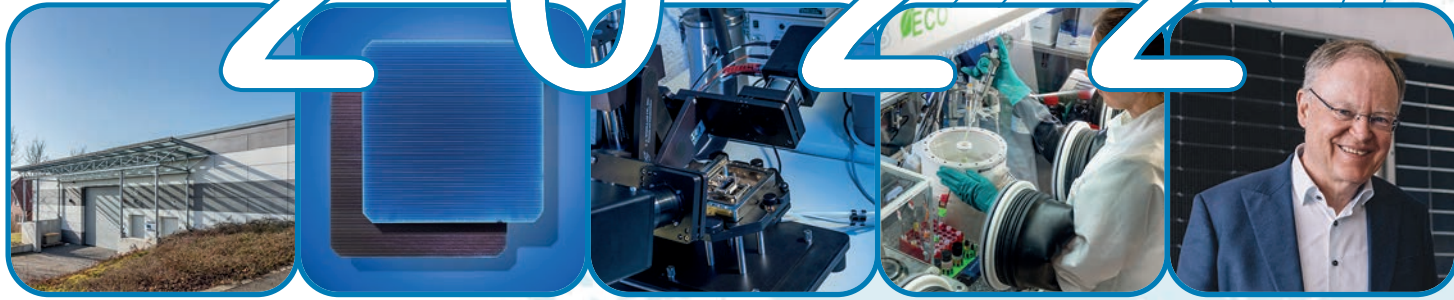


JAHRESBERICHT

ANNUAL REPORT

2022/23



An-Institut der

Leitbild

Erkenntnis. Das niedersächsische Institut für Solarenergieforschung (ISFH) leistet angewandte Forschung und Entwicklung für die Solarenergie. Mit wissenschaftlicher Erkenntnis und Innovationen tragen wir zum Ausbau der Solarenergie bei und leisten einen wichtigen Beitrag zur Energiewende. Es ist unser Anspruch, exzellente Leistung auf international anerkanntem Niveau zu erbringen.

Wirtschaftsförderung. Mit Entwicklungsarbeit und forschungsaktuellen Dienstleistungen auf höchstem Niveau fördern wir die Wirtschaft. Gemeinsam mit unseren Partnern lösen wir Entwicklungsfragen, welche die Kosten der Solarenergienutzung weiter senken.

Ausbildung. Wir geben Studierenden, Techniker*innen, Ingenieur*innen und Wissenschaftler*innen die Chance zur Aus- und Weiterbildung in einer hervorragenden Forschungsinfrastruktur. So geben wir dem Wandel zu einer nachhaltigen Energieversorgung ein solides wissenschaftliches Fundament.

Zusammenarbeit. Wir fördern den Austausch der Mitarbeiter*innen untereinander und schaffen Raum für Kreativität und neue Lösungen. Wir gestalten unsere Zusammenarbeit kooperativ, respektvoll und offen, sowohl intern als auch im Umgang mit unseren Kunden und Partnern.

Mission statement

Knowledge. The Lower Saxony Institute for Solar Energy Research (ISFH) conducts applied research and development for solar energy. We help to expend solar energy with scientific knowledge and innovation and thus make an important contribution to the energy transition. We strive to provide excellent performance on an internationally recognized level.

Economic development. We support the economy with development work and research-oriented services at the highest level. In collaboration with our partners, we solve development issues to further reduce the costs of using solar energy.

Training. We give students, technicians, engineers, and academics the opportunity to take part in basic and advanced training in excellent research infrastructure. We thereby provide a solid scientific foundation for the transition to a sustainable energy supply.

Collaboration. We promote the exchange of ideas among employees and create space for creativity and new solutions. We strive to collaborate in a cooperative, respectful and open manner, both internally and with our customers and partners.



Innovation with impact

Hinweise zu den Umschlagbildern/About the cover images:

A: ISFH Fassadenteststand. Links: solarthermisch-aktive Isolierglas-Fassade (aktivierte Fassadenfläche 22 m²). Rechts: solarthermisch-aktive Metall-Fassade (aktivierte Fassadenfläche 26 m²).

ISFH façade test wall. Left: Solar-thermally active insulation glass façade (activated façade area 22 m²). Right: Solar-thermally active metal façade (active façade area 26 m²).

B: Zweite Generation von Glasschattenmasken für POLO-IBC-Solarzellen.
Second generation of glass shadow masks for POLO IBC solar cells.

C: PV-Module mit Natursteinoberfläche.
PV modules with natural stone front sides.

D: Co-Sputter-Anlage zur Entwicklung thermochromer Schichten auf Metallen.
Co-sputtering system for the development of thermochrome layers on metals.

E: Ministerpräsident Stephan Weil besuchte das ISFH im April 2023.
Minister President Stephan Weil visited the ISFH in April 2023.



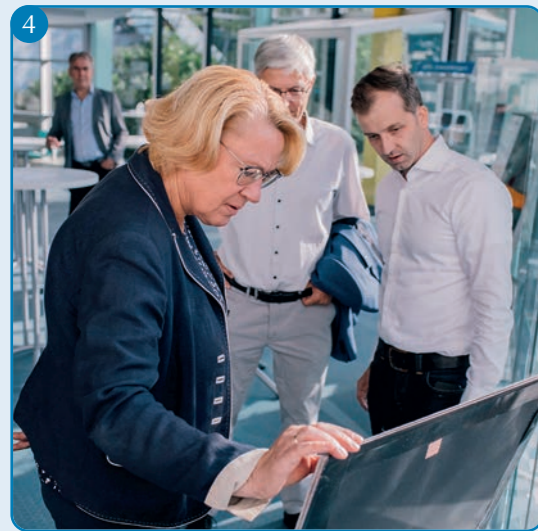
A B C D E

JAHRESBERICHT

ANNUAL REPORT



Automatische Beladeeinheit am industriellen PECVD-Ofen im SolarTeC.
Automatic loading unit at the industrial PECVD tool in the SolarTeC.



Abbildung/Figure 2: Professor Rolf Brendel (links) im Gespräch mit Björn Thümler (rechts), damaliger Niedersächsischer Minister für Wissenschaft und Kultur. Professor Rolf Brendel (left) in conversation with Björn Thümler (right), then Minister for Science and Culture of Lower Saxony.

Abbildung/Figure 3: Dr. Henning Schulte-Huxel (2. von rechts) stellt Björn Thümler (links), damaliger Niedersächsischer Minister für Wissenschaft und Kultur, das im Aufbau befindliche Labor für flexible Produktionstechnologien gebäudeintegrierter Photovoltaikmodule vor. Dr. Henning Schulte-Huxel (2nd from right) presents the laboratory for flexible production technologies of building-integrated photovoltaic modules, which is currently under construction, to Björn Thümler (left), then Minister for Science and Culture of Lower Saxony.

Abbildung/Figure 4: Barbara Otte-Kinast (links), damalige Niedersächsische Ministerin für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, untersucht die Haptik eines PV-Moduls mit Natursteinoberfläche. Barbara Otte-Kinast (left), then Minister for Food, Agriculture and Consumer Protection of Lower Saxony, examines the haptics of a PV module with a natural stone surface.

Abbildung/Figure 5: Mitglieder des SPD-Wissenschaftsforums besuchten das ISFH. Members of the SPD Science Forum visited the ISFH.

Abbildung/Figure 6: v.l.n.r.: Johannes Schraps (MdB), Dr. Raphael Niepelt, Dr. Matthias Miersch (MdB), Wolfgang Gaßdorf, Dr. Stefan Bordihn, Constantin Grosch (MdL), Uli Watermann (MdL), Dominik Petters (Bürgermeister Emmerthal), Dr. Bianca Lim, Prof. Robby Peibst, Prof. Rolf Brendel
f.l.t.r.: Johannes Schraps (Member of the Bundestag), Dr. Raphael Niepelt, Dr. Matthias Miersch (Member of the Bundestag), Wolfgang Gaßdorf, Dr. Stefan Bordihn, Constantin Grosch (Member of the Landtag), Uli Watermann (Member of the Landtag), Dominik Petters (Mayor of Emmerthal), Dr. Bianca Lim, Prof. Robby Peibst, Prof. Rolf Brendel

Abbildung/Figure 7: v.l.n.r.: Britta Kellermann (MdL), Thomas Jürgens, Hagen Langosch und Helge Limburg (MdB) informieren sich im Rahmen eines Besuchs des ISFH über die Energie- und CO₂-Sparmaßnahmen am ISFH. From left to right: Britta Kellermann (MdL), Thomas Jürgens, Hagen Langosch and Helge Limburg (MdB) learn about the energy and CO₂ saving measures at the ISFH during a visit to the ISFH.

Streiflichter ♦ At a glance	2
Inhalt ♦ Contents	4
Vorwort ♦ Preface	6
1 Institut für Solarenergieforschung	8
Kurzportrait ♦ Brief portrait	8
Organisation ♦ Organization	11
Abteilung Photovoltaik ♦ Photovoltaics department	11
Abteilung Solare Systeme ♦ Solar systems department	14
Calibration & Test Center (CalTeC)	17
Zentrale Dienste ♦ Central services	19
Aufsichtsrat ♦ Supervisory Board	21
Wissenschaftlicher Beirat ♦ Scientific Advisory Board	21
Das Institut in Zahlen ♦ Statistics of the Institute	24
Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V. (Förderverein)	27
Society for the Promotion of the Institute for Solar Energy Research (Friends of the ISFH)	
2 Forschungsabteilungen ♦ Research departments	30
Abteilung Photovoltaik ♦ Photovoltaics department	30
Forschungsthemen ♦ Research topics	30
Dienstleistungen ♦ Services	30
Apparative Ausstattung ♦ Equipment & facilities	30
Glanzlichter ♦ Highlights	31
Abteilung Solare Systeme ♦ Solar systems department	32
Forschungsthemen ♦ Research topics	32
Dienstleistungen ♦ Services	32
Apparative Ausstattung ♦ Equipment & facilities	33
Glanzlichter ♦ Highlights	33
3 Wissenschaftliche Ergebnisse ♦ Scientific results	34
Abteilung Photovoltaik ♦ Photovoltaics department	34
Quasistatische Photoleitungsmessungen an Perowskit-Dünnschichten	34
Quasi-steady-state photoconductance measurements on perovskite thin films	
Oberflächenpassivierung von undiffundiertem, texturiertem p-Typ Silizium mit industriellen PECVD-AIO _x /SiN _y -Schichtstapeln	37
Surface passivation of undiffused textured p-type crystalline silicon by industrial PECVD AIO_x/SiN_y stacks	
Perowskit-Silizium-Tandemzelltechnologie auf dem Weg zur Industrialisierung: POLO-PERC-Bottomzellen und aufgedampfte Perowskite	40
Perovskite-silicon tandem solar cell technology heading towards industrialization: POLO-PERC bottom solar cells and evaporated perovskites	
Leistungsmessung an neuen Hochleistungs-PV-Modulen	44
Power measurement for new high-power PV modules	

Abteilung Solare Systeme ♦ Solar systems department	47
Spektrale Ellipsometrie – vom UV bis mittlerem IR akkreditiert	47
Spectral ellipsometry - accredited from UV to mid IR	
Wärmerohrkollektoren mit Überhitzungsschutz in einem kostenoptimierten Systemkonzept: Monitoring von fünf Demonstrationsanlagen im realen Systembetrieb	50
Heat pipe collectors with overheating prevention in a cost-optimized system concept: Monitoring of five demonstration plants during real system operation	
Nachhaltige Dimensionierung von regenerierten Erdwärmesondenfeldern	54
Sustainable dimensioning of regenerated borehole heat exchanger fields	
Erdgas, Wasserstoff und Jobwende: Beschäftigungseffekte durch die beschleunigte Energiesystemtransformation in Deutschland	57
Natural gas, hydrogen and job transition: Employment effects from accelerated energy system transformation in Germany	
4 Weiterbildung ♦ Education	60
Akademische Ausbildung ♦ Academic education	60
NILS – Die Lernwerkstatt im Wandel ♦ NILS – The Learning Workshop in transition	64
5 Dokumentation ♦ Documentation	74
Partner aus Universitäten & Forschungseinrichtungen ♦ Partners from universities & research facilities	74
Inland ♦ National	74
Ausland ♦ International	75
Partner aus Industrie, Planung & Entwicklung ♦ Partners from industry, planning & development	76
Inland ♦ National	76
Ausland ♦ International	78
Institutsmitgliedschaften ♦ Institute memberships	78
Institutskolloquien ♦ Institute colloquia	79
Mitarbeit in Fachgremien ♦ Membership in professional bodies	79
Ausstellungen & Fachtagungen ♦ Fairs & congresses	80
Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften ♦ Peer-reviewed publications	80
Andere Veröffentlichungen ♦ Other publications	81
Vorträge & Poster ♦ Oral & visual presentations	83
Studien- & Bachelorarbeiten ♦ Student research projects & bachelor theses	87
Diplom- & Masterarbeiten ♦ Diploma & master theses	87
Doktorarbeiten ♦ Ph.D. theses	88
Lehrveranstaltungen ♦ Lectures	88
Preise & Auszeichnungen ♦ Awards	89
6 Presse ♦ Press	92
7 Autoren ♦ Authors	98
8 Impressum ♦ Impress	99

Die Energiewende betrifft uns alle. Die Energiewende kostet Geld. Die Energiewende ist dringend.

Diese Fakten sind ein häufiges Thema in den Medien. In unserem schön gelegenen Institut für Solarenergieforschung am Hang des Ohrbergs in Emmerthal, das mit derzeit 150 Mitarbeiter*innen Entwicklung von moderner Solar-Technologie und Energiesystemlösungen für die Energiewende betreibt, sind diese Fakten täglich intensiv spürbar.

Die Energiewende betrifft uns alle: Die Zahl der Anfragen an das ISFH zu ganz praktischen Fragen der Solarenergienutzung ist im Vergleich zu früheren Jahren massiv gestiegen. Oft sind es Anwenderfragen, die uns wertvolle Hinweise geben, in welche Richtung die Technologie weiterentwickelt werden muss. Es gibt offensichtlich einen Bedarf für Photovoltaik, die vielseitiger gestaltet werden kann und so z. B. für den Einsatz auf denkmalgeschützten Gebäuden geeignet ist. Eine Forschungslinie für die Herstellung von solchen PV-Modulen ist derzeit am ISFH im Aufbau und wir haben eine neue Gruppe „Photovoltaik-Spezialmodulbau“ eingerichtet. Wärmepumpensysteme, welche die erhöhten Anforderungen an eine Wärmeversorgung mit stark reduzierten Emissionen erfüllen, werden immer häufiger genutzt. Das ISFH kommt dem erhöhten Entwicklungsbedarf mit der Gründung einer neuen Gruppe „Wärmepumpen“ entgegen. Ich wünsche beiden neuen Gruppen viel Erfolg bei ihrer wichtigen Arbeit! Gleichzeitig geht die Energiewende auch mit einer „Jobwende“ einher. Die Beschäftigungseffekte durch die beschleunigte Energiesystemtransformation in Deutschland diskutieren wir ab Seite 57.

Die Energiewende kostet Geld: In der Forschungswelt gehört das ISFH zum Forschungs-Mittelstand: Wir sind viel größer als ein durchschnittlicher Universitäts-Lehrstuhl und viel kleiner als die großen Bundesforschungseinrichtungen. Als Forschungs-„Mittelständler“ ist die Energiewende für uns auch eine finanzielle Herausforderung, denn hohe Investitionen sind nötig, wenn wir unseren Energieverbrauch ganz ohne das Verbrennen fossiler Brennstoffe in unserem Betrieb decken wollen. Dies in den nächsten 5 Jahren darzustellen ist unser Plan. Durch von den Mitarbeiter*inne*n mitentwickelten und mitgetragenen Sparmaßnahmen konnten wir unseren Gasverbrauch im Winter 2022/2023 um 63 % im Vergleich zu den Vorjahren senken.

Die Energiewende ist dringend: Wir brauchen einen enorm beschleunigten PV-Ausbau in Niedersachsen. Sehr schnelle Entwicklungen, zu denen auch unerwartete geopolitische Spannungen gehören, können Preise in für die Energiewende gefährliche



Prof. Dr. Rolf Brendel, Wissenschaftlicher Leiter und Geschäftsführer der Institut für Solarenergieforschung GmbH in Hameln.

Prof. Dr. Rolf Brendel, Scientific Director and Chief Executive of the Institute for Solar Energy Research in Hameln.

The energy transition affects us all. The energy transition costs money. The energy transition is urgent.

These facts are a frequent topic in the media. In our beautifully located Institute for Solar Energy Research on the slope of the Ohrberg in Emmerthal, which currently has 150 employees developing modern solar technology and energy system solutions for the energy transition, these facts are intensely felt every day.

The energy transition affects us all: The number of inquiries to the ISFH regarding very practical questions of solar energy use has increased massively compared to previous years. Often, these are user questions that give us valuable information on the direction in which the technology must be further developed. There is obviously a need for photovoltaics that can be designed in a more versatile way, making them suitable for use on heritage buildings, for example. A research line for the production of such PV modules is currently under construction at ISFH and we have established a new group „Photovoltaics special Module Production“. Heat pump systems, which meet the increased requirements for heat supply with greatly reduced emissions, are being used more and more frequently. ISFH is responding to the increased need for development by establishing a new group „Heat Pumps“. I wish both new groups much success in their important work! At the same time, the energy transition also goes hand in hand with a „job transition“. We discuss the employment effects of the accelerated energy system transformation in Germany starting on page 57.

The energy transition costs money: In the research world, the ISFH is a research „medium-sized business“: We are much larger than an average university chair and much smaller than the large federal research institutions. As a research „medium-sized company“, the energy transition is also a financial challenge for us, because high investments are necessary if we want to cover our energy consumption entirely without burning fossil fuels in our operations. Our plan is to achieve this in the next 5 years. Through savings measures developed and supported by our employees, we were able to reduce our gas consumption in the winter of 2022/2023 by 63 % compared to previous years.

The energy transition is urgent: We need an enormously accelerated PV expansion in Lower Saxony. Very rapid developments, which also include unexpected geopolitical tensions, can cause prices to rise to heights that are dangerous for the energy transition. Today, we are twice as dependent on PV modules from China as we were on natural gas from Russia. It is therefore a

Höhen steigen lassen. Heute sind wir von PV-Modulen aus China doppelt so abhängig wie wir es vom Erdgas aus Russland waren. Es ist daher ein vorrangiges Ziel unserer Arbeit, den schnellen Wandel durch technologische Beiträge zum Aufbau einer hiesigen Photovoltaikfertigung gezielt zu unterstützen. Ein solcher Beitrag ist die am ISFH entwickelte POLO Backjunction-Solarzelle, die kurzfristig in einer Massenfertigung hergestellt werden könnte. Ab Seite 37 erläutern wir die für diese Technologie wichtigen Fortschritte zur Oberflächenpassivierung von undiffundiertem, texturiertem p-Typ Silizium mit industriellen PECVD-AIO_x/SiN_y-Schichtstapeln.

Wir freuen uns sehr, dass diese unsere Ziele ganz im Einklang mit den im Koalitionsvertrag festgehaltenen Zielen der Landesregierung stehen, und dass eine Stärkung des ISFH dort ausdrücklich genannt ist. So hoffen wir, dass viele unserer ehrgeizigen Zukunftsplanungen in Bezug auf eine Anpassung der institutionellen Förderung sowie Investitionen in Forschungsinfrastruktur und Forschungsgebäude möglich werden. Ich bin sicher, dass das den Energiewende-Teamgeist im Institut noch stärker anfährt und die Wirkung unserer Arbeit weiter steigert. „Innovation with Impact“ ist ja auch das Motto des ISFH! Eine Stärkung der Photovoltaik- und der Wärmepumpen-Industrie in Niedersachsen hätte eine wirklich große Wirkung.

Ich danke unseren Forschungspartnern aus der Industrie und aus der akademischen Welt sowie dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen, dem Umweltministerium des Landes Niedersachsen und ganz besonders dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sowie allen anderen Forschungsförderern für die gute Zusammenarbeit im vergangenen Jahr 2022.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitarbeiter*innen für die erzielten Erfolge unter herausfordernden Umständen.

Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, wünsche ich viel Vergnügen bei der Lektüre unseres Jahresberichts, der Ihnen ausgewählte Ergebnisse unserer Forschung präsentiert.

Unterstützen wir alle die schnelle Energiewende mit einer Bereitschaft zur Prioritätensetzung!

5. April 2023

primary goal of our work to provide targeted support for the rapid transformation by making technological contributions to the development of local photovoltaic manufacturing. One such contribution is the POLO backjunction solar cell developed at ISFH, which could be mass produced in the short term. Starting on page 37, we explain the important advances for this technology in surface passivation of undiffused, textured p-type silicon with industrial PECVD AIO_x/SiN_y layer stacks.

We are very pleased that these goals of ours are entirely in line with the goals of the state government as stated in the coalition agreement, and that strengthening ISFH is explicitly mentioned there. Thus, we hope that many of our ambitious plans for the future in terms of adjusting institutional funding as well as investments in research infrastructure and research buildings will become possible. I am sure that this will fuel the energy transition team spirit in the institute even more and further increase the impact of our work. „Innovation with Impact“ is, after all, the motto of the ISFH! Strengthening the photovoltaic and heat pump industries in Lower Saxony would have a really big impact.

I would like to thank our research partners from industry and academia as well as the Ministry of Science and Culture of the State of Lower Saxony, the Ministry of the Environment of the State of Lower Saxony and especially the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action as well as all other funding agencies for the good cooperation in the past year 2022.

Special thanks go to all our employees for the successes achieved under challenging circumstances.

Dear readers, I hope you enjoy reading our annual report, which presents selected results of our research.

Let us all support the rapid energy transition with a willingness to prioritize!

April 5, 2023

Kurzportrait

Am Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH) werden innovative Komponenten und Systeme für die photovoltaische und solarthermische Nutzung der Sonnenenergie entwickelt. Dabei stehen das physikalische Verständnis und verallgemeinerbare technologische Erkenntnisse sowie die Entwicklung von kostengünstigen Prozessen im Vordergrund. Die am ISFH hergestellten Komponenten werden in Energiesystemen getestet, denn erst das Verhalten im System entscheidet über den Erfolg einer Entwicklung. Das System selbst ist dabei ein besonders wichtiger Teil der Forschungsarbeit. Gemeinsam mit unseren Industriepartnern und unseren Studierenden, die am ISFH Studien-, Bachelor-, Master- oder Doktorarbeiten anfertigen, fördern wir die Nutzung von Solarenergie durch Forschung und Innovation.

Das ISFH ist als außeruniversitäres Forschungsinstitut des Landes Niedersachsen in der Rechtsform einer gemeinnützigen GmbH organisiert. Es ist An-Institut der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH) und unterhält Kooperationen mit anderen Universitäten und Fachhochschulen. Geschäftsführer des ISFH ist Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Brendel, der gleichzeitig auch Universitätsprofessor an der Fakultät für Mathematik und Physik der LUH ist. Professor Brendel leitet am Institut für Festkörperphysik die Abteilung Solarenergie.

Das ISFH besteht aus den beiden Abteilungen Photovoltaik und Solare Systeme sowie der unabhängigen Prüfstelle ISFH CalTeC. In der Photovoltaikforschung gehören grundlegende Material-

Brief portrait

Innovative components for the photovoltaic and solar thermal utilization of solar energy are developed at the Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH). The focus is on physical understanding and generalizable technological findings as well as the development of cost-effective processes. The components manufactured at ISFH are tested in energy systems, as only their behavior within a system decides whether a development is successful. The system itself is in this an extremely important part of research work. Together with our industrial partners and our students, working on student research papers, bachelor, masters or Ph.D. theses, we encourage solar energy utilization through research and innovation.

ISFH is a non-university research institute of the State of Lower Saxony with the legal status of a non-profit limited liability company. It is an affiliated institute of the Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH) and undertakes also joint projects with other universities and technical colleges. The director of ISFH is Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Brendel, who is also a university professor in the Faculty of Mathematics and Physics at the LUH. Professor Brendel heads the Solar Energy Department at the Institute for Solid State Physics.

ISFH is made up of the Photovoltaics and Solar systems departments as well as the independent test center ISFH CalTeC. Photovoltaic research includes the basic study of material properties as well as the development of processes and equipment for manufacturing solar cells. The main interest is the development of new

untersuchungen ebenso zu den Aufgaben wie die Entwicklung von Prozessen und Anlagen für die Herstellung von Solarzellen. Das Hauptinteresse gilt der Entwicklung neuer Silizium-Solarzellen mit Wirkungsgraden von mehr als 23 %, hocheffizienten Tandem-Solarzellen und der zugehörigen PV-Modultechnologie. Übergeordnetes Ziel ist das Senken der Produktionskosten von Solarzellen und PV-Modulen.

Die Abteilung Solare Systeme stellt die integrierte Gesamtenergieversorgung mit Strom und Wärme von dezentralen Einheiten wie Gebäuden und Siedlungen in den Mittelpunkt. Zielsetzung ist eine kostengünstige und CO₂-arme Energieversorgung in qualitativ hochwertigen Systemen. Dazu werden am ISFH u.a. thermische Sonnenkollektoren, Wärmepumpen, neuartige Beschichtungsverfahren, Speicherkonzepte sowie für Energiesysteme neue Anwendungen und Kombinationen entwickelt, bewertet und optimiert.

Das ISFH ist Mitglied der Zuse-Gemeinschaft, einem technologie- und branchenoffenen Verband unabhängiger Industrieforschungseinrichtungen. Ferner ist das Institut Mitglied im Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE), einem Zusammenschluss außeruniversitärer deutscher Forschungsinstitute, der seine Forschungstätigkeiten auf nationaler Ebene im Bereich der erneuerbaren Energien koordiniert. Außerdem ist das Institut Mitglied im Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE), im Leibniz Forschungszentrum Energie 2050 (LiFE 2050) und unterstützt die Arbeit des Energieforschungszentrums Niedersachsen (efzn).

silicon solar cells with efficiencies of more than 23 %, high-efficiency tandem solar cells and the related PV module technology. Above all, the aim is to reduce production costs for solar cells and PV modules.

The main focus of the Solar systems department is the integrated total energy supply with heat and electricity in local units like buildings and urban settlements. The objective is a cost-efficient and CO₂-reduced energy supply in high quality systems. For this purpose ISFH develops, evaluates and optimizes amongst others new solar thermal collectors, heat pumps, functional coatings and heat storage concepts as well as new applications and combinations of energy systems.

ISFH is a member of the Zuse Association, a technology- and industry-open association of independent industrial research institutions. Furthermore, the institute is a member of the Renewable Energy Research Association (FVEE), an association of German non-university research institutes coordinating renewable energy research activities at a national level. Moreover the institute is a member of the Laboratory for Nano and Quantum Engineering (LNQE), the Leibniz Research Center Energy 2050 (LiFE 2050) and supports the work of the Energy Research Center of Lower Saxony (efzn).

Batch-Anlage für nasschemische Prozesse im SolarTeC.
Batch process tool for wet chemical processes in the SolarTeC.





Hauptgebäude des ISFH.
Main building of ISFH.

Organisation

Abteilung Photovoltaik

Leitung: *Dr. Karsten Bothe (VERTRÄGE & IP-MANAGEMENT)*
Dr. Thorsten Dullweber (INFRASTRUKTUR)
Prof. Dr. Jan Schmidt (PERSONAL)

Im Labor erreichbare Wirkungsgrade von Solarzellen sind gegenwärtig schon sehr beachtlich. Es besteht jedoch Bedarf an neuen Technologien, mit denen höchsteffiziente Solarzellen und PV-Module industriell noch kostengünstiger und rascher hergestellt werden können. Die sechs Arbeitsgruppen der Abteilung Photovoltaik beschäftigen sich mit unterschiedlichen Aspekten der industriellen Umsetzung unserer Laborentwicklungen und in zunehmendem Maße mit Fragen nach künftigen Optionen für die Photovoltaik.

Photovoltaik-Materialforschung/Photovoltaics materials research

Leitung/Head: *Prof. Dr. Jan Schmidt*

Ziel dieser Gruppe ist es, ein umfassendes Verständnis der Auswirkung von Defekten und Defektreaktionen in Halbleitermaterialien auf Solarzeleigenschaften zu entwickeln. Mit Hilfe eines gezielten Defect Engineering wird die Materialqualität der heute in der Photovoltaik eingesetzten Materialien verbessert. Weitere Schwerpunkte sind neue Ansätze zur Oberflächenpassivierung, ladungsträgerselektive Kontakte sowie die Analyse neuartiger Materialien für die Photovoltaik.

The aim of this group is to gain a comprehensive understanding of the impact of defects and defect reactions in semiconductor materials on solar cell characteristics. Defect engineering techniques are developed to improve the material quality of today's photovoltaic materials. Other foci are on the evaluation of new surface passivation techniques, on carrier-selective contacts as well as on the analysis of novel materials for photovoltaic applications.

Solarzellencharakterisierung & Simulation/Solar cell characterization & simulation

Leitung/Head: *Dr. Karsten Bothe*

Die Aufgabe der Arbeitsgruppe ist es, neue Messverfahren zu entwickeln und Messsysteme aufzubauen, die notwendig sind, um in Kombination mit Bauelementsimulationen ein umfassendes Verständnis der am ISFH entwickelten Solarzellen zu erlangen. Um auf aktuelle Veränderungen im Solarzellendesign zu reagieren, werden die bestehenden physikalischen Modelle für die numerische Simulation von Solarzellen und PV-Modulen kontinuierlich angepasst und optimiert. Auf Basis elektrischer und optischer Bauteilsimulationen werden außerdem Verbesserungspotenziale aufgezeigt und Strategien für weitere Wirkungsgradsteigerungen von Solarzellen und PV-Modulen festgelegt. Die Gruppe bietet der Photovoltaikindustrie ihre Analyseverfahren sowie ihr Simulations-Know-how als Serviceleistung an.

The objective of the group is the development of new measurement and evaluation techniques which are required to gain, supported by device simulations, a comprehensive understanding about the solar cells developed at ISFH. In order to support the most recent solar cell designs, we continuously adapt and optimize our physical models used for the device simulation of solar cells and PV modules. Based on electrical and optical simulations we demonstrate potential optimization rules and define strategies for further energy conversion efficiency improvements of solar cells and PV modules. The team offers its facilities, experience and simulation know-how as a service to the photovoltaic industry.

Organization

Photovoltaics department

Heads: *Dr. Karsten Bothe (CONTRACTS & IP MANAGEMENT)*
Dr. Thorsten Dullweber (INFRASTRUCTURE)
Prof. Dr. Jan Schmidt (HUMAN RESOURCES)

Solar cell efficiencies achieved in the laboratory are already remarkably high. However, there is a demand for industrially applicable technologies to enable even more rapid mass production of high-efficiency solar cells and PV modules at lower cost. The six research groups in the photovoltaics department are committed to different aspects of the industrial application of our laboratory developments and increasingly with issues of future options for photovoltaics.

Industrielle Solarzellen/Industrial solar cells

Leitung/Head: Dr. Thorsten Dullweber

Diese Arbeitsgruppe entwickelt Verbesserungen von Silizium-Solarzellen mit einem industrietypischen Herstellungsprozess hinsichtlich Wirkungsgradsteigerung und Kostenreduktion. Im Fokus gegenwärtiger Forschungsaktivitäten mit Industriepartnern steht dabei die Entwicklung neuer PECVD-Herstellungsprozesse für passivierende poly-Si-Kontakte. Deren Integration in industrielle IBC-Solarzellen ist ein weiterer Schwerpunkt für die Kooperation mit Firmen aus der Photovoltaik-Industrie.

This group develops improvements to silicon solar cells produced in an industrial way with respect to increasing efficiencies and reducing costs. The focus of the activities is on the development of new PECVD manufacturing processes for passivating poly-Si contacts. Their implementation in industrial IBC solar cells are an additional focus for cooperation with companies from the photovoltaic industry.

Emergente Solarzellentechnologien/Emerging solar cell technologies

Leitung/Head: Prof. Dr. Robby Peibst

Den Schwerpunkt der Arbeit dieser Gruppe bildet die konzeptionelle Weiterentwicklung von Silizium-basierten Solarzellen. Dazu gehören einerseits höchsteffiziente Solarzellen mit einem nur aus Silizium bestehenden Absorber, zum anderen auch Tandem-Solarzellen, bei denen die Silizium-Bottom-Solarzelle mit einem anderen Absorbermaterial kombiniert wird. In beiden Fällen werden passivierende Kontakte auf Basis von polykristallinem Silizium auf Oxid (POLO) integriert, um die in der Silizium-Solarzelle erzeugten Ladungsträger möglichst verlustfrei zu extrahieren und, in der Tandemkonfiguration, effizient zur Top-Solarzelle weiterzuleiten. Die Forschungsfragen erstrecken sich dabei von grundlegenden Aspekten wie dem Interface zwischen beiden Subzellen oder der Bauelementphysik neuartiger 3-Terminal-Tandemzellen zu den Herausforderungen der Industrialisierung der Silizium- und Perowskit-Technologie. Darüber hinaus leistet die Gruppe Beiträge zu Spezialanwendungen, z. B. für fahrzeugintegrierte Photovoltaik, und evaluiert Einsatzmöglichkeiten von PV-Technologien in anderen Feldern der Energiewende.

The focus of this group's work is the conceptual further development of silicon-based solar cells. This includes, on the one hand, highly efficient solar cells with an absorber consisting only of silicon, and on the other hand, tandem solar cells in which the silicon bottom solar cell is combined with another absorber material. In both cases, passivating contacts based on polycrystalline silicon on oxide (POLO) are integrated to extract the charge carriers generated in the silicon solar cell as loss-free as possible and, in the tandem configuration, to transfer them efficiently to the top solar cell. The research questions range from fundamental aspects such as the interface between the two subcells or the device physics of novel 3-terminal tandem cells to the challenges of industrializing silicon and perovskite technology. Furthermore, the group contributes to special applications, e.g. for vehicle-integrated photovoltaics, and evaluates possible applications of PV technologies in other fields of the energy transition.

Zukunftstechnologien Photovoltaik/Future technologies photovoltaics

Leitung/Head: Dr. Sarah Kajari-Schröder

Die Arbeitsgruppe entwickelt Methoden und Technologien, die neue Optionen für die Photovoltaik erschließen sollen. Der Schwerpunkt unserer Arbeit ist die Entwicklung von kostengünstigen Tandem-Solarzellen auf Silizium, mit denen noch höhere Wirkungsgrade als mit reinen Silizium-Solarzellen erreicht werden können. Dafür entwickeln wir die koverdampften Perowskit-Solarzellen als Top-Solarzelle.

The group develops methods and technologies enabling new options for photovoltaics. The focus of our work is the development of cost-efficient tandem solar cells on silicon. These can reach an even higher efficiency than single junction silicon solar cells. To achieve this we develop co-evaporated perovskite solar cells as the top solar cell.

Modultechnologien/Module technologies

Leitung/Head: Dr. Marc Köntges

Die Arbeitsgruppe entwickelt neue Herstellungsverfahren von Photovoltaikmodulen für besondere Anwendungen. Solarzellen werden für neue Anwendungen als Lichtsensoren integriert und PV-Module für Fahrzeuge (VIPV) oder gebäude-integrierte Anwendungen (BIPV) entwickelt. Die Grundlagen des Aufbaus und der Charakterisierung von terrestrischen Tandem-PV-Modulen werden untersucht. Die Gruppe konzipiert Methoden zum Auffinden von Schäden in PV-Modulen. Schwerpunkt sind bildgebende Verfahren, wie beispielsweise die kamerabasierte Erfassung der UV-Fluoreszenz oder kontaktlose Elektrolumineszenz im PV-Modul. Diese Methoden werden für den größtenteils automatisierten Einsatz in Freiflächenanlagen weiterentwickelt. Außerdem werden Auftragsarbeiten zur Fehleranalyse von PV-Modulen mit beschleunigten Alterungstests und Standardprüfungen gemäß der Norm IEC 61215 durchgeführt.

The working group develops new manufacturing processes of photovoltaic modules for special applications. Solar cells for new applications are integrated as light sensors and PV modules for vehicles (VIPV) or building-integrated applications (BIPV) are developed. The fundamentals of the construction and characterization of terrestrial tandem PV modules are investigated. The group develops methods for detecting damage in PV modules. The focus is on imaging techniques, such as camera-based detection of the UV fluorescence or contactless electroluminescence in PV modules. These methods are further developed for the mostly automated use in ground-mounted systems. Service work is being carried out for fault analysis of modules with accelerated aging tests and standard tests in accordance to standard IEC 61215.



Vorbereitung einer Messung am PV-Modul-Flasher.
Preparation of a measurement at the PV module flasher.

Abteilung Solare Systeme

Leitung: *Dr. Federico Giovannetti (F&E-KOORDINATION)*
Dr. Rolf Reineke-Koch (PERSONAL & INFRASTRUKTUR)

Die Forschungsaktivitäten der Abteilung umfassen die Integration erneuerbarer Energie in effiziente, kostengünstige und zuverlässige Energiesysteme zur Versorgung von Gebäuden und Quartieren. Dazu werden sowohl Komponenten mit verbesserten Eigenschaften als auch neue Systemkombinationen entwickelt. Diese werden gemeinsam mit Partnern aus der Wirtschaft erprobt und umgesetzt. Neben Modellierung und Laboruntersuchungen ist die wissenschaftliche Begleitung von Pilotanlagen und Feldtests zur Sicherstellung der erwarteten Qualität eine wesentliche Aufgabe.

Solar systems department

Heads: *Dr. Federico Giovannetti (R&D COORDINATION)*
Dr. Rolf Reineke-Koch (HUMAN RESOURCES & INFRASTRUCTURE)

The research activities of the department include the integration of renewable energy into efficient, cost-effective and reliable energy systems to supply buildings and districts. For this purpose, components with improved properties as well as new system combinations are being developed. These are proven and implemented in cooperation with our partners from industry. In addition to modeling and laboratory experiments, the scientific monitoring of pilot plants and field tests to ensure the expected quality is an essential task.

Solarthermische Materialien/Solar thermal materials

Leitung/Head: *Dr. Rolf Reineke-Koch*

Diese Arbeitsgruppe evaluiert neue Konzepte für Wärmeschutzverglasungen und selektive Beschichtungen von Absorbern in Kollektoren. Ein neuer Themenschwerpunkt sind Beschichtungen für Wasser-Elektrolyseure. Die Entwicklung von Beschichtungen in eigenen Anlagen, die Unterstützung des Transfers zur Industrie, die Prüfung der Alterungs- und Korrosionsbeständigkeit sowie die materialwissenschaftliche und optische Charakterisierung einschließlich spektraler Ellipsometrie vom UV- bis mittleren Infrarot-Bereich sind Arbeitsschwerpunkte. Ein Messstand für bidirektionale Reflexion und Transmission (BRDF, BTDF) liefert optische Daten für 3-dimensionale Simulationen realer Gebäudestrukturen.

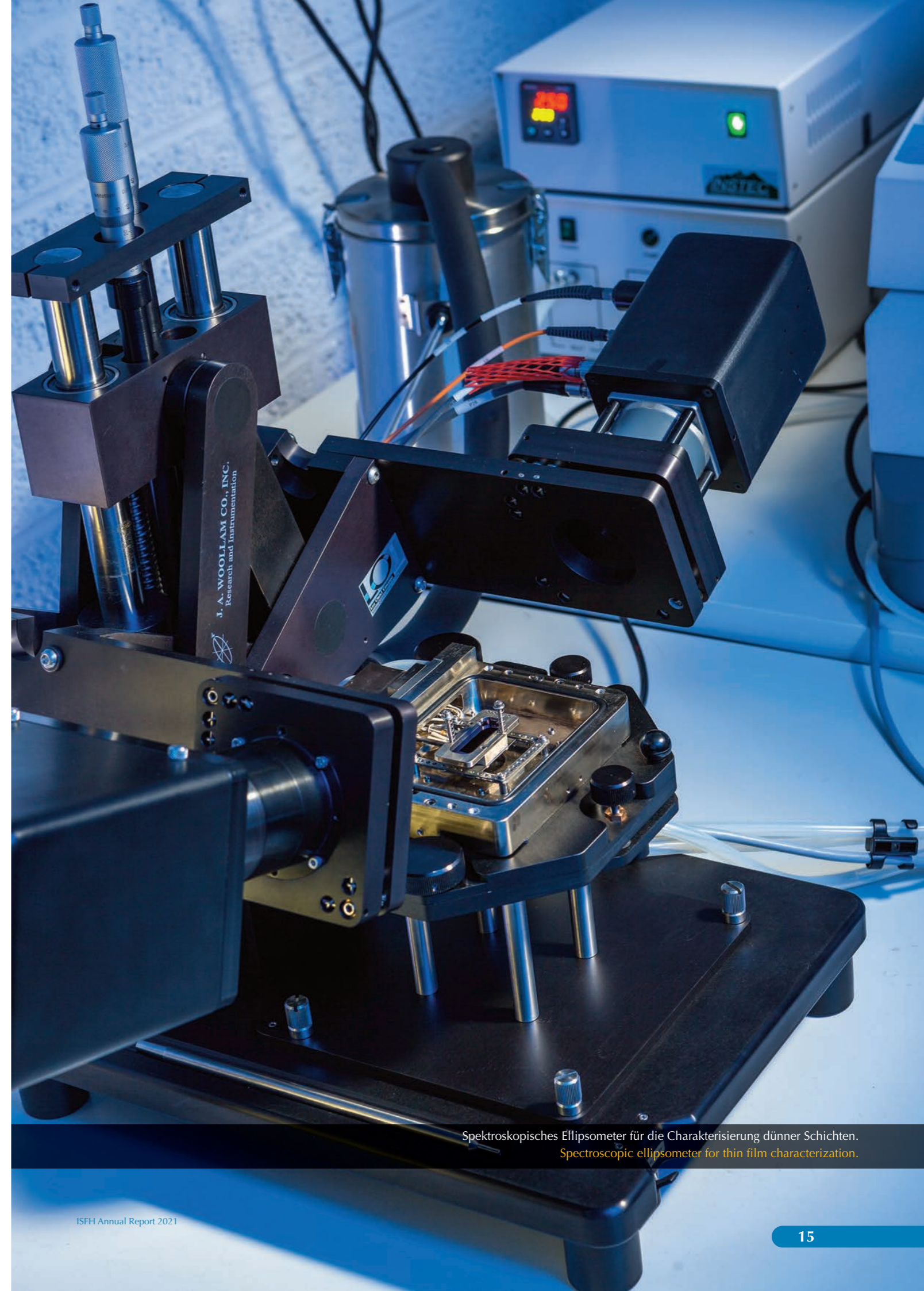
This working group evaluates new concepts for thermal glazing and selective coatings for absorbers in collectors. A new focus is on coatings for water electrolyzers. The development of coatings in our own facilities, support of the transfer to industry, testing of aging and corrosion resistance, and materials science and optical characterization including spectral ellipsometry from the UV to mid-infrared range are focal points of our work. A measurement stand for bidirectional reflectance and transmittance (BRDF, BTDF) provides optical data for 3-dimensional simulations of real building structures.

Kollektoren/Collectors

Leitung/Head: *Dr.-Ing. Federico Giovannetti*

Im Zentrum der Forschung dieser Gruppe stehen der Sonnenkollektor und der Kollektorkreis, wobei in der Arbeit ein systemorientierter Ansatz verfolgt wird. Kostenreduktion, Betriebssicherheit, Gebäudeintegration sowie Kollektoren für neue Einsatzbereiche sind die wesentlichen Aufgaben der Gruppe. Aktuelle Themen sind schaltbare Kollektoren für stagnationssichere Solaranlagen, photovoltaisch-thermische Kollektoren, optimierte Kollektoren für die Unterstützung von industriellen Prozessen, Wärmenetzen oder Wärmepumpensystemen sowie neue Lösungen für die solare Aktivierung der Gebäudehülle, beispielsweise mit vorgehängten Solarfassaden.

The research activities of this group focus on the solar collector and on the collector loop, using a systemic approach. Cost reduction, operational reliability, building integration as well as collectors for new applications are the main tasks. Current topics are smart collectors for stagnation-safe system operation, photovoltaic-thermal collectors, optimized collectors for solar assistance of industrial processes, district heating networks or heat pump systems as well as new solutions for the solar activation of the building envelope for example with curtain solar façades.



Spektroskopisches Ellipsometer für die Charakterisierung dünner Schichten.
 Spectroscopic ellipsometer for thin film characterization.

