49 761 4588-2393
oliver.fitz@ise.fraunhofer.de

Das Projekt »[PRONTO](#)« wird vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert.
»[VORAN](#)« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

NRGISE.ONE – eine Produktsuite für die integrierte Planung und Steuerung von Energiespeichern

Der Einsatz von einem oder mehreren Speichersystemen in einer elektrischen Versorgungsstruktur, die aus Erzeugern und Verbrauchern besteht, ermöglicht vielfältige Anwendungen. So kann zum Beispiel ein Industrieunternehmen seinen Energiebedarf durch die Kombination aus einer PV-Anlage und einer Batterie decken und dadurch die Stromkosten aus dem Netz minimieren. Mit Hilfe geeigneter Werkzeuge lassen sich solche Energiesysteme effizient planen und steuern. Zudem können die Kosten für Installation und Betrieb der Anlagen optimiert werden.



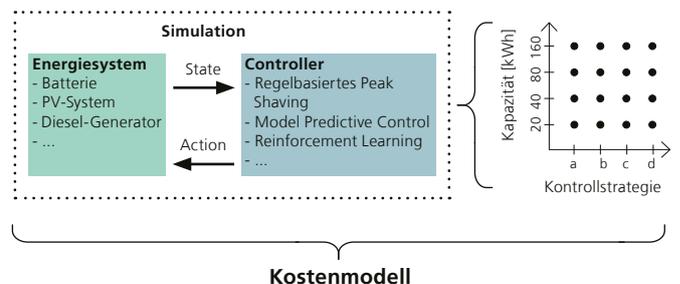
Die Produktsuite »NRGISE.ONE« erleichtert die Integration von Stromspeichern in eine bestehende Versorgungsstruktur.

Vor diesem Hintergrund haben wir am Fraunhofer ISE die Produktsuite »NRGISE.ONE« entwickelt, die Planern und Betreibern von Stromspeichern eine wirtschaftlich sinnvolle Integration der Systeme in eine Versorgungsstruktur ermöglicht. Zunächst umfasst die Suite die Planungssoftware »NRGISE.plan«, die auf Basis detaillierter Anlagenmodelle und KI-basierter Verfahren eine effiziente Auslegung speicherbasierter Energiesysteme bzw. ihrer Komponenten (Speicher, PV-Anlage, ...) ermöglicht. Hierbei erlaubt ein nutzerzentrierter Designansatz einen einfachen Planungsprozess. Ergänzend hierzu wird durch die Softwaresuite das Energiemanagementsystem »NRGISE.control« bereitgestellt, das eine ebenfalls ökonomisch optimierte Betriebsführung der Anlagen im Feld ermöglicht. Die Steuerung erfolgt konsistent zur Planung, d. h. in beiden Schritten wird auf die gleichen Anlagenmodelle und Optimierungsalgorithmen zurückgegriffen. Durch diese am Markt einmalige Integration der beiden Produkte wird der sogenannte Simulation-to-Reality-Gap geschlossen. Bei diesem unerwünschten Gap können durch die Verwendung unterschiedlicher Ansätze bei Planung und Steuerung signifikante Unterschiede zwischen den initial errechneten und den später in der Praxis erzielten wirtschaftlichen Erträgen entstehen. Als weiteren Mehrwert

erlauben die KI-basierten Optimierungsverfahren eine Mehrzwecknutzung von Speichern, sodass beispielsweise ein Industrieunternehmen neben einer Verbrauchsoptimierung von eigens erzeugtem PV-Strom gleichzeitig einen Ausgleich von produktionsbedingten Lastspitzen erzielen kann.

Zusätzlich zu den beiden kommerziellen Produkten »NRGISE.plan« und »NRGISE.control« umfasst »NRGISE.ONE« schließlich die Open-Source-Software »NRGISE.plan Free«, die Forschenden ein offenes Framework zur Entwicklung neuer Steuerungsalgorithmen und Anlagenmodelle bereitstellt. Durch diesen offenen Ansatz wird ein wichtiger Beitrag für die angewandte Energieforschung geleistet, um Forschungsinnovationen für die Energiewende zu beschleunigen.

Zukünftig wollen wir »NRGISE.ONE« weiterentwickeln und so die Anwendung im Kontext verschiedenster Speicheranwender und Anlagenkonstellationen ermöglichen. Außerdem wollen wir neue, nachhaltige Speichertechnologien, etwa auf Basis von Natrium oder Zink, integrieren, um eine rasche Integration ins Versorgungsnetz zu unterstützen.



Schematische Darstellung »NRGISE.ONE«: Simulation der Interaktion zwischen Energiesystem und Controller zur wirtschaftlichen Bewertung im mehrdimensionalen Parameterraum.

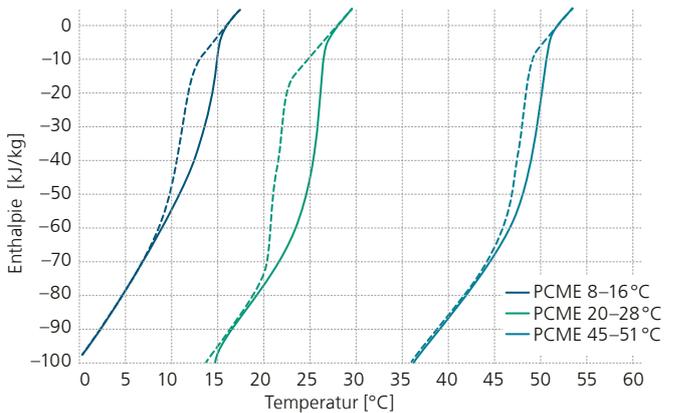
Kontakt

Dr. Nils Reiners
 Telefon +49 761 4588-5281
nils.reiners@ise.fraunhofer.de

Entwicklung von PCM-Emulsionen als Wärmeträgerfluide mit hoher Wärmekapazität

Im Projekt »Optimus – Entwicklung, Optimierung und Anwendung von PCM-Emulsionen mit hoher thermischer Speicherdichte« entwickeln wir zusammen mit Industriepartnern neue Emulsionen aus Phasenwechselmaterialien (engl. phase change materials, PCM) und Wasser oder Wasser-Glykol-Mischungen für die Anwendung in Gebäuden und Industrie sowie für Wärmepumpensysteme und zur Batteriekühlung in Kraftfahrzeugen. Die Schmelzbereichsbereiche der eingesetzten PCM liegen bei 8 bis 16°C, 20 bis 28°C oder 45 bis 51°C. Die Wärme wird jeweils in diesen engen Temperaturdifferenzen gespeichert und wieder abgegeben.

Bei unserem Ansatz nutzen wir primär Paraffine, die in Wasser dispergiert bzw. emulgiert werden. Die PCM-Emulsionen bleiben damit unabhängig vom Phasenzustand des PCM flüssig und können als Wärmeträgerflüssigkeiten in Wärme- oder Kältenetzen genutzt werden. Auf diese Weise können wir bei



Enthalpiekurven der PCM-Emulsionen (PCME), Kühlkurven gestrichelt, Heizkurven durchgezogen.

gleichem Volumen die doppelte bis dreifache Speicherdichte von Wasser erreichen. Zugleich wird durch die Wärmeabgabe und -aufnahme im Schmelz- bzw. Kristallisationsprozess des PCM eine sehr homogene Temperierung der Komponenten selbst bei geringen Volumenströmen erreicht. Für Industriekunden oder Gebäudebetreibende bietet das entscheidende Vorteile: So können beispielsweise die Volumenströme in hydraulischen Netzen ohne Reduktion der Wärmetransportleistung deutlich verringert werden bzw. bei gleichbleibendem Volumenstrom entsprechend mehr Wärme transportiert werden.

Alle im Projekt entwickelten Emulsionen wurden anwendungsnah in einem hydraulischen Testkreis mit Zentrifugalpumpe, verschiedenen Ventilen, Membranausgleichsgefäß und Plattenwärmeübertrager thermomechanisch getestet und überstehen mindestens 10 000 Zyklen. Bei den Experimenten haben wir bis zu 100 000 Zyklen durchgeführt. Dabei haben wir die PCM-Emulsionen zunächst im Labormaßstab mit Herstellungsmengen von bis zu 5 Litern entwickelt, charakterisiert und getestet. Im zweiten Schritt wurden die Rezepturen zur Herstellung in den Techniksmaßstab überführt und Mengen von bis zu 100 Litern hergestellt. Ein weiteres Upscaling in den Kubikmeter-Maßstab wird durch unseren Industriepartner H&R Wax & Specialties GmbH durchgeführt. So können die PCM-Emulsionen industriell auch in großen Mengen hergestellt werden und stehen für eine Demonstration in Gebäude- oder Industrieanwendungen zur Verfügung.

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



Herstellung von PCM-Emulsionen im Labor.