Systemkomponenten/System components

Leitung/Head: Dipl.-Ing. Carsten Lampe

Im Fokus dieser Arbeitsgruppe stehen die experimentelle Bewertung und Modellierung nichtsolare Systemkomponenten wie z. B. Frischwasser- und Wohnungsstationen, Wärmepumpen und Subsysteme wie beispielsweise Energiezentralen von Mehrfamilienhäusern. Besonders hervorzuheben sind die dynamische Prüfung von Wärmepumpen unter kontrollierten Bedingungen und die Erarbeitung einer Prüf- und Bewertungsgrundlage für Durchflusstrinkwassererwärmer.

The focus of this group is directed to the experimental evaluation and modeling of non-solar system components such as hot water modules, dwelling stations, heat pumps and subsystems such as central heat generation and distribution facilities in multi-family buildings. Main topics are the dynamic testing of heat pumps under controlled conditions and the development of a testing and evaluation procedure for instantaneous water heaters.

Elektrische Energiesysteme/Electrical energy systems

Leitung/Head: Dr. Raphael Niepelt

Die Arbeitsgruppe forscht an der Integration von erneuerbaren Energien auf Gebäude- und Quartiersebene. Hierbei spielen insbesondere die Kopplung von Strom- und Wärmesektor und die Interaktion von Komponenten wie Photovoltaik-Batteriespeichern, Wärmepumpen und thermischen Speichern eine wichtige Rolle. Es werden intelligente, modellbasierte Steuerungsstrategien und Fehlererkennungsverfahren für einen energieeffizienten und ökonomischen Betrieb solcher Systeme entwickelt. Eingesetzt werden sowohl Simulationen als auch Hardware-in-the-loop-Laboruntersuchungen bis hin zu Feldtests unter realen Bedingungen. Die Arbeitsgruppe verfügt über Laboreinrichtungen zur Abbildung von Energieversorgungssystemen von Ein- und Mehrfamilienhäusern und Erfahrung im energetischen Monitoring von Gebäuden und Quartieren.

The working group conducts research on the integration of renewable energies at the building and neighborhood level. In particular, the coupling of the electricity and heating sectors and the interaction of components such as photovoltaic battery storage systems, heat pumps and thermal storage systems play an important role. Intelligent, model-based control strategies and fault detection methods are being developed for the energy-efficient and economical operation of such systems. Simulations as well as hardware-in-the-loop laboratory investigations up to field tests under real conditions are applied. The working group has laboratory facilities for mapping energy supply systems of single- and multi-family houses and experience in energy monitoring of buildings and neighborhoods.

Thermische Energiesysteme/Thermal energy systems

Leitung/Head: Dipl.-Ing. Peter Pärtsch

Die Entwicklung und Bewertung von Systemen zur effizienten, erneuerbaren Wärmeversorgung von Gebäuden und Quartieren sind Mittelpunkt der Arbeiten dieser Gruppe. Dies umfasst zum einen die hygienisch abgesicherte Absenkung der Versorgungstemperaturen im Gebäude durch innovative Systemschaltungen mit zentralen bzw. dezentralen Durchflusstrinkwassererwärmern (Frischwasserstationen bzw. Wohnungsstationen). Zum anderen werden innovative und nachhaltige Wärmequellensysteme für Wärmepumpen mit möglichst hoher Temperatur in der Heizsaison erforscht. Dies sind regenerierte Erdwärmesonden(-felder) und photovoltaisch-thermische Kollektoren sowie ihre Kombination. Übergeordnet ist das Ziel, durch systemtechnische Maßnahmen CO₂-Emissionen einzusparen. Systemsimulation mit TRNSYS und messtechnische Analyse im Labor sowie im Feld sind wesentliche Methoden.

The development and evaluation of efficient and renewable thermal systems for buildings and districts are the focus of the work of this group. On the one hand, this includes the hygienically safe reduction of supply temperatures in the buildings through innovative system concepts with central or decentralized instantaneous water heater (fresh water stations or dwelling stations). On the other hand, important R&D topics are innovative heat source systems for heat pumps with high temperature in the heating season. These are regenerated borehole heat exchanger (arrays), photovoltaic-thermal collectors, and their combination. The overarching goal is to save CO₂ emissions through system engineering measures. System simulation with TRNSYS and metrological analysis in the laboratory as well as in the field are essential methods.

Calibration & Test Center (CalTeC)

Leitung/Head: Dipl.-Ing. Carsten Lampe

Die nach DIN EN ISO/IEC 17025^[1] akkreditierten, extern angebotenen Dienstleistungen sind im Kalibrier- und Testzentrum (CalTeC) des ISFH zusammengefasst. Es gliedert sich in vier Fachbereiche:

The externally offered services, which are accredited according to DIN EN ISO/IEC 17025^[1], run as the Calibration and Test Center (CalTeC) of ISFH. It is divided into four competence areas:

^[1] Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

^[1] Solar energy – Collector components and materials

CalTeC – Thermal applications

Leitung/Head: Dipl.-Ing. Carsten Lampe

Der Bereich Thermal applications des CalTeC bietet seit der Flexibilisierung des Akkreditierungsbereichs 2018 allgemein die Prüfungen von thermischen Energiewandlern, Energiespeichern und -systemen sowie Komponenten zum thermischen Energietransport an. Das CalTeC hat einen Fundus an Erfahrungen in allen Bereichen des thermischen Solarkollektors und der Solaranlage mit normgerechten Prüfungen nach den europäischen Standards EN 129751^[2], EN 129762^[3] und EN 129773^[4] sowie dem internationalen Standard ISO 98064^[5]. Wir arbeiten aktiv in Normungsgremien mit. Darüber hinaus werden entwicklungsbegleitende Untersuchungen durchgeführt sowie Prüfverfahren weiterentwickelt.

With the flexibilization of the accreditation scope in 2018, the Thermal applications unit of CalTeC offers general testing of thermal energy converters, energy storage and systems as well as components for thermal energy transport. The unit has a wealth of experience in all areas of thermal solar collectors and solar systems with tests in accordance with the European standards of EN 129752^[2], EN 129763^[3] and EN 129774^[4] and the international standard of ISO 98065^[5]. In this area, we are actively participating in standardization bodies. Furthermore, we provide our knowledge for accompanying product development as well as develop and improve test procedures.

^[2] Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren

^[3] Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Vorgefertigte Anlagen

^[4] Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen

^[5] Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren

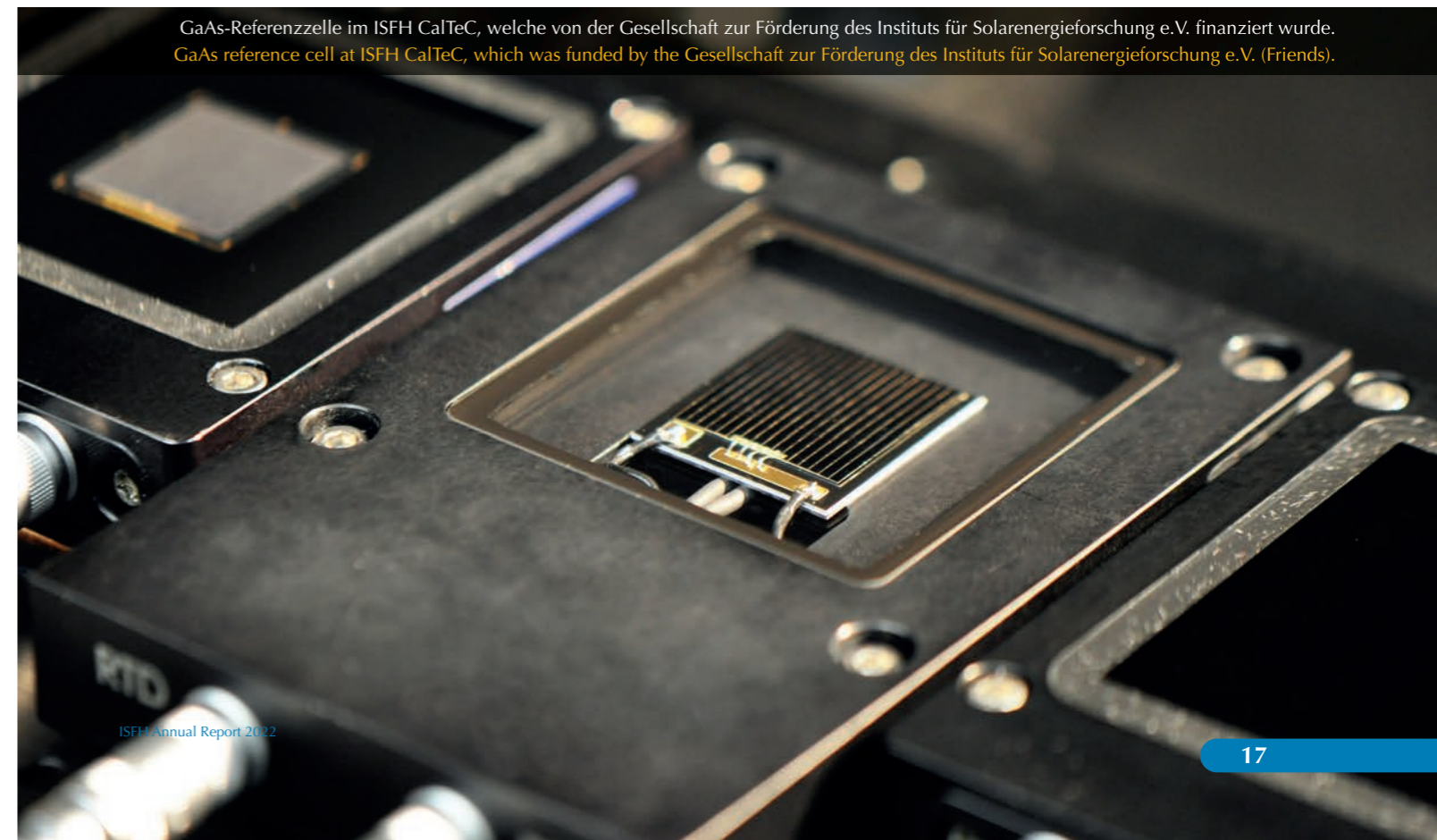
^[2] Thermal solar systems and components – Solar collectors

^[3] Thermal solar systems and components – Factory made systems

^[4] Thermal solar systems and components – Custom built systems

^[5] Solar energy – Solar thermal collectors – Test methods

GaAs-Referenzzelle im ISFH CalTeC, welche von der Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V. finanziert wurde.
GaAs reference cell at ISFH CalTeC, which was funded by the Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V. (Friends).



CalTeC – Solar cells & sensors

Leitung/Head: Dr. Karsten Bothe

Der Bereich Solar cells & sensors bietet sowohl die Kalibrierung von Solarzellen und Solarstrahlungssensoren als auch die Prüfung von Spektralradiometern bezüglich der korrekten Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärke an. Die Bestimmung der elektrischen Kenngrößen von Solarzellen und Solarstrahlungssensoren erfolgt unter Standardtestbedingungen und ist konform mit den IEC 609041-Normen. Die Prüfung von Spektralradiometern erfolgt unter Einhaltung der Empfehlung der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) in einer von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) gemäß ISO 17025^[6] zertifizierten Prozedur.

The unit Solar cells & sensors offers the calibration of solar cells and solar irradiance sensors as well as the testing of the correct measurement of the spectral irradiance of spectroradiometers. The determination of the electric parameters of solar cells and irradiance sensors are performed under standard testing conditions and in accordance with the IEC 609046 standards. The testing of the spectroradiometers is carried out in accordance with the recommendations of the International Commission on Illumination (CIE) in an ISO 17025^[6] certified procedure.

^[6] Photovoltaische Einrichtungen

^[6] Photovoltaic devices

CalTeC – Reference lamps

Leitung/Head: Dr. Karsten Bothe

Der Bereich Reference lamps bietet die Kalibrierung der spektralen Bestrahlungsstärke von Strahlernormalen zwischen 250 nm und 1700 nm an. In der Regel handelt es sich bei den Strahlernormalen um Wolfram-Halogenlampen mit einer elektrischen Leistung zwischen 250 W und 1000 W. Derartige Strahlernormale werden gerne zur Kalibrierung von Spektralradiometern eingesetzt, da sie ein kontinuierliches Spektrum besitzen und nach einer entsprechenden Einbrennprozedur eine hohe Langzeitstabilität aufweisen. Die Kalibrierung im ISFH CalTeC erfolgt mit einem Substitutionsverfahren.

The Reference lamps unit offers calibration of the spectral irradiance of reference lamps between 250 nm and 1700 nm. Usually tungsten halogen lamps with an electrical output between 250 W and 1000 W are used as reference lamps. Such reference lamps are often used for the calibration of spectroradiometers because they have a continuous spectrum and, after a corresponding burn-in procedure, have a high long-term stability. Calibration at the ISFH CalTeC is carried out using a substitution method.

Laborgebäude für Integrierte Solare Systemtechnik (ISS).
Integrated Solar Systems Technology (ISS) laboratory building.



CalTeC – Optics

Leitung/Head: Dr. Rolf Reineke-Koch

Der Bereich Optics des CalTeC bietet mit der flexibilisierten Akkreditierung allgemein die Messung strahlungsphysikalischer Eigenschaften von Beschichtungen und Oberflächen an. Der Bereich ist akkreditiert für Messungen der hemisphärischen Reflexion, der gerichteten Transmission und Reflexion jeweils vom UV-Bereich bis hin zu einer Wellenlänge von 50000 nm, darüber hinaus für die Bestimmung des Brechungsindex und des Extinktionskoeffizienten mittels spektraler Ellipsometrie im Wellenlängenbereich von 240 nm bis 33000 nm. Es werden Prüfungen der Alterungsbeständigkeit von Absorberschichten gemäß dem internationalen Standard ISO 22975-3^[7] angeboten.

In general, the Optics unit of CalTeC, with its flexibilized accreditation, offers the measurement of the radiometric properties of coatings and surfaces. The unit is accredited for measurements of hemispheric reflection and directed transmission and reflection, in each case from the UV range up to a wavelength of 50000 nm, and also for determining the refractive index and the extinction coefficient by means of spectral ellipsometry in the wavelength range of 240 nm to 33000 nm. Tests of the aging resistance of absorber layers are offered in accordance with the international standard ISO 22975-3^[7].

^[7] Solarenergie – Kollektorbauteile und Materialien

^[7] Solar energy – Collector components and materials

Zentrale Dienste

Leitung: Dipl.-Oec. Wolfgang Gaßdorf

Die Zentralen Dienste stützen die Infrastruktur des Institutes. Sie bestehen aus einem technischen Bereich mit einer Mechanikwerkstatt sowie EDV-Support und einem administrativen Bereich, dem die Sekretariate, das Rechnungswesen und die Öffentlichkeitsarbeit zugeordnet sind. Die zentralen Dienste werden von Dipl.-Oec. Wolfgang Gaßdorf geleitet, der gleichzeitig Prokurist und stellvertretender Institutsleiter ist.

Central services

Head: Dipl.-Oec. Wolfgang Gaßdorf

The Central services department sustains the infrastructure of the Institute. It comprises a technical section with a mechanical workshop and data-processing support as well as an administrative section consisting of secretarial services, accounts, and public relations work. Central services is headed by Dipl.-Oec. Wolfgang Gaßdorf, who is also registered manager and Deputy Director of ISFH.

Weiterbildung & NILS/Education & NILS

Leitung/Head: OStR Rüdiger Schanz

Eines der ersten Schülerlabore an einem wissenschaftlichen Forschungsinstitut ist die bereits 2001 am ISFH gegründete Niedersächsische Lernwerkstatt für solare Energiesysteme (NILS). Die Lernwerkstatt ist eine Bildungsinitiative, die vom Kultusministerium des Landes Niedersachsen unterstützt wird. Ziel der Einrichtung ist die Heranführung von Kindern und Jugendlichen an den Themenbereich Energieerzeugung und Energienutzung, insbesondere im Hinblick auf Verfügbarkeit, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Klimaschutz.

One of the first school laboratories at a scientific research institute was the Lower Saxon Learning Workshop for Solar Energy Systems (NILS) founded at ISFH as early as 2001. The learning workshop is an initiative which is supported by the Ministry of Education of the State of Lower Saxony. The aim of the workshop is to introduce children and young people to the topic of energy generation and energy use, in particular with respect to its availability, sustainability, economic viability and climate protection.

Die NILS ist außerdem anerkannter außerschulischer Lernstandort im BNE-Verbund^[8] und fördert die Bildung im mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Bereich (MINT). Als solcher Lernstandort ist sie starker außerschulischer Partner, der durch den Einsatz von niedersächsischen Lehrkräften für hohe Qualität steht und passgenaue Angebote für alle Schulformen vorhält.

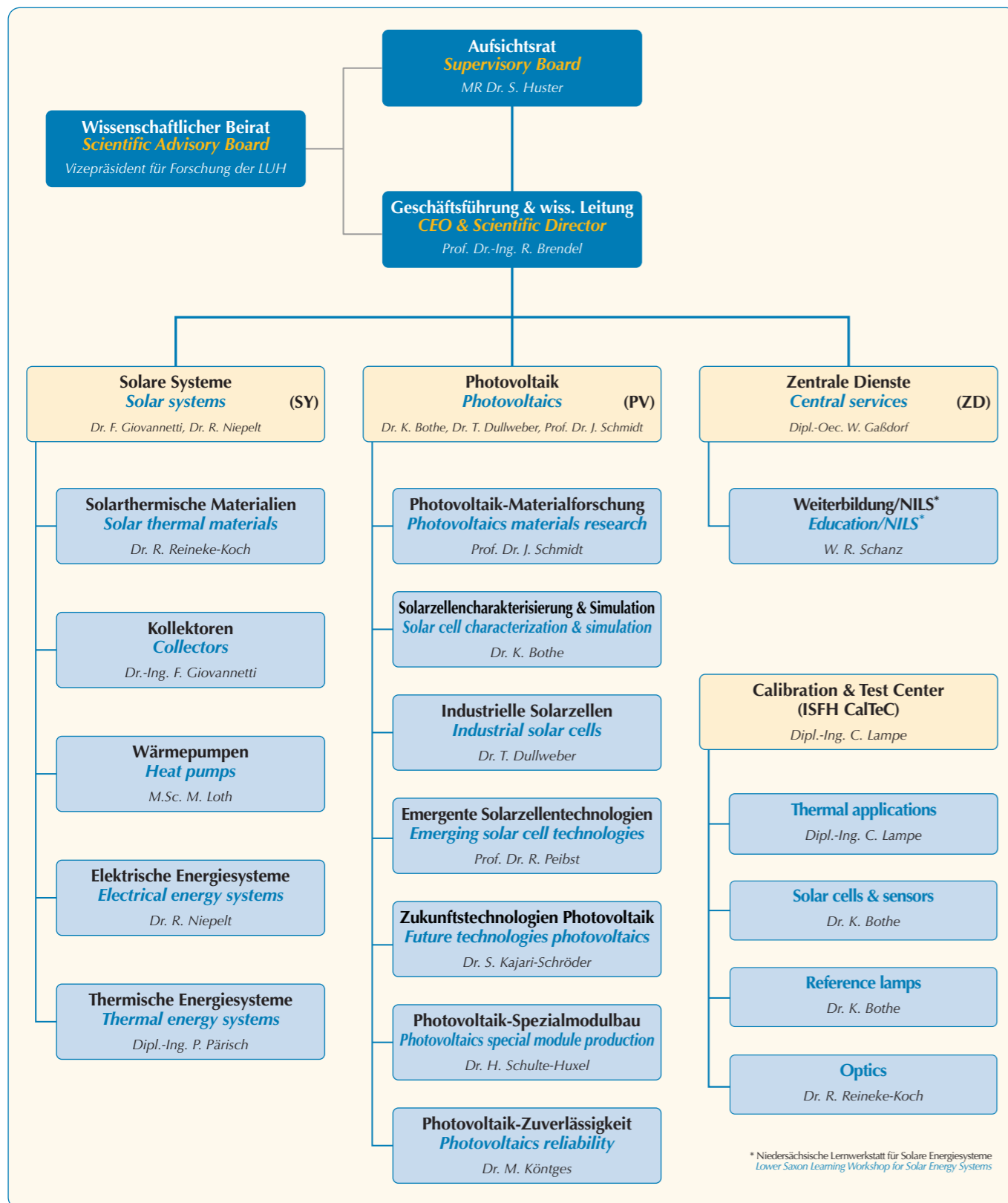
NILS is also an extra-scholastic place of learning in the BNE-Verbund^[8] and promotes education in the science, technology, engineering and mathematics (STEM) sector. As such a place of learning, it is a strong extra-scholastic partner, which, through the use of Lower Saxon teachers, ensures high quality and provides apposite offers for all types of schools.

Durch die Vernetzung mit den Schulen im BNE-Verbund erfolgt auf regelmäßig stattfindenden Treffen ein weitreichender Austausch von Erfahrungen auf Bezirks- und Landesebene.

Through networking with schools in the BNE-Verbund, an extensive exchange of experiences takes place at regular meetings at a district and provincial level.

^[8] Bildung für nachhaltige Entwicklung

^[8] Education for Sustainable Development Association



Das Organigramm des ISFH, Stand 04/2023.

The organization of ISFH, effective 04/2023.

Aufsichtsrat

Der Aufsichtsrat bestellt, überwacht und berät die Geschäftsführung. Er besteht gemäß dem Gesellschaftervertrag aus bis zu neun Mitgliedern. Ein Teil der Mitglieder wird vom Land Niedersachsen direkt entsandt, die übrigen werden von der Gesellschafterversammlung gewählt. Der Aufsichtsrat lädt zu seinen Sitzungen regelmäßig Gäste ein, die beratende Funktion ausüben. Der Aufsichtsrat tagte am 23. Juni 2022 und 6. Dezember 2022.

Die Mitglieder dieses Gremiums waren:

Mitglieder/Members

- Ministerialrat Dr. Sebastian Huster
Vorsitzender des Aufsichtsrates
Head of the Supervisory Board
Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur
Hannover
- Regierungsdirektorin Jana Miksch
Stv. Vorsitzende des Aufsichtsrates
Deputy Head of the Supervisory Board
Niedersächsisches Finanzministerium
Hannover
- Landrat Dirk Adomat
Landkreis Hameln-Pyrmont
- Prof. Dr. Rolf Haug, Institut für Festkörperphysik,
Leibniz Universität Hannover
Hannover

Wissenschaftlicher Beirat

Der wissenschaftliche Beirat berät den Aufsichtsrat und die wissenschaftliche Leitung des ISFH in allen wissenschaftlichen, technischen und organisatorischen Fragen. Die Beiratsmitglieder werden durch den niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kultur ernannt.

Die Mitglieder des Beirates sind anerkannte Wissenschaftler*innen aus Forschung und Industrie sowie Persönlichkeiten, die aus ihrer Berufserfahrung besondere Kenntnisse in den Arbeitsfeldern des ISFH haben.

Der Beirat hielt seine jährliche Sitzung am 24. November 2022. Die Mitglieder des wissenschaftlichen Beirates waren:

Supervisory Board

The Supervisory Board appoints, monitors and advises the executive office. In accordance with the Institute's statutes, it comprises up to nine members. Some of the members are directly appointed by the State of Lower Saxony, the rest are elected by a shareholders' general meeting. The Supervisory Board also regularly invites guests to its meetings who perform an advisory function. The Board's general meetings were held on 23 June and on 6 December 2022.

The members of the Board were:

- Prof. Dr. Bernd Rech
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
Berlin
- Martin Roßmann
Viessmann Werke GmbH & Co. KG
Allendorf (Eder)
- Ministerialrätin Petra Schröder
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,
Energie, Bauen und Klimaschutz
Hannover (bis 10.10.2022)
- Baudirektorin Dr. Anke Grieße
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,
Energie, Bauen und Klimaschutz
Hannover (ab 10.10.2022)

Scientific Advisory Board

The Scientific Advisory Board advises the Supervisory Board and the Scientific Director of ISFH on all scientific, technical and organizational issues. Board members are nominated by the Lower Saxon Minister for Science and Culture.

The members of the advisory board are recognized scientists from research and industry as well as personalities who have special knowledge in the fields of work of the ISFH due to their professional experience.

The Advisory Board held its annual meeting on 24 November 2022. The members of the Scientific Advisory Board were:

Wissenschaftlicher Beirat

Scientific Advisory Board

Mitglieder/Members

Stand/Effective: 31.12.2022

- Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr.-Ing. E.h. Peter Wriggers
*Vorsitzender des Beirates/
Head of the Scientific Advisory Board*
Leibniz Universität Hannover
Institut für Kontinuumsmechanik
Garbsen
- Dr. Jutta Trube
*Stellvertretende Vorsitzende des Beirates
Deputy Head of the Scientific Advisory Board*
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
Frankfurt am Main
- Prof. Dr. Günter Bräuer
Institut für Oberflächentechnik
Technische Universität Braunschweig
Braunschweig
- Prof. Dr. habil. Ursula Eicker
Concordia University
Department of Building, Civil & Environmental Engineering
Montreal, Kanada
- Dr. Gunter Erfurt
Meyer Burger Technology AG,
Thun, Schweiz
- Dr. Bernd Hafner
Viessmann Werke GmbH & Co. KG
Allendorf (Eder)
- Dr. Michel Haller
SPF Institut für Solartechnik,
OST, Ostschweizer Fachhochschule
Rapperswil, Schweiz

- Dr. Winfried Hoffmann
Applied Solar Expertise (ASE)
Hanau
- Dipl.-Ing. Helmut Jäger
SOLVIS GmbH & Co. KG
Braunschweig
- Prof. Dr. Stephan Kabelac
Leibniz Universität Hannover
Institut für Thermodynamik
Hannover
- Dr. Lars Oberbeck
Total S. A.,
Paris, Frankreich
- Dr. Kai Schiefelbein
Stiebel Eltron GmbH & Co. KG
Holzminden
- Prof. Dr. Frithjof Staiß
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg (ZSW)
Stuttgart
- Prof. Dr. Arthur Weeber
TNO Energy Transition - Solar Energy and Delft University
of Technology
Petten, Niederlande

Prof. Rolf Brendel und die Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats des ISFH in 2022 (v. r. n. l.) Dr. Lars Oberbeck, Prof. Frithjof Staiß, Dr. Kai Schiefelbein, Dr. Jutta Trube, Dr. Michel Haller, Dr. Bernd Hafner, Prof. Stephan Kabelac, Dr. Winfried Hoffmann, Prof. Arthur Weeber.

Prof. Rolf Brendel and the members of the ISFH Scientific Advisory Board in 2022 (from right to left) Dr. Lars Oberbeck, Prof. Frithjof Staiß, Dr. Kai Schiefelbein, Dr. Jutta Trube, Dr. Michel Haller, Dr. Bernd Hafner, Prof. Stephan Kabelac, Dr. Winfried Hoffmann, Prof. Arthur Weeber.



Eine Wärmepumpe vor der Vermessung im akkreditierten Prüfstand.
A heat pump before measurement in the accredited test stand.

Das Institut in Zahlen

Haushalt & Personal

Das Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal (ISFH) ist eine gemeinnützige Gesellschaft, deren alleiniger Gesellschafter das Land Niedersachsen ist. Die institutionelle Förderung erfolgt aus dem Haushalt des Ministeriums für Wissenschaft und Kultur und deckt im Berichtsjahr 30% des Gesamtetats (Einnahmen im Jahr 2022) von 12,2 Millionen Euro ab.

Neben dieser institutionellen Förderung durch das Land Niedersachsen erzielt das Institut Drittmittel aus öffentlicher Forschungsförderung des Bundes, des Landes Niedersachsen und der Europäischen Union (EU). Die Einnahmen aus der öffentlichen Projektforschung betragen im Berichtsjahr 6,6 Millionen Euro, davon ist der größte Teil Verbundforschung mit der Industrie. Hinzu kommen direkte industrielle Drittmittel aus Dienstleistungen und Auftragsforschung in Höhe von 1,9 Millionen Euro.

Zum Ende des Jahres 2022 waren 150 Personen am ISFH beschäftigt. Bei der Mehrzahl der Beschäftigten handelt es sich um wissenschaftliches und technisches Personal sowie im Rahmen von Forschungsprojekten Promovierende. In der Gruppe der Studierenden sind alle Personen zusammengefasst, die ein Praktikum absolvieren oder eine Studien-, Bachelor- bzw. Masterarbeit an Universitäten oder Fachhochschulen anfertigen und im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Ausbildung am ISFH beschäftigt werden.

Das Gelände der Institut für Solarenergieforschung GmbH am Ohrberg umfasst insgesamt eine Fläche von 32 000 m². Darauf stehen vier Forschungsgebäude mit einer Gesamtnutzfläche von 7 500 m². Zusätzlich gibt es auf dem Freigelände bzw. auf den Dachflächen die Möglichkeit, Außenversuche auf 2 000 m² Testfläche durchzuführen.

Statistics of the Institute

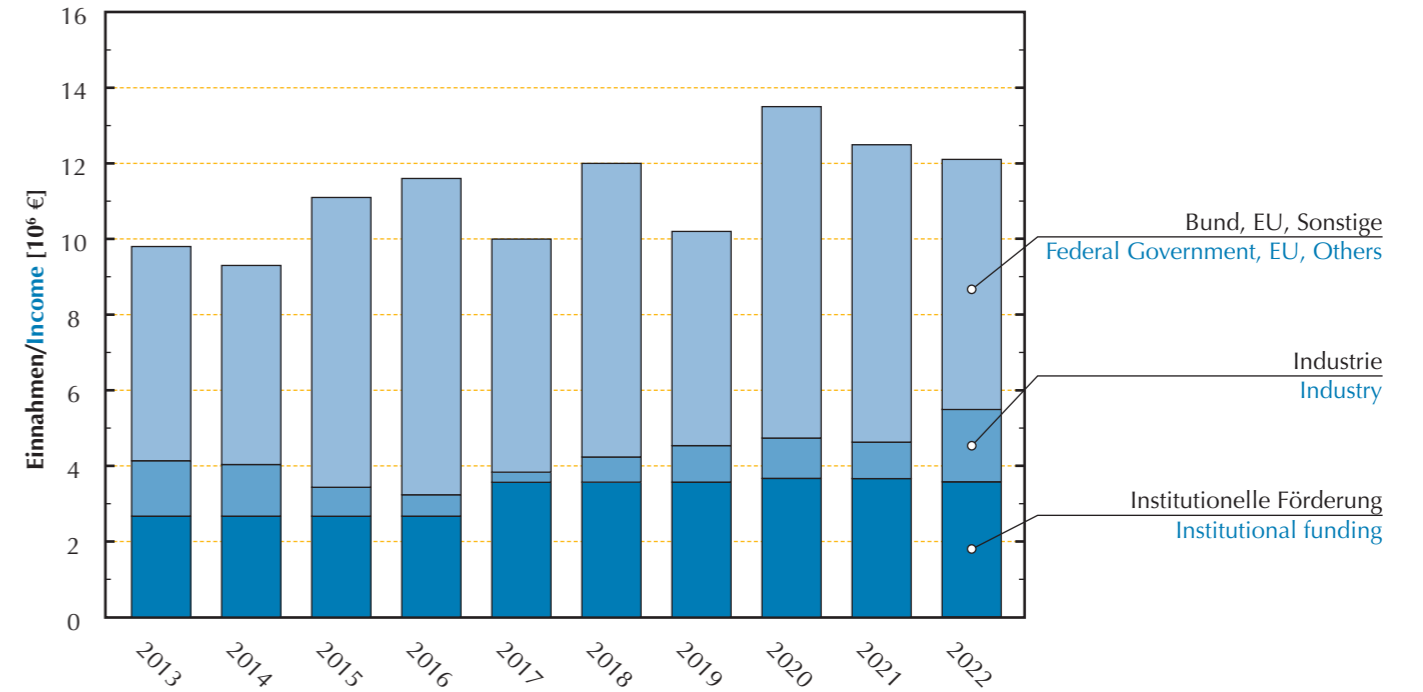
Budget & personnel

The Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH) is a non-profit organization whose sole proprietor is the State of Lower Saxony. Institutional funding comes from the budget of the Ministry for Science and Culture and makes up 30% of the total budget (income in 2022) of € 12.2 million for the reporting year.

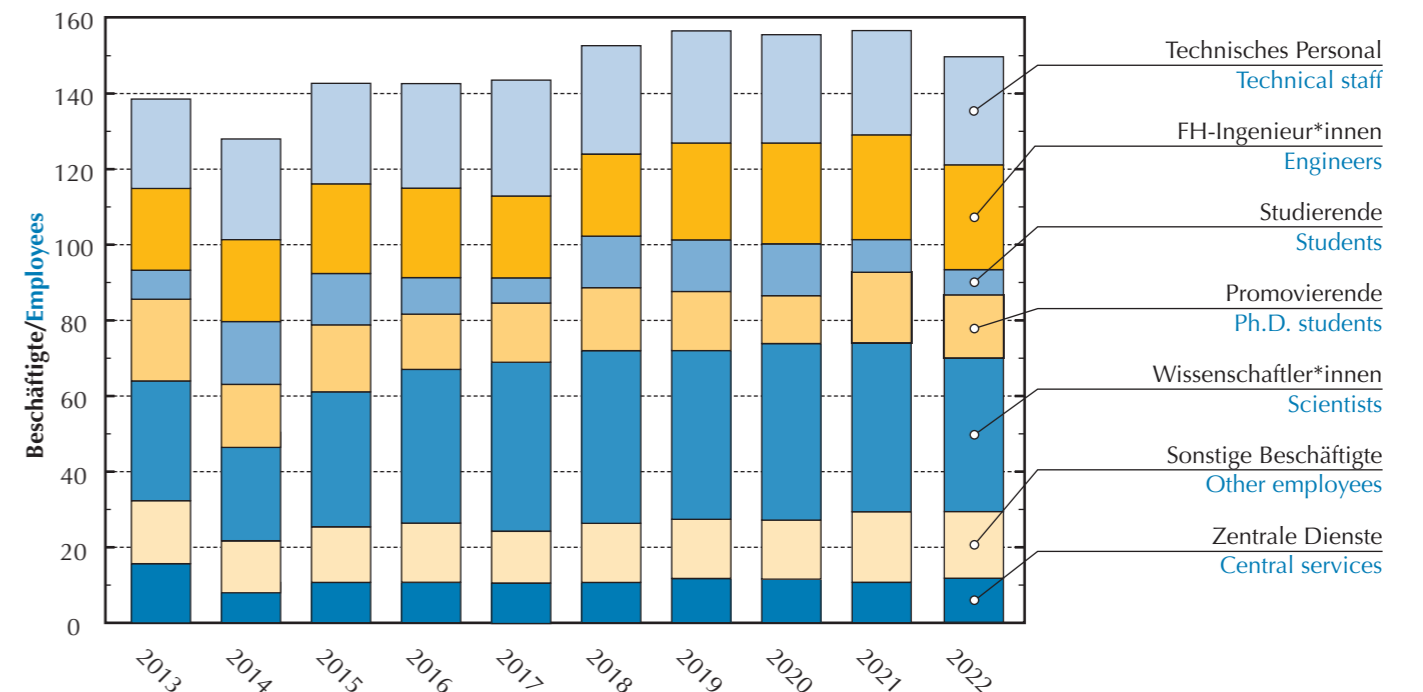
In addition to this institutional support from the State Government of Lower Saxony, the Institute receives so-called third-party funding from public research sponsors such as the Federal Government, the State Government of Lower Saxony or the European Union (EU). The income from public research projects was € 6.6 million in the reporting year, the majority of which was joint research with the industry. In addition, direct industrial third-party funding also comes from services and contract research amounting to € 1.9 million.

At the end of 2022 ISFH had 150 employees. The majority of the staff consists of scientific and technical personnel and Ph.D. students to undertake research projects. The students comprise undergraduates from universities or technical colleges employed at ISFH as part of their scientific training.

The Institute for Solar Energy Research site at the Ohrberg comprises an area of 32 000 m². There are four research buildings on it with a total floor space of 7 500 m². In addition, in the open-air areas or on the roofs there is the possibility to carry out outdoor tests on currently 2 000 m² of test area.



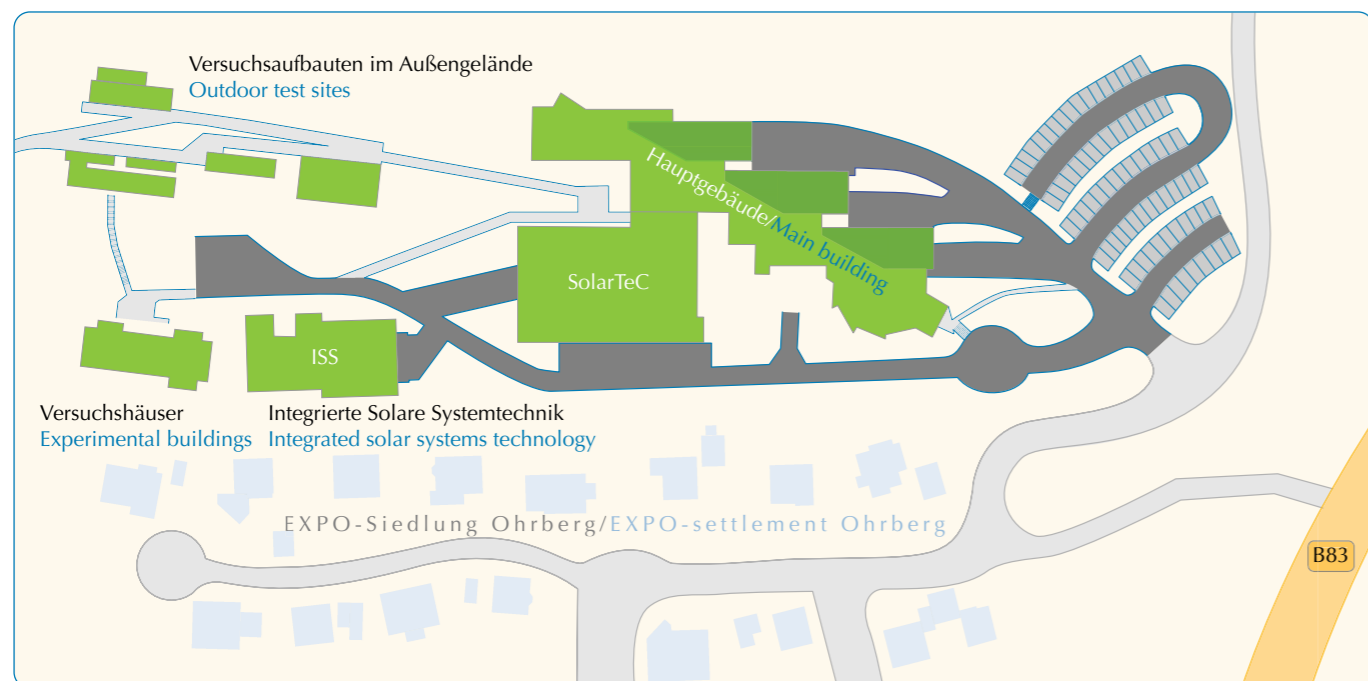
Der Haushalt des ISFH nach Einnahmequellen aufgeschlüsselt. ISFH budget broken down into funding sources.



Die Personalstruktur und Beschäftigtenzahlen am ISFH. The structure of personnel and number of employees at ISFH.

Flächenkategorie Area category	Fläche/Area [m ²]
Grundstück Property	31 812
Hauptgebäude Main building	4 358
Technologiehalle (SolarTeC) Technology hall (SolarTeC)	1 957
Laborgebäude (ISS) Laboratory building (ISS)	623
Versuchshäuser Experimental buildings	510
Versuchsaufbauten im Außengelände Outdoor test sites	557
Versuchsflächen auf dem Hauptgebäude Experimental areas on the main building	654
Versuchsflächen auf dem SolarTeC Experimental areas on SolarTeC	316

Verteilung der Flächen auf die Gebäude am ISFH.
Distribution of areas over the buildings at ISFH.



Das Gelände der Institut für Solarenergieforschung GmbH am Ohrberg.
The area of the Institute for Solar Energy Research at the Ohrberg.

Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V. (Förderverein)

Anliegen des Fördervereins^[9] ist die Unterstützung des Instituts für Solarenergieforschung (ISFH) in Hameln. Das umfasst sowohl finanzielle Förderung als auch die Kontaktpflege zwischen ISFH und Wirtschaft.

Die Herausforderungen an die Forschung definieren die Aufgaben für den Verein:

- Vermitteln der eigenen Sichtweisen von Teilmärkten an das ISFH zur Gewährleistung einer ganzheitlichen Marktwahrnehmung, z. B. mit Blick auf beobachtete Engpassfaktoren.
- Vermittlung der Forschungsleistung des ISFH in die eigenen politischen und wirtschaftlichen Netzwerke der Vereinsmitglieder.
- Nutzung der eigenen Möglichkeiten (Ressourcen und Netzwerke), um das Institut in die Region einzubinden.

Am 10. November 2022 fand am ISFH die jährliche Mitgliederversammlung des Fördervereins statt. Auf Einladung des Vereins fand im Anschluss daran ein öffentlicher Vortrag von Silke Weyberg, Geschäftsführerin Landesverband Erneuerbare Energien Niedersachsen | Bremen e. V. zum Thema „Die Sonne geht auf über Niedersachsen – energetische und wirtschaftliche Chancen erfolgreich verbinden“ statt. Darin stellte Frau Weyberg den Leitfaden Freiflächensolar des LEE vor und ging insbesondere auf die Möglichkeiten der Kommunen ein, mit der Ansiedlung erneuerbarer Energien Einnahmequellen zu erschließen.

In Niedersachsen sind bis heute etwa 5 GW PV installiert. Bis 2035 sollen es 65 GW sein, verteilt auf 50 GW PV auf Dächern und versiegelten Flächen und 15 GW Freiflächenphotovoltaikanlagen (FFPVA). Insbesondere die Kommunen leisten hier einen wichtigen Beitrag für das Gelingen der Energiewende, denn die Entscheidung darüber, ob und wie erneuerbare Energieanlagen errichtet werden können, liegt auch bei ihnen, da es in vielen Fällen der Aufstellung entsprechender Bebauungspläne bedarf.

Im Jahre 2022 hat der Förderverein die Anschaffung einer GaAs-Referenzsolarzelle für das Solarzellenkalibrierlabor des ISFH CalTeC gefördert. Damit wird die Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Dünnschichtsolarzellen gesenkt. Der Vorteil einer GaAs-Referenzzelle gegenüber einer Si-Referenzzelle besteht in einer besser angepassten spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit gegenüber Dünnschichtsolarzellen aus CdTe oder CuInGaSe₂.

^[9] Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V., c/o Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer GmbH, Dipl.-Ing. Detlef Mencke, Vorsitzender/Chairman, Schwarzer Weg 43a, 31789 Hameln, Telefon/Telephone 05151/403 699 - 0, Email: mencke@ib-mut.de

Society for the Promotion of the Institute for Solar Energy Research (Friends of the ISFH)

The aim of the "Friends"^[9] is the support of the Institute for Solar Energy Research (ISFH) in Hamelin. This includes both financial support and assistance with the maintenance of contacts between ISFH and industry.

The challenges to research define the tasks for the Friends:

- To communicate the particular points of view of market sectors to ISFH to ensure awareness of the whole market e.g. in respect of perceived bottleneck factors
- Communication of the research achievements of ISFH through Society members' own political and economic networks
- Use of its own facilities (resources and networks) to integrate the Institute better into the region

On November 10 2022, the annual general meeting of the Friends of the ISFH took place. At the invitation of the association, a public lecture by Silke Weyberg, Managing Director of the Landesverband Erneuerbare Energien Niedersachsen | Bremen e. V. on the topic "The sun rises over Lower Saxony - successfully combining energy and economic opportunities" took place afterwards. Ms. Weyberg presented the LEE's guide to ground-mounted solar power plants and focused in particular on the opportunities for local authorities to tap into sources of income by developing renewable energies.

In Lower Saxony, about 5 GW of PV have been installed to date. By 2035, this figure is supposed to be 65 GW, divided into 50 GW of PV on roofs and sealed surfaces and 15 GW of ground-mounted photovoltaic systems (FFPVA). The municipalities in particular make an important contribution to the success of the energy transition, as the decision as to whether and how renewable energy plants can be erected also lies with them, as in many cases it is necessary to draw up corresponding development plans.

In 2022, the Friends have funded the purchase of a GaAs reference solar cell for the solar cell calibration laboratory at ISFH CalTeC. This will reduce the measurement uncertainty in the calibration of thin-film solar cells. The advantage of a GaAs reference cell compared to a Si reference cell is a better matched spectral irradiance response compared to thin film solar cells made of CdTe or CuInGaSe₂.



v. l. n. r.: Prof. Rolf Brendel und der erweiterte Vorstand des Fördervereins: Detlef Mencke (Ingenieurbüro Mencke und Tegtmeyer GmbH, Vorsitzender), Ute Buff (Steuerkanzlei Buff, Kassenprüferin), Hans Niemeyer (C.W. Niemeyer GmbH & Co. KG, Vorstandsmitglied), Susanne Treptow (Stadtwerke Hameln Weserbergland GmbH, Schatzmeisterin), Sven Szubin (Stadt Hameln, Vorstandsmitglied), Rainer Tepe (proKlima, Stellvertretender Vorsitzender)

From left to right: Prof. Rolf Brendel and the extended board of the Friends: Detlef Mencke (Ingenieurbüro Mencke und Tegtmeyer GmbH, chairman), Ute Buff (Steuerkanzlei Buff, cash auditor), Hans Niemeyer (C.W. Niemeyer GmbH & Co. KG, board member), Susanne Treptow (Stadtwerke Hameln Weserbergland GmbH, treasurer), Sven Szubin (City of Hameln, board member), Rainer Tepe (proKlima, vice chairman).

Mitglieder/Members

Stand/Effective: 31.12.2022

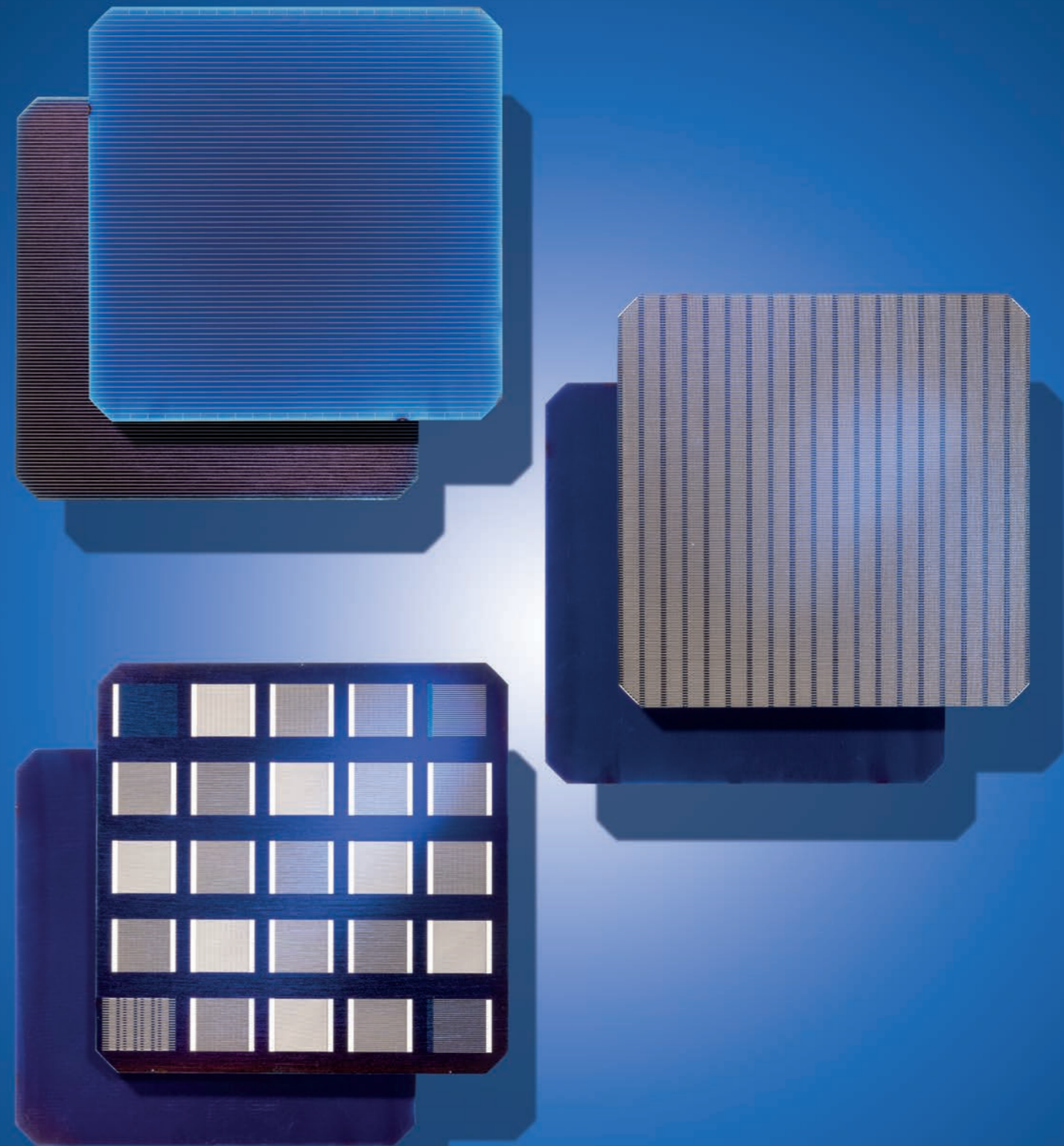
Firmen & Körperschaften/Companies & Corporations

- BHW Bausparkasse AG, Hameln
- C.W. Niemeyer GmbH & Co. KG, Hameln
- Dr. Paul Lohmann GmbH & Co. KGaA, Emmerthal
- elektroma GmbH, Hameln
- Gemeinde Emmerthal, Emmerthal
- Hochschule Weserbergland (HSW), Hameln
- Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer GmbH, Hameln
- Innung SHK Hameln (Sanitär/Heizung), Hameln
- Klimaschutzagentur Weserbergland, Hameln
- Kreishandwerkerschaft Hameln-Pyrmont, Hameln
- KSG Kreissiedlungsgesellschaft mbH des Landkreises Hameln-Pyrmont, Hameln
- NWDH Holding AG, Hameln
- PAW GmbH & Co. KG, Hameln
- proKlima – Der enercity-Fonds, Hannover
- pv-tools GmbH, Hameln

- riha WeserGold Getränkeindustrie GmbH & Co. KG, Rinteln
- Sparkasse Hameln-Weserbergland, Hameln
- Stadt Hameln, Hameln
- Stadtwerke Bad Pyrmont GmbH, Bad Pyrmont
- Stadtwerke Hameln Weserbergland GmbH, Hameln
- Stadtwerke Rinteln GmbH, Rinteln
- Steinmann BAU GmbH, Emmerthal
- Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, Holz Minden
- Viega GmbH & Co. KG, Attendorn
- Westfalen Weser Netz GmbH, Paderborn
- Zacharias Gebäudetechnik GmbH, Hameln

Natürliche Personen/Natural persons

- Buff, Ute
- Specht, Peter
- Zacharias, Horst



Vorder- und Rückseiten von POLO-Solarzellen. Oben: großflächige POLO BJ-Solarzelle. Mitte: großflächige POLO IBC-Solarzelle. Unten: 25 kleinflächige POLO IBC-Solarzellen.

Front and back sides of POLO solar cells. Top: large-area POLO BJ solar cell. Middle: large-area POLO IBC solar cell. Bottom: 25 small-area POLO IBC solar cells.

Abteilung Photovoltaik

Forschungsthemen

- Verlust- und Sensitivitätsanalyse von Solarzellen auf Basis von Solarzellensimulationen und präzise gemessenen Eingangsparametern
- Schlüsseltechnologien zur kostengünstigen Herstellung von Hocheffizienz-Solarzellen und -PV-Modulen
- Oberflächenpassivierung von Silizium-Solarzellen (SiO_2 , SiN_x , Al_2O_3 , poly-Si)
- Hocheffiziente Solarzellen mit poly-Si-on-Oxide (POLO)-Kontakten
- Hocheffiziente Perowskit/c-Si-Tandem-Solarzellen
- Industriennahe Technologie- und Prozessentwicklung
- Kamerabasierte Charakterisierung von Silizium-Materialien, Solarzellen und PV-Modulen
- Analyse von Defekten in Silizium und ihren Auswirkungen auf Solarzellen- und PV-Moduleigenschaften
- Neuartige Verbindungstechniken für PV-Module
- Langzeitstabilität von Solarzellen und PV-Modulen
- Mechanische Eigenschaften von PV-Modulen
- Fahrzeugintegrierte Photovoltaik (VIPV)
- Gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV)
- Bauelement- und Prozesssimulation

Dienstleistungen

- Kalibrierung von Solarzellen
- Kalibrierung von Solarstrahlungssensoren
- Prüfung von Spektralradiometern
- Kalibrierung von Strahlernormalen
- Charakterisierung von Solarzellen und PV-Modulen
- Sonder-PV-Modulbau

Apparative Ausstattung

- 800-m²-Solar-Technikum (SolarTeC) für die Prozessierung von Solarzellen auf industrienahen Anlagen (Batch- und Inline-Nasschemie, Diffusions- und Oxidationsofen, Direkt-Plasmaabschichtungsanlage (PECVD), Siebdrucker, Feuerofen)
- Reinraumlabor für Siliziumtechnologie (nasschemische Prozesse)
- Laserlabor mit mehreren Laser-Materialbearbeitungssystemen
- Niederdruck chemische Gasphasenabscheidung (LPCVD) von dotierten amorphen Silizium-Schichten
- PECVD-Anlagen für Abscheidung dotierter amorpher Silizium-Schichten
- Thermische und plasmaunterstützte Atomlagenabscheidung (ALD)
- Ultraschnelle ALD-Abscheidung
- Koverdampfung von Perowskiten
- Nasschemische Abscheidung von Perowskiten

Photovoltaics department

Research topics

- Loss and sensitivity analysis of solar cells on the basis of solar cell modeling using precisely measured input parameters
- Key technologies for the cost-efficient production of high-efficiency solar cells and PV modules
- Surface passivation of silicon solar cells (SiO_2 , SiN_x , Al_2O_3 , poly-Si)
- High-efficiency solar cells with poly-Si-on-oxide (POLO)-contacts
- High-efficiency perovskite/c-Si tandem solar cells
- Industry-related technology and process development
- Camera-based characterization of silicon materials, solar cells and PV modules
- Analysis of defects in silicon and their impact on solar cell and PV module properties
- Innovative interconnection techniques for PV modules
- Long-term stability of solar cells and PV modules
- Mechanical properties of PV modules
- Vehicle-integrated photovoltaics (VIPV)
- Building-integrated photovoltaics (BIPV)
- Device and process simulation

Services

- Calibration of solar cells
- Calibration of solar irradiance sensors
- Testing of spectroradiometers
- Calibration of reference lamps
- Characterization of solar cells and PV modules
- Customized PV modules

Equipment & facilities

- 800m² solar technology center (SolarTeC) for the processing of solar cells using industrial equipment (batch and inline wet chemical tools, diffusion and oxidation furnace, direct plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), screen printer, firing furnace)
- Clean room laboratories for silicon technology (wet chemical)
- Laser laboratory with several laser material processing systems
- Low-pressure chemical vapor deposition (LPCVD) of doped amorphous silicon layers
- PECVD tools for the deposition of doped amorphous silicon layers
- Thermal and plasma-assisted atomic layer deposition (ALD)
- Ultra-fast ALD
- Co-evaporation of perovskites
- Wet-chemical deposition of perovskites
- Sequential deposition of perovskites

- Sequentielle Abscheidung von Perowskiten
- Integrierte Hochraten-Durchlauf-Aufdampf- und Sputteranlage
- Ionenimplanter (gemeinsame Nutzung mit dem MBE-Institut der LUH und anderen Nutzern des LNQE)
- Verbindungs- und PV-Modultechnologie: Löttechnik, Laminator
- Klimakammern sowie UV- und Halogenlampen-Bestrahlungsplätze
- Transportsimulation von PV-Modulen (Shaker)
- PV-Modulflasher, Elektrolumineszenz- und UV-Fluoreszenz-messplatz für PV-Module
- Isolationsprüfplatz für PV-Module
- Sonnensimulatoren und spektrale Empfindlichkeitsmessung für 6"-Solarzellen und PV-Module
- Vollautomatisiertes integriertes Solarzellen-Charakterisierungstool (LOANA)
- Kamerabasierte Elektro- und Photolumineszenz für Solarzellen und Wafer
- Voll integriertes Analysetool für Mehrfachsolarzellen (LOANA-mj)
- IV-Charakterisierung für Perowskit-Solarzellen in inerter Atmosphäre
- Quasistatische Messung der Photoleitung (QSSPC)
- Absolute Photolumineszenz für Perowskit-Charakterisierung
- Mikrowellen-detektiertes Photoleitungsabklingen (MW-PCD)
- Temperatur- und injektionsabhängige Lebensdauerspektroskopie (TIDLS)
- Kapazitäts-Spannungs-Messungen (CV)
- Dotierprofilmessung mit ECV-Profilier
- Licht- und Rasterelektronenmikroskopie
- Energiedispersive Röntgenanalyse und Röntgenbeugung (EDX und XRD)
- Ramanspektrometer und Röntgendiffraktometer
- Messplatz für temperaturabhängige Hall-Messungen
- Praxistaugliches, elektrisch betriebenes, leichtes Nutzfahrzeug als Demonstrator für Fahrzeug-integrierte Photovoltaik mit Einspeisung ins Hochvoltbordnetz

Glanzlichter

- Erstmalige Charakterisierung von Perowskit-Dünnschichten mittel quasistatischer Photoleitung (QSSPC)
- ISFH CalTeC nimmt IV-Messplatz für die Kalibrierung von Solarzellen bis zum M12-Format (Kantenlänge 210mm) in Betrieb
- POLO BJ-Solarzelle mit LPCVD-poly-Si erreicht 23,1% Wirkungsgrad
- POLO IBC-Solarzelle mit lokaler PECVD-SiON/n-a-Si-Abscheidung durch Schattenmaske erzielt 23,0% Wirkungsgrad
- Übertragung des lokalen PECVD-Prozesses auf industrielle Beschichtungsanlage erzielt exzellentes $J_0 = 3 \text{ fA/cm}^2$ nach Feuern
- Monolithische Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzelle mit Silizium-Bottom-Solarzelle vom ISFH erreicht 26,9% Wirkungsgrad und 1,9V V_{oc}
- Rissfreie Lamination von Solarzellensträngen auf einer bidirektional gewölbten Motorhaube

- Integrated high-rate inline deposition and sputtering system
- Ion implanter (together with the MBE institute of the LUH and other users of the LNQE)
- PV module technology: soldering equipment, laminator
- Climate chambers as well as UV- and halogen-lamp irradiation chambers
- Transport simulation for PV modules (Shaker)
- PV module flasher, electroluminescence and UV-fluorescence set-ups for PV module characterization
- Isolation test stand for PV modules
- Solar simulators and spectral response set-ups for 6"-solar cells and PV modules
- Fully-automated integrated solar cell characterization tool (LOANA)
- Camera-based electro- and photoluminescence equipment for solar cells and wafers
- Fully integrated analysis tool for multijunction solar cells (LOANA-mj)
- IV characterization for perovskite solar cells in inert atmosphere.
- Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC)
- Absolute photoluminescence for characterization of perovskites
- Microwave-detected photoconductance decay (MW-PCD)
- Temperature- and injection-dependent lifetime spectroscopy (TIDLS)
- Capacitance-voltage measurements (CV)
- Doping profile measurement by ECV method
- Optical and scanning electron microscopy
- Energy-dispersive X-ray analysis and diffraction (EDX and XRD)
- Raman spectrometer and X-ray diffractometer
- Measurement set-up for temperature-dependent Hall measurements
- Practical, electrically-powered light commercial vehicle as demonstrator for vehicle-integrated photovoltaics with feed-in to high-voltage on-board network

Highlights

- First characterization of perovskite thin films by means of quasi-steady state photoconductance (QSSPC)
- ISFH CalTeC puts IV measuring system for the calibration of solar cells up to M12 format (edge length 210mm) into operation
- POLO BJ solar cells with LPCVD poly-Si achieves 23.1% efficiency
- POLO IBC solar cell with local PECVD SiON/n-a-Si deposition through shadow mask achieves 23.0% efficiency
- Transfer of local PECVD process to industrial deposition equipment achieves excellent $J_0 = 3 \text{ fA/cm}^2$ after firing
- Monolithic perovskite-silicon tandem solar cell with silicon bottom solar cell from ISFH achieves efficiency of 26.9% and V_{oc} of 1.9V
- Crack-free lamination of solar cell strings on a bidirectionally curved car bonnet

Abteilung Solare Systeme

Forschungsthemen

- Regenerative Versorgungskonzepte für Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Quartiere
- Solarthermische Kollektoren für neue Anwendungsgebiete (Kollektorfelder für Wärmenetze, Prozesswärme, Wärmepumpenquelle)
- Photovoltaisch-thermische (PVT)-Kollektoren für kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung
- Solarthermische Aktivierung von Komponenten der Gebäudehülle
- Neu- und Weiterentwicklung von Verfahren zur Prüfung, Effizienz- und Ertragskontrolle von Wärmeerzeugern und -zentralen
- Hygienisch gesicherte Absenkung der Versorgungstemperaturen für Trinkwarmwasser
- Optimierung der Wärmeverteilung in Mehrfamilienhäusern mit smarten Wohnungsstationen
- Entwicklung von Simulationsmodellen
- Entwicklung von innovativen Absorber- und Glasbeschichtungen
- Entwicklung von Komponenten für die Wasser-Elektrolyse, insbesondere PEM-Elektrolyse, Korrosionsforschung, elektrochemische Kinetik

Dienstleistungen

- EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüfzentrum
- Norm-Prüfungen und Prüfungen nach SolarKeymark-Regeln an thermischen Energiewandlern, Energiespeichern und Systemen sowie Komponenten zum thermischen Energietransport
- Norm-Prüfungen der strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Beschichtungen und Oberflächen
- Charakterisierung von Luft/Wasser-Wärmepumpen bis 30 kW_{th} sowie Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen bis 60 kW_{th}
- Charakterisierung von Frischwasserstationen mit einer Schüttleistung bis 100 l/min mit einstellbarer Zirkulationslast
- Charakterisierung von Dämmungen, Wärmerohren, Speicherschläüssen, Wohnungsstationen
- Wissenschaftliche Begleitung industrieller Entwicklungen mit experimentellen Methoden und Simulationen sowie Feldtests
- Energiesystemmodellierung und -monitoring
- Auslegung von Erdwärmesondenfeldern mit (solarer) Regeneration
- Hochvakuum-Beschichtungen für Flachgläser, Bleche und plane Elektroden

Solar systems department

Research topics

- Renewable energy supply concepts for buildings and districts
- Solar thermal collectors for new applications (collector fields for solar district heating, industrial processes, source for heat pumps)
- Photovoltaic-thermal (PVT)-collectors for combined electricity and heat generation
- Solar thermal activation of components of the building envelope
- New and further development of methods for testing procedures and automatic efficiency and yield control of heat generators and stations
- Hygienically secured reduction of supply temperatures for drinking water
- Optimization of heat distribution in apartment buildings with smart dwelling stations
- Development of simulation models
- Development of innovative coatings for absorbers and glazing
- Development of components for water electrolysis, in particular PEM electrolysis, corrosion research, electrochemical kinetics

Services

- ISO/IEC 17025-accredited test laboratory
- Standard tests and tests in accordance with the SolarKeymark rules on thermal energy converters, thermal storages and systems as well as systems and components for transfer of thermal energy
- Standard tests of radiometric properties of coatings and surfaces
- Characterization of air/water heat pumps up to 30 kW_{th}, and water/water and brine/water heat pumps up to 60 kW_{th}
- Characterization of central domestic hot water modules with a maximum flow rate of 100 l/min with adjustable circulation load
- Characterization of insulation materials, heat pipes, storage tank connections, dwelling stations
- Scientific support of industrial developments using experimental methods and simulation studies as well as field tests
- Energy system modeling and monitoring
- Design of borehole heat exchanger fields with (solar) regeneration
- High-vacuum coatings for flat glasses, sheets and plane electrodes

Apparative Ausstattung

- Innenprüfstände mit zwei Sonnensimulatoren für Leistungs- und Gebrauchstauglichkeitstests, bis 1 200 W/m²
- Prüfanlagen für Druck-, Sog- und Schubprüfungen an Solarmodulen
- Testdächer mit 400 m² Nutzfläche für Gebrauchstauglichkeitstests an Sonnenkollektoren und Systemen sowie Leistungstests an Kollektoren bis 180 °C
- Prüfstand für Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen im dynamischen Betrieb bis 30 bzw. 60 kW_{th}
- Zwei nachführbare Außenprüfstände mit 20 m² Nutzfläche
- Prüfstand für Systemtests an Solaranlagen nach EN 12976
- Prüfstände für Wärmespeicher, Reglerprüfstand nach EN 12977
- Begehbare Klimakammern (75 m³ und 180 m³)
- Vakuum-Beschichtungsanlagen (Sputtern, PECVD)
- Optisches Labor für Transmissions- und Reflexionsmessungen spektral aufgelöst (UV-VIS-NIR-MIR), spektrale Ellipsometrie (0,24 µm bis 33 µm) mit Probentemperierung
- Spektral-Gonioradiometer mit 2,5 m Radius für Messungen der bidirektionalen Reflexions- und Transmissions-Verteilungsfunktion (BRDF, BTDF)
- Ulbricht-Kugel für spektrale Transmissions- und Reflexionsmessungen von großformatigen, Licht-streuenden Proben
- Oberflächen-Rauheit
- Kontaktwinkel-Messung, dynamisch
- Testanlagen für Alterungsuntersuchungen an Glas- und Absorber-Oberflächen (Kondensat, Temperatur, korrosive Medien)
- Leistungs- und Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen an Wärmerohren
- Prüfstände für Dämmstoffe (Gebrauchstauglichkeit, Wärmeleitfähigkeit)
- Hardware-in-the-Loop-Experimentalanlagen regenerativer Strom/Wärmesysteme
- Prüfstand zur Bewertung von Wärmeübergabestationen (bis 100 l/min) inkl. Zirkulation
- Hardware-in-the-Loop-Outdoor-Teststand für großformatige, solarthermische und photovoltaische Fassaden (bis 50 m²)
- Prüfstand für die Bewertung menschlicher Wahrnehmung von Temperaturschwankungen beim Duschen

Glanzlichter

- Aufbau eines Wasser-Elektrolyse-Teststandes für drei PEM-Elektrolysezellen mit 25 cm² bzw. 100 cm² Elektrodenfläche
- Techno-ökonomische Optimierung eines mit PVT regenerierten Erdwärmesondenfelds für ein geplantes Plusenergiequartier
- Systemvergleich von PVT-Wärmepumpensystemen mit Referenzsystemen für die Wärmeversorgung eines Bestands-Einfamilienhauses in TRNSYS
- Überführung des am ISFH entwickelten wissenschaftlichen Effizienzmonitorings in die Praxis der Wohnungswirtschaft

Equipment & facilities

- Indoor test facilities with two sun simulators for performance and reliability tests, up to 1 200 W/m²
- Test facilities for pressure, suction and thrust loads on solar modules
- 400 m² test roofs for reliability tests on collectors and systems as well as performance tests on solar collectors up to 180 °C
- Test facility for air/water-, water/water- and brine/water heat-pumps in dynamic operation up to 30 and 60 kW_{th}, respectively
- Two outdoor solar-tracking test stands with an effective area of 20 m²
- Test facility for solar systems in accordance with EN 12976
- Test facilities for thermal storage tanks, control test facility (EN 12977)
- Walk-in climate chambers (75 m³ and 180 m³)
- Vacuum coating facilities (sputtering and PECVD)
- Optical laboratory for spectrally-resolved transmission and reflection measurements (UV-VIS-NIR-MIR), spectral ellipsometry (0.24 µm to 33 µm) including temperature control of samples
- Spectral-gonioradiometer with a radius of 2.5 m for measurements of bidirectional reflectance and transmittance distribution function (BRDF, BTDF)
- Integrating sphere for spectral transmittance and reflectance measurements of large, light scattering samples
- Surface roughness
- Contact angle measurement, dynamic
- Facilities for aging tests for glass and absorber surfaces (condensation, temperature, corrosive media)
- Performance and reliability tests on heat pipes
- Test facilities for insulation materials (reliability, thermal conductivity)
- Hardware-in-the-loop experimental facilities for renewable heat/power systems
- Test facility for heat transfer stations (up to 100 l/min) including circulation
- Hardware-in-the-loop outdoor test facility for large solar thermal and photovoltaic façades (up to 50 m²)
- Test facility for the evaluation of human perception of temperature fluctuations during showering

Highlights

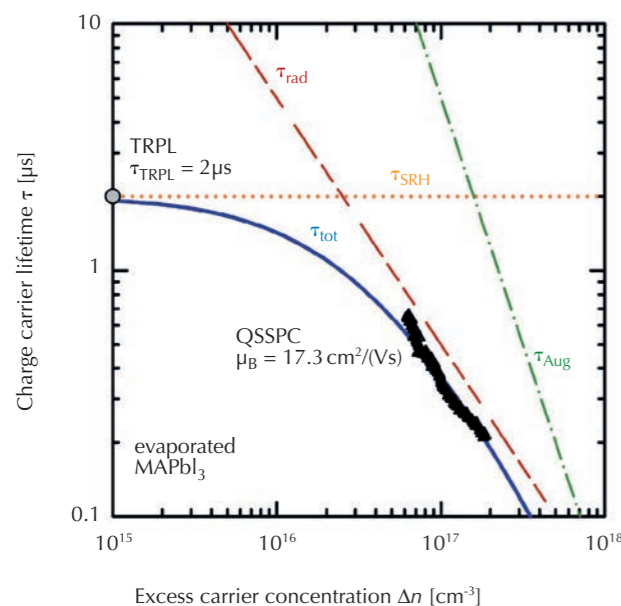
- Set-up of a water electrolysis test rig for three PEM electrolysis cells with 25 cm² and 100 cm² electrode area, respectively.
- Techno-economic optimization of a PVT-regenerated borehole heat exchanger field for a planned plus-energy quarter.
- System comparison of PVT heat pump systems with reference systems for the heat supply of an existing single-family house in TRNSYS
- Transfer of the scientific efficiency monitoring developed at ISFH into the practice of the housing industry

Abteilung Photovoltaik

Quasistatische Photoleitungsmessungen an Perowskit-Dünnschichten

Metall-Halogenid-Perowskite sind eine relativ neue Materialklasse für die Anwendung in Solarzellen. Perowskite sind potenziell kostengünstige Materialien und können mit Silizium-Solarzellen in Tandem-Solarzellen kombiniert werden, die ein realistisches Wirkungsgradpotenzial von deutlich über 30% haben. Um das Wirkungsgradpotenzial eines bestimmten Perowskit-Materials vor der Anwendung eines kompletten Solarzellenprozesses charakterisieren zu können, ist die Entwicklung von einfach anzuwendenden Methoden zur Messung der leistungsbegrenzenden Rekombinationsverluste von großer Relevanz. Ein Standardwerkzeug in der siliziumbasierten Photovoltaik ist die kontaktlose quasistatische Photoleitungsmessung (QSSPC), die heute in der siliziumbasierten Photovoltaik routinemäßig für injektionsabhängige Messungen der Ladungsträgerlebensdauer von kristallinen Siliziumwafern eingesetzt wird.

In dieser Studie haben wir die QSSPC-Methode erstmals auf Metall-Halogenid-Perowskit-Schichten angewandt. Trotz unserer anfänglichen Erwartung, dass das Perowskit-Signal möglicherweise nicht nachweisbar sein würde, waren wir überrascht, dass wir ein deutlich ausgeprägteres Signal als angenommen beobachten konnten. Der Grund dafür ist eine überraschend hohe Empfindlichkeit des QSSPC-Systems bei extrem niedrigen Leitwerten, verglichen mit dem um Größenordnungen höheren typischen Leitwertbereich



Photovoltaics department

Quasi-steady-state photoconductance measurements on perovskite thin films

Metal-halogenide perovskites are a relatively new material class for the application in solar cells. Perovskites are potentially low-cost materials and can be combined with silicon solar cells in tandem cells, which have a realistic efficiency potential well above 30%. In order to be able to characterize the efficiency potential of a particular perovskite material before applying a complete solar cell process, the development of easy-to-apply methods to measure the performance-limiting recombination losses are of utmost importance. A standard tool in silicon-based photovoltaics is the contactless quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) method, which, today, is routinely used in silicon-based photovoltaics for injection-dependent carrier lifetime measurements of crystalline silicon wafers.

In this study, we have applied the QSSPC method for the first time to metal-halogenide perovskite layers. Despite our initial expectation that the perovskite signal would perhaps not even be detectable at all, we were surprised to observe a much more pronounced signal than assumed. The reason turned out to be a surprisingly high sensitivity of the QSSPC system at ultralow conductances, compared to the typical conductance range of the standard measurements on silicon wafers. Based on a new calibration for ultralow conductances, we were able to calculate the injection-dependent carrier lifetime of 500 nm thick evaporated MAPbI₃

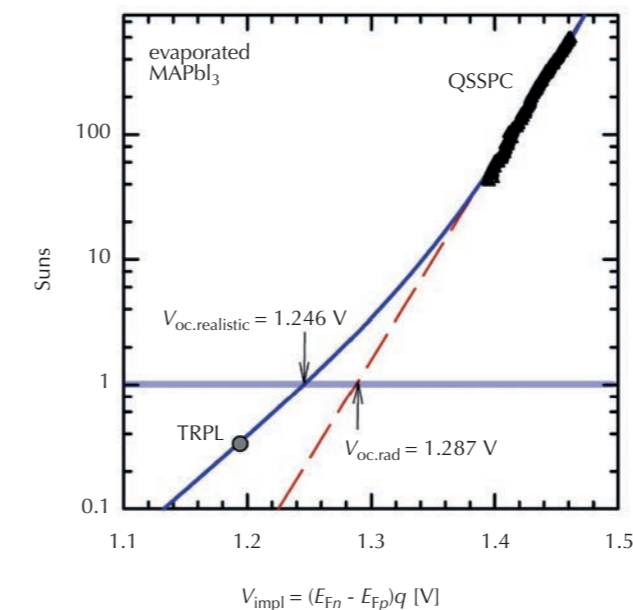
Abbildung/Figure 23: QSSPC-Messung der injektionsabhängigen Ladungsträgerlebensdauer (Dreiecke) einer 500 nm dicken aufgedampften MAPbI₃-Perowskitschicht auf einem Glassubstrat. Gezeigt ist auch eine zeitaufgelöste Photolumineszenzmessung (TRPL) derselben Probe (grauer Kreis) und die berechnete Gesamtlebensdauer (durchgezogene blaue Linie), die im Injektionsbereich der QSSPC-Messung von der strahlenden Rekombination (gestrichelte rote Linie) dominiert wird.

QSSPC measurement of the injection-dependent charge carrier lifetime (triangles) of a 500 nm thick evaporated MAPbI₃ perovskite layer on a glass substrate. Also shown is a time-resolved photoluminescence (TRPL) measurement of the same sample (grey circle) and the calculated total lifetime (solid blue line), which is dominated by the radiative lifetime (dashed red line) in the injection range of the QSSPC measurement.

der Standardmessungen auf Siliziumwafern. Basierend auf einer neuen Kalibrierung für ultraniedrige Leitwerte konnten wir die injektionsabhängige Ladungsträgerlebensdauer von 500 nm dicken aufgedampften MAPbI₃-Perowskit-Schichten aus dem gemessenen QSSPC-Signal berechnen, wie in Abb. 23 beispielhaft dargestellt ist.

Aus den Lebensdauerermessungen kann man nun eine implizierte Leerlaufspannungscharakteristik der untersuchten Perowskit-Schicht ableiten. Die implizierte Spannung V_{impl} entspricht der Quasi-Fermi-Niveau-Aufspaltung im Perowskit $V_{impl} = (E_{Fn} - E_{Fp})/q$, wobei E_{Fn} und E_{Fp} die Quasi-Fermi-Niveaus von Elektronen und Löchern und q die Elementarladung sind.

Abbildung 24 zeigt die resultierenden Intensitäts- V_{impl} -Charakteristiken der untersuchten MAPbI₃-Schicht, wie sie aus den Kurven in Abb. 23 berechnet wurden. Die gestrichelte rote Linie ist eine Extrapolation der QSSPC-Daten unter der Annahme, dass nur strahlende Rekombination stattfindet. Die Extrapolation der roten gestrichelten Kurve auf eine Sonne ergibt einen $V_{oc,rad}$ -Grenzwert von 1,287 V für das MAPbI₃-Material im Strahlungs-limit. Um ein relevanteres Ein-Sonnen- V_{oc} für die Probe unter Einbeziehung der defektbedingten Shockley-Read-Hall (SRH)-Rekombination zu bestimmen, beziehen wir zeitaufgelöste Photolumineszenzmessung (TRPL)-Daten ein, die bei deutlich niedrigeren Injektionsdichten gemessen wurden.



Die TRPL-Lebensdauer ist weitgehend durch SRH-Rekombination begrenzt und wird zur Bestimmung der Gesamtlebensdauer verwendet (blaue durchgezogene Linie in Abb. 23). Die Umrechnung der Kurve für die Gesamtlebensdauer in Abb. 23 in die Suns- V_{impl} -Kurve resultiert in der blauen durchgezogenen Linie in Abb. 24. Diese Linie stellt die realistischste Grenze für

perovskite layers from the measured QSSPC signal, as exemplarily shown in Fig. 23.

From the lifetime measurements, one can now deduce a suns-impl open-circuit voltage characteristic of the examined perovskite layer. The implied voltage V_{impl} corresponds to the quasi-Fermi level splitting in the perovskite $V_{impl} = (E_{Fn} - E_{Fp})/q$, where E_{Fn} and E_{Fp} are the quasi-Fermi levels of electrons and holes and q is the elementary charge.

Figure 24 shows the resulting suns- V_{impl} characteristics of the examined MAPbI₃ layer as calculated from the curves shown in Fig. 23. The dashed red line is an extrapolation of the QSSPC data assuming only radiative recombination takes place. Extrapolation of the red dashed curve to one sun provides us with a $V_{oc,rad}$ -limit of 1.287 V for the MAPbI₃ material in the radiative limit. In order to determine a more relevant one-sun V_{oc} for the particular sample including defect-related Shockley-Read-Hall (SRH) recombination, we include the Time-Resolved Photoluminescence (TRPL) data measured at much lower injection densities.

Abbildung/Figure 24: Implizierte Spannungscharakteristik der untersuchten MAPbI₃-Probe. Die Dreiecke sind aus der QSSPC-Messung (Abb. 23) berechnet. Die gestrichelte rote Linie ist eine Extrapolation der QSSPC-Daten unter der Annahme, dass nur strahlende Rekombination stattfindet, während die durchgezogene blaue Linie defektbedingte Rekombination einschließt.

Suns-impl voltage characteristic of the examined MAPbI₃ sample. The triangles are calculated from the QSSPC measurement (Fig. 23). The dashed red line is an extrapolation of the QSSPC data assuming only radiative recombination, whereas the solid blue line includes defect-related recombination.

The TRPL lifetime is largely limited by the defect-related SRH recombination and is used to determine the total lifetime (blue solid line in Fig. 23). Reversely calculating the total lifetime curve into the suns- V_{impl} curve results in the blue solid line in Fig. 24. This line provides the most realistic limit to a best-case scenario obtained in a solar cell made of the examined MAPbI₃ layer. From the

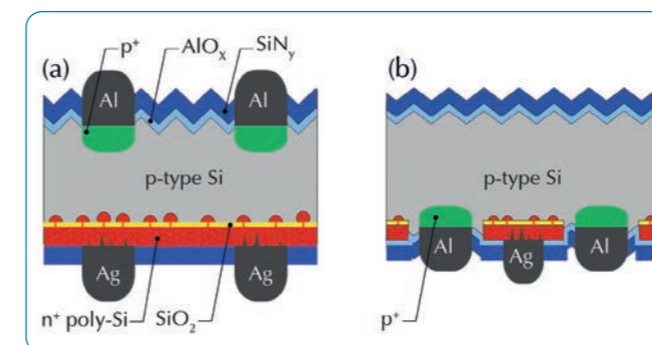
ein Best-Case-Szenario dar, das in einer Solarzelle aus der untersuchten MAPbI₃-Schicht erreicht werden kann. Aus der blauen durchgezogenen Linie extrahieren wir eine realistische Ein-Sonnen-V_{oc}-Grenze von V_{oc,realistic} = 1,246 V. Daraus können wir schließen, dass die SRH-Rekombination in unserer MAPbI₃-Schicht das maximal erreichbare V_{oc} um V_{oc,rad} - V_{oc,realistic} = 41 mV reduziert. Die V_{oc}-Reduktion, die sich aus unserer Analyse ergibt, ist ein hervorragendes Maß zur Beurteilung der Qualität der MAPbI₃-Schicht im Hinblick auf die Abweichung vom perfekten defektfreien Material. Die hier vorgestellte neue Methodik eignet sich daher sehr gut für die detaillierte Charakterisierung des Potentials von Metall-Halogenid-Perowskit-Schichten.

blue solid line, we extract a realistic one-sun V_{oc} limit of V_{oc,realistic} = 1.246 V. We can hence conclude that the SRH recombination in our MAPbI₃ layer reduces the maximally reachable V_{oc} by V_{oc,rad} - V_{oc,realistic} = 41 mV. This reduction obtained from our analysis is an excellent measure for the quality of the MAPbI₃ layer with respect to the deviation from the perfect defect-free material. The new methodology presented here is therefore well suited for the detailed characterization of the potential of metal-halogenide perovskite layers.

Oberflächenpassivierung von undiffundiertem, texturiertem p-Typ Silizium mit industriellen PECVD-AIO_x/SiN_y-Schichtstapeln

Passivierende polykristalline Silizium-Kontakte, im Englischen polysilicon on oxide und kurz POLO genannt, ermöglichen deutliche Steigerungen beim Wirkungsgrad von Silizium-Solarzellen. Hierbei sind die Solarzellenstrukturen POLO BJ (Back Junction) und POLO IBC (Interdigitated Back Contact, d. h. Rückkontaktarchitektur) vielversprechende Optionen zur Integration in industrielle Silizium-Solarzellen.^[10] Sie vereinen ein hohes Wirkungsgradpotenzial mit einem schlanken Prozessfluss, der sich stark an etablierte Technologien anlehnt und so für potenzielle lokale PV-Produzenten geringe Investitionskosten und ein geringes Risiko mit sich bringt. Außerdem verwenden diese Solarzellenkonzepte keine Materialien mit begrenzter Verfügbarkeit wie z. B. Indium und benötigen dank (teilweiser) Aluminiummetallisierung nur wenig Silber.

Wie in Abbildung 25 dargestellt, haben beide Solarzellenstrukturen eine undiffundierte, texturierte Vorderseite, welche mit einem Schichtstapel aus AIO_x/SiN_y passiviert wird. Im Labor wurde die AIO_x-Schicht mittels Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition, ALD) abgeschieden.^[11] Für die Massenproduktion ist eine Option, die AIO_x-Schicht mit einer Anlage für plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) zu realisieren, welche ebenfalls die SiN_y-Schicht abscheiden kann.



Auf texturierten, undiffundierten Oberflächen wurden derartige Schichtstapel bisher noch nicht im industriellen Maßstab angewandt und optimiert. Das ISFH hat hier Pionierarbeit geleistet und musste viele Anpassungen vornehmen, um eine gute Passivierungsqualität zu erreichen.

^[10] C.N. Kruse, S. Schäfer, F. Haase, V. Mertens, H. Schulte-Huxel, B. Lim, B. Min, T. Dullweber, R. Peibst, R. Brendel, Scientific Reports 2021, 11, 996.

^[11] B. Min, N. Wehmeier, T. Brendemuehl, F. Haase, Y. Larionova, L. Nasebandt, H. Schulte-Huxel, R. Peibst, R. Brendel, Solar RRL 2021, 5, 2000703.

Surface passivation of undiffused textured p-type crystalline silicon by industrial PECVD AIO_x/SiN_y stacks

Polysilicon-based passivating contacts, also known as polysilicon on oxide (POLO), enable a significant efficiency increase of silicon solar cells. Hereby, the POLO back junction (BJ) and POLO interdigitated back contact (IBC) solar cells are promising candidates for integrating passivating n-type POLO contacts into industrial Si solar cells.^[10] They combine a high efficiency potential with a lean process flow which is similar to established technologies. Hence, it enables lower investment cost as well as minimized risk for a prospective local PV production. In addition, these cell concepts need no rare elements such as indium, and less silver thanks to (partly) aluminum metallization.

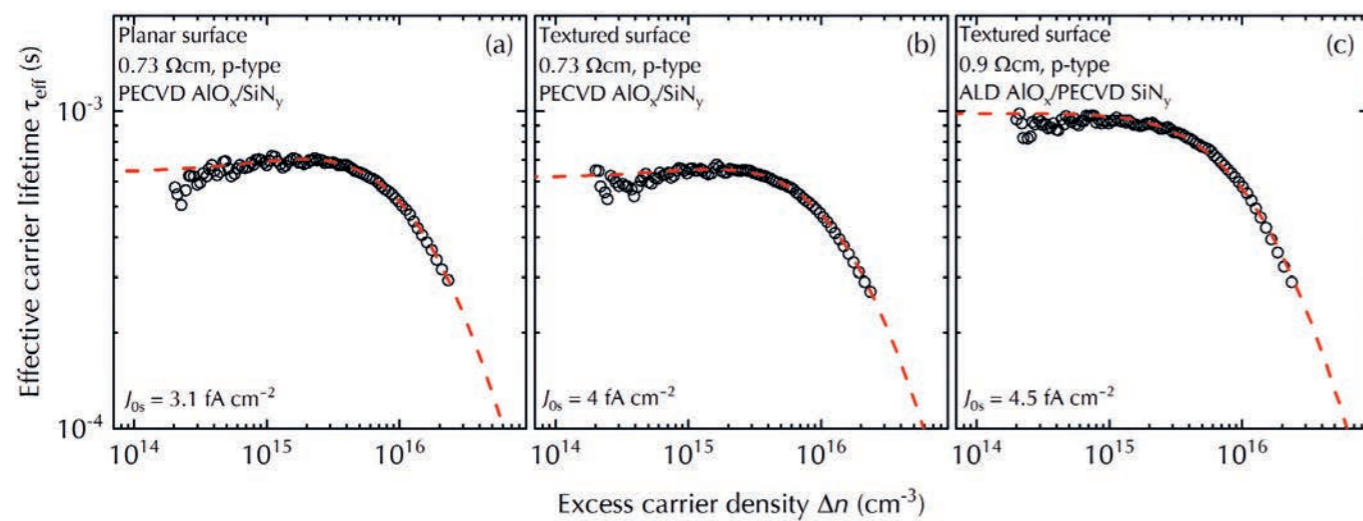
As shown in Figure 25, both have an undiffused textured front surface which we so far passivated with an AIO_x/SiN_y stack that used an AIO_x layer from atomic layer deposition (ALD).^[11] For mass production it is clearly desirable to apply an AIO_x layer deposited in a plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) tool that can also deposit the SiN_y layer.

Abbildung/Figure 25: Schemazeichnung der (a) POLO BJ- und (b) POLO IBC-Solarzellenstruktur. Beide benötigen auf der Vorderseite eine sehr gute Passivierung des undiffundierten, texturierten p-Typ Wafers. Schematics of a (a) POLO BJ and a (b) POLO IBC solar cell. Both require an excellent passivation of the undiffused, textured front side of the p-type wafer.

We could, however, not find reports on high level passivation by AIO_x/SiN_y dielectric stacks on undiffused textured surfaces that were deposited by an industrial PECVD tool. This is a pioneer work from ISFH which needed comprehensive process development and optimization in order to achieve an excellent passivation quality.

Die Kreissymbole in Abbildung 26(a) und (b) zeigen die gemessenen effektiven Ladungsträgerlebensdauern τ_{eff} als Funktion der Überschussladungsträgerdichte einer planaren und einer texturierten Teststruktur, welche mit einem optimierten $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichtstapel aus einem industriellen PECVD-System (c.PLASMA-LAB 2600, centrotherm) passiviert sind. In einer Prozessfahrt wurden eine 5 nm dicke AlO_x -Schicht und eine 100 nm dicke SiN_y -Schicht abgeschieden. Als Referenz wurden texturierte Teststrukturen hergestellt, welche mit einem Schichtstapel bestehend aus einer 10 nm dicken AlO_x -Schicht aus ALD und einer oben beschriebenen SiN_y -Schicht passiviert sind, siehe Abbildung 26(c).