Kontakt

Stefan Gschwander
Telefon +49 761 4588-5494
stefan.gschwander@ise.fraunhofer.de



Industrieprozesse dekarbonisieren: Konzepte für Wärmerückgewinnung und den Einsatz von Wärmepumpen

Die Industrie steht vor der Aufgabe, in den kommenden Jahrzehnten ihre Prozesse von fossilen auf erneuerbare Energien umzustellen. Thermische Prozesse stellen dabei eine besondere Herausforderung dar. Hier spielen nicht nur die Energiemengen, sondern zusätzlich auch die notwendigen Temperaturniveaus eine wichtige Rolle. Dies gilt insbesondere für die Wärmerückgewinnung und den Einsatz von Wärmepumpen. In dem Zuge gewinnt der methodische Ansatz der Prozessintegration weiter an Bedeutung: Er adressiert die thermische Interaktion zwischen einzelnen Prozessen. Darüber hinaus sind energetische Optimierungen bei den Einzelprozessen sowie alternative Energieversorgungsansätze für die Bereitstellung notwendig.

Damit Dekarbonisierungskonzepte kostengünstig und zielgerichtet umgesetzt werden können, bedarf es einer durchgängigen, integrierten Methodik. Dies gilt vor allem für den großflächigen Einsatz von neuen Technologien wie Industriewärmepumpen. Die Methodik umfasst folgende Schritte:

- Datenerhebung
- energetische Optimierung der einzelnen Prozesse
- Ermittlung des Potenzials von Wärmerückgewinnung
- Konzeptentwicklung zum Einsatz von Wärmepumpen sowie thermischen Speichern und
- Einsatz erneuerbarer Energien zur Abdeckung verbleibender Energiebedarfe.

Für die Prozessintegration spielt die Pinch-Analyse eine wichtige Rolle. Mit dieser Analyse können effizient ökonomisch optimierte Konzepte für die direkte Wärmerückgewinnung und den Einsatz von Wärmepumpen sowie die Integration weiterer Technologien wie Solarthermie, Kraft-Wärme-Kopplung oder thermische Speicher entwickelt werden. Beispiele aus unserer Projektarbeit am ISE zeigen, dass mit dieser Methode

signifikante und techno-ökonomisch optimierte Reduzierungen der CO₂-Emissionen möglich sind, bei vergleichsweise begrenztem Aufwand für die Konzepterstellung.

Bei Koehler Paper am Standort Kehl konnten wir mit diesem Ansatz Möglichkeiten aufzeigen, wie sich der Erdgasverbrauch stark reduzieren lässt. In diesem Fall wendeten wir die Pinch-Analyse an, um Optimierungspotenziale für die gesamte Liegenschaft mit Papiermaschinen und eigenem Kraftwerk aufzuzeigen und um die potenzielle Anbindung an ein Fernwärmenetz zu untersuchen. Neben der Optimierung der internen Wärmerückgewinnung mit Wärmeübertragern wurden auch verschiedene Konzepte der Dampferzeugung mit Wärmepumpen entwickelt.

Bei der Firma Adelholzer Alpenquellen GmbH nutzten wir die Pinch-Analyse, um ein Konzept zu entwickeln, mit dem das Unternehmen zukünftig energiebedingte CO₂-Emissionen vermeiden kann. Neben der verbesserten direkten Wärmerückgewinnung bildeten wir auch eine techno-ökonomisch optimale Integration von Industriewärmepumpen ab. Wesentliche Elemente des Konzeptes sind die Nutzung der Abwärme aus der Kälteanlage sowie aus dem Abwasser mit Großwärmepumpen, Optimierung der internen Wärmerückgewinnung mit Wärmepumpen sowie der Einsatz thermischer Speicher.

Unsere Arbeiten zeigen, dass sich die Pinch-Analyse dafür eignet, Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen für Heizen und Kühlen in der Industrie abzuleiten. Sie unterstützt dabei, Konzepte für den Einsatz von verschiedenen Technologien zur Emissionsminderung wie zum Beispiel Wärmepumpen, Solarthermie, thermische Speicher und BHKW zu entwickeln, und ermöglicht es, die Technologien im Industriekontext unter techno-ökonomischen Gesichtspunkten zu bewerten und zu optimieren.

Am Fraunhofer ISE entwickeln wir Konzepte zur Dekarbonisierung von Industrieprozessen.



Kontakt

Dr. Wolfgang Kramer
 Telefon +49 761 4588-5096
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

Lernprüfstand für Hochtemperatur-Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel

Rund die Hälfte des Endenergieverbrauches in Deutschland entfällt auf Wärmeanwendungen (Heizen und Prozesswärme) in Gebäuden und Industrie. Ein Großteil dieser Energie stammt derzeit noch aus fossilen Quellen. Eine Möglichkeit, sowohl industrielle Prozesswärme bis 200°C als auch Fernwärme zu dekarbonisieren, bieten Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP), die mit erneuerbar erzeugtem Strom betrieben werden können. Damit der Einsatz von HTWP gelingt, braucht es effiziente Kreislaufprozesse und gleichzeitig qualifizierte Fachkräfte, die diese einbauen, bedienen und warten können.

Im Rahmen des Verbundvorhabens »KETECC« gehen wir diese Herausforderungen an. Konkret erproben wir die Verwendung natürlicher Kältemittel in HTWP und entwickeln Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Dafür haben wir am Fraunhofer ISE ein Wärmepumpenfunktionsmuster als Lernprüfstand geplant, der mit n-Butan (R600), einem natürlichen Kältemittel, betrieben wird. Mit der Wärmepumpe ist es möglich, Nutzttemperaturen bis 140°C bei einer Wärmeleistung bis zu 40 kW bereitzustellen. Die Inbetriebnahme startete im Juni 2024. Wir konnten bereits eine Nutztemperatur von über 130°C und Temperaturhübe bis 100K erzielen. Das flexible Einstellen der Quellen- und Senkentemperaturen sowie der Volumenströme ermöglicht ein am Fraunhofer ISE aufgebautes Hydraulikmodul.

Eine Besonderheit des Wärmepumpenfunktionsmusters ist sein Aufbau mit vielfältigen Verschaltungsmöglichkeiten. Dieser besteht aus zwei Verdichtern, einem Verflüssiger, einem Unterkühler, einem internen Wärmeübertrager und zwei Verdampfern. Durch das Hinzuschalten eines Economizers kann das Arbeitsmedium (R600) zweistufig verdichtet werden. Den einfachen Kreislauf mit vier Komponenten, so wie er häufig auch in der Kältetechnik eingesetzt wird, nutzen wir als Referenz für den Vergleich der Verschaltungen. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung eines internen Wärmeübertragers eine leicht umsetzbare und

kostengünstige Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz ist. Die zweistufige Verdichtung ist gerade bei hohen Temperaturhüben zwischen der Wärmequelle und -senke von Vorteil. Dabei kann je nach Verschaltung, ob mit offenem oder geschlossenem Economizer, das Heißgas der ersten Verdichtungsstufe gekühlt oder weiter überhitzt werden. Die Parallelverdichtung wird in der Regel zur Leistungssteigerung eingesetzt. Außerdem kann während des Betriebs das Arbeitsmedium in einen abgetrennten Behälter ein- und ausgelagert werden, um Störsituationen wie Über- oder Unterfüllung sichtbar zu machen. Die zahlreichen Sensoren und Schaugläser ermöglichen die Nachverfolgung der Zustandsänderungen innerhalb des Kreislaufs und helfen somit, die thermodynamischen Zusammenhänge auch für komplexe Verschaltungen und Störsituationen nachzuvollziehen.

Ergänzend dazu erstellen wir derzeit ein digitales Lernmodul, das Grundlagenwissen zu (Hochtemperatur-)Wärmepumpen vermittelt und auf Arbeiten mit dem Wärmepumpenfunktionsmuster vorbereitet. Der physikalische Aufbau gekoppelt mit dem digitalen Lernmodul kann somit gewinnbringend in der Lehre eingesetzt werden.

Das Verbundvorhaben »KETECC« wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Hydraulikmodul zum flexiblen Einstellen der Quellen- und Senkentemperaturen bei der Überführung ins Labor.



Kontakt

Hannah Teles de Oliveira
Telefon +49 761 4588-5141
hannah.teles.de.oliveira@ise.fraunhofer.de

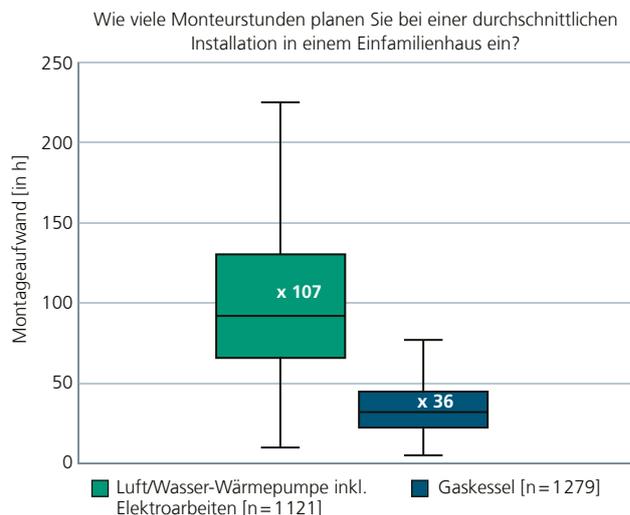


Digitalisierung für das Heizungsgewerk: Handwerk bei der Umsetzung der Wärmewende unterstützen

Handwerksbetriebe sind entscheidende Akteure der Energiewende. Dem Beruf des Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnikmechanikers (SHK) bzw. der SHK-Anlagenmechanikerin kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. So werden durch die zu erwartende vermehrte Installation von Wärmepumpen zukünftig neue Herausforderungen und Aufgaben auf SHK-Monteur zu kommen – bei einem weiterhin knappen Fachkräfteangebot. Um die notwendigen Produktivitätssteigerungen zu erreichen, kann Digitalisierung betroffene Betriebe bei der Bestandserfassung, Planung, Materialvorbereitung und Installation unterstützen und wesentlich entlasten. Dabei ist eine durchgängige Datenhaltung zwischen den Anwendungen und Prozessschritten entscheidend.

Angesichts dieser Herausforderung arbeiten wir am Fraunhofer ISE im Rahmen von zwei Forschungsprojekten an digitalen Anwendungen für Handwerksbetriebe. Im BMBF-Projekt »DiBesAnSHK: Digitalisierung der Bestandsaufnahme und Angebotserstellung im SHK-Handwerk« entwickeln wir eine KI-basierte Bilderkennung für Heizungskomponenten sowie einen Generator, der auf Basis von Angebotsinformationen und den mittels Bilderkennung identifizierten Komponenten valide Hydrauliksysteme erstellen kann. Diese Daten werden in einem zentralen Anlagendatenmodell gespeichert und mit Informationen aus öffentlichen Quellen zu den Komponenten verknüpft. Wichtige Informationen zur weiteren Auftragsabwicklung, z. B. für den Kundenservice, stehen den Handwerksbetrieben somit gebündelt zur Verfügung und ermöglichen effiziente Prozesse.

Unser Forschungsprojekt »WESPE: Wärmepumpen – Einbau schneller, produktiver und effizienter – handwerkliche Umrüstprozesse optimieren« konzentriert sich auf den gesamten Auftragsabwicklungsprozess. Wir analysieren den Prozessablauf einer Vielzahl von SHK-Betrieben, z. B. durch Interviews, Vor-Ort-Begleitung und Videoanalysen, um Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren. Grund hierfür sind die deutlich längeren Installationszeiten bei Wärmepumpen gegenüber Heizkesseln – wie Umfrageergebnisse zeigen, planen Handwerksbetriebe für diese fast dreimal so viel Zeit ein (siehe Grafik). Zusammen mit einer Vielzahl von Produktherstellern und Großhändlern als Industriepartnern adressieren wir das Thema Digitalisierung auf Basis von Datenmodellen, mit Fokus auf Schnittstellen, Integration und Verfügbarkeit der Komponentendaten. Um die identifizierten Optimierungspotenziale zu heben, entwickeln wir im Rahmen des Projekts ein Augmented Reality-Tool zur Bilderkennung von Heizungskomponenten.



Umfragen unter über 1 000 SHK-Betrieben ergaben höhere Installationszeiten von Wärmepumpen gegenüber Gaskesseln.

Erste Ergebnisse unserer Prozessanalysen zeigen, dass vor allem an den Schnittstellen zwischen Herstellern und Betrieben sowie innerhalb der Betriebe zwischen Büro und Baustelle Verbesserungspotenziale bestehen. Wir arbeiten daher eng mit Herstellern und Handwerksbetrieben zusammen, um die Informationsflüsse an diesen Schnittstellen zu optimieren und zu vereinheitlichen. So sollen Handwerker ihre begrenzten Ressourcen künftig sinnvoll für ihr Kerngeschäft, d. h. die Installation und Wartung von Anlagen, einsetzen können.

Das Projekt »DiBesAnSHK« wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Das Projekt »WESPE« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Digitale Bilderkennung hilft Monteuren bei der Installation.



Kontakt

Annette Uhl
 Telefon +49 761 4588-5868
annette.uhl@ise.fraunhofer.de



Gebäude-Wärmepumpen mit Propan – Geräteentwicklungen für den Austausch von Gas- und Ölheizungen

Wärmepumpen und Fernwärme sind die wichtigsten Technologien zur Dekarbonisierung unserer aktuell noch überwiegend fossil gefeuerten Heizungen. Wärmepumpen nutzen Strom mit einem Faktor von 3 bis 4 zur Bereitstellung von Heizwärme und verwenden so den zunehmend aus regenerativen Energien bereitgestellten Strom hocheffizient.

Kontinuierliche Marktanalysen zeigen: Für den Neubau und zunehmend auch die Sanierung von Einfamilienhäusern hat sich die Technologie der Wärmepumpe bereits etabliert. Hier finden überwiegend außen aufgestellte Luft-Wasser-Wärmepumpen Anwendung. Herausfordernd ist nach wie vor der Gebäudebestand mit eingeschränktem Platz innen und außen. Die mit der Revision der F-Gasverordnung nahezu zwingende Anforderung, natürliche Kältemittel wie z. B. das effiziente, klimafreundliche Propan zu verwenden, erfordert zusätzliches Augenmerk.

Mit mehreren Projekten setzen wir am Fraunhofer ISE an dieser Fragestellung mit konkreten Geräte- und Systemkonzeptentwicklungen an, zwei sollen hier vorgestellt werden. Im Projekt »[LCR290](#)« erarbeiten wir drei exemplarische Lösungen für den aktuellen Bedarf im Gebäudebestand: Wärmepumpengeräte als Austausch für Gasetagenheizungen und mit größerer Leistung als Austausch für Öl- und Gasheizungen im Keller sowie für die Außenaufstellung. Diese Konzepte entwickeln wir unter Begleitung eines Beirats aus 13 Wärmepumpenherstellern und fünf Unternehmen der Wohnungswirtschaft und stellen die Konzepte unseren Partnern für die weitere Anwendung zur Verfügung.

Zur Auslegung der Geräte haben wir eine breite Analyse des deutschen Wohnungsbestands in Bezug auf typische Wohnungsgrößen, Energieeffizienzklassen und Heizungssysteme vorgenommen und daraus die Leistungsklassen von 4 bis 6 kW für die Gasetagenheizungen und 25 bis 30 kW für die



Kältemittelreduzierter Wärmepumpenprüfling für die Außenaufstellung mit 25 bis 30 kW Leistung, entwickelt und aufgebaut am Fraunhofer ISE.

zentralen Heizungsanlagen als relevant abgeleitet. Die Geräteprüflinge sind in der Umsetzung und in den ersten Labor-Messkampagnen. Erste Ergebnisse zeigen, dass sich für das wandhängende Gerät eine Füllmenge von weniger als 150 g Propan gut realisieren lässt, für die Kelleraufstellung mit 30 kW sind maximal 900 g Propan geplant. Alle drei Konzepte werden in ihrem Betriebsverhalten analysiert und geeignete Sicherheitskonzepte durch Ausströmmessungen unterschiedlicher Havarieszenarien identifiziert und bewertet.

Im Projekt »[HP-PVT4.0](#)« entwickeln wir ein System aus einer Wärmepumpe, Speichern und PVT-Kollektoren. PVT-Kollektoren machen die Abwärme der PV-Module und der hinterströmenden Außenluft thermisch nutzbar – dadurch können sie als Wärmequelle für die Wärmepumpe eingesetzt werden. Besonderes Augenmerk liegt auf der guten Systemintegration und -regelung sowie der Verwendung natürlicher Kältemittel. Für den Heizbetrieb wird die Nutzung eines speicherintegrierten Kondensators untersucht. Um Propan als Kältemittel auch hier anwendbar zu machen, haben wir zwei Ansätze mit geringen Füllmengen identifiziert, die aktuell vermessen werden.

Die Projekte »[LCR290](#)« und »[HP-PVT4.0](#)« werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Kontakt

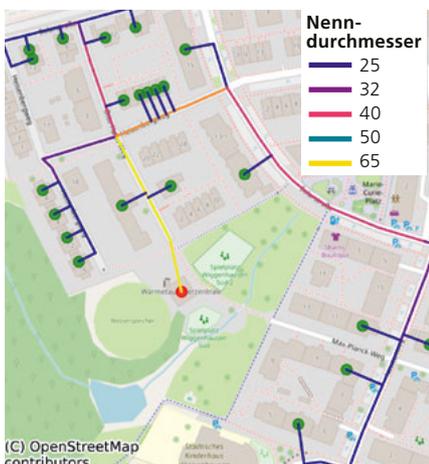
Dr.-Ing. Lena Schnabel
Telefon +49 761 4588-5412
lena.schnabel@ise.fraunhofer.de



Lösungen zur Transformation von Wärmenetzen

Der Ausbau von Wärmenetzen ist ein wichtiger Baustein für das Gelingen der Wärmewende. Ein großer Vorteil von Wärmenetzen: Sie können auch entfernt liegende, erneuerbare Wärmequellen für die Energieversorgung nutzen. So kann mithilfe von Wärmepumpen Umweltwärme aus Flüssen, Abwässern oder geothermischen Quellen zur Wärmeversorgung von Gebäuden oder Industrieanlagen erschlossen und über die Netze bereitgestellt werden. Auch kann industrielle Abwärme oder Wärme aus Solarthermiekollektoren, die sich häufig an Stadtgrenzen befinden, bei vorhandenen Netzen zur Energieversorgung von Wohngebieten beitragen. Wärmespeicher ergänzen dieses System, indem sie die fluktuierenden Wärmeströme dem tatsächlichen Wärmebedarf anpassen.