The circles in Figure 26(a) and (b) show the measured effective carrier lifetimes τ_{eff} of a planar and a textured test structure passivated with an optimized $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ dielectric stack fabricated with an industrial PECVD system (c.PLASMA-LAB 2600, centrotherm). Within a deposition process we deposited a 5 nm-thick AlO_x layer and a 100 nm-thick SiN_y layer. As a reference we use textured test structures passivated with a 10 nm-thick AlO_x layer deposited by ALD and capped by the SiN_y layer as mentioned above, see Figure 26(c).



Abbildung/Figure 26: Gemessene Ladungsträgerlebensdauern τ_{eff} als Funktion der Überschussladungsträgerdichte Δn (Kreise) von symmetrischen Lebensdauerproben mit PECVD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichtstapel auf (a) planarer und (b) texturierter Oberfläche sowie (c) mit ALD- AlO_x /PECVD- SiN_y auf texturierter Oberfläche. Die simulierten τ_{eff} -Kurven sind als gestrichelte Linien dargestellt.

Measured carrier lifetime τ_{eff} as a function of excess carrier density Δn (circles) of symmetric lifetime samples with PECVD $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ dielectric stack on (a) planar and (b) textured surfaces, and (c) with ALD AlO_x capped with PECVD SiN_y on textured surface. The simulated τ_{eff} curves are depicted as dashed lines.

Die Proben mit dem PECVD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichtstapel weisen, unabhängig von der Oberflächenstruktur, ähnliche Verläufe von τ_{eff} auf. Dies zeigt einen erfolgreichen Übertrag des Prozesses von planaren auf texturierte Oberflächen. Zur Bewertung der Qualität der Oberflächenpassivierung wurde aus dem Vergleich der Messungen mit numerischen Simulationen die Rekombinationsstromdichte J_{0s} an der Oberfläche bestimmt. Die detaillierte Beschreibung der Simulationsstudie ist in unserer kürzlich erschienenen Publikation zu finden.^[12] Für die planare bzw. texturierte Oberfläche mit dem PECVD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichtstapel ergaben sich J_{0s} -Werte von $3,1 \text{ fA cm}^{-2}$ bzw. 4 fA cm^{-2} . Für die texturierte Probe mit Schichtstapel aus ALD- AlO_x und PECVD- SiN_y , der als guter Referenzwert dient, ergab sich ein J_{0s} von $4,5 \text{ fA cm}^{-2}$. Die Passivierungsqualität unserer industriellen PECVD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichten ist also mindestens genauso gut wie die der Laborreferenz.

Despite the different surface morphologies, both test structures with PECVD $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ dielectric stack show similar τ_{eff} . This demonstrates the successful process transfer from planar to textured surface. For the evaluation of surface passivation quality, we extract the surface recombination current density J_{0s} by reproducing the lifetime measurement with numerical device simulations. More details about the device simulations can be found in our recent publication.^[12] For the PECVD $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ dielectric stack, we obtain sufficiently low J_{0s} values of 3.1 fA cm^{-2} and 4 fA cm^{-2} for planar and textured surfaces, respectively. For the textured test structure with ALD AlO_x /PECVD SiN_y stack, we extract a J_{0s} of 4.5 fA cm^{-2} . The passivation quality of our industrial PECVD $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ stack is on the same level as that of our reference with the lab tool.

^[12] B. Min, V. Mertens, Y. Larionova, T. Pernau, T. Dullweber, R. Peibst, R. Brendel, submitted to IEEE JPV.

Dennoch zeigt die Probe mit dem Schichtstapel aus ALD- AlO_x und PECVD- SiN_y leicht höhere effektive Lebensdauern bei geringen Überschussladungsträgerdichten. Dies ist jedoch nicht der Oberflächenpassivierung sondern vielmehr dem Si-Wafermaterial geschuldet, welches für diese Gruppe schwächer dotiert ist. In allen Fällen ist die Injektionsabhängigkeit der Rekombinationsverluste mit abnehmenden Überschussladungsträgerdichten gering ausgeprägt. Das ist wichtig, damit die spätere Solarzelle einen hohen Füllfaktor und einen hohen Wirkungsgrad erreichen kann.

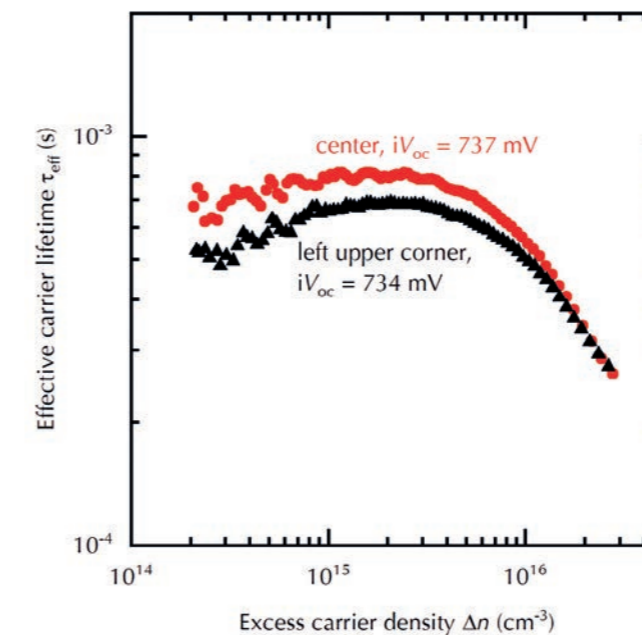
It is to note that the test structure with ALD AlO_x /PECVD SiN_y dielectric stack shows slightly higher τ_{eff} at Δn of 10^{15} cm^{-3} than the other test structure. This is not caused by the surface passivation quality, it rather reflects that this group has a lower doping concentration in the silicon wafer. The injection dependency for Δn smaller than 10^{15} cm^{-3} is negligibly small for all test structures. This is important for achieving a high fill factor and hence a high efficiency for solar cells.

Die Integration des entwickelten Schichtstapels in die Prozesssequenz von POLO BJ-Solarzellen wurde erfolgreich demonstriert, indem Solarzellenvorläufer, also Solarzellen ohne Metallisierung, mit einer implizierten Leerlaufspannung (iV_{oc}) von 737 mV auf einem Ga-dotierten Czochralski-Si-Wafer hergestellt wurden. Die Differenz in iV_{oc} zwischen der Wafermitte und der linken oberen Ecke beträgt lediglich 3 mV, wie Abbildung 27 zu entnehmen ist. Die Passivierungsqualität unseres PECVD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichtstapels ist also über die gesamte Fläche der späteren Solarzelle sehr homogen – was wiederum eine Voraussetzung für deren gute Performance ist.

The integration of this passivation sequence into our current process flow for POLO BJ solar cells has been successfully demonstrated by fabricating solar cell precursors, i.g. solar cells without metallization, with an implied open-circuit voltage (iV_{oc}) of 737 mV on a gallium-doped Czochralski-grown Si wafer. The difference in iV_{oc} between the center and the left upper corner area is only 3 mV as shown in Figure 27. The passivation quality of our PECVD $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ dielectric stack is homogeneous for the entire wafer surface which is an important requirement for highly efficient solar cells.

Zusammenfassend haben wir erstmals eine exzellente Passivierungsqualität auf undiffundiertem, texturiertem p-Typ Silizium mittels eines industriellen PECVD- $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ -Schichtstapels demonstriert. Die Passivierungsqualität ist auf gleichem Niveau wie die Referenz mit einem Schichtstapel aus ALD- AlO_x und PECVD- SiN_y .

In conclusion, we presented for the first time an excellent surface passivation quality on undiffused textured p-type crystalline silicon using an industrial PECVD $\text{AlO}_x/\text{SiN}_y$ stack. The passivation quality is on the same level as that of our reference test structures passivated by an ALD AlO_x /PECVD SiN_y stack.



Wir danken dem Land Niedersachsen für die Unterstützung und dem BMWK für die Förderung des Verbundprojekts „APOLON“ (FKZ 03EE1150A).

Abbildung/Figure 27: Ladungsträgerlebensdauern τ_{eff} als Funktion der Überschussladungsträgerdichte Δn gemessen an der Wafermitte (Kreise) und an der linken oberen Ecke (Dreiecke) mit dem Sinton Lebensdauertester WCT-120. Carrier lifetime τ_{eff} as a function of excess carrier density Δn measured at center (circles) and left upper corner (triangles) areas using the Sinton lifetime tester WCT-120.

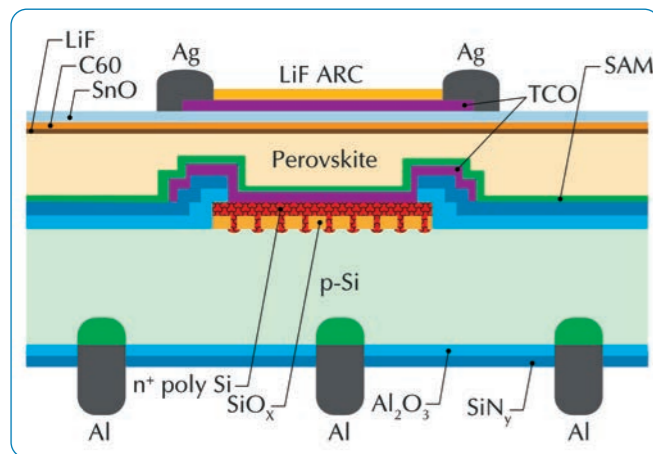
We would like to thank the state of Lower Saxony for its support and the BMWK for funding the project „APOLON“ (FKZ 03EE1150A).

Byungsul Min, Verena Mertens, Yevgeniya Larionova, Thorsten Dullweber, Robby Peibst, Rolf Brendel

Perowskit-Silizium-Tandemzelltechnologie auf dem Weg zur Industrialisierung: POLO-PERC-Bottomzellen und aufgedampfte Perowskite

Mehr als 95 % der weltweiten PV-Modulproduktion erfolgt derzeit mit Solarzellen auf Siliziumbasis. Dank kontinuierlicher Forschung und Entwicklung nähern sich diese Zellen ihrem praktischen Wirkungsgradmaximum von etwa 27 %. Um den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen und damit die Kosten für solar erzeugten Strom sowie den Platzbedarf zu senken, arbeiten Forschende und Industrie an sogenannten Tandem-Solarzellen. Diese kombinieren zwei (oder mehr) Solarzellen, die jeweils unterschiedliche Bereiche des Sonnenlichts nutzen und damit effektiver arbeiten als eine einzelne Solarzelle. Tandem-Solarzellen ebnen den Weg zu einem theoretischen Wirkungsgradpotenzial von etwa 40 %.

Eine sehr attraktive Möglichkeit für den Übergang von der aktuellen Siliziumtechnologie zu solchen Mehrfach-Solarzellen ist die monolithische Integration (d. h. die nahtlose Kombination) einer kostengünstigen Top-Solarzelle mit großer Bandlücke mit einer Bottom-Solarzelle aus Silizium. In den letzten Jahren wurden erhebliche Forschungsanstrengungen unternommen, um solche Tandems mit Metallhalogenid-Perowskit-basierten Top-Solarzellen herzustellen. Die besten Prototyp-Bauelemente erreichen bisher einen Wirkungsgrad von 33,7 %.^[13] Dennoch wird die Massenproduktion und Markteinführung noch einige Jahre dauern. Zudem verwenden fast alle diese hocheffizienten Tandem-Solarzellen Bottom-Solarzellen mit der sogenannten Heteroübergangstechnologie (HJT), da die HJT-Solarzellen sehr hohe Wirkungsgrade liefern und der Aufbau der Solarzellenvorderseite für die Kombination mit einer Perowskit-basierten Top-Solarzelle vorteilhaft ist.



Perovskite-silicon tandem solar cell technology heading towards industrialization: POLO-PERC bottom solar cells and evaporated perovskites

More than 95 % of the current global PV module production uses silicon-based solar cells. Thanks to continuous research and development, these solar cells are approaching their practical power conversion efficiency (PCE) limit of around 27 %. To further increase the efficiency and in turn reduce the cost of solar-generated electricity as well as the space requirements, researchers and industry are working on so-called tandem solar cells. These combine two (or more) solar cells that each use different domains of the sun light and thus work more effectively than a single solar cell could. Tandem solar cells pave the way towards a theoretical efficiency potential of about 40 %.

One intriguing transition path from today's silicon technology to such multi-junction solar cells is the monolithic integration (i.e. seamless combination) of a low-cost, wide-band-gap top solar cell with a silicon bottom solar cell. In recent years, significant research efforts were devoted to such tandems with metal-halide perovskite-based top solar cells, culminating in single prototype devices with PCEs of 33.7 %.^[13] Nevertheless, mass production and market launch will still take a few years. Also, almost all such high-efficiency tandem solar cells use silicon heterojunction (HJT) bottom solar cells, as HJT technology yields very high efficiencies and the layout of the front side is favorable to the combination with a perovskite-based top solar cell.

Abbildung/Figure 28: Struktur der Tandem-Solarzellen der ersten Iteration mit planarer Vorder- und Rückseite. Der POLO-Übergang auf der Vorderseite der Bottom-Solarzelle ist strukturiert, um ihn der Zellfläche der Top-Solarzelle anzupassen.

First iteration tandem solar cell structure with planar front and rear side. Bottom solar cell front side POLO junction is patterned to match top solar cell area.

^[13] NREL best solar cell efficiency chart, as of 30 June 2023.

Auf dem derzeitigen PV-Markt hat HJT jedoch einen sehr geringen Anteil von weniger als 5 %. Die dominierende Technologie ist die kostengünstigere p-Typ PERC-Solarzelle mit einem Marktanteil von etwa 75 %. Um diese große Technologieplattform zu nutzen, ist die Entwicklung eines Tandem-Upgrades für PERC-Solarzellen sehr attraktiv. Im Jahr 2018 hat das ISFH diese Herausforderung aufgegriffen und eine Bottom-Solarzelle mit polykristallinem Silizium auf Oxid (POLO) als passivierenden Frontübergang und Aluminium-Fingerkontakten auf der Rückseite vorgeschlagen. Diese Rückseite ist identisch zu der von bifazialen PERC+-Solarzellen.^[14] Kostenberechnungen haben mittlerweile ergeben, dass dieser Ansatz die kosteneffizienteste Option für Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen ist.^[15]

In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) kombinierten wir die POLO-Technologie des ISFH mit Perowskit-Top-Solarzellen des HZB, um erstmals POLO-PERC-Bottom-Solarzellen in Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen zu implementieren.^[16] Der Wirkungsgrad dieser Solarzellen der ersten Iteration wird durch (i) Reflexionsverluste an der planaren Vorder- und Rückseite und (ii) Verluste bei der Leerlaufspannung (V_{oc}) und dem Füllfaktor (FF) aufgrund von Shunts in der Top-Solarzelle auf 21,3 % begrenzt. Diese Shunts werden dadurch verursacht, dass die mit Spin-Coating hergestellte Perowskitschicht die Kanten der Sägeriefen auf der Oberfläche der Siliziumwafer nur unvollständig bedeckt.

Aufgrund von Beschränkungen bei der Herstellung der Top-Solarzellen werden im laufenden Projekt Tandem-Solarzellen mit etwa 1 cm² aktiver Zellfläche auf 2,5 cm × 2,5 cm großen Bottom-Solarzellen hergestellt. Diese Randbedingung machte die Strukturierung des Emitters auf der Vorderseite unserer Bottom-Solarzellen der ersten Iteration unumgänglich (Abb. 28). In einer zweiten Iteration verwenden wir n-Typ-Wafer, lassen aber die Prozessfolge unverändert, so dass wir Bottom-Solarzellen mit lokalen Emitterbereichen auf der Rückseite erhalten. Dadurch können wir auf die Strukturierung der Vorderseite verzichten (Abb. 29).

Abbildung/Figure 29: Struktur der Tandem-Solarzellen der zweiten Iteration mit planarer Vorder- und strukturierter Rückseite. Die Verwendung von n-Typ Wafern erspart die Strukturierung der Vorderseite.

Second iteration tandem solar cell structure with planar front and textured rear side. Use of n-type silicon wafer enables non-patterned bottom solar cell front side.

^[14] R. Peibst, M. Rienäcker, B. Min, C. Klamm, R. Niepelt, T.F. Wietler, T. Dullweber, E. Sauter, J. Hübner, M. Oestreich, R. Brendel, IEEE PVSC 2018 // IEEE JPV 9 49 (2019).

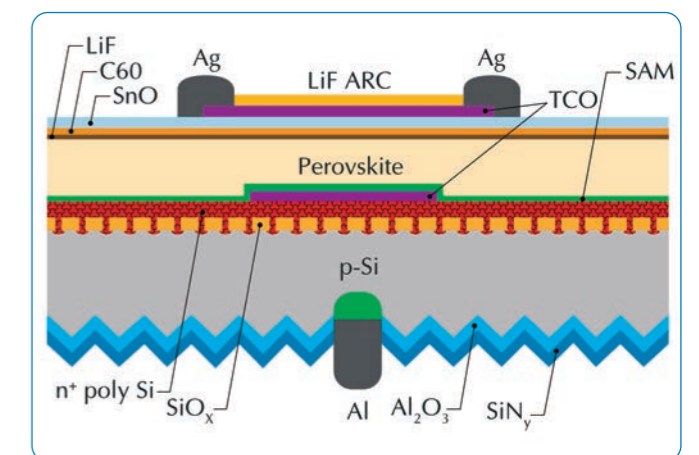
^[15] C. Messmer, B.S. Goraya, S. Nold, P.S.C. Schulze, V. Sittinger, J. Schön, J.C. Goldschmidt, M. Bivour, S.W. Glunz, M. Hermle, Prog. Photovolt. Res. Appl. 1 (2020).

^[16] S. Mariotti, K. Jäger, M. Diederich, M.S. Härtel, B. Li, K. Sveinbjörnsson, S. Kajari-Schröder, R. Peibst, S. Albrecht, L. Korte, T. Wietler, Solar RRL 2101066 (2022).

However, in the current PV market HJT has a very small share of less than 5 %. The dominating technology is the p-type PERC solar cell with a market share of about 75 %. To make use of this large technology base, developing a tandem upgrade for PERC solar cells is highly attractive. In 2018, ISFH addressed this task by proposing a bottom solar cell with polycrystalline silicon on oxide (POLO) passivating front junction and aluminum fingers on the rear side. This rear side is identical to that of bifacial PERC+ solar cells.^[14] Since then, cost calculations predict this approach to be the most cost-efficient option for perovskite-silicon tandem solar cells.^[15]

In cooperation with Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), we combined ISFH's POLO technology with HZB's perovskite top solar cells to implement POLO-PERC bottom solar cells in perovskite-silicon tandem devices for the first time.^[16] The PCE of these first iteration solar cells was limited to 21.3 % by (i) reflection losses at the planar front and rear side and (ii) losses in open-circuit voltage (V_{oc}) and fill factor (FF) due to shunting of the top solar cell. Incomplete coverage of the spin-coated perovskite layer at saw-mark edges on the silicon wafer surface caused these shunts.

Within the ongoing project, constraints in top solar cell processing limit the active solar cell area to about 1 cm² on 2.5 cm × 2.5 cm bottom solar cells. This constraint requires patterning of the front side emitter in our first iteration solar cells (Fig. 28). In a second iteration, we use n-type wafers but keep the processing unchanged, which results in a bottom solar cell with local emitter regions on the rear side. This allows us to omit front side patterning (Fig. 29).

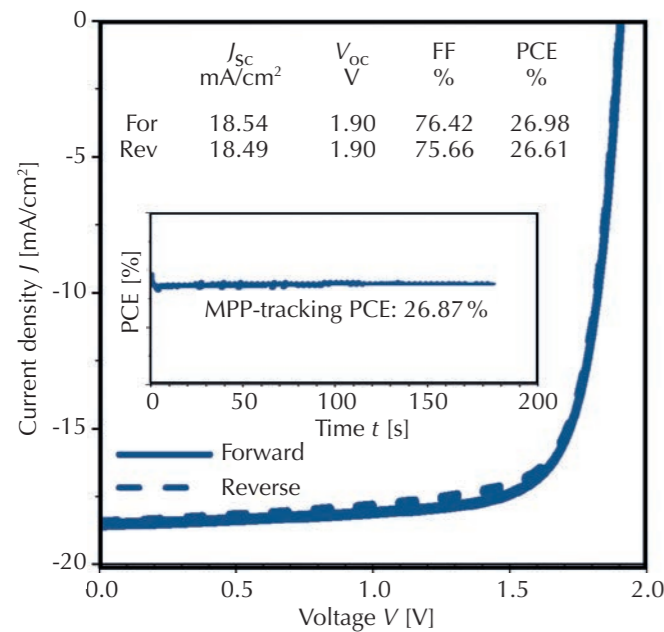


^[14] R. Peibst, M. Rienäcker, B. Min, C. Klamm, R. Niepelt, T.F. Wietler, T. Dullweber, E. Sauter, J. Hübner, M. Oestreich, R. Brendel, IEEE PVSC 2018 // IEEE JPV 9 49 (2019).

^[15] C. Messmer, B.S. Goraya, S. Nold, P.S.C. Schulze, V. Sittinger, J. Schön, J.C. Goldschmidt, M. Bivour, S.W. Glunz, M. Hermle, Prog. Photovolt. Res. Appl. 1 (2020).

^[16] S. Mariotti, K. Jäger, M. Diederich, M.S. Härtel, B. Li, K. Sveinbjörnsson, S. Kajari-Schröder, R. Peibst, S. Albrecht, L. Korte, T. Wietler, Solar RRL 2101066 (2022).

Wir texturieren die Rückseite und polieren die Vorderseite der Bottom-Solarzellen chemisch, um die Verluste (i) und (ii) zu vermeiden. Infolgedessen nimmt der Photogenerationsstrom der Bottom-Solarzellen stark zu, was eine Kurzschlussstromdichte (J_{sc}) der Tandem-Solarzellen von $18,5 \text{ mA/cm}^2$ ergibt (Abb. 30). Auch V_{oc} und FF werden durch die bessere Oberflächenbedeckung des Top-Solarzellenstapels erhöht. Darüber hinaus verringern wir auch den Flächenanteil der eindiffundierten Al-Kontakte auf der Rückseite der Bottom-Solarzelle und infolgedessen die damit einhergehenden Rekombinationsverluste. Diese Maßnahme trägt ebenfalls zu dem bemerkenswert hohen V_{oc} von $1,9 \text{ V}$ bei. Die Tandem-Solarzellen erreichen einen stabilisierten Wirkungsgrad von $26,9\%$ (Abb. 30, Inset).^[17]



We texture the rear side and chemically polish the front side of the bottom solar cells to overcome the limitations (i) and (ii), respectively. As a result, the bottom solar cell photogeneration current is strongly improved yielding a tandem solar cell short-circuit current density (J_{sc}) of 18.5 mA/cm^2 (Fig. 30). The V_{oc} and FF are also enhanced due to better surface coverage of the top solar cell layer stack. We also reduced the area fraction of the diffused aluminum contacts at the bottom solar cell rear side, and thus the related recombination loss. This contributed to a remarkable V_{oc} of 1.9 V . The tandem solar cells achieve a stabilized PCE of 26.9% (Fig. 30, inset).^[17]

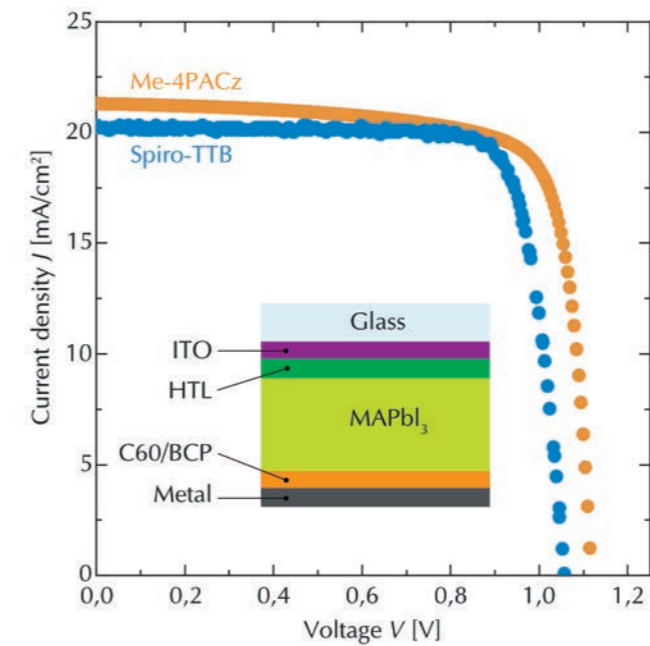
Abbildung/Figure 30: J/V -Charakteristik einer Tandem-Solarzelle der zweiten Iteration. Die kleine Grafik zeigt die Maximum-Power-Point-Kurve mit einem stabilisierten Wirkungsgrad von $26,9\%$. J/V characteristics of a second iteration tandem solar cell. The inset shows a maximum power point tracking curve with a stabilized PCE of 26.9% .

Ein weiterer Schritt zur Industrialisierung von Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen ist die Verwendung einer Perowskit-Abscheidungsmethode, die auch auf nicht polierten Oberflächen angewendet werden kann. Das ISFH entwickelt Aufdampfprozesse und nasschemische Beschichtungsverfahren für Perowskit-Absorberschichten. Damit können wir Perowskit-Absorberschichten mit aufgedampften Elektronentransportschichten und aufgedampften oder mit Spin-Coating aufgetragenen Lochertransport-schichten (HTL) zu Solarzellen kombinieren. Solarzellen mit dem aufgedampften Absorber Methylammoniumbleitriiodid (MAPbI_3) erreichen Wirkungsgrade von 17% (aufgedampfter HTL) und $18,5\%$ (mit Spin-Coating aufgetragener HTL) (Abb. 31).^[Fußnote] Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit anderen für aufgedampfte Perowskit-Solarzellen ohne Antireflexbeschichtung oder weitere Passivierungsmethoden veröffentlichten Wirkungsgraden.

Another step towards the industrialization of perovskite-silicon tandems is using a perovskite deposition method that can be applied on non-polished surfaces. ISFH develops evaporation processes as well as the wet-chemical deposition of perovskite absorber layers. Our perovskite solar cell process can combine perovskite absorber layers with evaporated electron transport layers and evaporated or spin-coated hole transport layers (HTLs). Solar cells with the evaporated perovskite methylammonium lead triiodide (MAPbI_3) as absorber layer achieve PCEs of 17% (evaporated HTL) and 18.5% (spin-coated HTL) (Fig. 31).^[Footnote] These results are on par with other published PCEs for evaporated perovskite solar cells without anti-reflection coating or any further passivation method.

^[17] S. Mariotti, K. Jäger, M. Diederich, M.S. Härtel, B. Li, K. Sveinbjörnsson, S. Kajari-Schröder, R. Peibst, S. Albrecht, L. Korte, T. Wietler, presented at IEEE PVSC and TandemPV Workshop 2022.

^[17] S. Mariotti, K. Jäger, M. Diederich, M.S. Härtel, B. Li, K. Sveinbjörnsson, S. Kajari-Schröder, R. Peibst, S. Albrecht, L. Korte, T. Wietler, presented at IEEE PVSC and TandemPV Workshop 2022.



Abbildung/Figure 31: J/V -Charakteristik von Perowskit-Solarzellen mit aufgedampften Absorber und Elektronentransportschichten. Die Zelle mit aufgedampftem HTL hat einen Wirkungsgrad von 17% (blaue Symbole), die Zelle mit dem HTL, das mit Spin-Coating aufgebracht wurde, erreicht $18,5\%$ (orange Symbole). J/V -characteristics of perovskite single junction solar cells with evaporated absorber and electron transport layers. The solar cell with the evaporated HTL has a PCE of 17% (blue symbols), while the solar cell with the spin-coated HTL has a PCE of 18.5% (orange symbols).

Die Kombination unserer vielseitigen Bottom-Solarzellen-Technologie mit unserem Top-Solarzellen-Prozess bildet einen leistungsstarken Baukasten, den wir nutzen, um die Industrialisierung von Perowskit-Silizium-Tandem-Solarzellen voranzutreiben.

The combination of our versatile bottom solar cell technology and our top solar cell process forms a powerful tool kit to advance the industrialization of perovskite-silicon tandem solar cells.

Wir danken dem Land Niedersachsen für die Unterstützung und dem BMWK für die Förderung des Verbundprojekts „P3T“ (FKZ 03EE1317B) und unserem Projektpartner HZB für die gute Zusammenarbeit.

We would like to thank the state of Lower Saxony for its support and the BMWK for funding the project „P3T“ (FKZ 03EE1317B) and our project partner HZB for the good cooperation.

Fußnote

Als aufgedampfte Elektronentransportschichten verwenden wir z. B. das Fullerene C60 und Bathocuproin (BCP). Als Lochertransport-schichten (HTLs) nutzen wir aufgedampfte (z. B. Spiro-TTB, das Spirofluorenderivat 2,2',7,7'-Tetra(N,N-di-p-tolylamino-9,9-spirofluorene) oder mit Spin-Coating aufgetragene (z. B. Me-4PACz, die Carbazol-Phosphonsäure Verbindung [4-(3,6-dimethyl-9H-carbazol-9-yl)butyl]phosphonic acid) Materialien. Das mit Spin-Coating aufgetragene Me-4PACz bildet eine selbstorganisierende Monolage mit überlegenen Passiviereigenschaften, die zu einem höheren V_{oc} führen (Abb. 31).

Footnote

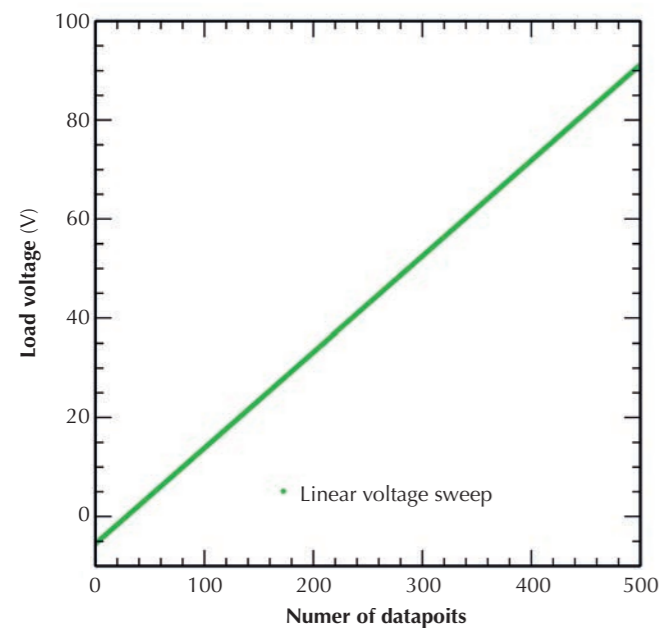
We use evaporated electron transport layers e.g. the fullerene C60 and bathocuproine (BCP). Our hole transport layers (HTLs) are either evaporated (e.g. Spiro-TTB, the spirofluorene derivate 2,2',7,7'-Tetra(N,N-di-p-tolylamino-9,9-spirofluorene) or spin-coated (e.g. Me-4PACz, the carbazole phosphonic acid compound [4-(3,6-dimethyl-9H-carbazol-9-yl)butyl]phosphonic acid). The spin-coated Me-4PACz forms a self-assembling monolayer with superior passivation properties yielding a higher V_{oc} (Fig. 31).

Tobias Wietler, Felix Haase, Verena Barnscheidt, Lukas Brockmann, Verena Steckenreiter, Marvin Diederich, Sascha Wolter, Sarah Kajari-Schröder, Robby Peibst

Leistungsmessung an neuen Hochleistungs-PV-Modulen

Die kontinuierliche technologische Verbesserung und die Vergrößerung ihrer Fläche führen dazu, dass neue PV-Module eine immer höhere Leistung aufweisen. Gleichzeitig haben diese Hochleistungs-PV-Module meist eine sehr hohe elektrische Kapazität. Diese führt bei einer Messung der elektrischen Kennlinie zu parasitären Strömen. Das heißt, dass bei sehr schnellen Kennlinienmessungen, wie sie in der Produktion üblich sind, je nach Durchlaufrichtung zusätzliche Be- bzw. Entladeströme auftreten. Dies führt zu zwei unterschiedlichen Kennlinienformen, je nach Messrichtung. Diesen Kennlinienunterschied nennt man Hysterese. Die Hysterese führt wiederum zu einem unerwünschten Hysterese messfehler in der Leistungsmessung. Die Norm IEC60904-1 (ed3) legt Qualitätsmaßstäbe für Kennlinienmessungen von PV-Modulen fest. Sie besagt, dass PV-Module im sogenannten Quasi-Stationärzustand oder mit weniger als 0,5% Hysterese fehler für alle charakterisierten Parameter gemessen werden müssen. Dies stellt für herkömmliche Kurzimpuls-Sonnensimulatoren mit einer Impulsdauer unter 25 ms eine große Herausforderung bei den neuen Hochleistungs-PV-Modulen dar.

Die drei wichtigsten Parameter bei der Leistungsmessung sind die maximale Ausgangsleistung (P_{mpp}), der Kurzschlussstrom (I_{sc}) bei Nullspannung und die Leerlaufspannung (V_{oc}). Bei den wichtigsten Arten von PV-Modulen auf dem Markt^[18], d. h. PV-Modulen mit Heterojunction-Technologie (HJT), Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) und Interdigitated Back Contact (IBC), liegt die größte effektive Kapazität in der Nähe des Punktes maximaler Leistung. Bei I_{sc} und V_{oc} geht die effektive Kapazität gegen Null. Dies führte uns

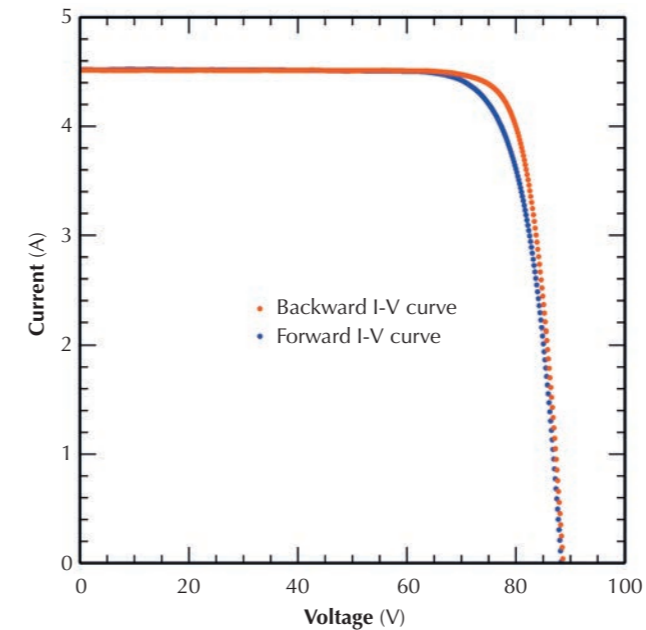


Power measurement for new high-power PV modules

The continuous technological improvement and the increase of their area lead to the fact that new PV modules have a constantly increasing power. At the same time, these high-power PV modules usually have quite high electrical capacity. This leads to parasitic currents when the electrical characteristic is measured. This means that for very fast measurements, as is common in production, additional charging or discharging currents occur depending on the direction of flow. This results in two different shapes of the measured characteristic, depending on the measuring direction. This difference in shape is called hysteresis. The hysteresis in turn leads to an undesired hysteresis measurement error in the power measurement. The IEC60904-1 (ed3) standard sets quality standards for measurements of PV module characteristics. It states that PV modules must be measured in the so-called quasi-steady state or with less than 0.5% hysteresis error for all characterized parameters. This is a major challenge for conventional short pulse solar simulators with a pulse duration below 25 ms for the new high-power PV modules.

The three most important parameters in power measurement are the maximum output power (P_{mpp}), the short-circuit current (I_{sc}) at zero voltage, and the open-circuit voltage (V_{oc}). For the main types of PV modules on the market^[18], i. e. PV modules with heterojunction technology (HJT), Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) and Interdigitated Back Contact (IBC), the largest effective capacitance is near the point of maximum power. For I_{sc} and V_{oc} , the effective capacitance approaches zero. This led us to the idea of increasing the measurement time near P_{mpp} at the expense of the measure-

Abbildung/Figure 32: Linearer Spannungsverlauf mit der Anzahl der Datenpunkte als Variable. Die Messzeit für jeden Datenpunkt beträgt 0,108 ms. Linear voltage sweep with the number of datapoints as a variable. The measurement time for each datapoint is 0.108 ms.



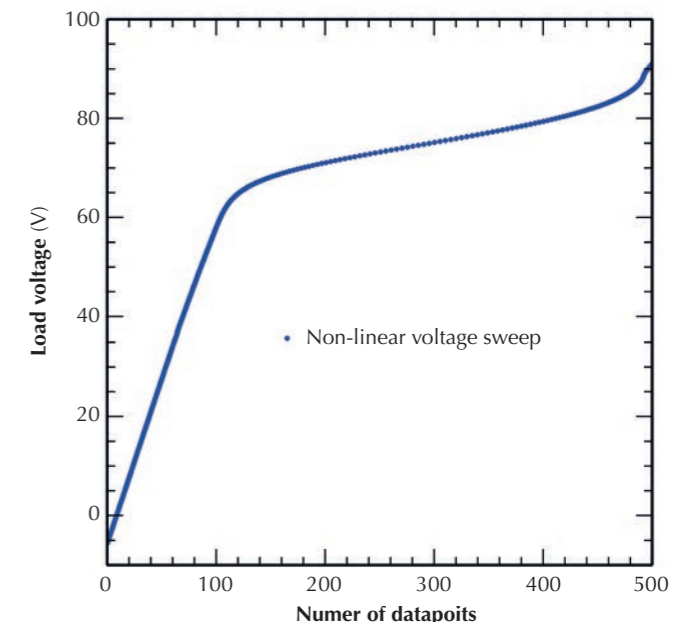
Abbildung/Figure 33: IV-Charakteristik mit dem in Abb. 32 gezeigten linearen Spannungsverlauf. IV characteristics with the linear voltage sweep shown in Fig. 32.

zu der Idee, die Messzeit in der Nähe von P_{mpp} auf Kosten der Messzeit in der Nähe von I_{sc} und V_{oc} zu verlängern. Dadurch wird der Einfluss der Kapazität verringert, während die Gesamtzeit erhalten bleibt.

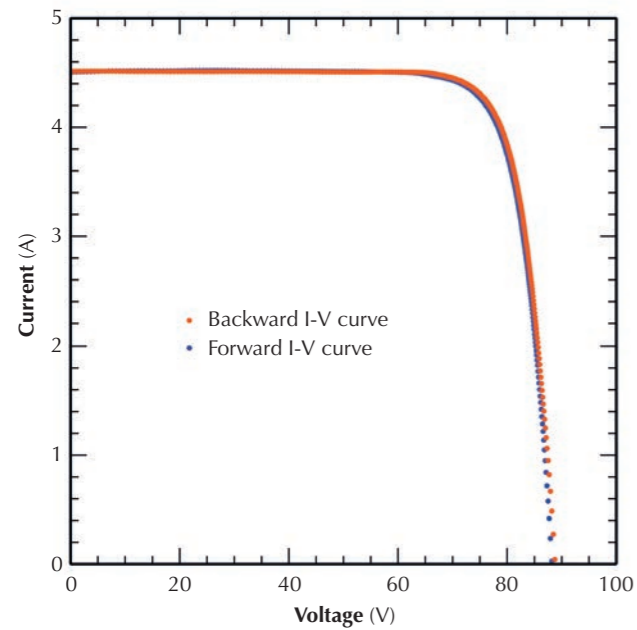
Diesen Ansatz setzen wird mit unserem neuen h.a.l.m. Sonnensimulator *Moduletest3* um. Der Sonnensimulator verfügt über eine Xenon-Lampe mit erweiterter Spannungssteuerung, die einen homogenen simulierten Sonnenblitz mit der Dauer von bis zu 100 ms und damit einer Messzeit von bis zu 93 ms ermöglicht. Außerdem ist es möglich, ein benutzerdefiniertes Spannungsverlauf-Profil für eine einzelne Kennlinienmessung zu laden, was eine variable Messrate ermöglicht.

ment time near I_{sc} and V_{oc} . This reduces the influence of capacitance while preserving the total measurement time.

We implement this approach with our new h.a.l.m. *Moduletest3* sun simulator. The sun simulator features a xenon lamp with extended voltage control, which allows a homogeneous simulated sun flash with the duration of up to 100 ms and thus a measurement time of up to 93 ms. It is also possible to load a user-defined voltage profile for a single measurement, allowing a variable measurement rate.



Abbildung/Figure 34: Nicht-linearer Spannungsverlauf, der anhand der IV-Charakteristiken in Abb. 33 und des entwickelten Algorithmus erstellt wurde, mit der Anzahl der Datenpunkte als Variable. Die Messzeit für jeden Datenpunkt beträgt 0,108 ms. Non-linear voltage sweep generated from the IV characteristics in Fig. 33 and the developed algorithm with the number of datapoints as a variable. The measurement time for each datapoint is 0.108 ms.



Abbildung/Figure 35: I-V-Charakteristik mit dem nicht-linearen Spannungsverlauf in Abb. 34.
I/V characteristics with the non-linear voltage sweep shown in Fig. 34.

Durch unsere Idee wird die Spannungsabtastrate dV/dt in der Nähe der maximalen Modulleistung minimiert. Wir haben dafür eine automatisierte Methode zur Erzeugung eines nicht-linearen Spannungsdurchlaufs entwickelt, die aus einer mit einem linearen Spannungsverlauf gemessenen Strom-Spannungs-Charakteristik eine optimale nicht-lineare Spannungsdurchlauftrate bestimmt.

An einem Beispiel-PV-Modul mit 120 Heterojunction-Halbzellen zeigen wir auf Basis eines linearen Spannungsdurchlaufs in Abb. 32 den Unterschied zwischen der Vorwärts- und der Rückwärts-Kennlinie (Abb. 33). Der Hysteresefehler für den Arbeitspunkt maximaler Leistung beträgt 2,35 %, während der Hysteresefehler von I_{sc} und V_{oc} 0,052 % bzw. 0,166 % beträgt. Der Hysteresefehler im Arbeitspunkt maximaler Leistung erfüllt somit nicht die Anforderung der Norm IEC60904-1 (ed3).

Abbildung 34 zeigt nach der Optimierung mit unserer automatisierten Methode wie ein nicht-linearer Spannungsverlauf aussieht. Bei diesem Spannungsverlauf zeigen die Vorwärts- und Rückwärts-I/V-Kurven eine deutlich geringere Hysterese (Abb. 35). Der Hysteresefehler für den Punkt maximaler Leistung wird auf 0,48 % reduziert, während die Hysteresefehler von I_{sc} und V_{oc} leicht auf 0,068 % bzw. 0,308 % ansteigen. Die Fehler aller drei Parameter bleiben jedoch unterhalb der Anforderung der Norm IEC60904-1 (ed3) von 0,5 %. Mit diesem Verfahren können somit Kennlinien von Hochleistungs-PV-Modulen automatisiert und schnell entsprechend der Normanforderungen gemessen werden.

Wir danken dem BMWK für die Förderung des Projekts „ProVe“ (FKZ 03EE1004) und unserem Projektpartner h.a.l.m. elektronik GmbH für die gute Zusammenarbeit.

Chencheng Xu, Iris Kunze, Marc Köntges

Abteilung Solare Systeme

Spektrale Ellipsometrie – vom UV bis mittlerem IR akkreditiert

Betrachten wir Dinge aus verschiedenen Blickwinkeln, stellt sich ein Sachverhalt gelegentlich anders dar, als man gemeinhin dachte. So muss es dem Göttinger Physiker Paul Drude ergangen sein, als er um 1890 die Technik der Ellipsometrie begründete. Er untersuchte polarisiertes Licht, welches von spiegelnden Metalloberflächen bei variablen Einfallswinkeln reflektiert wird. Forscher vor ihm nutzten für Reflexionsmessungen „normales“ Licht und publizierten voneinander abweichende Ergebnisse. Paul Drude dagegen konnte zeigen, dass die Variabilität der Ergebnisse durch Interferenzeffekte wenige Nanometer dicker, transparenter (Oxid-)Schichten begründet ist, wobei die Orientierung des elektrischen Feldes, die Polarisation des Lichts, bezüglich der Einfallrichtung zu beachten sei.