Machbarkeitsstudien des Fraunhofer ISE zeigen, dass der Ausbau von Wärmenetzen besonders in Gebieten mit einer hohen Verbrauchsdichte sowie nahegelegenen und geeigneten Wärmequellen zielführend ist. Durch die zunehmende Erschließung von Umweltwärmequellen entwickeln sich diese Netze jedoch immer mehr zu Systemen mit vielen dezentralen Einspeisequellen. Im Vergleich zu vielen bestehenden Netzen, die nur über eine zentrale Heizzentrale verfügen, erhöht sich der Regelungsaufwand dabei massiv. So steht Umweltwärme nicht immer bedarfsgerecht zur Verfügung und wird oft auf unterschiedlichen Temperaturniveaus ins Netz eingespeist. Während konventionelle Netze mit einfachen Regelkreisen auskommen, erfordern diese komplexeren Netze erfahrene Betriebsführer oder aber intelligente, vernetzte Regelungsstrategien, um einen kostenoptimalen Betrieb zu ermöglichen und Versorgungssicherheit zu gewährleisten.



Das »Reallabor Großwärmepumpen« und das Projekt »WOpS« werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Die Abbildung zeigt eine beispielhafte Planung eines kostenoptimal strukturierten Wärmenetzes.

Um diesem Problem zu begegnen, arbeiten wir im Projekt »WOpS – Wärmefluss-Optimierung zur Sektorkopplung« an der Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung zur optimalen Einsatzplanung der dezentralen Wärmeerzeuger. Dafür wird eine Lastprognose aus historischen Verbrauchsdaten erstellt und die Einspeisung der einzelnen Erzeuger entsprechend ihrer Wärmeerzeugungskosten und unter Berücksichtigung technischer und hydraulischer Restriktionen optimiert.

Im »Reallabor Großwärmepumpen – Reallabore der Energie-wende« erschließen wir ein weiteres Forschungsfeld zum Thema. Während kleinskalige Wärmepumpen für die Gebäudeheizung eine fest etablierte Technologie darstellen, werden Großanlagen noch nicht flächendeckend genutzt, auch sind die Planungs- und Genehmigungsprozesse noch nicht ausreichend standardisiert. Im Rahmen des Reallabors begleiten wir die Installation und den Betrieb entsprechender Anlagen. Ziel ist es dabei insbesondere, Erfahrungen hinsichtlich des Betriebs der Anlagen im Kraftwerksverbund von Bestandsanlagen sowie mit wechselnden Quell- und Senkentemperaturen zu sammeln. Gleichzeitig sollen die Analysen den komplexen Planungs- und Genehmigungsprozess von Großwärmepumpen erleichtern.

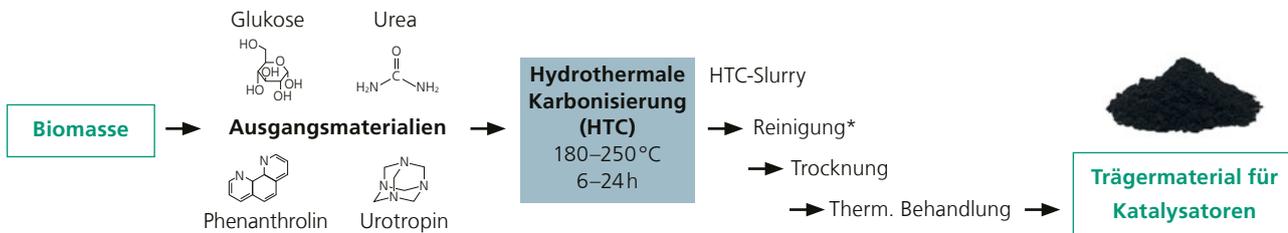
Darüber hinaus begleiten wir diverse Ausbau- und Transformationsprozesse von Wärmenetzen, darunter die Planung des Fernwärmeverbundes am Hochrhein. Hier soll die flächendeckende Wärmeversorgung im Landkreis Lörrach unter Nutzung ländersübergreifender, industrieller Abwärmequellen erfolgen. Mit unserer Arbeit möchten wir die gesamte Kette von Planung, Genehmigung und Betrieb zukunftsfähig machen, um eine CO₂-neutrale Wärmebereitstellung in Wärmenetzen zu erreichen. Auf diese Weise sollen der Ausbau von Wärmenetzen erleichtert und mehr erneuerbare Wärme- oder Abwärmequellen nutzbar gemacht werden.

Kontakt

Axel Oliva
Telefon +49 761 4588-5698
axel.oliva@ise.fraunhofer.de



Optimierung der katalytischen Wasserstofferzeugung aus Ammoniak mit Biomassematerialien



* Ein Reinigungsschritt nach HTC in Wasser und Ethanol ist notwendig, um Verunreinigungen, Nebenprodukte und Rückstände von Lösungsmitteln zu entfernen, die die Qualität, Stabilität und den vorgesehenen Gebrauch des Endprodukts negativ beeinflussen können.

Darstellung der Syntheseschritte zur Herstellung von Kohlenstoffträgermaterial.

Unser künftiges Energiesystem hängt u. a. davon ab, wie der Transport von Wasserstoff organisiert wird. Im Rahmen des Leitprojekts »TransHyDE« beschäftigen wir uns gemeinsam mit zahlreichen Partnern damit, eine Wasserstoff-Infrastruktur weltweit und innerhalb Deutschlands zu entwickeln und zu realisieren. Ammoniak, das aus grünem Wasserstoff hergestellt wird, gilt als wichtiges (Wasserstoff-)Syntheseprodukt für erneuerbaren Strom, da Hafens- und Transportinfrastruktur vorhanden sind sowie ein regulatorischer und normativer Rahmen besteht.

Die zentrale Fragestellung im TransHyDE-Projekt »AmmoRef« ist die effiziente Rückgewinnung von reinem Wasserstoff aus Ammoniak. Um die Umsetzung von Anlagen zu beschleunigen, befassen wir uns mit weiteren Forschungspartnern mit dem Katalysator als der wesentlichen Prozesskomponente. Zudem führen wir Untersuchungen in Laboren durch, um die Grundlagen von Effizienzverbesserungen zu verstehen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung neuer Katalysatoren, die ohne Edelmetalle auskommen und langzeitstabil sind. »AmmoRef« zielt darauf ab, sowohl Hoch- als auch Niederdruckverfahren zur Wasserstoffrückgewinnung aus Ammoniak zu optimieren und nachhaltiger zu machen.

Das Fraunhofer ISE entwickelt hierfür in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion (MPI-CEC) Nichtedelmetallkatalysatoren mit Kohlenstoffmaterialien als Trägermaterial, die mittels hydrothormaler Karbonisierung (HTC) hergestellt werden. Während des HTC-Verfahrens kann Kohlenstoff mit angepassten elektronischen und strukturellen Eigenschaften synthetisiert werden, sodass Metallspezies in Wechselwirkung mit dem angepassten Kohlenstoffmaterial effektiver als herkömmliche Katalysatoren arbeiten. Stickstoffhaltige Ausgangsmaterialien aus Biomasse stehen besonders im Fokus, da Stickstoff die Reaktivität, Adsorptionseigenschaften, elektrische Leitfähigkeit und Oberflächen beeinflussen kann.

In Rahmen von »AmmoRef« erhalten wir vom MPI-CEC Kohlenstoffmaterialien auf Basis von Glukose, Urea, Phenanthrolin und Urotropin, die wir mit Eisen, Cobalt, Nickel oder einer Kombination aus zwei Nichtedelmetallen imprägnieren. Im Anschluss erfolgt die Messung der Katalysatoraktivität mit reinem Ammoniak in einem Temperaturbereich von 400 bis 600 °C. Durch die Kombination mit der Charakterisierung des Materials, zum Beispiel Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), können wir Rückschlüsse auf Reaktionsmechanismen und aktive Zentren von Katalysatoren ziehen. Die höchsten Aktivitäten zeigen sehr kostengünstig herstellbare monometallische Eisen-Katalysatoren ohne thermische Nachbehandlung – damit bestätigt sich der wesentliche Einfluss des Trägermaterials auf die Wasserstofferzeugung aus Ammoniak. Die Langzeitstabilität und Beschichtungseigenschaften von Kohlenstoffen bleiben wichtige Forschungsfelder, wobei wir Fragen zur Beschichtung im neu gestarteten Projekt »AmmoCatCoat« untersuchen werden.

Kontakt

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

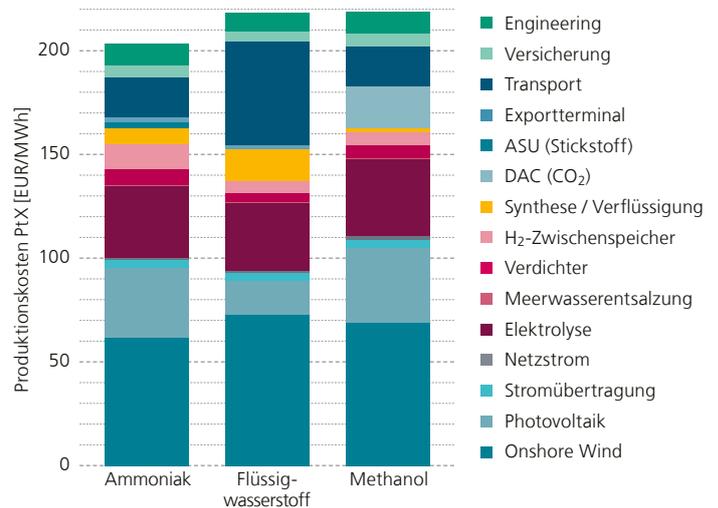
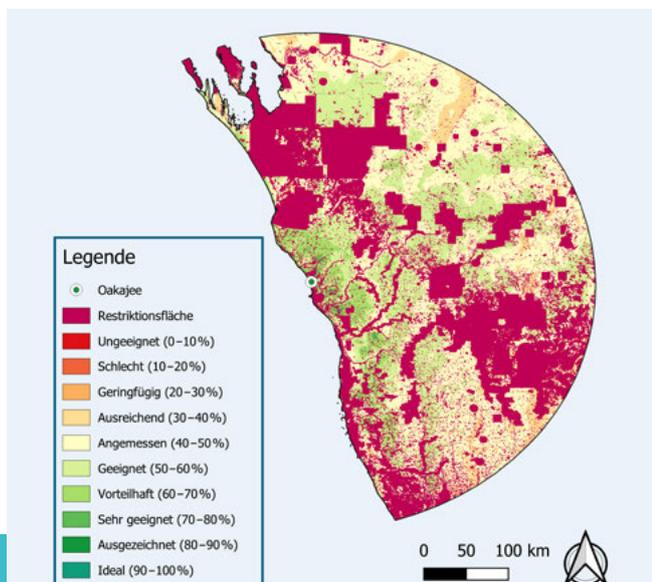
Die Projekte »TransHyDE«, »AmmoRef« und »Ammo-CatCoat« werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



Machbarkeitsanalyse zum Import von grünem Ammoniak aus Australien über Rotterdam nach Deutschland

Deutschland ist auf den Import erneuerbarer Energieträger wie »grünen Wasserstoff« angewiesen. Australien kommt hier als Exportland eine Schlüsselrolle zu, da sich der Kontinent durch eine hohe Flächenverfügbarkeit bei gleichzeitig hohen mittleren Windgeschwindigkeiten und Sonneneinstrahlungen auszeichnet. Im Rahmen des trinationalen Projekts »TrHyHub« haben wir gemeinsam mit der Mid-West Port Authority von Westaustralien und dem Hafen Rotterdam eine umfassende Machbarkeitsanalyse für den Export von grünem Wasserstoff und Derivaten wie Ammoniak durchgeführt. Am ISE haben wir die gesamte Lieferkette und die damit verbundenen spezifischen technologischen Lösungen für den Export von jährlich drei Millionen Tonnen Ammoniak aus Westaustralien über den Rotterdamer Hafen zu deutschen Abnehmern ab 2030 untersucht.

Zur Ermittlung der Potenziale haben wir in einem ersten Schritt anhand einer hochauflösenden GIS-Analyse Ausschlussflächen für erneuerbare Energien bestimmt und anschließend das theoretische Flächenpotenzial ermittelt. Mithilfe einer im Projekt entwickelten Multikriterien-Entscheidungsanalyse konnten wir diejenigen Flächen identifizieren, die sich am besten für die Installation von Windenergie- und Photovoltaikanlagen im Gigawattmaßstab eignen (Abb. unten). Anschließend erfolgte eine detaillierte techno-ökonomische Optimierung der Prozesskette sowie des Transports der Derivate zum Hafen von Rotterdam. Hierzu haben wir ein technisches Modell in der Toolbox »H2ProSim« (Hydrogen Process Simulation) aufgebaut und unter Verwendung eines Optimierungsalgorithmus die kostenoptimale Auslegung der Komponenten ermittelt. Dabei wurde auch die variable Stromerzeugung und das eingeschränkte Betriebsfenster der Wasserstoffderivatherstellung berücksichtigt.



Zusammensetzung der Importkosten für verschiedene Power-to-X (PtX)-Energieträger im Jahr 2030.

Für die Herstellung der geforderten Ammoniakmenge von 3 Mio. Tonnen bzw. des Energieäquivalents werden im Kostenoptimum rund 6,9 GW Photovoltaik und 5,5 GW Windenergie benötigt, die eine Elektrolyse mit einer Eingangsleistung von 4,4 GW versorgen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Herstellung von flüssigem Wasserstoff, Ammoniak und Methanol und deren Transport nach Europa bereits im Jahr 2030 zu Energiekosten von unter 225 € pro MWh realisierbar sind (Abb. oben). Den größten Anteil an den Gesamtkosten hat in allen Szenarien die Strombereitstellung. Während die Technologie für die »Ammoniakroute« bereits industrielle Anwendung findet, sind für die Herstellung und den Transport von flüssigem Wasserstoff und Methanol – unter Nutzung der »Direct-Air-Capture-Technologie« (DAC) zur CO₂-Bereitstellung – noch technische Weiterentwicklungen erforderlich. Unsere Analysen zeigen, dass bis 2050 die Importkosten nahezu halbiert werden könnten.

Das Projekt »TrHyHub« wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Kontakt

Marius Holst
 Telefon +49 761 4588-2027
marius.holst@ise.fraunhofer.de

Ergebnis der GIS-Analyse zur Eignung für Onshore-Windenergieanlagen in der Region Oakajee in Westaustralien.

Die Herstellung katalysatorbeschichteter Membranen für die PEM-Wasser-Elektrolyse effizienter gestalten

Bei der Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse) wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, wobei flexibel Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt werden kann. Was sinnvoll klingt, wird durch hohe Herstellungskosten getrübt: Teure Katalysatormaterialien und fehlende Industrialisierungsprozesse behindern die flächendeckende Marktdurchdringung. Um die Herstellungskosten zu reduzieren und Wasserstoff als Energieträger attraktiver zu machen, gilt es unter anderem, die Verarbeitungsprozesse für das »Herzstück« des Elektrolyseurs, die katalysatorbeschichtete Membran (CCM), zu verbessern.

Die Herstellung einer CCM erfolgt in vier Schritten:

1. Dispergierung der Katalysatorfarben (Katalysatorpulver, Ionenaustausch-Polymer, Lösungsmittel)
2. Druck der Farben zu Katalysatorschichten (< 20 µm Dicke) auf Transferfolie
3. Trocknen
4. Transfer dieser Schichten auf die PEM durch Heißpressen

Jeder Schritt beeinflusst die Leistungsfähigkeit der CCM stark und muss detailliert optimiert werden. Im Rahmen des Projekts »OREO« haben wir ein Netzwerk von nationalen und internationalen Fachleuten auf dem Gebiet der CCM etabliert, um eine breite Palette an verschiedenen, industrierelevanten CCM-Herstellungsrouten zu evaluieren. Im Laufe des Projekts haben wir Schlitzdüse, Siebdruck, Spray- und Rakeldruckprozesse für die CCM-Herstellung verglichen und anschließend die Eigenschaften der Katalysatorfarben individuell verbessert. Die Ergebnisse zeigen eine sehr ähnliche Leistung der CCMs, wobei die Schlitzdüse wegen ihrer Eignung für kontinuierliche Rolle-zu-Rolle-Prozesse mehr Vorteile bietet.

Neben der Untersuchung von Massenfertigungsrouten ist es relevant, die eingesetzte Menge an Katalysatorpulver der CCMs substanziell zu reduzieren. Laut den vom US Department of Energy veröffentlichten technischen Zielen für die PEM-Elektrolyse soll der Gesamt-Edelmetallgehalt langfristig von momentan ~1 mg/cm² auf 0,125 mg/cm² reduziert werden – und dies bei einer Elektrolyseleistung von 1,6 V bei 3 A/cm² und 80 °C. Diese Reduzierung des Edelmetallgehalts bringt nicht nur produktionstechnische Herausforderungen mit sich, sondern auch im Hinblick auf die Lebensdauer und Leistung der CCMs.