In der optischen Industrie, der Flachglasindustrie, der Halbleiter- und Metall- verarbeitenden Industrie ist die Messmethode weit verbreitet, wenn dünne Schichten geprüft werden sollen. Meist interessiert die präzise Kenntnis der Dicke und Homogenität einer Beschichtung, häufig der Brechungsindex und dessen Dispersion, in manchen Fällen der spektrale Absorptionskoeffizient der Schicht.

Der Begriff Ellipsometrie kam 50 Jahre nach Paul Drude in Gebrauch und die Verbreitung der Technik begann erst in den 1990er Jahren Fahrt aufzunehmen - insbesondere in Deutschland und den USA - weil Computer die Arbeit der komplexen Datenauswertung übernehmen konnten. Von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) sind jedoch nur drei Einrichtungen für Ellipsometrie akkreditiert: die Schott AG, Mainz, die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, und das ISFH. Wir bieten die Technik als Dienstleister an. Wir setzen Ellipsometer ein, die den ultravioletten bis mittleren infraroten Spektralbereich abdecken, also Wellenlängen von 240 nm bis 33 000 nm. Wir messen routinemäßig bei drei bis fünf Einfallswinkeln zwischen 40° und 80°. Alle unsere Spektral-Ellipsometer sind mit optisch aktiven Filtern ausgestattet, mit deren Hilfe wir den Laufzeitunterschied zwischen s- und p-polarisiertem Licht bzw. deren Phasendifferenz im Schichtsystem messen. Die damit verbundene Datenfülle wird genutzt, um die Dispersion des Brechungsindex, den spektralen Absorptions- bzw. Extinktions-Koeffizienten von Substraten, Schichten oder Schichtsystemen zu bestimmen. Häufig deckt man dabei Gradienten im Schichtaufbau, natürliche Zwischenschichten oder eine Anisotropie der polykristallinen Schicht auf, die durch orientiertes Wachstum des optisch aktiven Materials bedingt ist. Die Analyse gelingt nur mit leistungsfähiger Software und großer experimenteller Erfahrung.

Solar systems department

Spectral ellipsometry - accredited from UV to mid IR

If we look at things from different viewpoints, occasionally a fact turns out to be different from what we generally thought. This must have been the case for the physicist Paul Drude in Göttingen when he founded the technique of ellipsometry around 1890. He studied polarized light reflected from specular metal surfaces at variable angles of incidence. Researchers before him used “normal” light for reflection measurements and published divergent results. Paul Drude, on the other hand, was able to show that the variability of results was due to interference effects of transparent (oxide) layers a few nanometers thick, whereby the orientation of the electric field, the polarization of the light, with respect to the direction of incidence had to be taken into account.

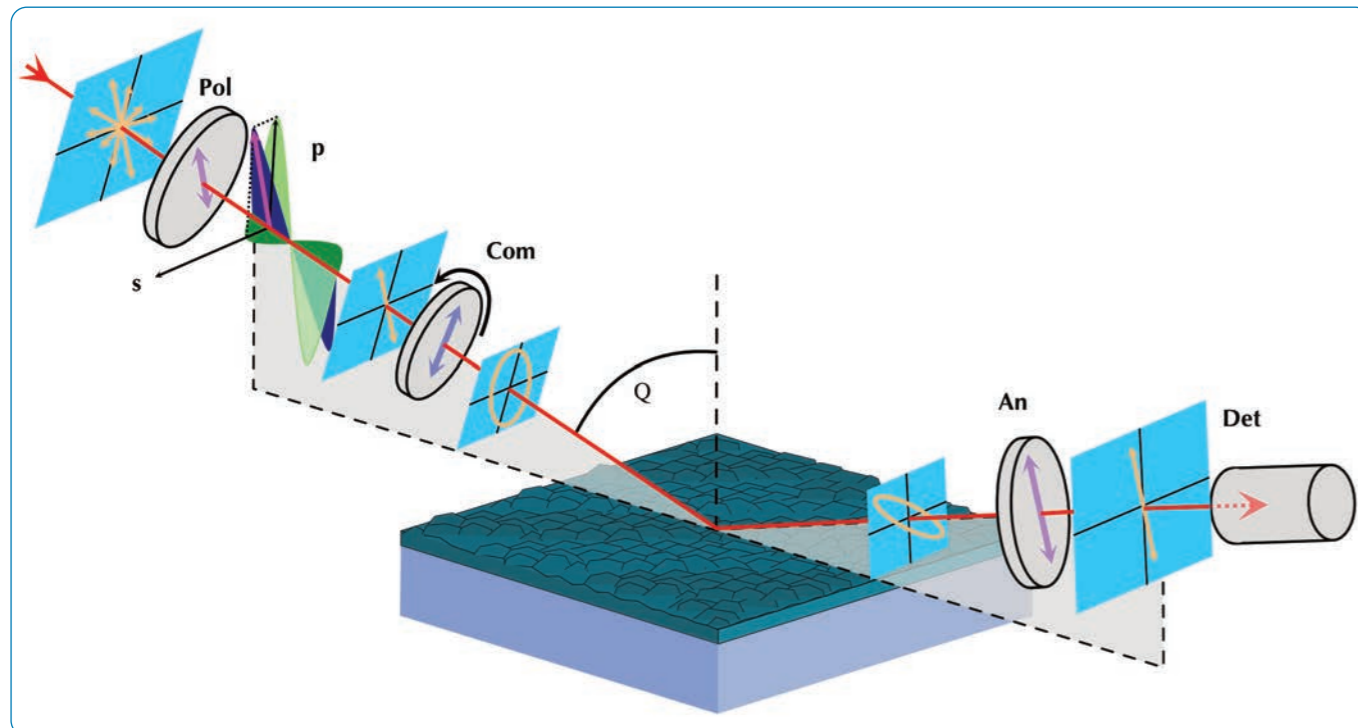
In the optical industry, the flat glass industry, the semiconductor- and metal- processing industry, the measurement method is widely used when thin layers are to be tested. Usually, the precise knowledge of the thickness and homogeneity of a coating is of interest, often the refractive index and its dispersion, in some cases the spectral absorption coefficient of the coating.

The term ellipsometry came into use 50 years after Paul Drude, and the dissemination of the technique only began to gain momentum in the 1990s - especially in Germany and the U.S. - because computers could do the work of complex data evaluation. However, only three institutions are accredited by the Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) for ellipsometry: Schott AG, Mainz, the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, and the ISFH. We offer the technique as a service provider. We use ellipsometers that cover the ultraviolet to mid-infrared spectral range, i.e., wavelengths from 240 nm to 33 000 nm. We routinely measure at three to five angles of incidence between 40° and 80°. All of our spectral ellipsometers are equipped with optically active filters that help us measure the runtime difference between s- and p-polarized light or their phase difference in the layer system. The associated wealth of data is used to determine the dispersion of the refractive index, the spectral absorption (extinction) coefficient of substrates, layers or layer systems. Often, gradients in the layer structure, natural interlayers or an anisotropy of the polycrystalline layer caused by oriented growth of the optically active material are uncovered. The analysis is only possible with powerful software and great experimental experience.

Mit präziser Messtechnik und sorgfältiger Datenanalyse fällt gelegentlich auf, dass bekannte physikalische Modelle zur Beschreibung der dielektrischen Funktion eines Materials nicht ausreichend sind. So konnten wir für das leitfähige, transparente Oxid ZnO:Al (AZO) zeigen, dass ein publiziertes Modell für hochdotierte Halbleiter zwar die ellipsometrischen Daten beschreiben konnte, jedoch die Transmission im sichtbaren Bereich fälschlich zu niedrig berechnet^[19]. Die Einführung einer frequenzabhängigen Dämpfung im Basismodell konnte die Beobachtungen verifizieren. In der gleichen Publikation wurde gezeigt, dass die Beweglichkeit der freien Elektronen nur näherungsweise mit dem weithin akzeptierten Modell Drudes beschrieben werden kann. Drude hatte seiner-

zeit postuliert, dass sich freie, bewegliche Elektronen in Metallen wie ein ideales Gas verhalten. Im Gegensatz dazu haben wir unter Verwendung eines modifizierten Drude-Modells mit ebenfalls frequenzabhängiger Dämpfung gezeigt, dass die Mobilität der Elektronen in polykristallinen ZnO:Al-Filmen mit der Anregungsfrequenz des Lichts zunimmt: ein deutliches Indiz dafür, dass die Korngrenzen die Beweglichkeit bei hohen Frequenzen nicht mehr beeinträchtigen.

Einen anderen Fall, in dem die polykristalline Struktur der Beschichtung zu einer Modifikation der optischen Parameter führt, haben C. Xu^[20] gezeigt. Die Absorption in polykristallinem Silizium kann im Vergleich zu früheren Arbeiten wesentlich vereinfacht modelliert werden, wenn man eine statistische Variation der Energiezustände aufgrund der Größenvariation der Kristalle annimmt. C. Xu ist eine analytische Lösung mit einer logarithmisch gaußverteilten Bandlückenenergie des Tauc-Lorentz-Modells gelungen.



Abbildung/Figure 36: Der Polarisator (Pol) filtert aus unpolarisiertem Licht der Quelle (von links) elektromagnetische Wellen mit einer Feldrichtung heraus. In der Regel wird ein Polarisationswinkel von 45° bezüglich der Einfallsebene gewählt, sodass das elektrische Feld sowohl eine s- als auch eine p-polarisierte Komponente enthält. Ein rotierender Kompensator (Com) verschiebt die Phase der beiden Komponenten zueinander, sodass hinter dem Kompensator elliptisch polarisiertes Licht vorliegt, das mit der Rotation periodisch zwischen linearer und zirkularer Polarisation wechselt.

The polarizer (Pol) filters out electromagnetic waves with one field direction from unpolarized light from the source (from the left). Usually, a polarization angle of 45° is chosen with respect to the plane of incidence, so that the electric field contains both an s- and a p-polarized component. A rotating compensator (Com) shifts the phase of the two components with respect to each other, so that behind the compensator there is elliptically polarized light that changes periodically between linear and circular polarization with rotation.

Mit der Reflexion an der Probe ändert sich das Intensitätsverhältnis des s- und p-polarisierten Lichts und dessen Phasendifferenz erneut. Nach Durchtritt eines zweiten Polarisationsfilters, der als Analysator (An) bezeichnet wird, erfasst der Detektor (Det) das Messsignal.

With reflection at the sample surface the intensity ratio of the s- and p-polarized light and its phase difference changes again. After passing through a second polarization filter, referred to as analyzer (An), detector (Det) acquires the measurement signal.

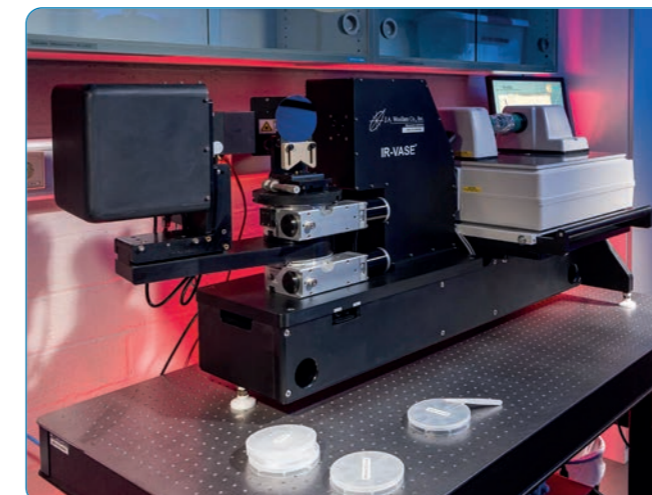
^[19] N. Ehrmann, R. Reineke-Koch, Ellipsometric studies on ZnO:Al thin films: Refinement of dispersion theories, *Thin Solid Films* 519 (2010) 1475–1485, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.09.057>

zeit postuliert, dass sich freie, bewegliche Elektronen in Metallen wie ein ideales Gas verhalten. Im Gegensatz dazu haben wir unter Verwendung eines modifizierten Drude-Modells mit ebenfalls frequenzabhängiger Dämpfung gezeigt, dass die Mobilität der Elektronen in polykristallinen ZnO:Al-Filmen mit der Anregungsfrequenz des Lichts zunimmt: ein deutliches Indiz dafür, dass die Korngrenzen die Beweglichkeit bei hohen Frequenzen nicht mehr beeinträchtigen.

Einen anderen Fall, in dem die polykristalline Struktur der Beschichtung zu einer Modifikation der optischen Parameter führt, haben C. Xu^[20] gezeigt. Die Absorption in polykristallinem Silizium kann im Vergleich zu früheren Arbeiten wesentlich vereinfacht modelliert werden, wenn man eine statistische Variation der Energiezustände aufgrund der Größenvariation der Kristalle annimmt. C. Xu ist eine analytische Lösung mit einer logarithmisch gaußverteilten Bandlückenenergie des Tauc-Lorentz-Modells gelungen.

trons in metals behave like an ideal gas. In contrast, using a modified Drude model with frequency-dependent damping as well, we showed that the mobility of electrons in polycrystalline ZnO:Al films increases with the exciting frequency of light: a clear indication that grain boundaries no longer affect mobility at high frequencies.

Another case in which the polycrystalline structure of the coating leads to a modification of the optical parameters has been shown by C. Xu^[20]. Absorption in polycrystalline silicon can be modeled in a much simplified way compared to previous work by assuming a statistical variation of the energy states due to the size variation of the crystals. C. Xu has succeeded in obtaining an analytical solution with a logarithmically Gaussian-distributed band gap energy of the Tauc-Lorentz model.



Abbildung/Figure 37: Spektrales Infrarot-Ellipsometer für den Spektralbereich von 1700 nm bis 33 μm .
Spectral infrared ellipsometer for the spectral range of 1700 nm to 33 μm .

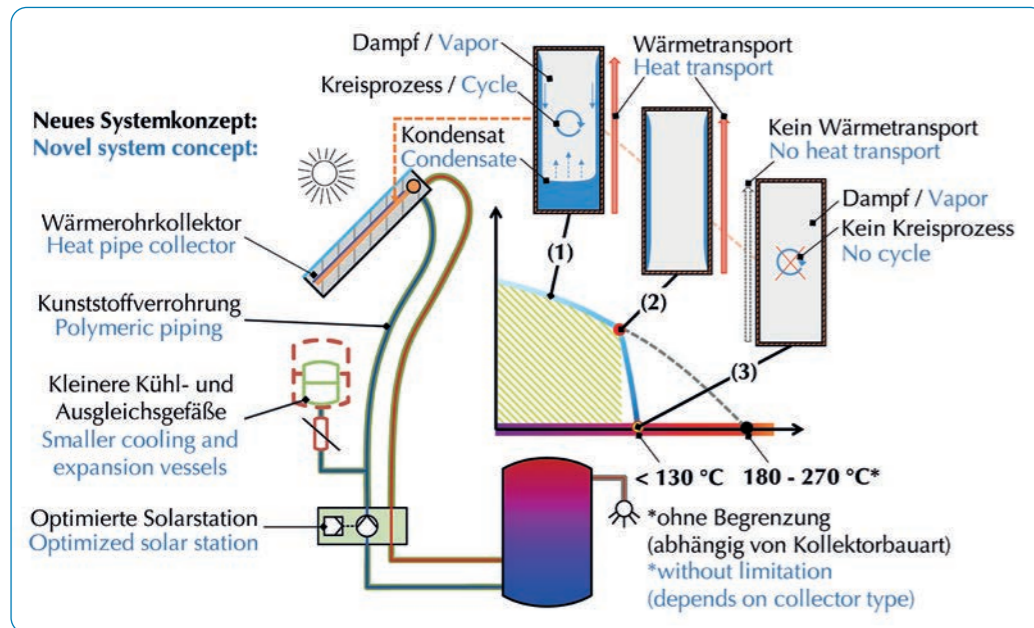
^[20] C. Xu; B. Min; R. Reineke-Koch, Extended Tauc-Lorentz model (XTL) with log-normal distributed bandgap energies for optical permittivity in polycrystalline semiconductors, *AIP Advances*, 12 (2022) 115007, doi:10.1063/5.0119256

Wärmerohrkollektoren mit Überhitzungsschutz in einem kostenoptimierten Systemkonzept: Monitoring von fünf Demonstrationsanlagen im realen Systembetrieb

Solarthermische Anlagen werden schon lange als effiziente und erneuerbare Wärmeerzeuger eingesetzt und lassen sich ohne zusätzliche Anforderungen an die Netzinfrastruktur mit allen Wärmeerzeugungsformen dezentral kombinieren. Die vergleichsweise hohe Komplexität – insbesondere in der Handhabung von Überschusswärme – stellt aber eine wesentliche Barriere zur weiteren Verbreitung dar. Die effektive Vermeidung der Überhitzung im Stagnationsfall gilt als ein Schlüssel zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und damit der Attraktivität für Solarthermieanlagen. Kollektoren mit abschaltenden Wärmerohren können hierzu einen vielversprechenden Beitrag leisten und bieten eine eigensichere Begrenzung des Wärmetransportes. Hierbei werden die thermophysikalischen Grenzen des Wärmerohr-Kreisprozesses ausgenutzt und entsprechend der Anforderungen in solarthermischen Systemen angepasst (s. Abbildung 38).

Heat pipe collectors with overheating prevention in a cost-optimized system concept: Monitoring of five demonstration plants during real system operation

Solar thermal systems are already well established as efficient and renewable heat source. The decentral combination with all other forms of heat generation is possible without additional requirements to the grid infrastructure. However, the comparatively high complexity - especially the handling of heat surplus - represents a significant barrier to further dissemination. Effective prevention of overheating in stagnation events is considered as a key to increasing the economic efficiency and thus the attractiveness for solar thermal systems. Heat pipe collectors with power shut-off can provide a promising solution to this problem and offer an intrinsically safe limitation of the heat transport. For this, the thermophysical limits of the heat pipe cycle are used and optimized according to the requirements in solar thermal systems (see Figure 38).



Abbildung/Figure 38: Skizze einer Solarthermieanlage nach dem innovativen Systemkonzept mit Wärmerohrkollektor, wobei jeweils der Zustand des Wärmerohr-Kreisprozesses schematisch anhand eines vereinfachten Schnittbildes mit Bezug zur temperaturabhängigen Kollektorleistungskurve dargestellt ist. Bei Temperaturerhöhung des Wärmerohrs verschiebt sich das Phasengleichgewicht hin zur Dampfphase. Während in (1) und (2) der Kreisprozess noch uneingeschränkt läuft und den Wärmetransport ermöglicht, ist das Rohr zwischen (2) und (3) zunehmend ausgetrocknet. In (3) liegt das Fluid ausschließlich in der Dampfphase vor, sodass der Wärmetransport vollständig zum Erliegen kommt. Im Vergleich zu Kollektoren ohne Begrenzung kann die Maximaltemperatur im Stagnationsfall auf unter $130\text{ }^\circ\text{C}$ begrenzt werden.

Sketch of a solar thermal system according to the innovative system concept with heat pipe collector, where in each case the state of the heat pipe cycle is shown schematically on the basis of a simplified sectional view with reference to the temperature-dependent collector performance curve. When the temperature of the heat pipe increases, the phase equilibrium shifts to the vapor phase. While in state (1) and (2) the circulation process is still running and allows a high heat transport, the pipe is increasingly dried out between (2) and (3). In (3), the fluid is present exclusively in the vapor phase, so that heat transport comes to a complete standstill. Compared to collectors without limitation, the maximum temperature in the stagnation case can be limited to below $130\text{ }^\circ\text{C}$.

Aufbauend auf den vorangegangenen Forschungsaktivitäten zur Entwicklung neuer Lösungen mit Flach- (FPC) und Vakuumröhrenkollektor (ETC) sind im Rahmen der aktuellen Arbeiten geeignete Ansätze zur Optimierung des Gesamtsystems verfolgt und praktisch umgesetzt worden. Die verwendeten Wärmerohre sind so ausgelegt, dass sich im Solarkreis jeweils eine Maximaltemperatur von deutlich unterhalb $130\text{ }^\circ\text{C}$ einstellt, sodass die Begrenzung des Pumpenbetriebs auf eine maximale Temperatur von $95\text{ }^\circ\text{C}$ ohne negative Folgen möglich ist. Im Stagnationsfall lassen sich somit kritische Temperaturen und Dampf im Solarkreis eigensicher vermeiden. Als Folge der geringeren thermomechanischen Belastung werden die Anlagen entsprechend Abbildung 38 vereinfacht (z. B. Kühl- und Ausgleichsgefäße) und kostengünstigere Kunststoffkomponenten (z. B. Verrohrung) eingesetzt.

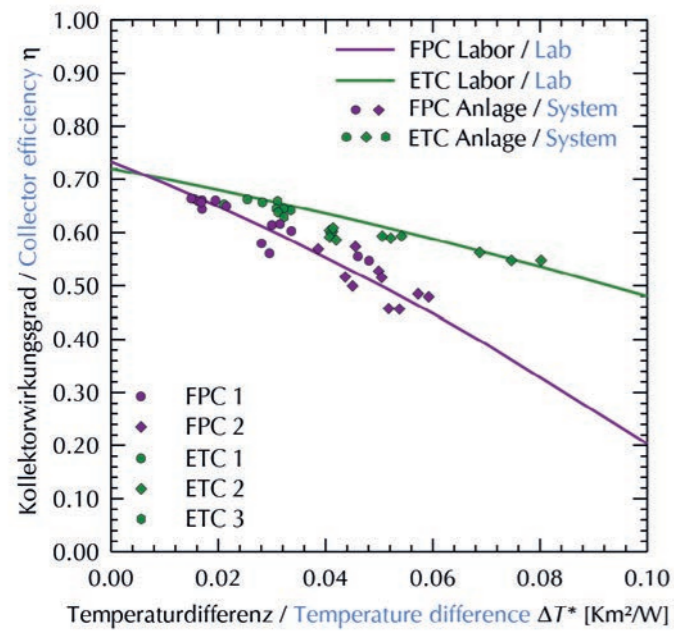
Dieses neue Systemkonzept wurde in fünf Demonstrationsanlagen praktisch realisiert und im Rahmen eines wissenschaftlichen Monitorings bewertet. Das Spektrum umfasst drei ETC-Anlagen und zwei FPC-Anlagen (s. Abbildung 39), wovon eine Anlage einen direkten Vergleich zwischen der neuen Technologie und herkömmlichen Kollektoren erlaubt (FPC 1). Das Messkonzept erlaubt sowohl die Bilanzierung energetischer Kenngrößen der Solarkreise als auch die Erfassung von Stagnationsereignissen. Die Kollektorkennwerte und die Abschaltfunktion der verwendeten ETC und FPC mit Wärmerohren sind aufgrund von Leistungsmessungen am Einzelmodul hinreichend bekannt. Auf Basis der im Feld gemessenen Kollektorleistung wird für alle Anlagen der Bezug zur Wirkungsgradkennlinie der Labormessung hergestellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 40 dargestellt. Die Abweichung der im Feld gemessenen Werte beträgt weniger als 10% und zeigt, dass die Kollektoren in der Praxis einen leistungsfähigen Anlagenbetrieb garantieren.

Based on the previous research activities for the development of suitable solutions with flat plate collectors (FPC) and evacuated tube collectors (ETC), suitable optimizations of the overall system have been developed and implemented in real systems. The used heat pipes are designed for a maximum temperature well below $130\text{ }^\circ\text{C}$ in the solar circuit. This makes it possible to limit the operation of the pump to a maximum temperature of $95\text{ }^\circ\text{C}$ without negative consequences. During stagnation events, critical temperatures and steam in the solar circuit can be intrinsically and safely avoided. As a result of the lower thermomechanical load, the systems are simplified as shown in Figure 38 (e.g. cooling and expansion vessels) and more cost-effective components (e.g. polymeric piping) are used.

The new system concept was implemented in five demonstration plants and evaluated within the scope of scientific monitoring. The monitoring includes three ETC systems and two FPC systems (see Figure 39), whereby one plant allows a direct comparison between the new technology and conventional collectors (FPC 1). The measurement concept allows both the energetic evaluation of the solar circuits and the detection of stagnation events. The collector performance and the power shut-off function of the used ETC and FPC with heat pipes are already known due to performance measurements on the single collector. Based on the measured thermal collector output in the field, the efficiency curve is compared to the results of the laboratory measurement for all systems. The results are shown in Figure 40, where the deviations of the field results are less than 10%. This shows that the collectors ensure an efficient system operation in practice.



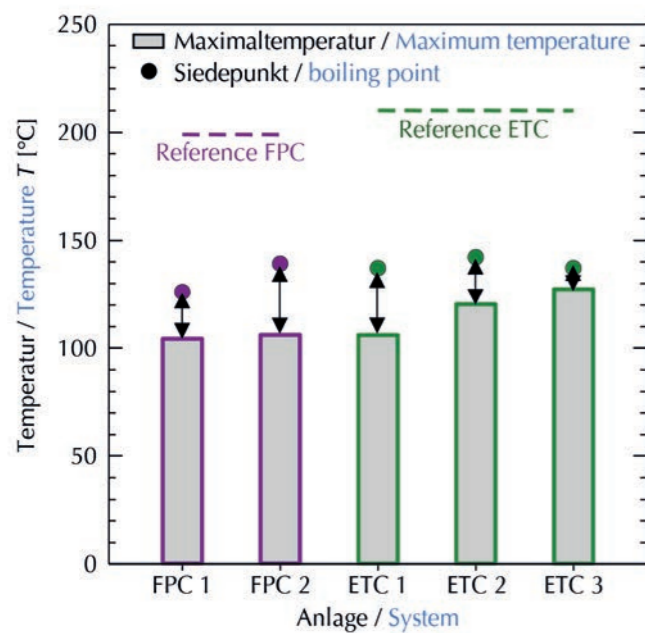
Abbildung/Figure 39: Kollektorinstallation der fünf Demonstrationsanlagen, bestehend aus zwei FPC-Anlagen und drei ETC-Anlagen. Das FPC 1-System wird parallel zu einer vergleichbaren Referenzanlage am ISFH betrieben. Collector installation of the five demonstration systems, consisting of two FPC systems and three ETC systems. The FPC 1-system is operated in parallel with a comparable reference system at ISFH.



Abbildung/Figure 40: Im Feld gemessene Kollektorstufengrade der FPC- und ETC-Anlagen im Vergleich zur Einzelmodulmessung im Labor in Abhängigkeit der reduzierten Temperaturdifferenz ΔT^* . Die Messpunkte liegen alle innerhalb des Betriebsbereichs zwischen (1) und (2), siehe Abbildung 38.
Collector efficiencies of the FPC and ETC systems measured in the field compared to single module measurement in the lab plotted against reduced temperature difference ΔT^* . The measured points are all within the operating range between (1) and (2), see Figure 38.

An allen Standorten wurden repräsentative Stagnationszustände untersucht und ausgewertet, um damit den Abschaltmechanismus der Wärmeröhre im Kollektor sowie das neue Systemkonzept praxisnah zu verifizieren. Die jeweils gemessenen Maximaltemperaturen sind in Abbildung 41 im Vergleich zu Referenzwerten mit direkt durchströmten Kollektoren aus Vergleichsmessungen am ISFH aufgetragen. Bei den FPC wurde jeweils im Kollektor (Sammler- bzw. Absorberbereich) und bei den ETC an den Kollektoranschlüssen gemessen. Je nach Kollektor- und Anlagenkonfiguration liegen die Maximaltemperaturen zwischen 105°C und

At all locations, representative stagnation events were investigated and evaluated in order to verify the shut-off behaviour of the heat pipes in the collectors as well as the novel system concept under practical conditions. The measured maximum temperatures are plotted in Figure 41 compared to stagnation temperatures with direct-flow collectors from similar measurements at ISFH. In the case of the FPC, measurements were taken inside of the collector (manifold or absorber area) and in the case of the ETC only at the collector connections. Depending on collector and system configurations, the maximum temperatures range between 105°C and



Abbildung/Figure 41: Maximale Temperatur im Solarkreis der FPC- und ETC-Anlagen bei Stagnation im Vergleich zur jeweils vorherrschenden Siedetemperatur auf Kollektorniveau und zur Maximaltemperatur von typischen FPC und ETC (Referenz). Die Messpunkte der Wärmeröhrekollektoren umfassen den Stagnationsfall (3), gemäß Abbildung 38.
Maximum temperature in the solar circuit of the FPC and ETC systems at stagnation compared to the boiling temperature at collector level and the maximum temperature of typical FPC and ETC (reference). The measured points of the heat pipe collectors represent the stagnation case (3), according to Figure 38.

127°C. In Bezug auf die jeweils vorherrschenden Siedetemperaturen auf Kollektorniveau (126°C – 142°C) zeigt sich, dass die Dampfbildung in den Solarkreisen verhindert werden kann. Bei den Referenzkollektoren würden hingegen durch Dampfbildung hohe Stagnationslasten auftreten, sodass diese bei der Komponentenauswahl und -dimensionierung entsprechend berücksichtigt werden müssen.

127°C. With respect to each boiling temperature at collector level (126°C – 142°C), it can be shown that the formation of steam in the solar circuits can be completely prevented. In the case of the reference collectors high stagnation loads would occur due to steam formation, which must be considered when selecting and dimensioning the components.

Das hier implementierte Anlagenkonzept, basierend auf abschaltenden Wärmeröhrekollektoren und kostengünstigen Systemkomponenten, konnte somit erfolgreich getestet werden. Im Vergleich zu einer Referenzinstallation mit Standardkomponenten lassen sich dadurch die Investitionskosten um bis zu 16% senken. Eine größere Ersparnis ergibt sich unter Berücksichtigung der auftretenden Kosten im Anlagenbetrieb, da mit einer deutlichen Reduzierung des Wartungsaufwands zu rechnen ist. Für einen anlagentypischen Betrachtungszeitraum wird eine Reduktion des Wärmepreises (Levelized Cost of Heat, LCoH) um 21 – 22% (ETC) und 14 – 18% (FPC) gegenüber vergleichbaren Referenzanlagen prognostiziert.

The developed system concept based on collectors with power shut-off and low-cost system components has been successfully tested. Compared to a reference installation with standard components, the investment costs can be reduced by up to 16%. The cost reduction is even bigger when the system operation costs are taken into account, as a significant reduction in maintenance costs can be expected. For a typical evaluation period, a reduction in the heat price (Levelized Cost of Heat, LCoH) of 21 – 22% (ETC) and 14 – 18% (FPC) is predicted compared to similar reference systems.

Wir danken dem BMWK für die Förderung des Verbundprojekts „HP-SYS“ (FKZ 03ETW005) sowie unseren Projektpartnern KBB Kollektorbau GmbH und AKOTEC Produktionsgesellschaft mbH für die gute Zusammenarbeit.

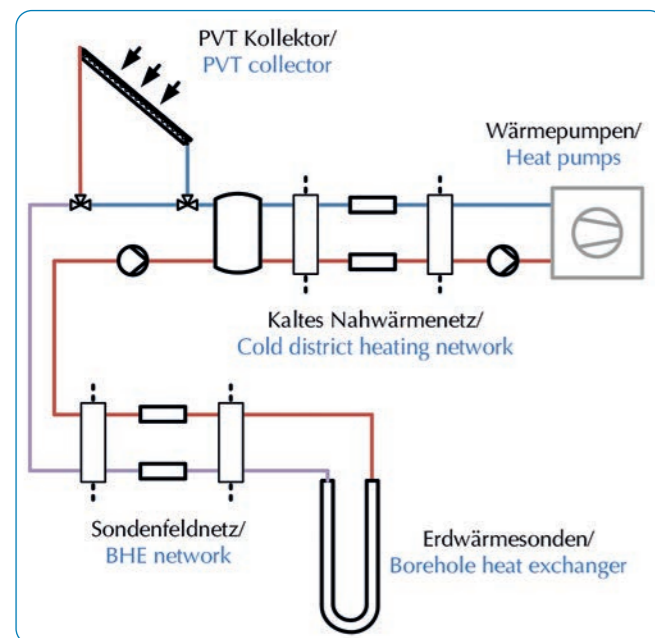
We thank the BMWK for sponsoring the “HP-SYS” joint project (FKZ 03ETW005) as well as our project partners KBB Kollektorbau GmbH and AKOTEC Produktionsgesellschaft mbH for their good collaboration.

Bert Schiebler, Julian Jensen, Federico Giovannetti

Nachhaltige Dimensionierung von regenerierten Erdwärmesondenfeldern

Erdgekoppelte Wärmepumpen mit Erdwärmesonden (engl.: borehole heat exchanger, BHE) können einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Wärmeversorgung auf Basis erneuerbarer Energien leisten. Insbesondere in Verbindung mit kalten Nahwärmenetzen können in Quartieren die spezifischen Kosten des gemeinsamen BHE-Feldes reduziert werden. Bei steigendem Bedarf an oberflächennaher Geothermie steht das Zusammenspiel einzelner Sonden in großen Erdwärmesondenfeldern oder in einem Cluster von einzelnen BHE-Systemen im Mittelpunkt der wissenschaftlichen Diskussion. Der nachhaltige Betrieb solcher Systeme kann durch eine Regeneration mit Solar-, Umwelt- oder Abwärme erreicht werden. Durch die Regeneration mit Solarenergie kann eine Unterkühlung des Bodens in dicht besiedelten Gebieten mit BHE-Clustern verhindert werden. In diesem Beitrag wird der Einfluss der solaren Regeneration auf die Dimensionierung der Erdwärmequelle eines Wärmeversorgungssystems für ein Wohnquartier anhand einer Simulationsstudie mit dem installationären Systemsimulationsprogramm TRNSYS dargestellt.

Das betrachtete Quartier umfasst 37 Mehrfamilienhäuser (MFH) mit 450 Wohnungen für 800 Bewohner*innen. Die Wärme für die Raumheizung (411 MWh), die Warmwasserbereitung (315 MWh) sowie die Verteilungsverluste (266 MWh) in den Gebäuden des Quartiers werden durch Wärmepumpen bereitgestellt, die das kalte Nahwärmenetz als Wärmequelle nutzen. Ein BHE-Feld und ein photovoltaisch-thermisches (PVT) Kollektorfeld, das die Regeneration des Erdreichs ermöglicht, liefern die erforderliche Wärme an das Nahwärmenetz, dessen hydraulisches Schema in Abbildung 42 dargestellt ist.

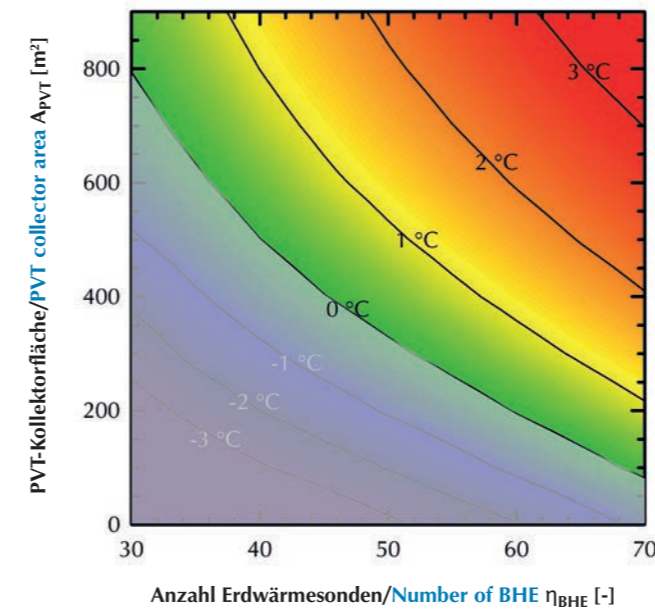


Sustainable dimensioning of regenerated borehole heat exchanger fields

Geothermal heat pumps with borehole heat exchangers (BHE) can significantly contribute to the future heat supply based on renewable resources. Especially in combination with cold district heating networks, the specific costs of the shared BHE field can be reduced. With increasing demand for shallow geothermal energy, the focus of scientific discussion lies on the interaction of individual boreholes in large borehole heat exchanger fields or in a cluster of individual BHE systems. The sustainable operation of these systems can be achieved by regeneration with solar thermal, environmental or waste heat. The regeneration with solar energy can prevent undercooling of the ground in densely populated areas with BHE clusters. Here, we present the influence of solar regeneration on the dimensioning of the geothermal source in a residential district heating system using a simulation study with the transient system simulation software TRNSYS.

The district comprises 37 multi-family houses (MFH) with 450 apartments for 800 inhabitants. The energy for space heating (411 MWh), domestic hot water (315 MWh) as well as distribution losses (266 MWh) in the district is provided by heat pumps, which use the cold district heating network as the heat source. A BHE field and a photovoltaic-thermal (PVT) collector field, which allows regeneration of the ground, provide the required heat to the network. Figure 42 shows the hydraulic schematic of this supply system.

Abbildung/Figure 42: Schema des Wärmeversorgungssystems des Quartiers.
Schematic of the heat supply system of the district.



Abbildung/Figure 43: Minimale Fluidtemperatur in Abhängigkeit der PVT-Kollektorfläche und der Anzahl der Erdwärmesonden im Monatsmittel. Sicherheitskriterium sind minimal 0°C. Varianten unterhalb dieser Grenze können nicht genehmigt werden.
Minimum fluid temperature as a function of PVT collector area and number of BHE as a monthly average. Safety criterion is a minimum of 0°C. Variations below this limit cannot be permitted

Die Sonden sind 150m tief und das Netz hat eine Gesamtlänge von über 1 km. Es handelt sich um ein Wärmenetz der fünften Generation, bei dem die Übertragungstemperaturen üblicherweise im Bereich von ca. 5°C bis 25°C liegen und kaum Wärmeverluste oder sogar Wärmegewinne auftreten. Die PVT-Kollektoren entsprechen in ihrem Aufbau ungedeckten thermischen Kollektoren, auch bekannt als wind- und/oder infrarotstrahlungsempfindliche Kollektoren (engl.: WISC), und liefern somit effizient Wärme bei oder unterhalb der Umgebungstemperatur von 0°C bis 30°C sowie elektrische Energie. Um Frostbedingungen im Füllmaterial der Sonden zu vermeiden, ist die minimale Austrittstemperatur der Wärmepumpe auf -3°C in der Spitze und auf 0°C im Monatsmittel begrenzt. Der Bewertungszeitraum beträgt 50 Jahre, um einen langfristigen Betrieb der Erdwärmequelle zu gewährleisten.

In einer Parameterstudie variieren wir die Sondenanzahl zwischen 30 (in Summe 4500 Bohrmeter) und 70 (in Summe 10500 Bohrmeter) sowie die Fläche des PVT-Kollektorfeldes von 0m² bis 900m². Die Mindestanforderungen für die Dimensionierung sind exemplarisch für die Monatsmitteltemperatur von minimal 0°C in Abbildung 43 dargestellt.

Ein weiteres gewähltes Bewertungskriterium ist die durchschnittliche Systemjahresarbeitszahl der Quellwärmeseite^[21], die für den Parameterraum in Abbildung 44 dargestellt ist. Da das System für einen monovalenten Betrieb ausgelegt ist, d. h. dass nur eine Energiequelle zur Wärmeerzeugung genutzt wird, werden Konfigurationen, die die Mindesttemperaturanforderungen nicht erfüllen, nicht berücksichtigt und sind in der folgenden Abbildung ausgegraut.

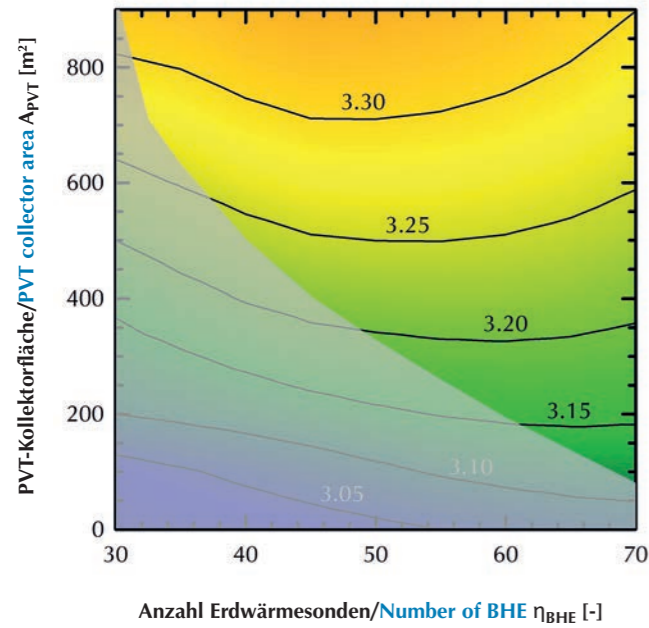
^[21] SPF_{H2O} , nach Gehlin et al. (2022) Gehlin, S. et al., 2022. Subtask 3 Report - Guide for analysis and reporting of GSHP system performance - system boundaries and key performance indicators (KPI) - Final Document. IEA HPT Annex 52 - Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

The BHEs are 150m deep and the cold district heating network has a total length of more than 1 km. This type of cold district heating is a fifth-generation heating network, where the transmission temperatures are commonly in the range of approx. 5°C to 25°C and therefore have relatively low heat losses or even gains. The PVT collectors correspond in their design to uncovered thermal collectors, also known as wind and/or infrared sensitive collectors (WISC), and thus efficiently supply heat at or below the ambient temperature from 0°C to 30°C as well as electrical energy. In order to avoid frost conditions in the filling material of the BHE field the minimum outlet temperature of the heat pumps is limited to -3°C at its peak and to 0°C for the monthly average. The evaluation period is 50 years to ensure a long-term operation of the geothermal source.

In a parametric study we vary the number of BHE between 30 (in total 4500 drilling meters) and 70 (in total 10500 drilling meters) and the area of the PVT collector field is varied from 0m² to 900m². The minimum requirements for the dimensioning are shown as an example for the monthly average temperature of 0°C in Figure 43.

Another evaluation criterion is the average seasonal performance factor of the source side system^[21], shown in Figure 44 for the parameter range. The system is designed to operate monovalently, i. e. with only one source of energy. Therefore, configurations that did not meet the minimum temperature requirements are prohibited and marked grey in the figure below.

^[21] SPF_{H2O} , according to Gehlin et al. (2022). Gehlin, S. et al., 2022. Subtask 3 Report - Guide for analysis and reporting of GSHP system performance - system boundaries and key performance indicators (KPI) - Final Document. IEA HPT Annex 52 - Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.



Abbildung/Figure 44: Durchschnittliche Systemjahresarbeitszahl der Quellenseite inkl. Wärmepumpen und Umwälzpumpen
Average seasonal performance factor of the source side system incl. heat pumps and circulation pumps

Die Ergebnisse zeigen, dass die solare Regeneration die Effizienz der Wärmepumpe um etwa 0,05 pro 100 m² PVT-Kollektoren verbessert. Durch den Einsatz von 500 m² Solarkollektorfläche kann demnach die Anzahl der Sonden um ca. 50% von 80 (ohne Regeneration, extrapoliert) auf 40 reduziert werden. Erste Schätzungen der Wärmegestehungskosten (engl.: Levelized Cost of Heat, LCoH) zeigen, dass die eingesparten Kosten für die Bohrmeter und die höhere Effizienz der regenerierten Systeme die zusätzlichen Investitionskosten für die PVT-Kollektoren überwiegen.

Wir danken dem BMWK für die Förderung des Verbundprojekts „Geo-Resume“ (FKZ 03EE4021) und unserem Projektpartner Georg-August-Universität Göttingen für die gute Zusammenarbeit.

The results show that solar regeneration improves the efficiency of the system approximately by 0.05 per 100 m² of PVT collectors. By using 500 m² of PVT collectors, the number of boreholes can be reduced by about 50% from 80 (without regeneration, extrapolated) to 40. First estimations of the levelized cost of heat (LCoH) show that the saved costs of drilling meters and the higher efficiency of regenerated systems outweigh the additional investment cost for the PVT collectors.

We thank the BMWK for funding the joint project "Geo-Resume" (FKZ 03EE4021) and our project partner Georg-August-Universität Göttingen for the good cooperation.

Literatur:
Gehlin, S. et al., 2022. Subtask 3 Report - Guide for analysis and reporting of GSHP system performance - system boundaries and key performance indicators (KPI) - Final Document. IEA HPT Annex 52 - Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

Finn Weiland, Niklas Kracht, Peter Pärish

Erdgas, Wasserstoff und Jobwende: Beschäftigungseffekte durch die beschleunigte Energiesystemtransformation in Deutschland

Die sozio-ökonomischen Auswirkungen der Energiewende, und davon insbesondere die Auswirkungen auf die Beschäftigungszahlen in den von der Energiewende betroffenen Branchen, sind ein Thema, das oft mit Sorge betrachtet wird. Diese Sorge stützt sich weniger auf konkrete Zahlen, als auf eine Angst vor Veränderung, die allzu oft mit einer Gefahr assoziiert wird, wenn nicht von vorneherein klar benannt werden kann, wie sich die Veränderung konkret auswirkt. Bei einem hochkomplexen und multidimensionalen Veränderungsprozess wie der Energiewende ist eine solche Vorhersage aber nicht möglich.

Mit der Energiesystemanalyse steht ein Werkzeug zur Verfügung, um die Zukunft zwar nicht vorherzusagen, aber immerhin verschiedene – aus heutiger Sicht – plausible Pfade für eine Transformation des Energiesystems aufzuzeigen. Diese Transformationspfade können auch zur quantitativen Abschätzung sozio-ökonomischer Auswirkungen der Energiewende genutzt werden. Dazu müssen die Entwicklungen im Energiesystem mittels geeigneter Verknüpfungen „übersetzt“ werden. Im Bereich der Energiewirtschaft ist dies recht einfach möglich, indem man heutige und für die Zukunft erwartbare Beschäftigungsfaktoren für den Aufbau, die Integration und den Betrieb von Energiesystemkomponenten ermittelt, mit deren Hilfe sich dann die Entwicklung der Beschäftigung im Energiesektor in den verschiedenen Transformationsszenarien darstellen lässt.

Für eine Untersuchung der Beschäftigungseffekte der Energiewende wurde die Entwicklung der Bereitstellung elektrischer Energie in 3-Jahres-Schritten für drei verschiedene Szenarien im Zeitraum zwischen 2018 und 2030 analysiert. Ausgangspunkt für die Auswahl der Szenarien war die unsichere Lage im Frühjahr 2022 nach dem russischen Überfall auf die Ukraine. Dieser stellt auch für die Energiewende eine Herausforderung dar, da flexibel einsetzbares Erdgas bisher in fast allen Transformationsszenarien und auch in der Energiewendestrategie der Bundesregierung eine wichtige Rolle eingenommen hat.

Das Referenzszenario A beschreibt einen Weg, bei dem Erdgas wie ursprünglich geplant als Brückentechnologie eingesetzt werden kann. Die Zubauzahlen für erneuerbare Energien entsprechen den von der Bundesregierung gesetzten Zielen. Im Zeitraum zwischen 2021 und 2030 werden diese stark ausgebaut. Gleichzeitig wächst auch der Erdgaseinsatz an, da Erdgaskraftwerke sehr flexibel gefahren werden können und so ein optimaler Partner für die fluktuierenden Erneuerbaren sein können. In den Szenarien B und C wird davon ausgegangen, dass Erdgas nur noch aus nicht-russischen Quellen importiert werden darf. Dies schränkt die Verfügbarkeit dieses Energieträgers ein, da der Anteil Russlands am Erdgasimport zuletzt etwa zwei Drittel betrug. Es wird davon ausgegangen, dass

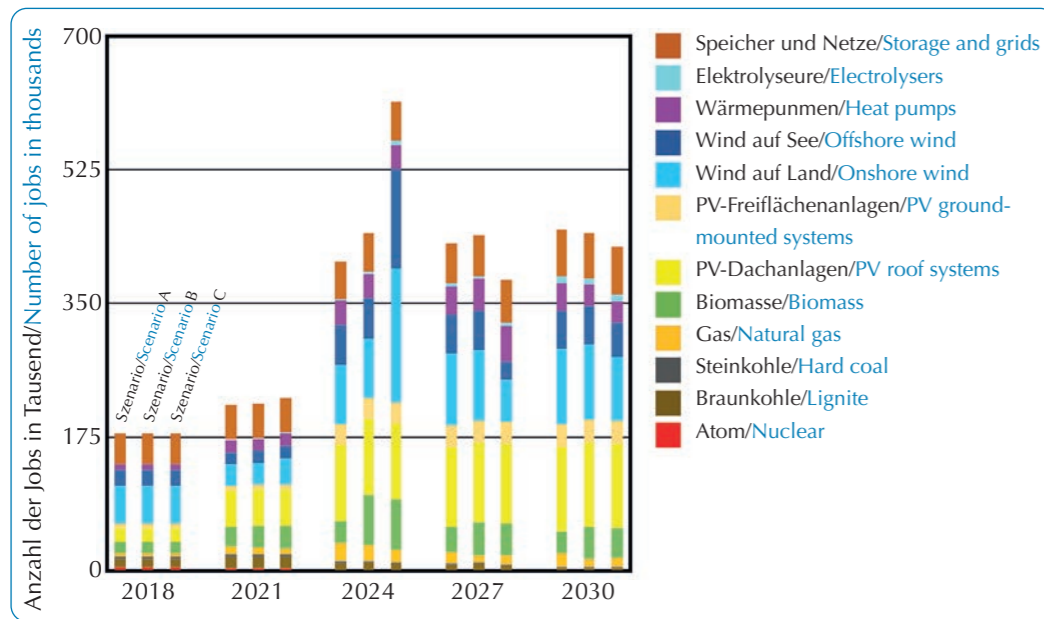
Natural gas, hydrogen and job transition: Employment effects from accelerated energy system transformation in Germany

The socio-economic effects of the energy transition, and of these in particular the effects on employment figures in the sectors affected by the energy transition, are a topic that is often viewed with concern. This concern is based less on concrete figures than on a fear of change. This is quickly associated with a threat to one's own status quo and possible negative consequences if it cannot be clearly stated from the outset what the concrete impact of the change will be. However, in a highly complex and multidimensional change process such as the energy transition, such a prediction is not possible.

With energy system analysis, a tool is available not to predict the future, but at least to show various - from today's perspective - plausible paths for a transformation of the energy system. These transformation paths can also serve as an indicator for estimating the socio-economic impacts of the energy system transformation. For this purpose, the developments in the energy system must be "translated" by means of suitable linkages. In the energy sector, this can be done quite simply by determining known employment factors today and those that can be expected in the future for the construction, integration and operation of energy system components, which can be used to depict the development of employment in the energy sector in various transformation scenarios.

For an investigation of the employment effects of the energy transition, the development of the provision of electrical energy was analyzed in 3-year steps for three different scenarios in the period between 2018 and 2030. The starting point for the selection of the scenarios was the uncertain situation in spring 2022 after the Russian invasion of Ukraine. This also poses a challenge for the energy transition, as flexible natural gas has played an important role in almost all transformation scenarios and also in the German government's energy transition strategy.

Reference scenario A describes a path in which natural gas can be used as a bridging technology as originally planned. The expansion figures for renewable energies are in line with the targets set by the federal government. In the period between 2021 and 2030, these will be strongly expanded. At the same time, the use of natural gas also increases, as natural gas power plants can be operated very flexibly and can thus be an optimal partner for the fluctuating renewables. In scenarios B and C, it is assumed that natural gas may only be imported from non-Russian sources. This severely limits the availability of this energy carrier, as Russia's share of natural gas imports was recently around two-thirds. It is assumed that 530 TWh of natural gas will be available annually from non-Russian sources in the medium and long term, which corresponds to about 60% of natural gas imports in 2020. The two



Abbildung/Figure 45: Entwicklung der Beschäftigung im Energiesektor in Deutschland für die verschiedenen Szenarien aufgeschlüsselt nach Energietechnologien. Development of employment in the energy sector in Germany for the different scenarios broken down by energy technologies.

mittel- und langfristig jährlich 530 TWh Erdgas aus nicht-russischen Quellen verfügbar sind, was etwa 60% des Erdgasimports im Jahr 2020 entspricht. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in der erlaubten Ausbaugeschwindigkeit der erneuerbaren Energien. Während in Szenario B weiterhin der von der Bundesregierung angestrebte Ausbaupfad verfolgt wird, ist es in Szenario C auch möglich, mehr Erneuerbare zuzubauen als derzeit vorgesehen. Dies hat Auswirkungen auf die Energiebereitstellung. In Szenario B wird ab dem Jahr 2024 parallel zum Ausbau der Erneuerbaren noch einmal verstärkt Kohleverstromung eingesetzt, während in Szenario C das fehlende Erdgas durch einen schnelleren Ausbau der Windenergie kompensiert wird.

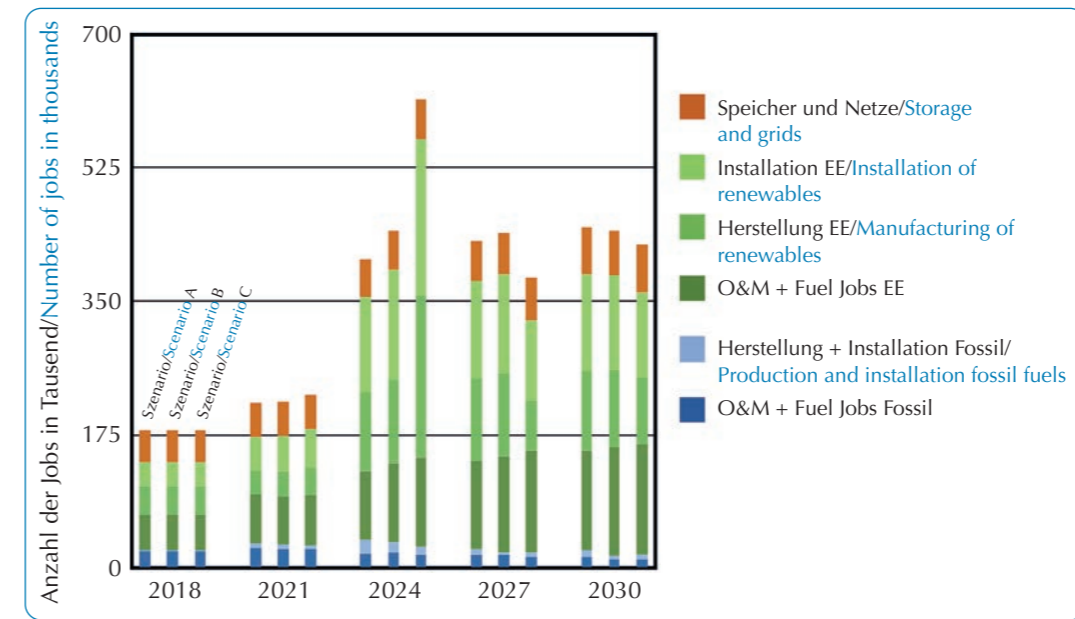
In allen Szenarien werden die Ziele der Energiewende erreicht, ohne dass Versorgungslücken auftreten. Die Pfade B und C zeigen daher, dass eine Energiewende auch ohne russisches Erdgas als Brückentechnologie gelingen kann. Beide Szenarien halten zu jedem Zeitpunkt die Klimaziele ein, führen jedoch auch zu zusätzlichen Herausforderungen: Szenario B setzt nicht für die Stromerzeugung, aber für andere Sektoren auch auf den Import von grünem Wasserstoff, der vor allem in den Jahren bis 2030 noch nicht sicher zur Verfügung steht. Szenario C erhöht die ohnehin schon ambitionierten Ziele für den Windenergieausbau bis 2030 noch einmal zusätzlich.

Abbildung 45 zeigt nun die sich aus der Energiesystemtransformation ergebenden Beschäftigungsbedarfe. Abgebildet ist die direkte Beschäftigung durch die Energiebereitstellung. In allen Szenarien zeigt sich dabei ein ähnliches Bild: Der Beschäftigung im Energiesektor steht ein deutlicher Aufschwung bevor. Der größte Bedarf an Fachkräften besteht in den Branchen Windenergie und Photovoltaik.

scenarios differ in the permitted rate of expansion of renewable energies. While Scenario B continues to pursue the expansion path envisaged by the German government, in Scenario C it is also possible to add more renewables than currently envisaged. This has an impact on energy supply. In Scenario B, parallel to the expansion of renewables, coal-fired power generation is once again increasingly used from 2024 onwards, while in Scenario C the lack of natural gas is compensated by a faster expansion of wind energy.

In all scenarios, the goals of the energy transition are achieved without supply gaps occurring. Paths B and C therefore show that an energy transition can succeed even without Russian natural gas as a bridging technology. Both scenarios comply with the climate targets at all times, but also lead to additional challenges: Scenario B relies on the import of green hydrogen for some sectors (albeit not for electricity generation), which is not yet reliably available, especially in the years up to 2030. Scenario C further increases the already ambitious targets for wind energy expansion by 2030.

Figure 45 now shows the employment requirements resulting from the energy system transformation. Only direct employment from energy provision is shown. The picture is similar in all scenarios: employment in the energy sector is set for a significant upswing. The greatest demand for skilled workers is in the wind energy and photovoltaic sectors.



Abbildung/Figure 46: Entwicklung der Beschäftigung im Energiesektor in Deutschland für die verschiedenen Szenarien aufgeschlüsselt nach Art der Tätigkeit. Development of employment in the energy sector in Germany for the various scenarios broken down by type of activity.

In Abbildung 46 werden dieselben Beschäftigungszahlen aufgeschlüsselt nach Art der Beschäftigung. Für die erneuerbaren Technologien wird dabei unterschieden zwischen der Installation und dem Betrieb der Erzeugungskapazitäten sowie der Herstellung der Komponenten. Dies ist insofern wichtig, als dass letztere auch im Ausland erfolgen kann und nicht unbedingt zu Arbeitsplätzen im Inland führen muss. Es zeigt sich, dass in allen Szenarien und zu allen Zeitschritten weniger als ein Drittel des Beschäftigungsbedarfs in der Herstellung der Komponenten anfällt.

Die Kopplung von Energiesystemenszenarien mit sozio-ökonomischen Faktoren ermöglicht es, mit Hilfe der Energiesystemanalyse auch über das Energiesystem hinausgehende Betrachtungen durchzuführen und zu diskutieren. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Energiewende in allen betrachteten Szenarien zu einem deutlich sechsstelligen Aufwuchs der Beschäftigung führen kann. Dadurch kann der Energiesektor auch erwartete Verluste von Arbeitsplätzen in anderen Sektoren kompensieren. Für die Automobilwirtschaft z. B. wird durch den Umstieg auf Elektromobilität ein Rückgang der Beschäftigung um 50 000 erwartet. Der Bedarf an zusätzlichen Arbeitskräften im Energiebereich liegt deutlich höher.

Figure 46 shows the same employment figures broken down by type of employment. For renewable technologies, a distinction is made between the installation and operation of generation capacity and the manufacture of components. This is important insofar as the latter can also take place abroad and does not necessarily lead to jobs in Germany. It can be seen, however, that in all scenarios and at all time steps, less than one third of the employment demand is generated in the production of components.

The coupling of energy system scenarios with socio-economic factors makes it possible, with the help of the energy system analysis, to carry out and discuss considerations that go beyond the energy system. Our results show that the energy transition can lead to a significant six-digit increase in employment in all scenarios considered. As a result, the energy sector can also compensate for expected declines in other sectors. For the automotive industry, for example, a decline in employment of 50 000 is expected due to the switch to electric mobility. The need for additional workers in the energy sector is significantly higher.

Weitere Details / More Details: A. Krenzel, „Erdgas, Wasserstoff und Jobwende - Szenarienbasierte Analyse von Beschäftigungseffekten durch die Energietransformation in Deutschland“, Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2022.

Akademische Ausbildung

Den Forschungseinrichtungen und den Universitäten kommt die gemeinsame Aufgabe zu, ausreichend Nachwuchs für die Forschung auszubilden.

Im Jahr 2022 wurden an der Leibniz Universität Hannover eine Reihe von Lehrveranstaltungen durchgeführt:

→ Vorlesung und Übungen „Physik der Solarzelle“

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel,
Dr. Carsten Schinke, 4 SWS^[22]
Fakultät für Mathematik und Physik,
Leibniz Universität Hannover.

Diese Vorlesung behandelt die Grundlagen der Halbleiterphysik und alle physikalischen Prozesse, die für die Funktion einer Solarzelle wichtig sind. Dabei wird insbesondere auf die optischen Eigenschaften des Halbleiters, die Lichteinkopplung in die Solarzelle, den Transport von Elektronen und Löchern, sowie auf die Rekombination von Ladungsträgern eingegangen. Die Vorlesung gibt eine Einführung in das Herstellen und experimentelle Charakterisieren von Solarzellen. Die physikalischen Grenzen des Wirkungsgrades von Solarzellen werden berechnet. Die Vorlesung richtet sich an Studierende aus der Physik und aus den Ingenieurwissenschaften ab dem fünften Semester.

→ Vorlesungsreihe: „Erneuerbare Energien“

Vorlesungseinheit Photovoltaik:
Dr. Dennis Bredemeier
1 VL + 1 Übung + 1 Praktikum
Vorlesungseinheit Niedertemperatur Solarthermie:
Julian Jensen
2 VL + 2 Übungen + 1 Praktikum
Fakultät für Maschinenbau, Institut für Thermodynamik
Leibniz Universität Hannover

Die Vorlesung soll den Studierenden einen Überblick über die verschiedenen Arten der erneuerbaren Energieerzeugung geben. Themengebiete sind u.a. Energiewandlung, Solarenergie, Wärmepumpen, Biomasse und Windenergie. Das ISFH führt die beiden Vorlesungen „Photovoltaik“ und „Niedertemperatur-Solarthermie“ durch, in denen die Grundlagen der Technologie sowie deren Anwendungsfelder vermittelt werden. Zusätzlich werden zu den beiden Vorlesungseinheiten Praktika angeboten, in denen die Studierenden die Möglichkeit haben eine photovoltaische Zelle zu charakterisieren und einen solarthermischen Kollektor im Sonnensimulator zu vermessen. Weiterhin wird eine Exkursion am ISFH angeboten, in der den Studierenden die derzeit relevanten Forschungsbereiche am Institut präsentiert werden. Die Inhalte der Vorlesungsreihe richten sich an Studierende aus den Ingenieurwissenschaften ab dem fünften Semester.

→ Vorlesung „Charakterisierung von Halbleitern und

^[22] SWS – Semesterwochenstunden

Academic education

Research institutions and universities have the joint task of training sufficient young people to undertake research.

In 2022, a number of courses were held at Leibniz University Hannover:

→ Course and exercises "Physics of solar cells"

Lecturers: Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel,
Dr. Carsten Schinke, 4 SCH^[22].
Faculty of Mathematics and Physics,
Leibniz Universität Hannover.

This course deals with the basics of semi-conductor physics and all physical processes which are important to the function of a solar cell. At the same time, in particular, the optical characteristics of the semi-conductor, the trapping of light in the solar cell, the transport of electrons and holes as well as the recombination of charge carriers are considered. The course gives an introduction into the production and experimental characterization of solar cells. The physical limits of the efficiency levels of solar cells are calculated. The course is aimed at students of physics and engineering science from the fifth semester onwards.

→ Series of courses: "Renewable Energies"

Course unit „Photovoltaics“:
Dr. Dennis Bredemeier
1 lecture + 1 exercise + 1 practical course
Course unit "Low Temperature Solar Thermal":
Julian Jensen
2 lectures + 2 exercises + 1 practical course
Faculty of Mechanical Engineering, Institute of
Thermodynamics
Leibniz Universität Hannover

This series of courses is designed to give students an overview of the different types of renewable energy generation. Topics include energy conversion, solar energy, heat pumps, biomass and wind energy. ISFH conducts two lectures, "Photovoltaics" and "Low Temperature Solar Thermal", which teach the fundamentals of the technology as well as its fields of application. In addition to the two lecture units, practical courses are offered in which students have the opportunity to characterize a photovoltaic cell and to measure a solar thermal collector in the solar simulator. Furthermore, an excursion to the ISFH is offered, in which the currently relevant research areas at the institute are presented to the students. The contents of the series of courses are aimed at engineering students from the fifth semester onwards.

^[22] Semester credit hours

Solarzellen“

Dozent: Prof. Dr. Jan Schmidt, 2 SWS.
Fakultät für Mathematik und Physik,
Leibniz Universität Hannover.

Im ersten Teil dieser Vorlesung werden Grundlagen der Halbleiterphysik in Verbindung mit Charakterisierungsmethoden für Halbleitermaterialien behandelt. Einen Schwerpunkt bilden dabei Methoden zur Charakterisierung von Defekten in Halbleitern sowie ihrer Auswirkung auf die elektrischen Eigenschaften des Halbleiters. Im zweiten Teil der Vorlesung werden Methoden für die Charakterisierung von Solarzellen vorgestellt, wobei sowohl integrale Methoden wie die spektrale Empfindlichkeit als auch orts aufgelöste Methoden wie die kamerabasierte Photolumineszenz behandelt werden.

→ Vorlesung „Grundlagen der Halbleiterphysik“

Dozent: Prof. Dr. Jan Schmidt, 2 SWS.
Fakultät für Mathematik und Physik,
Leibniz Universität Hannover.

Diese Vorlesung behandelt die elektronischen und optischen Eigenschaften von Halbleitern sowie deren Anwendung in Bauelementen. Die Vorlesung befasst sich insbesondere mit den Themen Bändertheorie, Eigen- und Störstellenleitung, Defekte in Halbleitern, Rekombinationsprozesse, Ladungsträgertransport, pn-Übergänge, Heteroübergänge, Metall-Halbleiter-Kontakte und Halbleiterbauelemente (Dioden, Transistoren, Photodioden).

→ Proseminar „Physik präsentieren – Physik der Energiekonversion“

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel, 2 SWS.
Fakultät für Mathematik und Physik,
Leibniz Universität Hannover.

In dieser Lehrveranstaltung erlernen und vertiefen die Studierenden anhand des Themas der Energiekonversion aus erneuerbaren und konventionellen Quellen Präsentationstechniken und Literaturrecherche. Inhaltlich liegt der Schwerpunkt auf den physikalischen Grundlagen und Prozessen zur Bereitstellung elektrischer Leistung mit erneuerbaren und konventionellen Techniken. Dies beinhaltet im Bereich der erneuerbaren Energien Wind-, Wasser-, und Sonnenenergie. Zudem wollen wir den Aufbau, die Komponenten und die Funktionsweisen thermischer Kraftwerke aus physikalischer Sicht betrachten. Unterschiedliche Quellen für thermische Energie werden behandelt, wie beispielsweise Verbrennung fossiler Rohstoffe und erneuerbare Wärmequellen.

→ Course "Characterization of semiconductors and solar cells"

Lecturer: Prof. Dr. Jan Schmidt, 2 SCH.
Faculty of Mathematics and Physics,
Leibniz Universität Hannover.

The first part of this lecture deals with the fundamentals of semiconductor physics in connection with characterization methods for semiconductor materials. One focus is on methods for characterizing defects in semiconductors and their effect on the electrical properties of the semiconductor. In the second part of the lecture, methods for the characterization of solar cells are presented, including integral methods such as spectral response as well as spatially resolved methods such as camera-based photoluminescence.

→ Course "Fundamentals of semiconductor physics"

Lecturer: Prof. Dr. Jan Schmidt, 2 SCH.
Faculty of Mathematics and Physics,
Leibniz Universität Hannover.

This course deals with the electrical and optical properties of semiconductors and their application in devices. The course includes in particular the following topics: band theory, intrinsic and extrinsic conduction, defects in semiconductors, recombination processes, carrier transport, pn-junctions, heterojunctions, metal-semiconductor junctions and semiconductor devices (diodes, transistors, photodiodes).

→ Proseminar "Presenting physics – Physics of energy conversion"

Lecturer: Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel, 2 SCH.
Faculty of Mathematics and Physics,
Leibniz Universität Hannover.

In this course students learn and deepen presentation techniques and literature research based on the issue of energy conversion from renewable and conventional sources. The focus lies on the physical fundamentals and processes for providing electrical power using renewable and conventional techniques. In the field of renewable energies, this includes wind, water and solar energy. In addition, we look at the structure, components and functionality of thermal power plants from a physical point of view. Different sources of thermal energy, such as combustion of fossil raw materials and renewable heat sources, will also be dealt with.

→ **Vorlesung „Einführung in die elektronische Messdatenerfassung und -verarbeitung mit LabView“**

Dozent: Dr. Carsten Schinke, 4 SWS.
Fakultät für Mathematik und Physik,
Leibniz Universität Hannover.

Die Lehrveranstaltung führt in die Grundlagen der elektronischen Messdatenerfassung und -verarbeitung mit der in Forschung und Industrie häufig eingesetzten grafischen Programmierumgebung LabView ein. Der Fokus liegt auf der Erfassung von Messdaten mit Datenerfassungskarten im Rahmen von kleinen Experimenten, die am PC durchgeführt werden und der anschließenden Weiterverarbeitung dieser Daten mit dem PC. Darüber hinaus werden die physikalischen Grundlagen der Funktionsweise der verwendeten Sensoren sowie die Grundlagen der systematischen Betrachtung von Messunsicherheiten vermittelt.

→ **Vorlesung und Übungen „Wirkungsweise und Technologie von Solarzellen“**

Dozenten: Prof. Dr. Robby Peibst,
Dr.-Ing. Jan Krügener, 4 SWS.
Fakultät für Elektrotechnik und Informatik (MBE),
Leibniz Universität Hannover.

Die Studierenden erlangen vertieftes grundlegendes Verständnis der Funktionsweise von Silizium-Solarzellen und deren Herstellungstechnologie, Verständnis von Wirkungsgradgrenzen und real auftretenden Verlustmechanismen in Solarzellen sowie grundlegende Kenntnisse der Bauteil- und Prozesscharakterisierung.

→ **Vorlesung „Bipolarbauelemente“**

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Tobias Wietler,
Dr.-Ing. Jan Krügener, 4 SWS.
Fakultät für Elektrotechnik und Informatik,
Leibniz Universität Hannover.

Die Vorlesung behandelt zunächst die physikalischen Grundlagen der Halbleiterelektronik wie Ladungsträger im Halbleiter, Stromtransportmechanismen, Generations- und Rekombinationsprozesse. Darauf aufbauend folgt die Betrachtung des statischen und dynamischen Verhaltens von pn-Übergängen, Metall-Halbleiterübergängen und Halbleiter-Heteroübergängen mit einer kurzen Einführung in optoelektronische Bauelemente. In einem begleitenden Posterworkshop zeigen die Studierenden selbst erarbeitete Präsentationen zu verschiedenen Diodentypen und ihren Anwendungen. Den Abschluss bildet die Diskussion des Bipolartransistors von den grundlegenden Prinzipien bis zum dynamischen Verhalten und schließlich Heterobipolartransistoren.

→ **Course "Introduction to electronic measurement data acquisition and processing with LabView"**

Lecturer: Dr. Carsten Schinke, 4 SCH.
Faculty of Mathematics and Physics,
Leibniz Universität Hannover.

The course gives an introduction to the principles of electronic measurement data acquisition and processing with the LabView graphical programming environment often used in research and industry. The focus is on the compilation of measurement data with data acquisition cards as part of small experiments carried out on the PC and the subsequent further processing of this data with the PC. In addition, the physical principles of the functioning of the sensors used and the principles of the systematic consideration of measurement uncertainties are also considered.

→ **Course and exercises "Operating principle and technology of solar cells"**

Lecturers: Prof. Dr. Robby Peibst,
Dr.-Ing. Jan Krügener, 4 SCH.
Faculty of Electrical Engineering and Computer Science (MBE),
Leibniz Universität Hannover.

Participants receive detailed basic knowledge of the functionality of silicon solar cells and their manufacturing technology, an understanding of the efficiency limits and loss phenomena actually occurring in solar cells as well as basic knowledge of component and process characterization.

→ **Course "Bipolar devices"**

Lecturers: Prof. Dr.-Ing. Tobias Wietler,
Dr.-Ing. Jan Krügener, 4 SCH.
Faculty of Electrical Engineering and Computer Science,
Leibniz Universität Hannover.

This lecture course looks into basic semiconductor physics including charge carriers in semiconducting materials, current transport mechanisms and generation and recombination processes. This forms the base for the discussion the static and dynamic characteristics of pn-junctions, metall-semiconductor junctions and semiconductor heterojunctions including a brief introduction to optoelectronic devices. In a special workshop, students give short presentations on different types of diodes and their application. Bipolar junction transistors from basic principles to dynamics and hetero bipolar transistors are also covered.

→ **Vorlesung und Übungen „MOS-Transistoren und Speicher“**

Dozenten: Prof. Dr.-Ing. Tobias Wietler,
Dr.-Ing. Jan Krügener, 3 SWS.
Fakultät für Elektrotechnik und Informatik,
Leibniz Universität Hannover.

Die Vorlesung behandelt die grundlegenden physikalischen Prinzipien des MOS-Systems, den MOS-Kondensator und den MOSFET von einfachen Modellen bis zu Skalierungsproblemen moderner MOSFET-Technologiegenerationen. Weiterhin werden MOS-basierte Speicher wie SRAM, DRAM und Flash-Speicher diskutiert. In begleitenden Laborversuchen wenden die Studierenden das Erlernete auf die Auswertung der Charakteristika von MOS-Kondensatoren und MOSFETs an.

→ **Course and exercise "MOS transistors and memory devices"**

Lecturers: Prof. Dr.-Ing. Tobias Wietler,
Dr.-Ing. Jan Krügener, 3 SCH.
Faculty of Electrical Engineering and Computer Science,
Leibniz Universität Hannover.

This lecture course covers the basic principles of MOS-systems, the MOS capacitor and MOSFETs device physics from simple models to scaling issues of modern MOS technology generations. MOS-based memories like SRAM, DRAM, CCD and flash-memories are also discussed. In a laboratory workshop, students examine the characteristics of MOS capacitors and MOSFETs.



Hauptgebäude des ISFH.
Main building of ISFH.

NILS – Die Lernwerkstatt im Wandel

Die Lernwerkstatt NILS ist ein anerkannter außerschulischer Lernort und wurde am 01.08.2001 als Kooperationsprojekt des Niedersächsischen Kultusministeriums mit dem ISFH gegründet. Sie dient gemäß der im damaligen Klimaschutzaktionsplan Niedersachsen formulierten Aufgabenstellung der Förderung des Austausches zwischen Wissenschaft und Schulen und ist heute dem Aufgabenbereich der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) des Kultusministeriums zugeordnet. Durch die Vernetzung mit den Schulen und Lernorten im niedersächsischen BNE-Verbund erfolgt auf regelmäßig stattfindenden Tagungen ein weitreichender Austausch von Informationen auf Bezirks- und Landesebene.

NILS hat motivierende Lernangebote im mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Bereich (MINT) und ist Mitglied im Bundesverband der Schülerlabore LeLa (Lernort Labor). Für die Lernwerkstatt sind drei Lehrer*innen, die an einem Wochentag ans NILS-ISFH abgeordnet sind, tätig. Nach Bedarf unterstützen ein*e Bundesfreiwilligendienstler*in und Wissenschaftler*innen des Instituts unsere Arbeit. Wir bieten passende Kurse von der Grundschule bis zur beruflichen Aus- und Weiterbildung von Lehrer*innen an.

Besuchstage des NILS-Labors am ISFH sind Mittwoch und Donnerstag. Wir sind auch außerhalb des Instituts tätig. Beispielsweise führen wir in Schulen Solarprojekte oder Fortbildungsveranstaltungen für Lehrer*innen durch. Auf unserer Homepage - www.nils-isfh.de - können sich Interessierte über freie Termine informieren und Material zur Solarenergie erhalten.



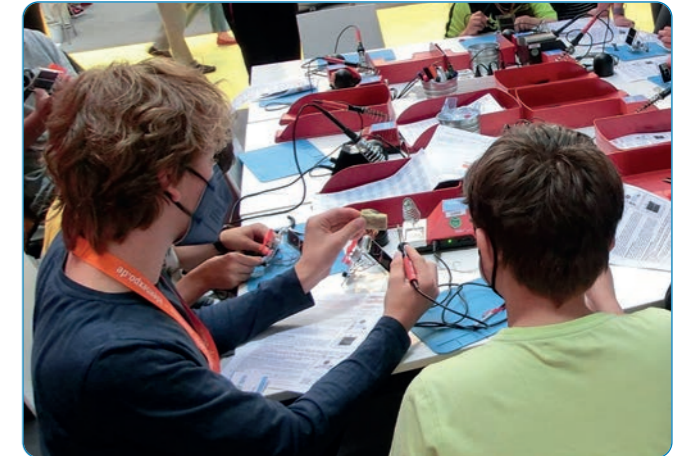
NILS – The Learning Workshop in transition

The Learning Workshop NILS is a recognized extracurricular place of learning and was founded on 01.08.2001 as a cooperation project between the Lower Saxon Ministry of Education and the ISFH. It serves the terms of reference formulated in the then-current Climate Protection Action Plan for Lower Saxony of promoting the exchange between science and schools and is today attributed to the area of responsibility of the Education for Sustainable Development (BNE) department of the Ministry of Education. Through networking with schools and places of learning in the Lower Saxon BNE Association an extensive exchange of information takes place at regularly held conferences at provincial and state level.

NILS has motivational programs in the science, technology, engineering and mathematics (STEM) field and is a member of the Federal Association of School Student Laboratories (LeLa). Three teachers work for the Learning Workshop, who are seconded to NILS-ISFH for one day a week. Whenever necessary, a federal voluntary service worker and scientists from the Institute assist our work. We offer appropriate courses from primary school through to job training and in-service training courses for teachers.

Visits take place to the NILS laboratory at the ISFH on Wednesdays and Thursdays. We also work outside the Institute. For example we organize solar projects in schools or further education courses for teachers. On our homepage – www.nils-isfh.de – those interested can obtain information about available dates and material on solar energy.

Abbildung/Figure 48: Dr. Roland Goslich erläutert die Wirkungsgradbestimmung von Solarzellen auf der IdeenExpo 2022.
Dr. Roland Goslich explains the measurement of the efficiency of solar cells at IdeenExpo 2022.



Abbildung/Figure 49: Schüler beim Bau eines Solarmoduls bei einem Workshop im Rahmen der IdeenExpo 2022.
Students building a solar module at a workshop as part of IdeenExpo 2022.

NILS-ISFH Stand auf der IdeenExpo 2022 – Messegelände Hannover

„Neun Tage, 425.000 Besucher, mehr als 280 Aussteller, 720 Mitmach-Exponate, über 750 Workshops, vier große Talkabende, Kongresse und sechs Konzerte an drei Abenden - das war die IdeenExpo 2022!“ (www.ideenexpo.de/event-2022)

NILS-ISFH war mit einem großen Stand von über 50 m² Fläche für einen Schülerworkshop und mit fünf Exponaten dabei. Der Stand war dem Themenbereich „EnergieFeld“ zugeordnet, der sich der Frage widmete, wie wir künftig mit knappen Ressourcen besser umgehen können und wie innovative Lösungen zur Energiegewinnung und -speicherung aussehen könnten.

Die zehntägige Betreuung des NILS-ISFH-Standes wurde durch die große Unterstützung des ISFH und zweier Kooperationsschulen ermöglicht. Dr. Roland Goslich übernahm wieder die Organisation und die Durchführung mit seiner Erfahrung als NILS-Gründungsmitglied. Die Schulen stellten ca. 50 Betreuungsschüler*innen von der 7. bis 12. Klasse, die die Besucher*innen bei den Workshops und den Exponaten einwiesen.

Abbildung/Figure 50: Schüler*innen beim Workshop am Stand von NILS-ISFH bauen ein Solarauto.
Students at the workshop at the NILS-ISFH booth build a solar car.

NILS-ISFH booth at the IdeenExpo 2022 - Hanover Fairgrounds
“Nine days, 425,000 visitors, more than 280 exhibitors, 720 hands-on exhibits, more than 750 workshops, four big talk evenings, congresses and six concerts on three evenings - that was the IdeenExpo 2022!“ (www.ideenexpo.de/event-2022)

NILS-ISFH was there with a large booth of over 50 m² of space for a student workshop and five exhibits. The booth was assigned to the thematic area “EnergyField”, which was dedicated to the question of how we can better deal with scarce resources in the future and how innovative solutions for energy generation and storage could look like.

The ten-day supervision of the NILS-ISFH booth was made possible by the great support of the ISFH and two cooperating schools. Dr. Roland Goslich again took over the organization and implementation with his experience as a NILS founding member. The schools provided about 50 supervising students from 7th to 12th grade who instructed the visitors during the workshops and the exhibits.



Das ISFH hat sich damit nicht nur einer großen Öffentlichkeit gezeigt, sondern einen wichtigen, anerkannten Beitrag zur Nachwuchsförderung im MINT-Bereich geleistet. Die Möglichkeiten und der Spaß an der Technik und dem „Mach doch einfach“ motiviert die Jugendlichen und ist ein wichtiger Beitrag um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken.



The ISFH thus not only showed itself to a large public, but also made an important, recognized contribution to the promotion of young talent in the STEM field. The possibilities and the fun of technology and the "just do it" motivates the young people and is an important contribution to counteract the shortage of skilled workers.

Abbildung/Figure 51: Das Exponat „Solartankstelle“ des NILS-ISFH-Standes auf der IdeenExpo 2022.
The exhibit "Solar Filling Station" of the NILS-ISFH booth at the Ideen-Expo 2022.

NILS-Aktionen beim Stand des Kultusministeriums beim Tag der Niedersachsen am Maschsee und auf der niedersächsischen Landestagung der außerschulischen Lernorte in Goslar im Rahmen der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)

Beim Tag der Niedersachsen zeigte sich in vielen Gesprächen und Kontakten, dass unser Bildungsangebot selbst in der Freizeit bei Kindern und Erwachsenen ankommt. Unser damaliger Kultusminister Grant Hendrik Tonne dankte sogar schriftlich: „Ich konnte mich bei meinem Besuch am Samstag selbst davon überzeugen, welche tolle und innovative Ideen dort gezeigt wurden. ... die Besucherinnen und Besucher waren begeistert und ich auch.“

Oberstufenkurse

Gerade im Rahmen eines Seminarfachs oder eines Physik-Kurses bietet sich eine Exkursion ins ISFH an. Wichtige Aspekte dieser Besuche sind das Kennenlernen eines Forschungsinstituts und die Berufsorientierung. NILS bietet hier ein zugeschnittenes Besuchsprogramm, das gerne auch von Mitarbeiter*innen des ISFH durch Einblick in Labore oder bei der Beantwortung von Fragen bezüglich Lebenslauf und Tätigkeit unterstützt wird.

Darüber hinaus können Schüler*innen an Lernstationen Experimente zu Solarzellen und Solarmodulen durchführen. Sie messen selbst den Wirkungsgrad einer Solarzelle oder erforschen die Ströme und Spannungen bei der Aufladung eines Handys mit einem Solarmodul und DC/DC-Wandler.

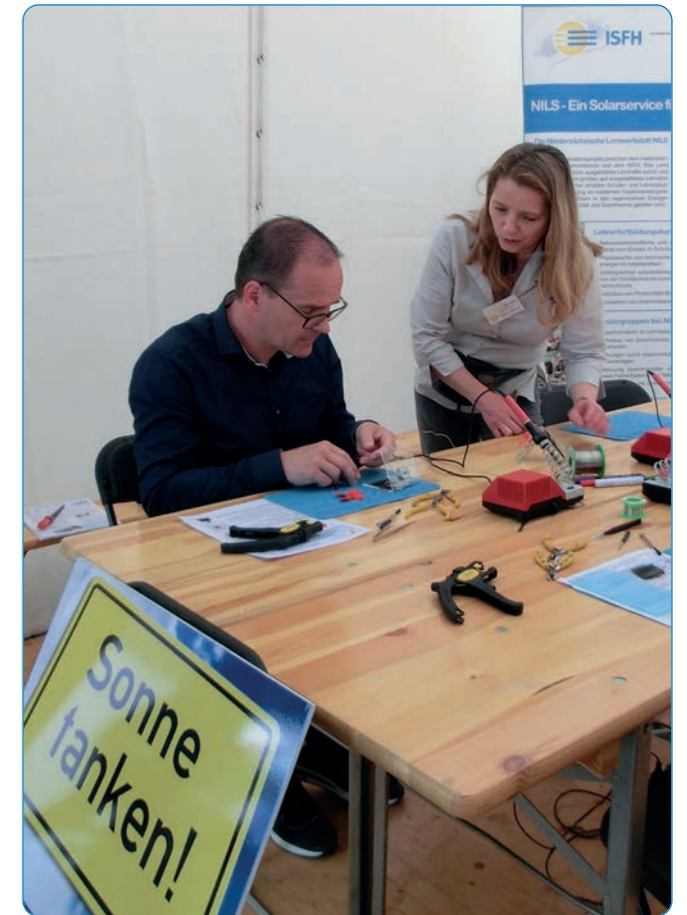
NILS activities at the booth of the Ministry of Education at the Day of Lower Saxony at the Maschsee and at the Lower Saxony state conference of extracurricular places of learning in Goslar in the framework of Education for Sustainable Development

At the Day of Lower Saxony, many conversations and contacts showed that our educational offerings are well received by children and adults even in their free time. Our then Minister of Education Grant Hendrik Tonne even thanked us in writing: "During my visit on Saturday, I was able to see for myself what great and innovative ideas were on display there. ... the visitors were enthusiastic and so was I."

Upper secondary school courses

Especially in the context of a seminar course or a physics course, an excursion to the ISFH is a good idea. Important aspects of these visits are getting to know a research institute and career orientation. NILS offers a tailored program of visits, which is also supported by ISFH staff members who provide insight into laboratories or answer questions regarding their careers and current work.

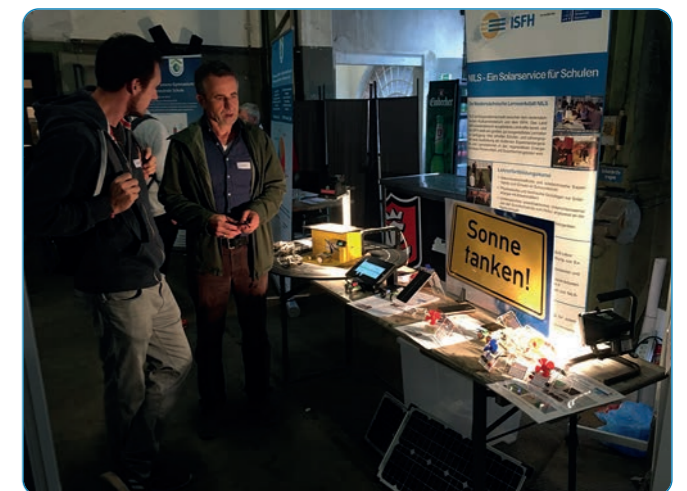
In addition, students can conduct experiments on solar cells and solar modules at learning stations. They measure the efficiency of a solar cell themselves or explore the currents and voltages when charging a cell phone with a solar module and DC/DC converter.



Abbildung/Figure 52: Der ehemalige niedersächsische Kultusminister Grant Hendrik Tonne beim Bau eines NILS-Solarmoduls mit rotem Propeller im Zelt des Kultusministeriums bei dem Tag der Niedersachsen am Maschsee.
The former Minister of Education of Lower Saxony, Grant Hendrik Tonne, building a NILS solar module with a red propeller in the tent of the Ministry of Education at the Day of Lower Saxony at the Maschsee.

Jeder Oberstufenschüler, jede Oberstufenschülerin muss im Seminarfach eine 15-seitige, wissenschaftspropädeutische Arbeit schreiben. Im Jahr 2022 hatten wir mehrere Seminarfachkurse zu Gast im ISFH, die durch den Besuch Ideen für ihre Themen fanden.

Each upper secondary school student is required to write a 15-page science propaedeutic paper in the seminar course. In 2022, we had several seminar course students visit ISFH and find ideas for their topics through the visit.



Abbildung/Figure 53: Frank Tittel zeigt einem interessierten Lehrer NILS-Experimentiersysteme auf der Landestagung der außerschulischen Lernorte für Bildung für Nachhaltige Entwicklung in Goslar.
Frank Tittel shows NILS experiment systems to an interested teacher at the state conference of extracurricular learning sites for education for sustainable development in Goslar.