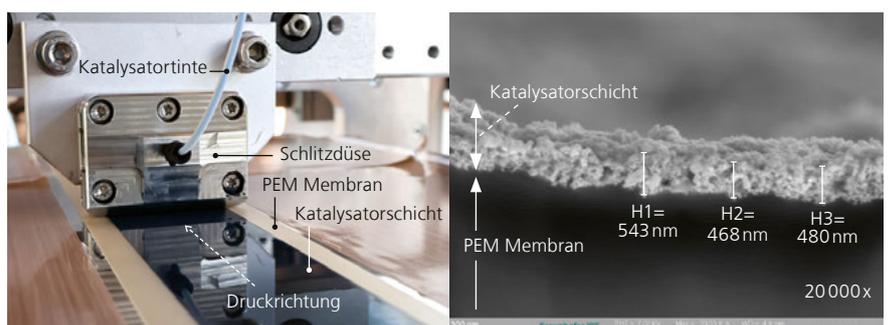
Seit Anfang 2024 arbeiten wir am Fraunhofer ISE im Rahmen des Verbundvorhabens »Hyfab3« an der Etablierung von Referenzherstellungsprozessen für CCMs mit reduziertem Edelmetallgehalt. Diese Prozesse sollen sowohl für die Wasserstoffherzeugung mittels PEM-Elektrolyse als auch für eine verwandte Technologie der anionischen Austauschmembran (AEM-Elektrolyse) anwendbar sein. Ziel ist es, ein Scale-up in der Zellfläche sowie hohe Durchsatzraten für den bevorstehenden Markthochlauf von CCMs zu ermöglichen. Uns ist es bereits gelungen, Elektroden mit einer Dicke von ca. 0,5 µm und einem Edelmetallgehalt von unter 0,1 mg_{Iridium}/cm² herzustellen, womit wir die Anforderungen des US Department of Energy übertreffen konnten (siehe Abb.).

Im nächsten Entwicklungsschritt wollen wir die Schnittstelle zwischen den so gefertigten CCMs und den übrigen Zellschichten optimieren. Damit wollen wir sicherstellen, dass CCMs mit geringem Edelmetallgehalt weiterhin gut elektrisch kontaktiert werden können, um Leistungseinbußen zu verhindern.

Druckvorgang einer Katalysatorschicht im Schlitzdüsenprozess (links); Querschnittsbild einer 0,5 µm dicken Katalysatorschicht mit Edelmetallbeladung von 0,1 mg/cm² (rechts).

Kontakt

Jerónimo Horstmann de la Viña
Telefon +49 761 4588-2031
jeronimo.horstmann.de.la.vina@ise.fraunhofer.de



Lokales Betriebsverhalten in automotiven Brennstoffzellen

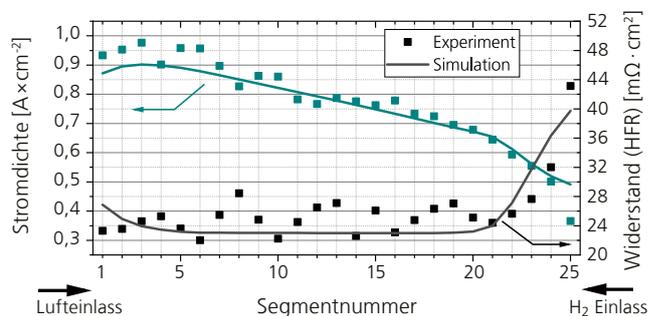
Automobile Betriebsbedingungen stellen hohe Anforderungen an ein Brennstoffzellensystem im Hinblick auf Dynamik, Leistungsdichte und Lebensdauer. Unser wissenschaftlicher Fokus liegt hierbei in der Untersuchung von inhomogenen Bedingungen und den daraus abzuleitenden Anforderungen an Material und Betriebsführung.

Für die Untersuchung von katalysatorbeschichteten Membranen (CCMs) werden in der Regel Zellen mit kleiner Fläche, sogenannte differenzielle Zellen, verwendet. Mit diesen Zellen kann der Materialeinsatz minimiert und es können konstante Betriebsbedingungen definiert eingestellt werden. Um deren Ergebnisse auf das Betriebsverhalten von CCMs im Automobilformat übertragen zu können, müssen zur Charakterisierung real vorkommende Betriebsbedingungen gewählt werden, da sich die lokalen Bedingungen im Brennstoffzellenstapel von Gaseinlass zu -auslass sowohl auf der Kathode als auch auf der Anode erheblich unterscheiden.

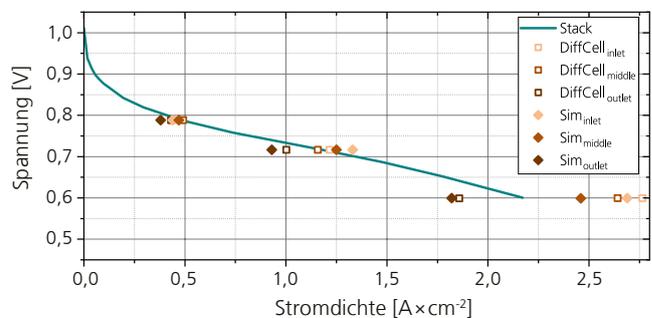
Die komplexe Wechselwirkung der Anoden- und Kathodenprozesse und die daraus resultierende, lokal inhomogene Stromdichte machen eine einfache Abschätzung der real vorliegenden lokalen Bedingungen, z. B. Partialdrücke und Temperaturen der Gase, allein aus der Kenntnis des Gesamtstroms und der Kühlmitteltemperaturen unmöglich. Um die real auftretenden lokalen Bedingungen innerhalb der Bipolarplatte zu bestimmen und geeignete Randbedingungen für Messungen mit der differenziellen Zelle zu erhalten, haben wir eine segmentierte Testzelle, die einen Ausschnitt einer automotiven Flussfeldgeometrie mit realer Kanallänge repräsentiert, entwickelt. Die daraus gewonnenen Daten bzgl. Stromdichte- und Widerstandsverteilung nutzen wir im Rahmen des Projekts »FC-CAT« zur Validierung eines 3D-CFD-Modells unseres Projektpartners AVL.

Abb. rechts oben zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Stromdichte- und Impedanzverteilungen der segmentierten Zelle mit 25 cm langen Parallelkanälen bei einer Zellspannung von 750 mV. Durch die Simulation der gekoppelten Prozesse mit diesem validierten CFD-Modell ermitteln wir die lokalen Bedingungen, die dann in differenziellen Zellen nachgestellt werden. So gewinnen wir belastbare Aussagen über das Verhalten der zu untersuchenden Membranelektrodeninheit in verschiedenen Regionen der aktiven Fläche im Brennstoffzellen-Stapel. Abb. rechts unten zeigt einen Vergleich der Polarisationskennlinie des Brennstoffzellen-Stapels und der mittleren Stromdichte in verschiedenen Regionen (Kathodeneinlass, -mitte, -auslass), nachgestellt in

der differenziellen Zelle und simuliert mit dem CFD-Paket von AVL-FireM. Die Ergebnisse liefern tiefere Einblicke in Verlustmechanismen, auf deren Basis die Optimierung der Katalysatorschichten angegangen werden kann.



Gemessene und simulierte Stromdichte- und Widerstandsverteilung entlang des Strömungskanal einer Brennstoffzelle.



Vergleich der Polarisationskennlinie des Brennstoffzellenstapels und der simulierten Stromdichte in verschiedenen Regionen der aktiven Fläche mittels CFD-Modell und differenzieller Zelle.

Das Projekt »FC-CAT« wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Kontakt

Dr. Dietmar Gerteisen
Telefon +49 761 4588-5205
dietmar.gerteisen@ise.fraunhofer.de



EnStadt:Pfaff – ein klimaneutrales Quartier entsteht



Altes Verwaltungsgebäude im Pfaff-Quartier, Kaiserslautern.

Die Energiewende erfordert technische, regulatorische und soziale Innovationen. Diese gilt es, auch auf lokaler Ebene zu etablieren und Planungs- und Entscheidungsprozesse entsprechend weiterzuentwickeln. Reallaborprojekte bieten hierfür einen wertvollen Forschungsrahmen. Im Projekt »EnStadt:Pfaff« haben wir gemeinsam mit sieben Projektpartnern aus Wissenschaft und Wirtschaft von 2017 bis Ende 2024 die Entwicklung des Pfaff-Quartiers in Kaiserslautern zu einem klimaneutralen Quartier begleitet und erforscht. Das Quartier entsteht auf einer innenstadtnahen Industriebrache von Kaiserslautern, wo zuvor das Traditionsunternehmen Pfaff 150 Jahre lang Nähmaschinen produziert hatte.