Mittelstufenklassen und Grundschule

Zusätzlich zu Besuchen ans ISFH führten wir in 2022 auf Anfrage mit Schulklassen aus dem Bereich Sekundarstufe 1 auch Workshops und Experimente an deren Schulen durch. Dabei haben die Schüler*innen das Modul SUSE CM 315 bzw. den Solarflitzer turboSC gebaut und mit den selbstgebaute Geräten eigenständige Experimente durchgeführt. So haben sie Spannungen und Stromstärken gemessen, Leistungen ermittelt, Parallel- und Reihenschaltungen aufgebaut, Lade- und Entladekurven beim Speichern gemessen sowie z. B. Radios betrieben und Handys geladen.

Beim Besuch des ISFH haben die Schulklassen neben dem Bau von Geräten und Experimenten eine Institutsführung bekommen und konnten so einen kleinen Eindruck über die Tätigkeiten in einem Forschungsinstitut gewinnen, in dem sie kurz in verschiedene Labore schauen durften.

Über die klassischen Experimente hinaus ist in 2022 durch NILS eine Projektwoche zum Thema Wasserstoff unterstützend begleitet worden, bei der unter anderem Experimente mit Wasserstoffautos durchgeführt worden sind. Die Schüler*innen konnten hier eine weitere Komponente der Energiewende kennenlernen.

Die im letzten Jahr an der KGS Bad Münde erprobten Solarforschertage im 5. Jahrgang haben sich etabliert, sodass alle Schüler*innen des Jahrgangs durch NILS organisierte Projekttag durchführen konnten. Dabei wurden anhand von Experimenten verschiedene BNE-Themen behandelt.



Lower secondary school classes and primary school

In addition to visits to the ISFH, in 2022 we also conducted workshops and experiments with school classes from secondary level 1 at their schools on request. The students built the SUSE CM 315 module or the solar speedster turboSC and conducted their own experiments with the self-built devices. They measured voltages and currents, determined power, set up parallel and series circuits, measured charge and discharge curves during storage, and operated radios and charged cell phones, for example.

During the visit to the ISFH, the school classes were given a guided tour of the institute in addition to the hands-on building of devices and experiments, and were thus able to gain a small impression of the activities in a research institute, where they were allowed to look briefly into various laboratories.

In addition to the classic experiments, NILS supported a project week on the topic of hydrogen in 2022, which included experiments with hydrogen cars. The students were able to get to know another component of the energy transition.

The solar research days piloted last year at KGS (cooperative comprehensive school) Bad Münde in the 5th grade have become established, so that all students of the grade were able to carry out project days organized by NILS. Various Education for Sustainable Development (BNE) topics were dealt with by means of experiments.

Abbildung/Figure 54: Solarmodul SUSE 315 eines Schülers.
Solar module SUSE 315 of a student.



Abbildung/Figure 55: Funktionstest von selbstgebaute NILS-Solarmodulen.

Functional test of self-made NILS solar modules.

Von NILS-Angeboten konnten neben mehreren Hamelner Grundschulen auch Schulen aus Springe und Hildesheim profitieren. Die handlungsorientierten Projekte wurden von Schüler*innen und Lehrkräften mit Begeisterung quittiert.

Begabungsförderung

NILS führt ein Projekt in Kooperation mit dem Begabtenförderverbund Hameln-Pyrmont bei den Talenttagen in Hameln durch. An den Talenttagen beteiligen sich mehrere Grundschulen und weiterführende Schulen aus dem Landkreis Hameln-Pyrmont.

In Wunstorf gibt es eine schulübergreifende Begabungsförderung. Im Rahmen dieser Begabungsförderung ist mit Unterstützung durch NILS ein Energieprojekt etabliert worden, bei dem Schülerinnen des Hölty-Gymnasiums Experimente für Grundschüler*innen vorbereitet und an mehreren Projekttagen mit unterschiedlichen Grundschulen durchgeführt haben.

Abbildung/Figure 56: Grundschülerinnen beim Experimentieren
Primary school girls experimenting.

In addition to several Hamelin primary schools, schools from Springe and Hildesheim have also benefited from NILS offers. The hands-on projects were enthusiastically received by students and teachers alike.

Talent development

NILS carries out a project in cooperation with the association for the promotion of gifted students Hameln-Pyrmont at the Talent Days in Hameln. Several primary and secondary schools from the Hameln-Pyrmont district participate in the Talent Days.

In Wunstorf, there is a school-wide talent promotion program. Within the framework of this talent promotion, an energy project has been established with the support of NILS, in which students of the Hölty-Gymnasium prepared experiments for primary school students and carried them out on several project days with different elementary schools.



Fortbildung für angehende Lehrkräfte

Zwei Seminare der Lehrer*innen aus Hameln haben Fortbildungen im NILS-Labor absolviert. Dabei haben die Teilnehmer*innen zum einen das ISFH und zum anderen die Möglichkeiten für Projekte mit Schulklassen kennengelernt.

Überregionale Kooperationen von NILS-ISFH in 2022

Neben den regionalen und landesweiten solardidaktischen Aktivitäten ist NILS auch deutschlandweit und im EU-Ausland aktiv tätig. NILS bekommt viele Anfragen von Lehrkräften, Schulen, Schulträgern, privaten und öffentlichen Bildungsträgern, Hochschulen und Klimaschutzagenturen. An vielen Schulen und Hochschulen in Deutschland und im benachbarten Ausland sind NILS-Konzepte und NILS-Experimentiersysteme im Einsatz. Neben langfristig gepflegten Kooperationen gab es in 2022 viele neue Kontakte mit Schulen und Hochschulen, die Interesse am Einsatz von NILS-Konzepten und NILS-Experimentiergeräten hatten.



Further training for prospective teachers

Two seminars of teacher trainees from Hameln have completed advanced training courses in the NILS laboratory. On the one hand, the participants got to know the ISFH and on the other hand the possibilities for projects with school classes.

Supraregional cooperation of NILS-ISFH in 2022

In addition to the regional and state-wide solar didactic activities, NILS is also active throughout Germany and in other EU countries. NILS receives many inquiries from teachers, schools, school boards, private and public educational institutions, universities and climate protection agencies. NILS concepts and NILS experiment systems are in use at many schools and universities in Germany and neighboring countries. In addition to long-term cooperations, there were many new contacts with schools and universities in 2022 that were interested in using NILS concepts and NILS experimental equipment.

Abbildung/Figure 57: Bettina Wolpensinger zeigt Schüler*innen des Schiller-Gymnasiums die Eigenschaften von flüssigem Stickstoff. Bettina Wolpensinger shows students of the Schiller-Gymnasium the properties of liquid nitrogen.

Bayern

Eine enge Kooperation entwickelte sich 2022 mit der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg. Im dortigen studentischen experimentellen Solarenergiepraktikum werden NILS-Experimentiergeräte eingesetzt, die nach intensiven fachdidaktischen Beratungen teilweise modifiziert wurden. Die Bilder 59 und 60 zeigen Praktikumsversuche im studentischen Praktikum zur Wirkungsgradbestimmung von Solarzellen, zur Winkelabhängigkeit und zur Parallel- und Reihenschaltung von Solarzellen.

Seit vielen Jahren arbeitet NILS-ISFH mit „Solar für Kinder“ zusammen. Diese Organisation errichtet PV-Anlagen auf Schulen und liefert dazu solardidaktische Konzepte. Die von Solar für

Bavaria

A close cooperation developed in 2022 with the Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg. NILS experimental devices are used in the student solar energy practical course there, which were partially modified after intensive consultations with didactic experts. Figures 59 and 60 show practical experiments in the student practical course on the determination of the efficiency of solar cells, on the angular dependence and on the parallel and series connection of solar cells.

NILS-ISFH has been cooperating with "Solar für Kinder" (Solar for Children) for many years. This organization builds PV systems on schools and provides solar didactic concepts for this purpose. The



Abbildung/Figure 58: Wasserstoffauto Hydrogen-powered car.

Kinder Bildung GmbH entwickelten Solar-Experimentierkästen für den Unterrichtseinsatz beinhalten auch NILS- Experimentiergeräte, da es mit NILS eine solardidaktische Kooperation gibt.

Realschule Weichs: Solardidaktische Kooperation, Einsatz von NILS-Experimentiergeräten im naturwissenschaftlichen Unterricht.

Willstädter Gymnasium Nürnberg: Online Lehrerfortbildungskurs im Sommer 2022 zum experimentellen Unterricht zur Solarenergie im Fach Physik mit NILS-PV-Experimentiergeräten.

Baden-Württemberg

Schulverbund Creglingen: Auch mit diesen Schulen besteht eine solardidaktische Kooperation. Im Unterricht werden NILS-Konzepte und NILS-Experimentiergeräte eingesetzt.

Berlin/Brandenburg

Robert-Havemann-Gymnasium, Canisius Kolleg: Seit Jahren besteht eine intensive Kooperation mit dem Robert-Havemann-Gymnasium RHO und weiteren Schulen. Das RHO hat ein großes Solar-Schülerlabor, welches mit NILS-Beteiligung eingerichtet wurde. NILS war auch in 2022 an solaren Schulprojekten und solaren Fortbildungsveranstaltungen in Berlin und Brandenburg beteiligt.

Hessen

Solardidaktische Kooperationen bestehen mit dem Freien Bildungsträger SKA in Darmstadt und der Grundschule Kranichstein in Darmstadt.

Nordrhein-Westfalen

Pictorius Berufskolleg Coesfeld: Eine jahrelange Kooperation gibt es mit dem Pictorius-Berufskolleg in Coesfeld. Dort wurde ein Ausbildungsgang der BBS mit NILS-Experimentiergeräten und NILS-Konzepten aufgebaut. NILS begleitet und berät die Schule. Weitere solardidaktische Kooperationen gab es in 2022 mit der DGS Münster und dem Verein WWU Münster.

solar experimentation kits developed by Solar für Kinder Bildung GmbH for classroom use also contain NILS experimentation equipment, as there is a solar didactic cooperation with NILS.

Secondary school Weichs: Solar didactic cooperation, use of NILS experimental equipment in science teaching.

Willstädter grammar school Nürnberg: Online teacher training course in summer 2022 on the experimental teaching of solar energy in physics using NILS PV experimental equipment.

Baden-Württemberg

School network Creglingen: There is also a solar didactic cooperation with these schools. NILS concepts and NILS experimental equipment are used in lessons.

Berlin/Brandenburg

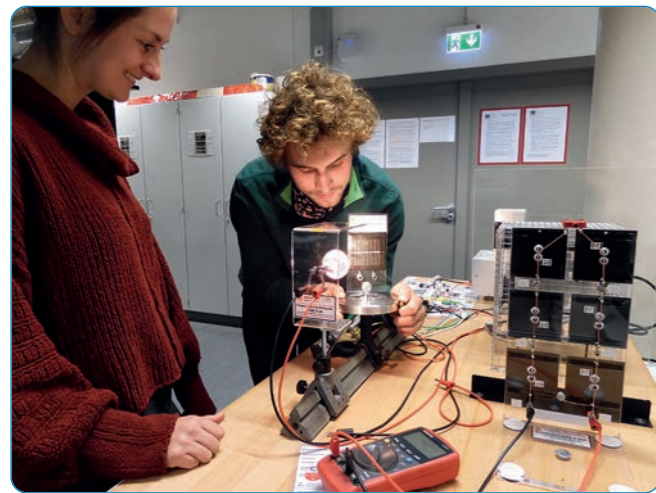
Robert-Havemann grammar school, Canisius Kolleg: For years, there has been intensive cooperation with the Robert-Havemann grammar school RHO and other schools. The RHO has a large solar student laboratory, which was established with NILS participation. NILS was also involved in solar school projects and solar training events in Berlin and Brandenburg in 2022.

Hesse

Solar didactic cooperations exist with the independent educational institution SKA in Darmstadt and the primary school Kranichstein in Darmstadt.

North Rhine-Westphalia

Pictorius Berufskolleg Coesfeld: There has been a long-standing cooperation with the Pictorius-Berufskolleg in Coesfeld. There, a training course of the BBS was established with NILS experimental equipment and NILS concepts. NILS supports and advises the school. Further solar didactic cooperations took place in 2022 with the DGS Münster and the association WWU Münster.



Abbildung/Figure 59: Studierende am Versuchsaufbau mit NILS-Experimentiergeräten im studentischen Solarpraktikum an der OTH Regensburg. Students at the experimental set-up with NILS experimental devices in the student solar practical course at the OTH Regensburg.

Rheinland-Pfalz

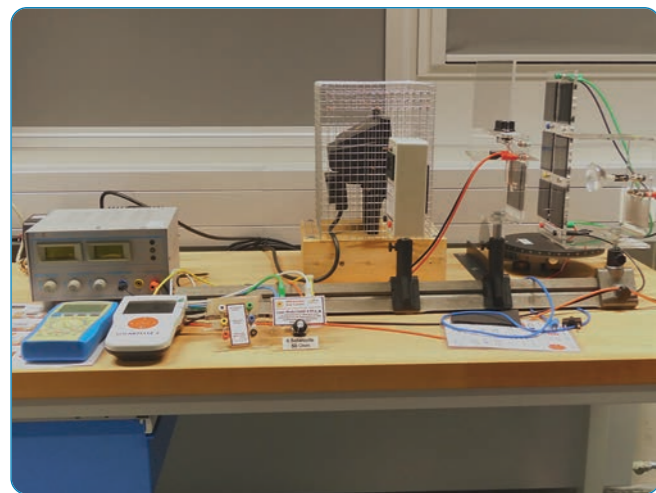
Die evangelische Jugend in Worms hatte 2022 Beratungskontakte mit NILS und setzte NILS- Experimentiergeräte für ihre solare Bildungsarbeit ein.

Sachsen

Schon seit vielen Jahren setzt das Lößnitz-Gymnasium in Radebeul NILS-Konzepte und NILS-Experimentiergeräte im naturwissenschaftlichen Unterricht ein. Auch in 2022 gab es eine beratende Kooperation.

Österreich

Solardidaktische Kooperation mit der Fachhochschule Burgenland mit dem Einsatz von NILS-Konzepten und NILS-PV-Experimentiergeräten in Forschung und Lehre an der FHS.



Abbildung/Figure 60: Experimentelle Aufbauten des Solar-Praktikums an der OTH Regensburg. Experimental set-up of the solar practical course at the OTH Regensburg.

OSTr Volker Napp, OSTr Frank Tittel, StR Vivienne Wesebe-Wetzig, OSTr a.D. Wolf-Rüdeger Schanz



Partner aus Universitäten & Forschungseinrichtungen/ Partners from universities & research facilities

Inland/National

bifa Umweltinstitut GmbH; Augsburg	Leibniz Universität Hannover, Institut für elektrische Energiesysteme (IfES); Hannover
Center for Applied Energy Research e.V. (CAE); Würzburg	Leibniz Universität Hannover, Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (MBE); Hannover
Fachhochschule Nordhausen; Nordhausen	Leibniz Universität Hannover, Institut für Mikroelektronische Systeme (IMS); Hannover
Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-5); Jülich	Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik (match); Garbsen
Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich (PTJ); Jülich	Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik (IfT); Garbsen
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik (CSP); Halle	Leibniz Universität Hannover, Institut für Umweltplanung (IUP); Hannover
Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP); Stuttgart	Leibniz Universität Hannover, Institut für Wirtschaftswissenschaften (iwi); Hannover
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE); Kassel	Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V. (IOM); Leipzig
Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP; Dresden	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB); Braunschweig
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE); Freiburg	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Institut für Baumanagement, Digitales Bauen und Robotik im Bauwesen (ICoM); Aachen
Georg-August-Universität Göttingen, Geowissenschaftliches Zentrum; Göttingen	Technische Universität Chemnitz, Institut für Physik Optik und Photonik kondensierter Materie (OPKM); Chemnitz
Georg-August-Universität Göttingen, IV. Physikalisches Institut; Göttingen	Technische Universität Clausthal, Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEK); Clausthal-Zellerfeld
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH; Berlin	Technische Universität Clausthal, Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT); Clausthal-Zellerfeld
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW); Berlin	Technische Universität Clausthal, Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE); Clausthal-Zellerfeld
International Solar Energy Research Center Konstanz (ISC); Konstanz	Technische Universität Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik (IWTT); Freiberg
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung GmbH; Mühlheim an der Ruhr	Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik; Kassel
Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Eggenstein-Leopoldshafen	
Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG); Hannover	
Leibniz Universität Hannover, Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL); Hannover	

Partner aus Universitäten & Forschungseinrichtungen/ Partners from universities & research facilities

Universität Konstanz, Fachbereich Physik; Konstanz	Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermo- technik und Energiespeicherung (IGTE); Stuttgart
Universität Potsdam; Potsdam-Golm	Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA); Stuttgart

Ausland/International

Aalto University; Aalto; Finnland	(ESTI); Ispra; Italien
Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (AEE); Gleisdorf; Österreich	L'Institut PhotoVoltaire d'Ile-de-France (IPVF); Antony; Frank- reich
Australian National University (ANU); Canberra; Australien	Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE); Paris; Frankreich
Berner Fachhochschule (BHF); Burgdorf; Schweiz	Loughborough University; Loughborough; Großbritannien
Case Western Reserve University; Cleveland; USA	National Physical Laboratory (NPL); Teddington; Großbritannien
CSEM SA – Recherche et Développement; Neuchâtel; Schweiz	National Renewable Energy Laboratory (NREL); Golden; USA
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); Lausanne; Schweiz	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO); Den Haag; Niederlande
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Institute of Microengineering (IMT); Neuchâtel; Schweiz	Polymer Competence Center Leoben (PCCL) GmbH; Leoben; Österreich
Fachhochschule Nordwestschweiz; Muttenz; Schweiz	Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI); Canobbio; Schweiz
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE); Winterthur; Schweiz	SPF Institut für Solartechnik; Rapperswil; Schweiz
Institut für Solartechnik Prüfung Forschung (SPF); Rapperswil; Schweiz	The University Centre in Svalbard (UNIS); Longyearbyen; Nor- wegen
Institut National de l'Énergie Solaire (CEA INES); Le Bourget- du-Lac; Frankreich	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK); Ankara; Türkei
Institute for Energy Technology (IFE); Kjeller; Norwegen	University of Luxembourg, Laboratory for Photovoltaics; Belvaux; Luxembourg
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas (INTA); Madrid; Spanien	University of Warwick, School of Engineering; Coventry; Groß- britannien
Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC); Leuven; Belgien	
Joint Research Centre (JRC), European Solar Test Installation	

**Partner aus Industrie, Planung & Entwicklung/
Partners from industry, planning & development**

Inland/National

a2 – solar Advanced and Automotive Solar Systems GmbH; Erfurt	EnergieSynergie GmbH; Ovelgönne
Aerial PV Inspection GmbH; Aachen	Energy Glas Glasbeschichtungsgesellschaft mbH & Co. KG; Wolfhagen
AkoTec Produktionsgesellschaft mbH; Angermünde	Enerpipe GmbH; Hilpoltstein
albert.ing GmbH; Frankfurt am Main	EnPV GmbH; Karlsruhe
Architektenkammer Niedersachsen; Hannover	eurolaser GmbH; Lüneburg
Architektur- und TGA-Planungsbüro Carsten Grobe Passivhaus; Hannover	Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVHF); Berlin
Baltic Renewable Partners GmbH & Co. KG; Neustadt in Holstein	Flachglas Sachsen GmbH; Grimma
blue energy systems GmbH; Rösrath	FOSTA-Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.; Düsseldorf
BRUGG Rohrsysteme GmbH; Wunstorf	Gebr. SCHMID GmbH; Freudenstadt
Bundesverband Wärmepumpe; Berlin	GeoClimaDesign AG; Fürstenwalde/Spree
centrotherm international AG; Blaubeuren	GeoEn Energy Technologies GmbH; Berlin
Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH; Berlin	GEWO – Gesellschaft für Wohnen und Bauen mbH; Nordhorn
Comgy GmbH; Berlin	GGEW Gruppen-Gas und Elektrizitätswerk Bergstraße AG; Bensheim
Consolar Solare Energiesysteme GmbH; Lörrach	Gundlach Bau und Immobilien GmbH & Co. KG; Hannover
Corona Solar GmbH; Hannover	H. Anger's Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH; Hessisch Lichtenau
CreaPhys GmbH; Dresden	h.a.l.m. elektronik gmbh; Frankfurt am Main
Cupasol GmbH; Ravensburg	Heimkehr Wohnungsgenossenschaft eG; Hannover
Daldrup & Söhne AG; Ascheberg Westfalen	iNeG IngenieurNetzwerk Energie eG; Bad Iburg
DME consult GmbH; Rosenheim	Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer GmbH; Hameln
Ecotopia Dienstleistungsgenossenschaft Hannover eG; Hannover	Innovative WärmeNetze GmbH; Berlin
Ecovillage Hannover eG; Hannover	janßen energieplanung; Hannover
Eilenburger Fenstertechnik GmbH & Co. KG; Eilenburg	
Eisenhuth GmbH & Co. KG; Osterode	

**Partner aus Industrie, Planung & Entwicklung/
Partners from industry, planning & development**

juwi AG; Wörrstadt	Ronge GmbH; Alfeld / Leine
Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH (KEAN); Hannover	Sika Deutschland GmbH; Bad Urach
Klimaschutzagentur Weserbergland; Hameln	SINGULUS TECHNOLOGIES AG; Kahl am Main
Konvortec GmbH; Schermbeck	SM InnoTech GmbH & Co. KG; Bocholt
Lang Hugger Rampp GmbH; München	SMA Solar Technology AG; Niestetal
LPKF Laser & Electronics AG ; Garbsen	Social Impact gGmbH; Potsdam
meravis Wohnungsbau & Immobilien GmbH; Hannover	solarnative GmbH; Frankfurt
Meyer Burger Technology AG; Hohenstein-Ernstthal	Solvis GmbH; Braunschweig
MN Metall GmbH; Neustadt in Holstein	SpaceTech GmbH; Immenstaad
Narva Lichtquellen GmbH & Co. KG; Brand-Erbisdorf	Splus2 GmbH; Mönchengladbach
nD-Enerserve GmbH; Hannover	Stadtwerke Lemgo GmbH; Lemgo
nefino GmbH; Hannover	Stadtwerke Mühlhausen GmbH; Mühlhausen
NexWafe GmbH; Freiburg im Breisgau	Stadtwerke Neuruppin GmbH; Neuruppin
Optimel Schmelzgußtechnik GmbH; Iserlohn	Stadtwerke SH GmbH & Co. KG; Rendsburg
Oventrop GmbH & Co. KG; Olsberg	Stadtwerke Solingen GmbH ; Solingen
Oxford PV Germany GmbH; Brandenburg a.d. Havel	Stiebel Eltron GmbH & Co. KG; Holzminden
PAW GmbH & Co. KG; Hameln	Stiftung Umweltenergierecht ; Würzburg
PEWO Energietechnik GmbH; Elsterheide	Sunmaxx PVT GmbH; Dresden
Pforzheimer Bau und Grund GmbH; Pforzheim	SURTECO GmbH; Buttenwiesen
Phönix SonnenWärme AG; Berlin	Systea Pohl GmbH; Henstedt-Ulzburg
pro Klima GbR bei der Stadtwerke Hannover AG; Hannover	Taconova GmbH; Singen
RENA Technologies GmbH; Gütenbach	Teutoburger Energie Netzwerk eG; Hagen a.T.W.
RESOL – Elektronische Regelungen GmbH; Hattingen	Trianel GmbH; Aachen

Partner aus Industrie, Planung & Entwicklung/ Partners from industry, planning & development

TÜV Rheinland AG; Köln	Viega GmbH & Co. KG; Attendorn
UNIWELL Rohrsysteme GmbH & Co. KG; Ebern	Viessmann Werke GmbH & Co. KG; Allendorf
Uponor GmbH; Haßfurt	VISCODA GmbH; Hannover
Vaillant GmbH; Remscheid	WärmePlan; Hainewalde
VDE Renewables GmbH; Alzenau	Wavelabs Solar Metrology Systems GmbH; Leipzig
VHF Plan Liesenhoff; Malente	

Ausland/International

Meyer Burger AG; Thun; Schweiz	Taconova Group AG; Zürich; Schweiz
SoliTek R&D, UAB; Vilnius; Litauen	TECNAN – NANOMAT; Los Arcos; Spanien

Institutsmitgliedschaften/Institute memberships

Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (AEE); Gleisdorf, Österreich	Innovationsnetzwerk Niedersachsen; Hannover
Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (BSW); Berlin	International Solar Energy Society (ISES); Freiburg
Deutsche Industrieforschungsgemeinschaft Konrad Zuse e.V.; Berlin	Klimaschutzagentur Weserbergland; Hameln
ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE); Berlin	Laboratorium für Nano- und Quantenengineering (LNQE); Hannover
Global Solar Certification Network (https://gscn.solar/members/members.html)	Leibniz Forschungszentrum Energie 2050 (LiFE 2050); Hannover
Informationsdienst Wissenschaft (idw); Bochum	Weserbergland AG; Hameln

Institutskolloquien/Institute colloquia

Amlung M.: „Transparente GFK-Materialien durch Brechwertanpassung“. Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH (INM), Saarbrücken, 25.10.2022

Harvey S.: „Renewable Energy from a Big Picture Perspective to Nanoscale Insights via TOF-SIMS“. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, USA, 02.08.2022

Terheiden B.: „CoSt redUction and enhanced PERformance of PV systems - SUPER PV“. Universität Konstanz, Konstanz, 18.10.2022

Vinay M.: „Maximizing the impact of your research – insights from an editor at Communications Engineering“. Communications Engineering, Berlin, 29.06.2022

Mitarbeit in Fachgremien/Membership in professional bodies

Bothe K.: Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) – AK 373.0.10 „Solarzellen, Wafer und Module“; Mitglied | Fachausschuss: Hochfrequenz und Optik im Deutschen Kalibrierdienst (DKD); Mitglied | Fachausschuss: Messunsicherheit im Deutschen Kalibrierdienst (DKD); Mitglied | Working Group 8: PV Cell of the Technical Committee 82 of the International Electrotechnical Commission (IEC); Mitglied | European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; Mitglied des Scientific Committee

Brendel R.: Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien des BMWK; Mentor der Arbeitsgruppe „Kristallines Silizium - Neue Ansätze“ | ForschungsVerbund Erneuerbare Energien, Berlin; Mitglied des Direktoriums | Institut für Festkörperphysik, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover; Vorstand | International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV); Mitglied des Executive Committee | KIT Scientific Advisory Board for the Research Field Energy; Mitglied | Laboratorium für Nano- und Quantenengineering der Leibniz Universität Hannover (LNQE); Mitglied | Leibniz Forschungszentrum Energie 2050, Leibniz Universität Hannover (LiFE); Vorstand | Progress in Photovoltaics, Wiley and Publishers; Mitglied des Editorial Board | Solar-Rapid Research Letters, Wiley-VCH; Mitglied des Editorial Board

Dullweber T.: Energy Award, Westfalen Weser Energie GmbH & Co. KG, Paderborn; Jurymitglied | European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC); Mitglied des Scientific Committee | International Photovoltaic Power Generation and Smart Energy Conference & Exhibition (SNEC); Mitglied des Scientific Committee | International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV); Mitglied | Photovoltaics International; Mitglied des Editorial Advisory Boards

Eggert D.: Erfahrungsaustauschkreis der Prüflaboratorien „Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile der Inspektoren“ (EK-TSuB-I), unter Leitung von DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH; Mitglied | Erfahrungsaustausch-

kreis der Prüflaboratorien „Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile“ (EK-TSuB), unter Leitung von DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH; Mitglied

Giovanetti F.: Arbeitsgruppe Energieversorgung Region Hannover; Mitglied | BSW, Fachgruppe Markt und Wirtschaftlichkeit und Fachgruppe Prozesswärme; Mitglied | Deutsche Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP); Mitglied des Beirats | International Conference on Solar Energy in Buildings and Industry; Mitglied des Scientific Committee | Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Bad Staffelstein; Mitglied des Tagungsbeirates

Köntges M.: IEA TASK 13 „Performance and Reliability of Photovoltaic Systems“; Mitglied | PV-Symposium, Bad Staffelstein; Mitglied des Tagungsbeirates | Sachverständigenkreis Photovoltaik; Mitglied

Lampe C.: Arbeitsausschuss NA 041-01-45 (Wassererwärmer) im DIN/NHRS, zugleich nationaler Spiegelausschuss zu CEN/TC 164/WG10; Mitglied/stellv. Obmann | ISO/TC 180/WG 4 „Solar collectors“; Mitglied

Lim B.: European Technology & Innovation Platform Photovoltaics (ETIP PV); Mitglied des Steering Committee

Peibst R.: IEA Task 17 „PV for Transport“; Mitglied

Schmidt J.: European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; Mitglied des Scientific Committee | IEEE Journal of Photovoltaics; Editor | Institut für Festkörperphysik, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover; Vorstand | International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells (CSSC); Mitglied des International Advisory Committee | npv workshop; Mitglied im Organisationskomitee | SiliconFOREST (Fortschritte in der Entwicklung von Solarzellen-Strukturen und -Technologien), Doktoranden- und Diplomanden-Workshop; Mitglied des Programmkomitees

Ausstellungen & Fachtagungen/Fairs & congresses

Degradation modes in new PV cell and module technology, Frankfurt am Main, 06.10.2022, Veranstalter und Organisator

SiliconFOREST (Fortschritte in der Entwicklung von Solarzellen-Strukturen und -Technologien), Falkau, 9.-12.10.2022, Mitorganisator

Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften/Peer-reviewed publications

Bordihn S., Fladung A., Schlipf J., Köntges M.: „Machine Learning Based Identification and Classification of Field-Operation Caused Solar Panel Failures Observed in Electroluminescence Images“. IEEE Journal of Photovoltaics 12 (3), 827-832 (2022). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3150725.

Helmich L., Walter D. C., Pernau T., Schmidt J.: „Carrier Lifetime Stability of Boron-Doped Czochralski-Grown Silicon Materials for Years After Regeneration in an Industrial Belt Furnace“. IEEE Journal of Photovoltaics 12 (1), 198-203 (2022). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3116019.

Dittrich A., Heinemeyer F., Xu C., Reineke-Koch R.: „Realization of a cost-effective thermochromic solar absorber with a high emittance change based on VO₂ and an infrared transparent intermediate layer“. AIP Advances 12 (3), 35118 (2022). DOI: 10.1063/5.0063702.

Hollemann C., Rienäcker M., Soeriyadi A., Madumelu C., Haase F., Krügener J. et al.: „Firing stability of tube furnace-annealed n-type poly-Si on oxide junctions“. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 30 (1), 49-64 (2022). DOI: 10.1002/pip.3459.

Firat M., Wouters L., Lagrain P., Haase F., Polzin J.-I., Chaudhary A. et al.: „Local Enhancement of Dopant Diffusion from Polycrystalline Silicon Passivating Contacts“. ACS Applied Materials & Interfaces 14 (15), 17975-17986 (2022). DOI: 10.1021/acsami.2c01801.

Köntges M., Wagner J., Siebert M., Bordihn S., Schinke C.: „Applicability of Light Induced Luminescence for Characterization of Internal Series-Parallel Connected Photovoltaic Modules“. IEEE Journal of Photovoltaics 12 (3), 805-814 (2022). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3156727.

Genath H., Norberg J., Wolpensinger B., Osten H. J.: „Investigation of the temperature stability of germanium-rich SiGe layers on Si(111) substrates“. Thin Solid Films 763, 139561 (2022). DOI: 10.1016/j.tsf.2022.139561.

Leibbrandt P., Giovannetti F., Schabbach T., Jordan U.: „Improved calculation approach of the heat transfer in inclined insulating gas layers“. Solar Energy 231, 252-261 (2022). DOI: 10.1016/j.solener.2021.10.052.

Gewohn T., Bredemeier D., Schinke C., Lim B., Brendel R.: „Improved Calculation of the Power Gain of Vertical PV Modules due to Ground Reflection Using the Ground View Factor“. IEEE Journal of Photovoltaics 12 (6), 1567-1575 (2022). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.3207312.

Lohr C., Schlemminger M., Peterssen F., Bensmann A., Niepelt R., Brendel R., Hanke-Rauschenbach R.: „Spatial concentration of renewables in energy system optimization models“. Renewable Energy 198 (C), 144-154 (2022). DOI: 10.1016/j.renene.2022.07.144.

Green M. A., Dunlop E. D., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Koidakis N., Bothe K. et al.: „Solar cell efficiency tables (Version 60)“. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 30 (7), 687-701 (2022). DOI: 10.1002/pip.3595.

Mariotti S., Jäger K., Diederich M., Härtel M. S., Li B., Sveinbjörnsen K. et al.: „Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells Fabricated Using Industrial p-Type Polycrystalline Silicon on Oxide/Passivated Emitter and Rear Cell Silicon Bottom Cell Technology“. Solar RRL 6 (4), 2101066 (2022). DOI: 10.1002/solr.202101066.

Haase F., Hollemann C., Wehmeier N., Bothe K., Min B., Schulte-Huxel H. et al.: „Design of Large Poly-Si on Oxide Interdigitated Back Contact Silicon Solar Cells with Local Al-p+ Contacts in the Constraints of Measurement and Module Integration“. Solar RRL 6 (11), 2200583 (2022). DOI: 10.1002/solr.202200583.

Morlier A., Lim B., Blankemeyer S., Schulte-Huxel H., Witteck R., Daschinger T. et al.: „Photovoltaic Modules with the Look and Feel of a Stone Façade for Building Integration“. Solar RRL 6 (5), 2100356 (2022). DOI: 10.1002/solr.202100356.

Nasebandt L., Min B., Hollemann C., Hübner S., Dippell T., Peibst R., Brendel R.: „Sputtered Phosphorus-Doped poly-Si on Oxide Contacts for Screen-Printed Si Solar Cells“. Solar RRL 6 (9), 2200409 (2022). DOI: 10.1002/solr.202200409.

Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften/Peer-reviewed publications

Niewelt T., Steinhäuser B., Richter A., Veith-Wolf B., Fell A., Hammann B. et al.: „Reassessment of the intrinsic bulk recombination in crystalline silicon“. Solar Energy Materials and Solar Cells 235, 111467 (2022). DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111467.

Vogt M. R., Riechelmann S., Gracia-Amillo A. M., Driesse A., Kokka A., Maham K. et al.: „PV Module Energy Rating Standard IEC 61853-3 Intercomparison and Best Practice Guidelines for Implementation and Validation“. IEEE Journal of Photovoltaics 12 (3), 844-852 (2022). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3135258.

Peibst R., Fischer H., Brunner M., Schießl A., Wöhe S., Wecker R. et al.: „Demonstration of Feeding Vehicle-Integrated Photovoltaic-Converted Energy into the High-Voltage On-Board Network of Practical Light Commercial Vehicles for Range Extension“. Solar RRL 6 (5), 2100516 (2022). DOI: 10.1002/solr.202100516.

Walter D. C., Voronkov V. V., Falster R., Bredemeier D., Schmidt J.: „On the kinetics of the exchange of hydrogen between hydrogen boron pairs and hydrogen dimers in crystalline silicon“. Journal of Applied Physics 131 (16), 165702 (2022). DOI: 10.1063/5.0086307.

Peibst R., Rienäcker M., Larionova Y., Folchert N., Haase F., Hollemann C. et al.: „Towards 28 %-efficient Si single-junction solar cells with better passivating POLO junctions and photonic crystals“. Solar Energy Materials and Solar Cells 238, 111560 (2022). DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111560.

Wang T., Ehre F., Weiss T. P., Veith-Wolf B., Titova V., Valle N. et al.: „Diode Factor in Solar Cells with Metastable Defects and Back Contact Recombination“. Advanced Energy Materials 12 (44), 2202076 (2022). DOI: 10.1002/aenm.202202076.

Peterssen F., Schlemminger M., Lohr C., Niepelt R., Bensmann A., Hanke-Rauschenbach R., Brendel R.: „Hydrogen supply scenarios for a climate neutral energy system in Germany“. International Journal of Hydrogen Energy 47 (28), 13515-13523 (2022). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.098.

Wetzel G., Salomon L., Krügener J., Bredemeier D., Peibst R.: „High time resolution measurement of solar irradiance onto driving car body for vehicle integrated photovoltaics“. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 30 (5) (2022). DOI: 10.1002/pip.3526.

Schlemminger M., Ohrdes T., Schneider E., Knoop M.: „Dataset on electrical single-family house and heat pump load profiles in Germany“. Scientific Data 9 (1), 56 (2022). DOI: 10.1038/s41597-022-01156-1.

Winter M., Walter D. C., Min B., Peibst R., Brendel R., Schmidt J.: „Light and elevated temperature induced degradation and recovery of gallium-doped Czochralski-silicon solar cells“. Scientific Reports 12, 8089 (2022). DOI: 10.1038/s41598-022-11831-3.

VanSant K. T., Warren E. L., Geisz J. F., Klein T. R., Johnston S., McMahon W. E. et al.: „A performance comparison between GaInP-on-Si and GaAs-on-Si 3-terminal tandem solar cells“. iScience 25 (9) (2022). DOI: 10.1016/j.isci.2022.104950.

Xu C., Min B., Reineke-Koch R.: „Extended Tauc Lorentz model (XTL) with log-normal distributed bandgap energies for optical permittivity in polycrystalline semiconductors“. AIP Advances 12 (11), 115007 (2022). DOI: 10.1063/5.0119256.

Andere Veröffentlichungen/Other publications

Baumann S., Brockmann L., Blankemeyer S., Steckenreiter V., Barnscheidt V., Köntges M., Kajari-Schröder S., Wolter S.J., Schulte-Huxel H., Wietler T.: „Influence of encapsulation process temperature on the performance of perovskite mini modules“, AIP Conference Proceedings 2487, 120001 (2022). DOI: 10.1063/5.0090632

Dullweber T., Mertens V., Stöhr M., Langlois J., Mettner L., Baumann U., Haase F., Brendel R., Libal J., Hähnel A., Müller A., Naumann V., Vogt A., Ambrosius N., Pernau T., Haverkamp H.: „Towards Cost-Effective High-Efficiency POLO IBC Solar Cells with Minimal Conversion Invest for Existing PERC+ Production Lines“. Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 35-39. Milano, Italy (2022). DOI: 10.4229/WCPEC-82022-1AO.6.5.

Distelhof M., Pärish P., Lampe C.: „Methodology for the development of temporally high-resolved and spatially accurate tapping profiles“, Proceedings CLIMA 2022 -14th REHVA HVAC World Congress, Netherland (2022). DOI: 10.34641/clima.2022.229

Eggert D., Yasin M., Puknat R.: „Effizienzbewertung der Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern im Bestand“, Tagungsunterlagen 14. Effizienztagung klimaneutral Bauen+Modernisieren, Hanover, Germany (2022).

Andere Veröffentlichungen/Other publications

Folchert N., Bordihn S., Peibst R., Brendel R.: „Modelling the annealing of poly-Si/SiO_x/c-Si junctions“, AIP Conference Proceedings 2487, 20006 (2022). DOI: 10.1063/5.0089597

Frick E., Büttner C., Kirchner M., Giovannetti F.: „Solar Thermal, Rear-Ventilated Facades as Heat Pump Sources in Multi-Storey Buildings“, Proceedings ISES Solar World Congress, 1158–1168, Online Event, (2022).

Frick E., Kirchner M., Büttner C., Wehmeier T., Giovannetti F.: „Dynamische Charakterisierung solarthermisch aktiver Fassaden als Quelle für Wärmepumpensysteme“. Tagungsunterlagen 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 479–496, Bad Staffelstein, Germany (2022)

Herz M., Friesen G., Jahn U., Köntges M., Lindig S., Moser D.: „Identify, Analyse, Mitigate – Quantification of Technical Risks in PV Power Systems“. Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1105-1111. Milano, Italy (2022). DOI: 10.4229/WCPEC-82022-4DO.4.3.

Jensen J., Schiebler B., Giovannetti F.: „Simulationsstudie stagnationssicherer Wärmerohrkollektoren- Vergleich zwischen Simulation und Praxis“. Tagungsunterlagen 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 554–570, Bad Staffelstein, Germany (2022)

Keuler J., Pärish P., Büttner C.: „Energetic Comparison of Different Instantaneous Water Heater Concepts in a Solar Combi-System for a Multi-Family House with TRNSYS“. Proceedings ISES Solar World Congress 2021, pp. 537–547, Online Event (2022)

Keuler J., Mühlenweg P., Mende S., Schuba S., Eggert D., Pärish P.: „Measurement and statistical evaluation of hot water tapping profiles in (non-)residential buildings“. Proceedings CLIMA 2022 -14th REHVA HVAC World Congress, Netherland (2022). DOI: 10.34641/clima.2022.73

Kirchner M., Schiebler B., Wehmeier T., Giovannetti F.: „Profiled Glass Solar Façade with Integrated Heat Pipe Absorber – Experimental Evaluation of Prototypes“. Proceedings ISES Solar World Congress 2021, 1169–1178, Online Event (2022)

Leibbrandt P., Giovannetti F., Schabbach T., Jordan U.: „Angepasster Berechnungsansatz für den Wärmeübergang in geneigten Isoliergasschichten für Kollektoranwendungen“. Tagungsunterlagen 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 400–419, Bad Staffelstein, Germany (2022)

Mandow W., Edenhofner F., Maier T., Giovannetti F.: „Building Information Modeling (BIM) für die Abbildung solarer Komponenten“. Tagungsunterlagen 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 535–553, Bad Staffelstein, Germany (2022)

Mariotti S., Jager K., Diederich M., Hartel M.S., Li B., Sveinbjornsson K., Kohlen E., Brendel R., Kajari-Schroder S., Peibst R., Albrecht S., Korte L., Wietler T.: „Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells on p-type POLO/PERC Silicon Bottom Cells“. 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49), 0529. Philadelphia, USA (2022). DOI: 10.1109/PVSC48317.2022.9938622

Min B., Nasebandt L., Hollemann C., Bredemeier D., Thiemann L., Brendemühl T., Bothe K., Peibst R., Brendel R.: „23.1%-Efficient POLO Back Junction Solar Cells“. Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 107-109. Milano, Italy (2022). DOI: 10.4229/WCPEC-82022-1CV.2.13.

Min B., Wehmeier N., Brendemuehl T., Haase F., Larionova Y., Nasebandt L., Schulte-Huxel H., Peibst R., Brendel R.: „Impact of dielectric capping layer thickness on the contact formation between n+ type passivating contacts and screen-printed fire-through silver pastes“, AIP Conference Proceedings 2487, 20014 (2022). DOI: 10.1063/5.0089239

Peibst R., Schwarz C., Larionova Y., Wolter S., Rienäcker M., Wietler T., Diederich M., Brendel R.: „Interface between Poly-Si on Oxide Passivated Si Bottom and Perovskite Top Cells – Search for the Leanest and Best Working Layer Stack“. Proceedings of the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 255-259. Milano, Italy (2022). DOI: 10.4229/WCPEC-82022-2CO.1.2

Ramspeck K., Komp L., Dauwe S., Bothe K., Hinken D., Wolf M., Meixner M.: „Determination of base doping concentration of silicon solar cells from light IV-curves“, AIP Conference Proceedings 2487, 030008 (2022). DOI: 0.1063/5.0090130

Schiebler B., Beier T., Köhler J., Jensen J., Giovannetti F.: „Projektabschluss HP-SYS: Entwicklung und Demonstration innovativer, stagnationssicherer solarthermischer Anlagen mit Heat-Pipe-Kollektoren“. Tagungsunterlagen 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 33–44, Bad Staffelstein, Germany (2022)

Schiebler B., Wagner L., Jensen J., Giovannetti F.: „Innovatives Systemkonzept mit stagnationssicheren Wärmerohrkollektoren im Praxistest: Ergebnisse aus den Feldtestanlagen“. Tagungsunterlagen 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 231–250, Bad Staffelstein, Germany (2022)

Andere Veröffentlichungen/Other publications

Wetzel G., Krügener J., Stannowski B., Janke S., Peibst R.: „Transient electrical characteristics of silicon heterojunction solar cells under fast transient illumination“, AIP Conference Proceedings 2487, 30014 (2022). DOI: 10.1063/5.0090104

Wetzel G., Krügener J., Stannowski B., Janke S., Peibst R.: „Transient electrical characteristics of silicon heterojunction solar cells under fast transient illumination“, AIP Conference Proceedings 2487, 30014 (2022). DOI: 10.1063/5.0090104

Vorträge & Poster/Oral and visual presentations

Baumann S.: „Effiziente Flächennutzung durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen – ein Vergleich der Bundesländer“. 37. PV-Symposium. Freiburg, Germany.