»EnStadt:Pfaff« wurde als Reallabor konzipiert, in dem innovative Technologien entwickelt und in der Praxis demonstriert und erprobt wurden. Grundlegend für »EnStadt:Pfaff« war eine ganzheitliche Betrachtung der Quartiersentwicklung mit

Klimaneutralität als übergeordnetem Ziel. Neben der Energieversorgung und Gebäudetechnik haben wir deshalb auch Anforderungen aus dem Städtebau, der Mobilität, der Digitalisierung, aber auch der Aufenthaltsqualität und der sozialen Teilhabe bearbeitet.

Auf Basis des klimaneutralen Energiekonzepts wurde eine Solargründachpflicht im Bebauungsplan festgesetzt. Die Wärmeversorgung erfolgt über ein Niedertemperatur-Wärmenetz gespeist aus dem Fernwärmerücklauf, ergänzt durch die Abwärmeeinspeisung einer Kältemaschine. In der Energiezentrale wird auch das bidirektionale Laden von E-Fahrzeugen erprobt. Darüber hinaus haben wir ein Mobilitätskonzept für ein autoarmes Quartier inklusive eines Geschäftsmodells für alternative Mobilitätsangebote erarbeitet, das Grundlage für die Stellplatzsatzung wurde. Digitale Lösungen ermöglichen eine effiziente Planung und den Betrieb klimaneutraler Quartiere, weshalb wir hierfür Onlineplattformen entwickelt haben.

Im Rahmen der Sanierung von zwei Bestandsgebäuden wurden Holzintegralfenster, fensterintegrierte Lüftungen und fassadenintegrierte farbige PV-Anlagen demonstriert sowie ein Leitfaden für die Sanierung von Denkmälern und eine Software für Lebenszyklusanalysen entwickelt. Zudem wurden im Vorhaben die Planungs- und Entscheidungsprozesse der Quartiersentwicklung untersucht.

Zur Kommunikation der Ergebnisse dient das Reallabor-Zentrum auf dem Pfaff-Gelände, das im Rahmen des Vorhabens entwickelt wurde. In einer Ausstellung werden hier die einzelnen Aspekte der Quartiersentwicklung, unterstützt durch Augmented Reality, vorgestellt. Für alle Akteurinnen und Akteure, die Quartiere planen und entwickeln, wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus »EnStadt:Pfaff« zielgruppengerecht aufbereitet und auf der Webseite <https://pfaffquartier-klimaneutral.de> bereitgestellt.

Kontakt

Gerhard Stryi-Hipp
Telefon +49 761 4588-5686
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

»EnStadt:Pfaff« wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Wärmepumpen für die Prozessindustrie: Technologieverständnis und Matchmaking

Die Wärmeversorgung von Industrieprozessen wird derzeit zum großen Teil durch fossile Energieträger gedeckt. Für den Umbau des Energiesystems hin zu einer CO₂-neutralen Wärmeversorgung sind Wärmepumpen ein wichtiger Baustein. Die Bereitstellung von Wärme bei Temperaturen über 100 °C ist mit Wärmepumpen allerdings deutlich aufwendiger als beim Einsatz von Verbrennungsprozessen. Dafür stehen unterschiedliche Technologievarianten zur Verfügung. Im Projekt »Identifikation von industriellen Wärmepumpen für die Prozesswärme (IdWPPro)« haben wir diese identifiziert und kategorisiert. Parallel dazu haben wir entlang von Wirtschaftszweigen analysiert, wie hoch der Prozesswärmebedarf in Deutschland ist. Je nach Branche und Prozess unterscheidet sich nicht nur die Wärmemenge, sondern auch das benötigte Temperaturniveau deutlich. Bei Prozessen, die Temperaturen zwischen 100 und 250 °C benötigen, können Hochtemperatur-Wärmepumpen sinnvoll zum Einsatz kommen – dies betrifft etwa die Papier-, Lebensmittel- und Chemiebranche.

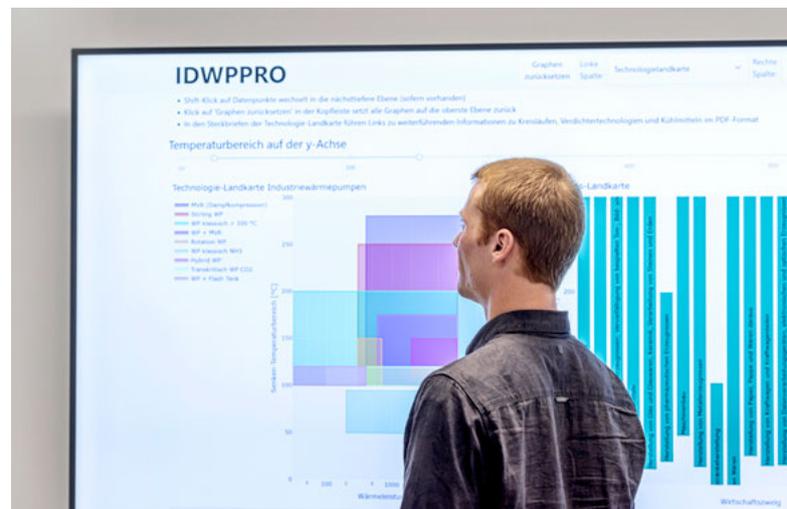
Im Projekt »IdWPPro« wollen wir die grundlegenden Eigenschaften herausarbeiten, in denen sich die einzelnen Wärmepumpentechnologien unterscheiden:

- dem zugrunde liegenden thermodynamischen Kreisprozess,
- der Verdichtertechnologie,
- dem Kältemittel.

Diese Einteilung erlaubt uns, in kurzer Zeit ein Matching mit dem zu versorgenden Prozess zu erzielen. So können beispielsweise Prozesse, die ihre Wärme über einen breiten Temperaturbereich nutzen, effizienter mit einer Wärmepumpentechnologie versorgt werden, die auf einem Joule-Prozess basiert.

Um leicht und in unterschiedlicher Detaillierungstiefe eine Gegenüberstellung von Wärmepumpentechnologien und zu bedienenden Prozessen zu ermöglichen, haben wir eine [interaktive Online-Plattform](#) entwickelt. Als zentrale Parameter werden dabei die gelieferte bzw. benötigte Wärmeleistung sowie das benötigte bzw. zur Verfügung gestellte Temperaturniveau dargestellt.

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



Im Rahmen des Projekts »IdWPPro« haben wir eine interaktive Technologie-Landkarte entwickelt, die verschiedene Konzepte von Industriewärmepumpen den unterschiedlichen Herstellungsprozessen gegenüberstellt.

Die Plattform richtet sich an Akteure aus Industrie, Gewerbe und Politik, die die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung vorantreiben möchten, sowie an Hersteller von Wärmepumpen und Forschende. Die Plattform bietet einen Überblick über marktverfügbare Systeme, eingeteilt nach Funktionsprinzip, Temperatur und Leistungsbereich. Die Funktionsweise von Wärmepumpen wird anhand der thermodynamischen Grundlagen prägnant erklärt. Außerdem machen wir die Ergebnisse einer Recherche zu den in Deutschland relevanten industriellen Prozessen und deren Prozesstemperaturen zugänglich. Neben der Informationsbereitstellung stellt die Plattform ein interaktives Dashboard bereit, das ein Matching der Wärmepumpen mit industriellen Prozessen ermöglicht.

Kontakt

Dr.-Ing. Ursula Wittstadt
Telefon +49 761 4588-2817
ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de



Transformation und Investitionen auf Bundeslandebene modellieren und analysieren

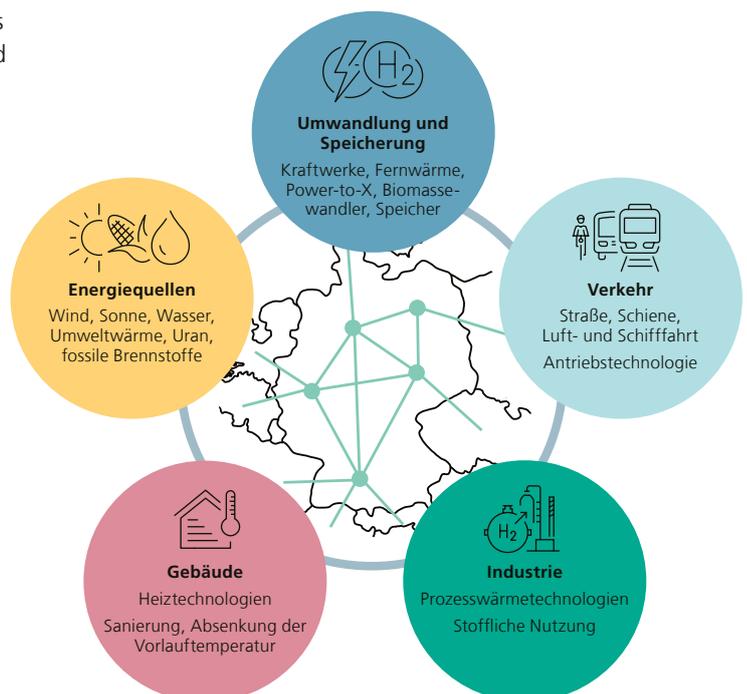
Angesichts der Zunahme von Extremwetterereignissen gewinnt der Klimawandel zunehmend an gesellschaftlicher Präsenz. Die Transformation des Energiesystems in Deutschland zur Erreichung von Klimaneutralität im Jahr 2045 befindet sich inzwischen mitten in der Umsetzung. Die Studie [»Wege zu einem Klimaneutralen Energiesystem: Transformationspfade deutscher Bundesländer«](#) analysiert neueste Entwicklungen im deutschen Energiesystem und formuliert konkrete Umsetzungsbausteine für jedes Bundesland. Die Studie greift Entwicklungen im deutschen Energiesystem wie die Prognose der Stromnachfrage, geopolitische Unsicherheiten, Infrastrukturplanungen wie den Stromnetzausbau und den Ausbau des Wasserstoffkernnetzes auf und kombiniert diese mit Transformationspfaden auf Bundeslandebene. Zur Analyse wurden zahlreiche Erweiterungen im Energiesystemmodell »REMod« implementiert, das wir am Fraunhofer ISE entwickelt haben. Eine wesentliche Neuerung ist die Regionalisierung des Modells, die es ermöglicht, Transformationspfade für 10 Regionen darzustellen und das Strom- und Wasserstoffnetz integriert zu betrachten.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Stromnachfrage durch Elektrifizierung und Sektorkopplung ansteigt, insbesondere durch Elektrolyse in nördlichen Bundesländern. Wir erwarten eine stärkere geografische Ungleichheit von Energieerzeugung und -bedarf, was neue Herausforderungen für neue Energienetze mit sich bringt. Für das Jahr 2045 ergibt sich aus der Optimierung, dass Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern aufgrund des hohen Windkraftpotenzials ein Drittel der deutschen Primärenergie bereitstellen werden. In Regionen mit viel Windkraft wird der Ausbau von Power-to-X-Technologien vorangetrieben, während in

PV-starken Bundesländern vermehrt stationäre Batteriespeicher installiert werden. Für eine optimale Energieverteilung sind der Ausbau bestehender Stromübertragungskapazitäten sowie eine umfangreiche Wasserstoffinfrastruktur notwendig, wobei insbesondere die Nord-Süd- und Nord-West-Verbindungen von zentraler Bedeutung sind. Zusätzlich wird in der Studie ein Szenario betrachtet, das auf wachsende geopolitische Unsicherheiten eingeht und in dem eine größere Robustheit des Energiesystems gegen diese Einflüsse untersucht wird. Die Ergebnisse weisen eine noch größere Bedeutung von Effizienz bei Wandlung und Verbrauch, einen noch größeren Ausbau von Wandlern erneuerbarer Energien und eine noch stärkere Elektrifizierung aus.

Mit der Weiterentwicklung des Modells »REMod« haben wir die Basis für noch tiefergehende Analysen im Hinblick auf mögliche Entwicklungen von Gesamtenergiesystemen geschaffen, bei denen zukünftig auch Fragen der räumlichen Auflösung detailliert untersucht werden können.

Mit dem Energiesystemmodell »REMod« untersuchen wir Entwicklungspfade des deutschen Energiesystems.



Kontakt

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

Veranstaltungen 2025 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE

Januar

BAU	München	13. – 17.01.2025
Batterieforum Deutschland	Berlin	21. – 23.01.2025
SPIE Photonics West	San Francisco, USA	28. – 30.01.2025

Februar

World Hydrogen MENA	Dubai, Vereinigte Arabische Emirate	04. – 06.02.2025
E-world Energy & Water	Essen	11. – 13.02.2025
LOPEC	München	26. – 27.02.2025

März

40. PV-Symposium	Bad Staffelstein	11. – 13.03.2025
PVinMotion	Miyazaki, Japan	12. – 14.03.2025
International Battery Seminar	Orlando, USA	17. – 20.03.2025
ISH	Frankfurt am Main	17. – 21.03.2025
Volta-X	Stuttgart	25. – 27.03.2025
Hannover Messe	Hannover	31.03. – 04.04.2025

April

SiliconPV	Oxford, Großbritannien	08. – 11.04.2025
OWPT Conference	Yokohama, Japan	22. – 25.04.2025
CO ₂ -based Fuels and Chemicals Conference	Köln	29. – 30.04.2025

Mai

Berliner ENERGIETAGE	online	05. – 07.05.2025
PCIM Europe	Nürnberg	06. – 08.05.2025
Intersolar/		
The smarter E Europe	München	07. – 09.05.2025
HOPV25	Rom, Italien	12. – 14.05.2025
tandemPV Workshop	Hasselt, Belgien	13. – 15.05.2025
Symposium Zukunft Wärme	Bad Staffelstein	20. – 22.05.2025
World Hydrogen Summit & Exhibition	Rotterdam, Niederlande	20. – 22.05.2025
Berliner ENERGIETAGE	Berlin	26. – 28.05.2025
EMRS Spring Meeting	Straßburg, Frankreich	26. – 30.05.2025

Juni

The Battery Show Europe	Stuttgart	03. – 05.06.2025
SNEC Photovoltaic Power Conference & Exhibition	Shanghai, China	11. – 13.06.2025
LASER World of Photonics	München	24. – 27.06.2025

Juli

AgriVoltaics	Freiburg	01. – 03.07.2025
--------------	----------	------------------

August

ICE International Conference on Electrolysis	Freiburg	25. – 29.08.2025
--	----------	------------------

September

CISBAT	Lausanne, Schweiz	03. – 05.09.2025
RE+	Las Vegas, USA	08. – 11.09.2025
PSCO	Perugia, Italien	15. – 18.09.2025
EUMETSAT Meteorological Satellite Conference	Lyon, Frankreich	15. – 19.09.2025
EU PVSEC	Bilbao, Spanien	22. – 26.09.2025
SolarPACES	Almería, Spanien	23. – 26.09.2025
European Hydrogen Week	Brüssel, Belgien	29.09. – 03.10.2025

Oktober

FVEE Jahrestagung	Berlin	07. – 08.10.2025
eMove360° Europe	München	14. – 16.10.2025
Hydrogen Technology Expo	Hamburg	21. – 23.10.2025
European Heat Pump Summit	Nürnberg	28. – 29.10.2025

November

ISES Solar World Congress	Fortaleza, Brasilien	04. – 07.11.2025
Agritechnica	Hannover	09. – 15.11.2025
Productronica	München	18. – 21.11.2025
DKV Tagung	Magdeburg	19. – 21.11.2025
12. Solarbranchentag	Stuttgart	27.11.2025
MRS Fall Meeting & Exhibition	Boston, USA	30.11. – 05.12.2025
IRES International Renewable Energy Storage and Systems	tba	tba

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

Impressum

Redaktion

Marie-Sophie Himmerich, Tobias Mickler
Christina Lotz (verantwortlich)

Anschrift der Redaktion

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

+49 761 4588-5150

info@ise.fraunhofer.de

www.ise.fraunhofer.de

Bestellung von Publikationen bitte per E-Mail.
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien

© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE,
Freiburg, 2025

Hier halten wir Sie auf dem Laufenden

Internet: www.ise.fraunhofer.de

Forschungsblog: blog.innovation4e.de

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

YouTube: [FraunhoferISE-official](https://www.youtube.com/channel/UCF8u3v1v1v1v1v1v1v1v1v1)

Bluesky: [Fraunhofer ISE](https://bsky.app/profile/fraunhoferise)

Konzeption und Gestaltung

[GrafikSüd](http://www.grafik-sued.de), Visuelle Wissenschaftskommunikation, Freiburg

Druck

Burger Druck GmbH, Waldkirch



Bildnachweise

Copyrights

Fraunhofer-Allianz Energie: Seite 7

GKM AG: Seite 12

INATECH Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: Seite 13

Fraunhofer CSP: Seite 55

Koehler Pressebild: Seite 63

EnStadt: Pfaff/Triolog: Seite 72

Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

Fotografinnen und Fotografen

Piotr Banczerowski: Seite 10 (unten rechts)

Philipp von Ditzfurth: Seite 10 (oben links)

Michael Eckmann: Cover

Joscha Feuerstein: Seite 35

Myriam Kaiser: Seiten 10 (unten links), 16/17, 40

Guido Kirsch: Seite 5

Dirk Mahler: Seiten 1, 4 (Bett, Henning, Glunz, Preu, Schossig),
11 (oben links), 19, 25, 42, 48, 50, 59, 62

Bernd Schuhmacher: Seiten 4 (Frei, Wittwer, Vormfelde), 23, 49

Michael Spiegelhalter: Seiten 10 (oben rechts), 27, 29, 31, 33,
37, 38, 46/47, 58, 60, 73

Kai-Uwe Wudtke: Seite 4 (Wirth)

Newsletter



Sie interessieren sich für unsere Forschung und Veranstaltungen?
Abonnieren Sie unsere Newsletter!

Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg

www.ise.fraunhofer.de



Jahresbericht 2024/25