Bongs C., Krause M., Kracht N.: „Wärmepumpen – Aktuelle Entwicklungen und Lösungen für den Gebäudebestand“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Bordihn S., Köntges M., Siebert M., Wagner J. K., Schinke C.: „Photovoltaic Module Characterization Using Light-Induced Electroluminescence of Solar Modules with Parallel Cell String Interconnection“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Bothe K., Sinton R.: „Tutorial: AM2: Cell And Module Characterization“. 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49). Philadelphia, USA.

Bredemeier D., Schinke C., Gewohn T., Niepelt R., Brendel R.: „Clustering of Sun Positions for Fast Calculation of Time Resolved Insolation Using Ray Tracing“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Brendel R., Min B., Haase F., Schmidt J., Peibst R.: „Staying selective: The ISFH c-Si roadmap“. PV CellTech 2022. Berlin, Germany.

Brinkmann M.: „Simulation der Messung von SHJ-Zellen ohne Vorderseitenmetallisierung“. SiliconFOREST 2022. Falkau, Germany.

Brinkmann M., Haase F., Bothe K., Bittkau K., Lambertz A., Duan W., Ding K., Sperlich H.-P., Waltinger A., Schulte-Huxel H.: „Accurate IV-Measurements of Silicon Heterojunction Solar Cells without Front Metallization Using FEM Simulations“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Büttner C.: „Solar-Thermal Activation of Rear-Ventilated Façades as a Source for Heat Pump Based Heat Supply Systems“. EuroSun 2022. Kassel, Germany.

Witteck R., Siebert M., Kontges M., Laurikenas P., Denafas J., Wietler T.: „Improved STC and energy yield performance of bifacial modules with white-grid rear reflectors“. 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49), 1245-1247. Philadelphia, USA (2022). DOI: 10.1109/PVSC48317.2022.9938599

Büttner B., Wurdinger K., Vehse M., Yasin M., Groß B., Pflugradt N., Wagner A.: „Gebäudebestand der Zukunft – Smarte Energieeffizienz“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Chhugani B.: „Decarbonizing Heating Supply Systems in Existing Single-family Houses Through PVT – Heat Pump Systems“. EuroSun 2022. Kassel, Germany.

Chhugani B.: „Simulation von Varianten“. Workshop zum Projekt integraTE. Bad Staffelstein, Germany.

Chhugani B., Pärish P.: „PVT-Kollektoren: Kombination mit Wärmepumpen und Systemvergleiche für Wohngebäude“. Fachausschuss des Verbraucherzentrale Bundesverbands. Hamm (Westf), Germany.

Chhugani B., Pärish P.: „PVT-Kollektoren: Kombination mit Wärmepumpen und Systemvergleiche für Wohngebäude“. Fachausschuss des Verbraucherzentrale Bundesverbands. Waren (Müritz), Germany.

Dullweber T., Mertens V., Baumann U., Kosuke T., Dhamrin M., Brendel R.: „High-efficiency low-cost IBC upgrade of existing PERC+ production lines: the POLO IBC with PECVD shadow mask approach“. 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33). Nagoya, Japan.

Dullweber T., Mertens V., Mettner L., Baumann U., Langlois J., Stöhr M., Haase F., Brendel R., Libal J., Vogt A., Ambrosius N., Pernau T., Haverkamp H.: „Towards Cost-Competitive High-Efficiency POLO IBC Solar Cells with Minimal Conversion Invest for Existing PERC+ Production Lines“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Eggert D.: „Automatisierte Effizienzanalyse der Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern anhand von Verbrauchswerten“. Fachtagung 2022: Energiewende in der Wohnungswirtschaft. Wolfenbüttel, Germany.

Vorträge & Poster/Oral and visual presentations

Eggert D.: „Monitoring - Wissen, was im Heizungskeller los ist!“. Abschlussveranstaltung des Projektes FeBOp-MFH. Hannover, Germany.

Eggert D., Yasin M., Puknat R.: „Effizienzbewertung der Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern im Bestand“. 14. Effizienz-Tagung klimaneutral Bauen+Modernisieren, Hannover, Germany

Epp B., Pärish P.: „Gefördert und gefordert: Neue Lösung zur Gebäude-Energieversorgung über PVT-Kollektoren in Verbindung mit Wärmepumpen“. Technikausschuss des vdw Niedersachsen Bremen sowie des VNW Verband Norddeutscher Wohnungsunternehmen. Leer, Germany.

Epp B., Pärish P.: „PVT-Wärmepumpensysteme: Doppelt Sonne für vierfachen Ertrag“. 14. Effizienz-Tagung klimaneutral Bauen+Modernisieren. Hannover, Germany.

Frick E.: „Dynamische Charakterisierung solarthermisch aktiver Fassaden als Quelle für Wärmepumpensysteme“. 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme. Bad Staffelstein, Germany.

Giovanetti F.: „Solarwärme: Stand und Perspektive“. Webinarreihe „Norddeutsche Wärme-Forschung“. Online Event.

Herrmann W., Eder G. C., Farnung B., Friesen G., Koentges M., Kubicek B., Kunz O., Liu H., Parlevliet D., Tsanakas I., Vedde J.: „Review of On-Site Inspection Techniques for the Qualification of PV Power Plants“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Herz M., Friesen G., Jahn U., Koentges M., Lindig S., Moser D.: „Identify, Analyse, Mitigate – Quantification of Technical Risks in PV Power Systems“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Hollemann C., Haase F., Wehmeier N., Min B., Bothe K., Krügener J., Brendel R., Peibst R.: „Analysis of Losses in POLO-IBC Cells in the Constraints of Module Integration“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Hüsing F.: „Die Wärmepumpe in der künftigen Wärmeversorgung in Niedersachsen“. Woche der Wärmepumpe. Emmerthal, Germany.

Hüsing F., Bongs C., Klinker F., Lenz V.: „Wärmepumpen machen Umweltwärme in Gebäuden nutzbar – der Schlüssel zu einer nachhaltigen Wärmeversorgung“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Jensen J.: „A TRNSYS Type for the Simulation of Temperature Limiting Heat Pipe Collectors“. EuroSun 2022. Kassel, Germany.

Jensen J.: „Heat Pipe Collectors with Overheating Prevention in a Cost-Optimized System Concept: Monitoring of System Performance and Stagnation Loads under Real Conditions“. EuroSun 2022. Kassel, Germany.

Jensen J.: „Simulationsstudie mit abschaltenden Heatpipe-Kollektoren“. Workshop zum Projekt HP-SYS. Bad Staffelstein, Germany.

Jensen J.: „Simulationsstudie stagnationssicherer Wärmerohrkollektoren - Vergleich zwischen Simulation und Praxis“. 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme. Bad Staffelstein, Germany.

Jensen J.: „Solarthermie und ihr Beitrag zur Energiewende“. „Tag der Solarenergie 2022“ als Fachveranstaltung zu den Themen Photovoltaik und Solarthermie. Online Event.

Kallert A. M., Gebhardt H., Schiebler B., Oliva A., Schüwer D., Weismann S.: „Neubau und Transformation hocheffizienter Wärmenetze im Kontext der Dekarbonisierung und Flexibilisierung unserer Energiesysteme“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Köntges M.: „Defektcharakterisierung mittels lichtinduzierter Elektrolumineszenz von Solarmodulen mit paralleler Zellstring-Verschaltung“. 37. PV-Symposium. Freiburg, Germany.

Kracht N.: „Projektvorstellung Geo-Resume“. EASyQuart-Anwenderworkshop. Leipzig, Germany.

Kracht N.: „Techno-Economical Assessment of a Solar Regenerated Borehole Heat Exchanger Field with PVT Collectors for District Heating“. EuroSun 2022. Kassel, Germany.

Lenz V., Hartmann I., Eggert D., Bongs C., Thomas S.: „Lösungsansätze für die schnelle Umstellung von 20 Mio. Einzelgebäudeheizungen von fossil auf erneuerbar“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Mack S., Rienäcker M.: „Tutorial 2: Passivating Contacts on Basis of Polycrystalline Si“. SiliconPV 2022 - 12th International Conference on Silicon Photovoltaics. Konstanz, Germany.

Mandow W.: „Building Information Modeling (BIM) für die Abbildung solarer Komponenten“. 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme. Bad Staffelstein, Germany.

Vorträge & Poster/Oral and visual presentations

Mandow W.: „Building Information Modeling for Solar Energy Systems“. EuroSun 2022. Kassel, Germany.

Mariotti S., Jager K., Diederich M., Hartel M. S., Li B., Sveinbjornsson K., Kohlen E., Brendel R., Kajari-Schroder S., Peibst R., Albrecht S., Korte L., Wietler T.: „Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells on p-type POLO/PERC Silicon Bottom Cells“. 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49). Philadelphia, USA.

Mertens V., Baumann U., Dorn S., Brendel R., Ambrosius N., Pernau T., Haverkamp H., Vollmer J., Dullweber T.: „Advances in POLO IBC solar cells with shadow mask process“. 10th workshop on Back contact solar cell and module technology (BCworkshop2022). Konstanz, Germany.

Mertens V., Baumann U., Schäfer S., Stöhr M., Mercker A., Köhler A., Mettner L., Langlois J., Brendel R., Ambrosius N., Pernau T., Haverkamp H., Dullweber T.: „POLO IBC with shadow masks: A novel IBC cell design based on today's bifacial PERC+ cells“. 9th workshop on Back contact solar cell and module technology (BCworkshop). München, Germany.

Min B., Nasebandt L., Hollemann C., Bredemeier D., Thiemann L., Brendemühl T., Bothe K., Peibst R., Brendel R.: „Recent Progress of POLO Back Junction Solar Cells“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Nasebandt L.: „Gesputterte poly-Si-Kontakte“. SiliconFOREST 2022. Falkau, Germany.

Niepert R.: „Erneuerbare Wärmeversorgung in Wärmepumpen-Quartieren mit Sonne und Wind“. 3. Kongress Energiewendebauen: Mit Innovationen gemeinsam die Energiewende WUPpen. Wuppertal, Germany.

Niepert R.: „H2-Wegweiser Niedersachsen“. Wasserstoffnetzwerk Schaumburg. Online Event.

Niepert R.: „Optionen für die Solarenergienutzung in Niedersachsen“. Kommunales EnergieEffizienz-Netzwerk Region Hannover. Online Event.

Niepert R.: „Wärmepumpen für Niedersachsen: Eine Initiative zur Beschleunigung der Energiewende“. Projektsteuerungskreis Wärmewende Nordwest. Online Event.

Niepert R.: „Wärmepumpenforschung als Motor der Energiewende“. 1. Niedersächsischer Wärmepumpentag. Online Event.

Niepert R., Schlemminger M., Bredemeier D., Peterssen F., Lohr C., Bensmann A., Hanke-Rauschenbach R., Brendel R.: „The Influence of Falling Costs for Electrolysers on the Location Factors for Green Hydrogen Production“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Ohrdes T.: „Erneuerbar betriebene Wärmepumpen - eine Herausforderung für die Stromnetze?“. 1. Niedersächsischer Wärmepumpentag. Online Event.

Pärish P.: „Erneuerbare Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern“. Abschlussveranstaltung des Projekts Sonnenzeit. Hameln, Germany.

Pärish P.: „Fachartikelverwertung und Verbändekommunikation“. Workshop zum Projekt integraTE. Bad Staffelstein, Germany.

Pärish P.: „Förderung und politische Rahmenbedingungen“. Workshop zum Projekt integraTE. Bad Staffelstein, Germany.

Pärish P.: „Hocheffiziente Wärmepumpenkonzepte mit Wohnungsstationen im Neubau - Projekt WoSta4.0“. Technikausschuss des vdw Niedersachsen Bremen sowie des VNW Verband Norddeutscher Wohnungsunternehmen. Leer, Germany.

Pärish P.: „Klimaschutz durch PVT-Wärmepumpensysteme: Systemvarianten im Vergleich“. Webinar für den Landesverband freier Immobilien- und Wohnungsunternehmen Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland. Online Event.

Pärish P.: „PVT – Eine alternative Wärmequelle - Initiative integraTE“. Web-Forum „Wattbewerb Spezial: Wärmeversorgung mit Solarstrom“ des Bauzentrum München, Landeshauptstadt München. Online Event.

Pärish P.: „PVT-Wärmepumpensysteme: Doppelt Sonne für vierfachen Ertrag“. Webinar für den Verband der Gebäudeenergieberater, Ingenieure und Handwerker. Online Event.

Pärish P.: „Wichtige Eigenschaften von zentralen Durchflusstrinkwassererwärmern für solare Kombisysteme“. Fokustreffen Zukunft der Trink(warm)wasserinstallation und -bereitstellung; Begleitforschung Energiewendebauen. Online Event.

Peibst R.: „The success story of poly-Si on oxide based passivating contacts“. TaiyangNews Special Focus Webinar on TOPCon Solar Modules. Online Event.

Vorträge & Poster/Oral and visual presentations

Peibst R., Schwarz C., Larionova Y., Wolter S., Rienäcker M., Wietler T., Diederich M., Brendel R.: „Interface between Poly-Si on Oxide Passivated Si Bottom and Perovskite Top Cells – Search for the Leanest and best Working Layer Stack“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Puknat R., Eggert D.: „Handhabung und Funktionen des FeBOP-Systems“. Abschlussveranstaltung des Projektes FeBOP-MFH. Hannover, Germany.

Puknat R., Yasin M., Eggert D.: „Automatisierte Effizienzbewertung der Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern“. 12. Projektleitungstreffen ENERGIEWENDEBAUEN. Petershagen, Germany.

Puknat R., Yasin M., Eggert D.: „Weboberfläche zur Betriebsoptimierung der Wärmeversorgung von Wärmezentralen in Wohngebäuden“. 3. Kongress Energiewendebauen: Mit Innovationen gemeinsam die Energiewende WUPPEN. Wuppertal, Germany.

Rienäcker M.: „Selektivität von Solarzellenkontakten“. SiliconFOREST 2022. Falkau, Germany.

Schiebler B.: „Entwicklung eines neuen Anlagenkonzepts und Bewertung im Feld“. Workshop zum Projekt HP-SYS. Bad Staffelstein, Germany.

Schiebler B.: „Innovatives Systemkonzept mit stagnationssicheren Wärmerohrkollektoren im Praxistest: Ergebnisse aus den Feldtestanlagen“. 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme. Bad Staffelstein, Germany.

Schiebler B., Jensen J., Giovannetti F.: „Kostengünstige & zuverlässige Solarthermieanlagen: Eine Lösung zur schnellen Reduktion fossiler Heizenergie, Ergebnisse aus dem F&E-Projekt HP-SYS“. 12. Projektleitungstreffen ENERGIEWENDEBAUEN. Petershagen, Germany.

Schmidt J.: „Wie gewinnt man Strom aus der Sonne?“. AnsprechBAR: Tag der offenen Tür der Leibniz Universität. Hannover, Germany.

Schmidt D., Estevam-Schmiedt J., Stryi-Hipp G., Chhugani B., Hoffmann P., Volk R., Wagner O., Brinner A.: „Umsetzung der urbanen Wärmewende im Quartier“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Schmidt J., Peibst R., Brendel R.: „Surface Passivation of Crystalline Silicon Solar Cells: Past, Present and Future“. 19th Conference on Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology, GADEST. Mondsee, Austria.

Schossig P., Binder J., Szarka N., Pregger T., Kost C., Niepelt R., Hagenmeyer V., Krüger C.: „Klimaneutrale Wärmeversorgung – Bedeutung für die Energiewende und Herausforderungen bei Technik, Wirtschaftlichkeit und Regulierungen“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Schulte-Huxel H., Witteck R., Blankemeyer S., Köntges M.: „From Three Terminal Tandem Solar Cells to Modules“. 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit. Boston, USA.

Schulte-Huxel H., Witteck R., Blankemeyer S., Köntges M.: „Three Terminal Tandem Solar Cells – a Module Perspective“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Schulte-Huxel H., Witteck R., Blankemeyer S., Köntges M., Rienäcker M., Kajari-Schröder S., Peibst R., Warren E. L., McMahon M. E., VanSant K. T., Geisz J. F., Tamboli A. C.: „Three terminal tandem solar devices – a module perspective“. tandemPV 2022 Workshop. Freiburg, Germany.

Szarka N., Lenz V., Kutne P., Mercker O., Wern B., Jordan M.: „Systemdienliche Wärmeversorgung aus Biomasse“. FVEE – Jahrestagung 2022: Forschung für die Wärmewende – klimaneutral, effizient und flexibel. Berlin, Germany.

Tous L., Govaerts J., Harrison S., Carrière C., Buchholz F., Halm A., Faes A., Nogay G., Fairbrother A., Haug F.-J., Roessler T., Fellmeth T., Reinwand D., Haase F., Hollemann C., Morlier A., Bokalic M., Brecl K., Topic M., Kester J., Wendlandt S., Gializzo M., Voltan A., Galbiati G., Ortiga M. E., Torregrosa F., Grimm M., Denafas J., Radavicius T., Lukinskas P., Savisalo T., Regrettier T., Gordon I.: „Overview of Key Results Achieved in H2020 HighLite Project Helping to Raise the EU PV Industries' Competitiveness“. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Milan, Italy.

Wetzel G., Salomon L., Krügener J., Peibst R.: „Assessment of required MPPT speed based on measured transient irradiance and dynamic electrical modelling for VIPV applications“. 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33). Nagoya, Japan.

Wietler T., Mariotti S., Jäger K., Diederich M., Härtel M., Li B., Sveinbjörnsson K., Köhnen E., Brendel R., Kajari-Schröder S., Peibst R., Albrecht S., Korte L.: „Fabrication of Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with POLO/PERC Bottom Cell“. tandemPV 2022 Workshop. Freiburg, Germany.

Winter M.: „Degradation und Regeneration in Ga-dotierten Cz-Si Solarzellen“. SiliconFOREST 2022. Falkau, Germany.

Vorträge & Poster/Oral and visual presentations

Winter M.: „Performance Degradation and Recovery of Ga-doped Cz-Si Solar Cells“. SiliconPV 2022 - 12th International Conference on Silicon Photovoltaics. Konstanz, Germany.

Witteck R., Siebert M., Kontges M., Laurikenas P., Denafas J., Wietler T.: „Improved STC and energy yield performance of bifacial modules with white-grid rear reflectors“. 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49). Philadelphia, USA.

Studien- & Bachelorarbeiten/Student research projects & bachelor theses

Albrecht K.: „Einfluss von systembedingten Temperaturschwankungen auf das Komfortempfinden beim Duschen“. (Bachelorarbeit), Fakultät für Maschinenbau, Leibniz Universität Hannover, Hannover, April 2022

Kracht N.: „Vergleich von Regenerationsquellen für die nachhaltige Dimensionierung von großen Erdwärmesonden-Anlagen“. (Bachelorarbeit), Regenerative Energietechnik, Hochschule Nordhausen, Juli 2022

Diplom- und Masterarbeiten/Diploma & master theses

Handrup M. C.: „Integration gemessener Reflexionsverteilungen in einen Monte-Carlo Raytracing-Algorithmus zur Bestimmung von Solarpotentialen“. (Masterarbeit), Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Oktober 2022

Oberhörmann J.: „Camera-based Electroluminescence Measurements of Lead-halide Perovskite Solar Cells“. (Masterarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Juli 2022

Wolter S., Barnscheidt V., Diederich M., Rienäcker M., Wietler T., Kajari-Schröder S.: „Refined Model for the Growth Mechanism of Perovskite Absorber Films from Vacuum Deposition“. tandemPV 2022 Workshop. Freiburg, Germany.

Thiemann L.: „Ertragsprognose von Silizium-Solarzellen mit unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten“. (Bachelorarbeit), Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Juni 2022

Schwarz C.: „Untersuchung der elektronischen Eigenschaften des Heteroübergangs von polykristallinem Silizium zu Löcher sammelnden Schichten in monolithischen Perowskit/Silizium-Tandemsolarzellen“. (Masterarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Mai 2022

Sitarz G.: „In situ-Röntgenbeugungsuntersuchungen beim Tempern von Caesium-Formamidinium-Blei(II)-Bromid-Iodid Nanotechnologie“. (Masterarbeit), Leibniz Universität Hannover, Hannover, Mai 2022

Doktorarbeiten/Ph.D. theses

Helmich L.: „Improved understanding of boron-oxygen-related carrier lifetime degradation and regeneration in crystalline silicon solar cells“, Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, 11.07.2022

Hollemann C.: „Application of poly-Si on oxide junctions as one or both polarities of high-efficiency IBC solar cells“, Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, 10.11.2022

Jäger P.: „Ein verbessertes chemisches Modell der POCl₃ Diffusion für hocheffiziente Silizium Solarzellen“, Chemie, Leibniz Universität Hannover, Hannover, 08.12.2022

Wetzel G.: „Einfluss transienter Beleuchtung auf die elektrische Charakteristik von Solarzellen bei fahrzeugintegrierter Photovoltaik“, Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, 04.05.2022

Lehrveranstaltungen/Lectures

Brendel R.: „Physik der Solarzelle“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (04/2022-07/2022)

Brendel R.: „Physik präsentieren“, Proseminar, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (10/2022-01/2023)

Jensen J.: „Niedertemperatur Solarthermie“, Vorlesung, Fakultät für Maschinenbau, Leibniz Universität Hannover, (05/2022-05/2022)

Jensen J.: „Niedertemperatur Solarthermie“, Vorlesung, Fakultät für Maschinenbau, Leibniz Universität Hannover, (11/2022-12/2022)

Peibst R.: „Wirkungsweise und Technologie von Solarzellen“, Vorlesung, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Leibniz Universität Hannover, (10/2022-01/2023)

Peibst R.: „Ringvorlesung „Mission 2031: Bezahlbare und saubere Energie“: „Photovoltaik – noch voller spannender Forschungsfragen und trotzdem schon jetzt eine der preiswertesten Energiekonversionsformen“, Vorlesung, Fakultätsübergreifend organisiert vom Green Office der Leibniz Universität Hannover, (15.11.22)

Schinke C.: „Physik der Solarzelle“, Übung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (04/2022-07/2022)

Schinke C.: „Labor- und Simulationspraxis Solarenergie“, Blockpraktikum, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (09/2022)

Schinke C.: „Einführung in die elektronische Messdatenerfassung und -verarbeitung mit LabView“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (10/2022-01/2023)

Schmidt J.: „Charakterisierung von Halbleitern und Solarzellen“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (04/2022-07/2022)

Schmidt J.: „Grundlagen der Halbleiterphysik“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (10/2022-01/2023)

Wietler T.: „MOS-Transistoren und Speicher“, Vorlesung, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Leibniz Universität Hannover, (04/2022-07/2022)

Wietler T.: „Bipolarbauelemente“, Vorlesung, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Leibniz Universität Hannover, (10/2022-01/2023)

Preise & Auszeichnungen/Awards

Albrecht K., Förderpreis für Abschluss- und Projektarbeiten, Westfalen Weser Energy Award 2022 für „Einfluss von systembedingten Temperaturschwankungen auf das Komfortempfinden beim Duschen“, Bad Lippspringe, 23.11.2022

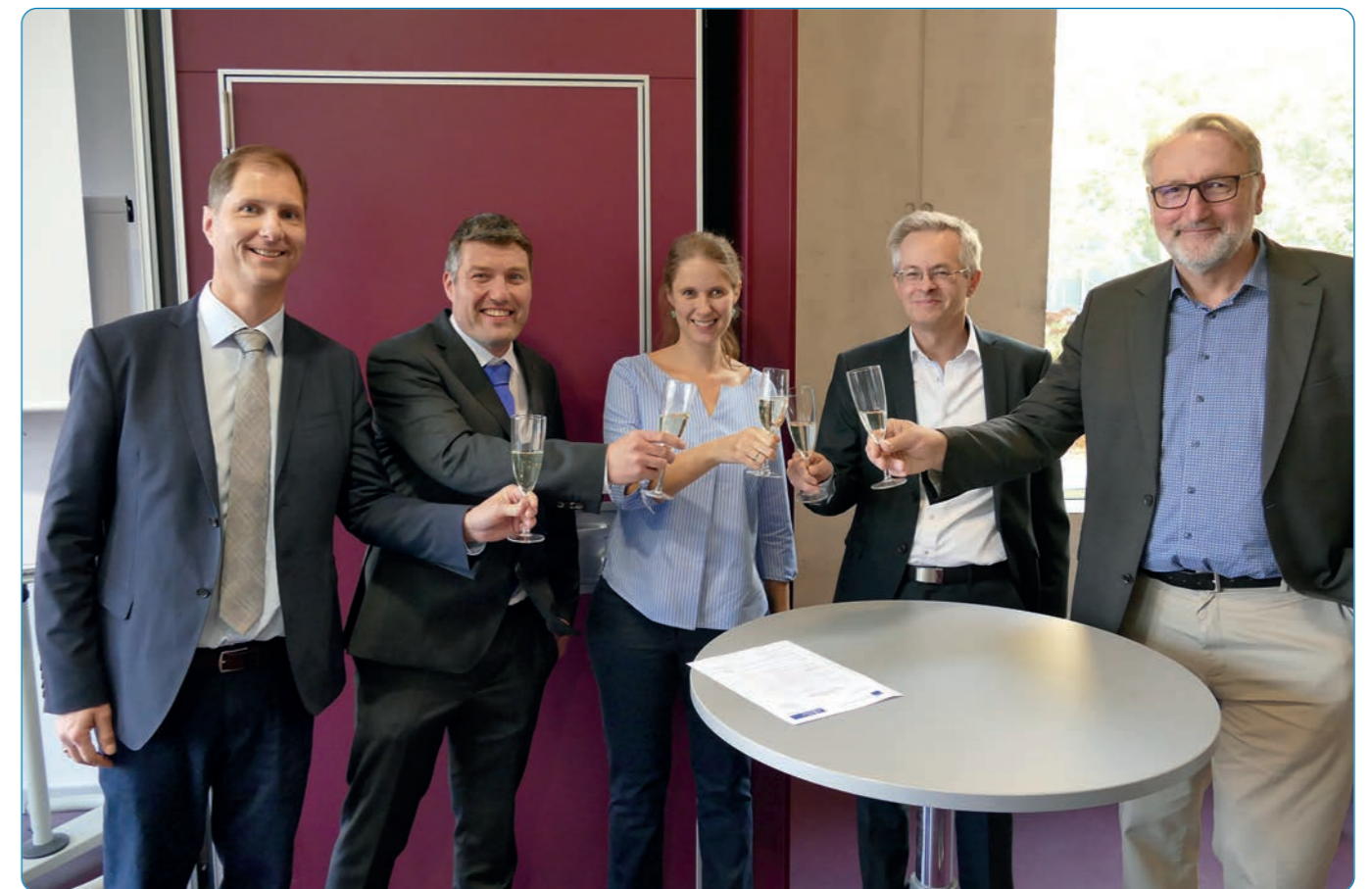
Handrup M. C., Kategorie 1: Besondere akademische Leistungen, Leibniz Talents 2022 für Masterarbeit, Welfenschloss, Leibniz Universität Hannover, 08.11.2022

Jensen J., Schiebler B., Giovannetti F., Poster Award, Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme für „Simulationsstudie stagnationssicherer Wärmerohrkollektoren – Vergleich zwischen Simulation und Praxis“, Bad Staffelstein, 03.-05.05.22

Kracht N., Nachwuchspreis, Westfalen Weser Energy Award 2022 für „Vergleich von Regenerationsquellen für die nachhaltige Dimensionierung von großen Erdwärmesonden-Anlagen“ (Bachelorarbeit), Bad Lippspringe, 23.11.2022

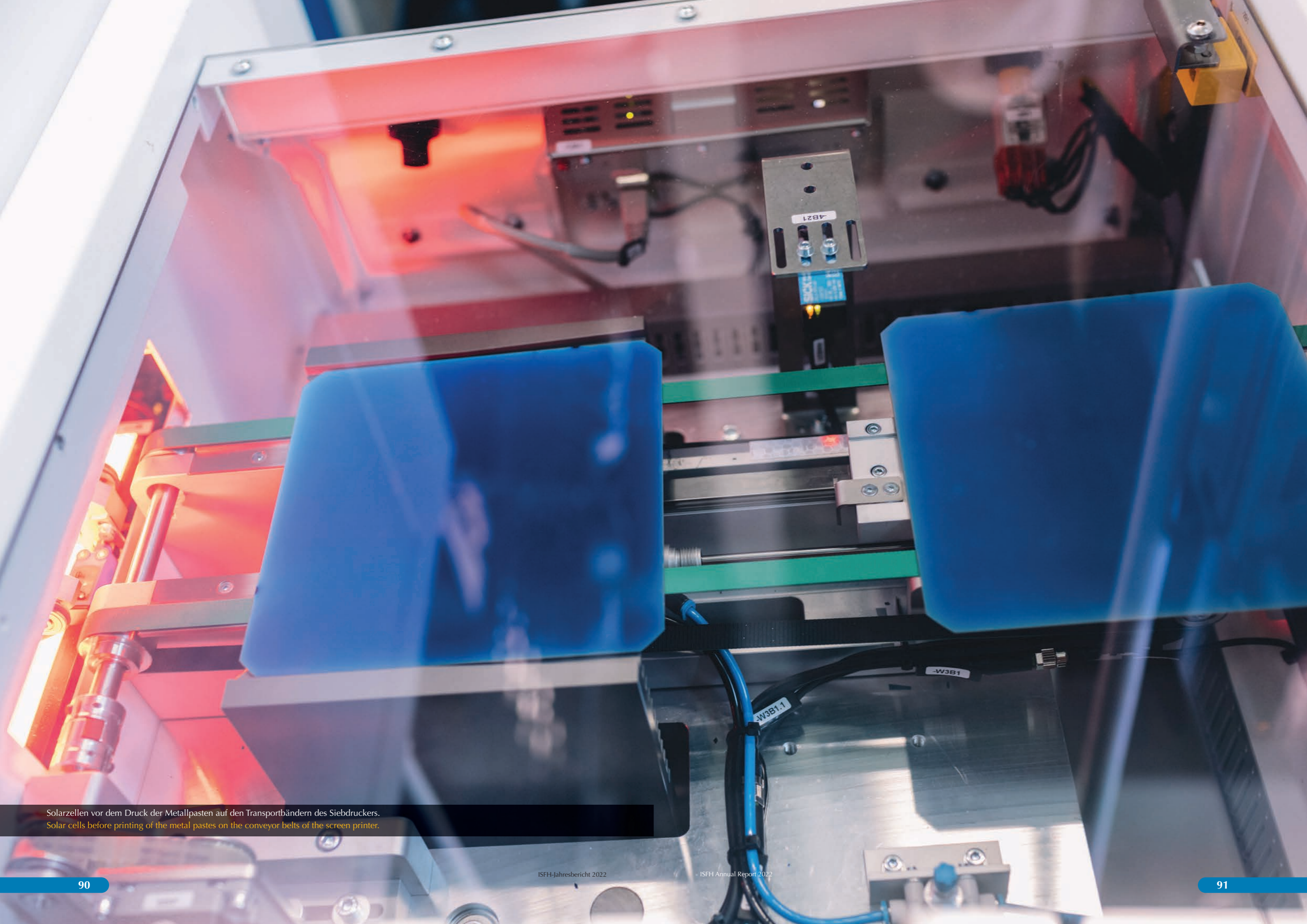
Thiemann L., Forschungspreis, Westfalen Weser Energy Award 2022 für Bachelorarbeit: Ertragsprognose von Silizium-Solarzellen mit unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten, Bad Lippspringe, 23.11.2022

Wagner J. K., Forschungspreis, Westfalen Weser Energy Award 2022 für Studentische Abschlussarbeit: „Anwendungsgrundlagen des lichtinduzierten Elektrolumineszenzverfahrens für Halbzellen-Photovoltaikmodule mit Serien-Parallelverschaltung“, Bad Lippspringe, 23.11.2022



Dr. Christina Hollemann (Mitte) nach erfolgreicher Verteidigung ihrer Dissertation zusammen mit ihren Prüfern Prof. Bernhard Wicht (links), Prof. Robby Peibst (2. v. l.), Prof. Jan Schmidt (2. v. r.) und Prof. Stefan Glunz (rechts).

Dr. Christina Hollemann (center) after successfully defending her dissertation together with her examiners Prof. Bernhard Wicht (left), Prof. Robby Peibst (2nd from left), Prof. Jan Schmidt (2nd from right) and Prof. Stefan Glunz (right).



Solarzellen vor dem Druck der Metallpasten auf den Transportbändern des Siebdruckers.
Solar cells before printing of the metal pastes on the conveyor belts of the screen printer.

Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 25. März 2022

Aus dem Labor in die Wirtschaft

Erfolg für das Institut für Solarenergieforschung: Spezialist bringt Referenzsolarzelle auf den Markt

EMMERTHAL/HAMELN. Hochpräzise Messtechnik aus dem Labor bahnt sich den Weg in die Wirtschaft: Die Ingenieurbüro Mencke und Tegtmeyer GmbH (IB-MuT) hat die vom Institut für Solarenergieforschung (ISFH) vorentwickelte großflächige Referenzsolarzelle „BigRef“ zu einem marktfähigen Produkt weiterentwickelt. In der Entwicklung und der Produktion von Solarzellen und PV-Modulen werden diese unter verschiedensten Beleuchtungsbedingungen genauestens vermessen. Dafür kommen sogenannte

Sonnensimulatoren zum Einsatz. Diese Beleuchtungseinheiten bilden laut Forschungsinstitut das Licht der Sonne möglichst ideal nach und erlauben Messungen im Labor unter realistischen Strahlungsbedingungen. Für möglichst präzise Messungen müssten die Einstrahlungsbedingungen im Sonnensimulator genau bekannt sein. Mit der „BigRef“

können die Bestrahlungsstärke und Homogenität der Lichtfelder in den Sonnensimulatoren genau bestimmt werden.

Die „BigRef“ sei derzeit die einzige am Markt erhältliche großflächige (160 x 160 mm) Referenzsolarzelle. Der einzigartige Aufbau der „BigRef“, der Techniken aus dem Solarmodulbau nutzt (zum Beispiel eine Einkapselung in EVA-Copolymer), führt laut ISFH zu einer extrem guten thermischen Ankopplung an die Grundplatte und damit zu einer exzellenten

Temperaturstabilität des Sensors. Dies sei für präzise Kalibrierungen von Konstantlichtsimmulatoren und Messplätzen zur Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit unerlässlich. Der größte Vor-

teil der „BigRef“ sei jedoch ihre Größe. Als aktives Sensorelement würden handelsübliche Solarzellen mit Kantenlängen von derzeit rund 160 Millimeter verwendet. Bisherige am Markt erhältliche eingekapselte Referenzsolarzellen hätten eine Kantenlänge von nur 20 Millimeter. Marktübliche Photovoltaikmodule würden derzeit Größen von bis zu 1,3 x 2,2 m² erreichen. Die Lichtfelder der Sonnensimulatoren für Module seien entsprechend groß. Um ihre Homogenität zu vermessen, müssten die bestrahlte Fläche abgerastert und eine Homogenitätskorrektur durchgeführt werden. Je kleiner die dafür verwendete Referenzsolarzelle, desto größer sei der Aufwand. Bei der Kalibrierung der Bestrahlungsstärke von Sonnensimulatoren für einzelne Solarzellen habe eine großflächige Referenzsolarzelle den Vorteil, dass eine Homogenitätskorrektur sogar komplett entfallen könne. Das vereinfache nicht

nur die Kalibrierprozedur, sondern führe auch zu einer noch geringeren Messunsicherheit.

Die Entwicklung der „BigRef“ sei die Fortführung der gemeinsamen Arbeiten im Projekt „Uniform Sun“, das vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) gefördert worden sei und die Entwicklung eines modularen Solarmoduls zur Bestimmung der Lichtfeldhomogenität von Sonnensimulatoren für Solarmodule zum Inhalt gehabt habe. Die „BigRef“ sei bei IB-MuT erhältlich und könne am Solarzellenkalibrierlabor des ISFH kalibriert werden. Das Ingenieurbüro Mencke und Tegtmeyer GmbH ist ein niedersächsisches mittelständiges Unternehmen mit 18 Mitarbeitern, das seit 1993 an der Verbesserung und Qualitätssteigerung von PV-Modulen und -Anlagen arbeitet. Das ISFH forscht mit derzeit 158 Mitarbeitern an innovativen Technologien für die Solarenergienutzung. red



„BigRef“ – eine großflächige Referenzsolarzelle für die Messung und Einstellung der Bestrahlungsstärke von Sonnensimulatoren. FOTO: ISFH

Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 26. April 2022

Städte im Visier

Solarenergieforscher sehen großes Potenzial in Gebäudefassaden / 1,5 Millionen Euro für neues Labor

VON PHILIPP KILLMANN

Das Institut für Solarenergieforschung entwickelt fortan neue Lösungen für die Nutzung von Solarenergie im städtischen Raum. Der niedersächsische Wissenschaftsminister Björn Thümler (CDU) hat sich am Montag vor Ort ein Bild von dem neuen im Aufbau befindlichen Forschungslabor gemacht.

OHR. Das Institut für Solarenergieforschung in Hameln/Emmerthal (ISFH) hat Ende letzten Jahres einen Förderbescheid in Höhe von 1,5 Millionen Euro für die Einrichtung eines Labors für flexible Produktionstechnologien gebäudeintegrierter Photovoltaik-Module erhalten. Die Mittel stammen aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE). In einer nun in dem am Ohrberg gelegenen Institut aufzubauenden Forschungsfabrik, genannt „FlexMod“, will das ISFH in Kooperation mit Unternehmen aus der Bau- und Immobilienwirtschaft, auch aus der Region, neue Lösungen für die Nutzung von Solarenergie im städtischen Raum entwickeln.

In den Städten bieten die Gebäudefassaden ein großes zusätzliches Potenzial zur Solarenergienutzung, das noch nicht erschlossen ist, führte

Institutsleiter Professor Rolf Brendel beim Pressetermin mit Björn Thümler, dem niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kultur, aus. Eine Beschleunigung des Solarenergieausbaus in den Städten soll möglich sein, wenn im Zuge anstehender Renovierungen die Fassaden mit solar-aktivierten Elementen ausgestattet werden. Dafür notwendig sind in den Augen der Forscher vom Ohrberg kostengünstige Photovoltaik-Module in flexibel anpassbarer Form,

„Heute ist in praktisch jeder modernen Solarzelle, die wir auf unsere Dächer schrauben, auch ein Stück ISFH enthalten.“

Dr. Bianca Lim
Abteilung Strategische Planung

auch ein zukunftsträchtiges Geschäft. Es sei zu erwarten, dass der Weltmarkt dafür bis 2024 um 15 Prozent auf dann sieben Milliarden US-Dollar anwachsen, was nur den Anfang der globalen Entwicklung markieren würde. „Die Forschungsfabrik am ISFH soll dazu beitragen, dass niedersächsische Unternehmen, die



Dr. Henning Schulte-Huxel (li.) erläutert Minister Björn Thümler das Ziel des neuen Forschungslabors „FlexMod“. FOTO: DANA

flexibel anpassbarem Erscheinungsbild und variablen Montagemöglichkeiten – die es aber noch nicht gibt. Physikalisch optimierte Photovoltaik-Module, die mit Digitalisierung und Robotik kostengünstig industriell gefertigt werden, sind die Aufgabe, der sich das ISFH-Team um Dr. Henning Schulte-Huxel in Kooperation mit Robotik-Experten der Leibniz-Universität in Hannover und Anwendern aus der Region stellen wollen.

Die Forscher sehen in der gebäudeintegrierten Photovoltaik

zum Beispiel Fassadenkomponenten herstellen, schneller mit neuen attraktiven Produkten an diesem Markt teilhaben können“, so Institutsleiter Brendel.

Der niedersächsische Minister für Wissenschaft und Kultur befand, dass sich die Solarenergie in den letzten Jahrzehnten enorm entwickelt habe. Ihr Ausbau sei ein wichtiger Baustein im Kampf gegen den Klimawandel. „Mit der Bewilligung des Projektes ‚FlexMod‘ wird die Fertigung neuer, innovativer Photovoltaik-Module gefördert und die Forschungsinfrastruktur am ISFH weiter ausgebaut“, so Thümler.

Das ISFH arbeitet zudem an einer optimierten Solarzellenfertigung. „Heute ist in praktisch jeder modernen Solarzelle, die wir auf unsere Dächer schrauben, auch ein Stück ISFH enthalten“, erläuterte Dr. Bianca Lim beim Gang durch die Labore am Beispiel der Rückseitenbeschichtung aus Aluminiumoxid und Siliziumnitrid. Den nächsten Schritt haben die Entwickler aus dem Weserbergland schon vorbe-

reitet: Mit ganz neuen Kontakten aus polykristallinem Silizium sollen noch höhere Wirkungsgrade produktionsstauglich werden. „Das ist eine Chance für eine Zell- und Modulfertigung in Niedersachsen“, meint Professor Rolf Brendel. Minister Thümler würdigte die Forschung des ISFH: „Sie alle zeigen gemeinsam, wie leistungsfähig außeruniversitäre Forschung in Niedersachsen ist. Sie bereiten den Weg für die Nutzung der Solarenergie von morgen.“



Ulrike Baumann ist eine von 159 Mitarbeitern des ISFH. FOTO: DANA

Am ISFH forschen derzeit 159 Männer und Frauen in zwei Abteilungen an innovativen Technologien für die Solarenergienutzung. Die Abteilung „Photovoltaik“ entwickelt neue industriennahe Solarzellentechnologien und hocheffiziente, industrialisierbare Photovoltaik-Module. Das Tun der Abteilung „Solare Systeme“ umfasst Forschungsarbeit zur Integration von solar erzeugter Energie von der Komponente bis zur Anwendung in Gebäuden und Quartieren.

Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 28. September 2022

Eine Solarfabrik im Weserbergland?

Preisangst und Zukunftsvisionen: Umweltminister Olaf Lies zu Gast im ISFH

VON FRANK HENKE

Von einem „Tsunami“ sprach der SPD-Landtagsabgeordnete Ulrich Watermann, von „irrationalen Preisen“ der als Wahlkampfunterstützung eingeladene Landesumwelt- und Energieminister Olaf Lies. Im Emmerthaler Solarforschungsinstitut (ISFH) ging es um Wege aus der Energiekrise – und um Zukunftsvisionen.

EMMERTHAL. Und dann lag da plötzlich eine Rechnung auf dem Tisch: Gut 400 Millionen Euro würde es wohl kosten, eine Photovoltaikfabrik zu errichten, hatte Dr. Bianca Lim vom gastgebenden ISFH den Politikern als Größenordnung geliefert. Da hielt es Olaf Lies durchaus für sinnvoll, großzügig Landesmittel zuzuschießen – „100 Millionen Euro“ schüttelte er zumindest verbal aus dem Ärmel. Denn: „Wir müssen dafür sorgen, dass wir hier produzieren.“ Solarzellen also nicht aus China, sondern irgendwann vielleicht aus dem Weserbergland. Der zweite heimische Wahlkämpfer in der Runde, der Hamelner SPD-Landtagskandidat und Fraktionsvorsitzende im Kreistag, Constantin Grosch, gab sich nicht weniger großzügig. „Vielleicht gibt der Landkreis noch mal 100 Millionen dazu“, sagte er, räumte aber ein, dass der Kreiskämmerer wohl über solche Rechnungen nicht begeistert sein würde. Auch im Wahlkampf wachsen die Bäume nicht gleich in den Himmel.

SPD-Minister Lies hatte im Solarforschungsinstitut, einem „Zentrum von internationaler Bedeutung“, zunächst die aktuelle (Krisen-)Situation umrisen. Der Strom – müsste vom Gaspreis entkoppelt, der Gaspreis in den Griff bekommen werden – auch durch die neuen Flüssiggas-Terminals in Wilhelmshaven und Stade. Die Anlagen seien später schließlich auch für grünen Wasserstoff nutzbar. Eine „Vorgestern-Diskussion“ über Kernenergie helfe jedenfalls nicht. „Wir müssen unabhängiger werden, wir müssen diversifizieren.“ Dass der Weg dorthin



Umweltminister Olaf Lies im Gespräch mit Frank Umbach von der Energiegenossenschaft Weserbergland.

FOTO: FH



Abschlussfoto im ISFH (v. li.): Stefan Pöschel, Tim Corinth, Constantin Grosch, Dr. Bianca Lim, Ulrich Watermann, Olaf Lies und Frank Umbach.

FOTO: FH

nicht immer ein leichter ist, bestätigt dem Minister der Blick aus dem Fenster des ISFH: „Wenn ich da vorne auf das Dach gucke, sehe ich gar keine Photovoltaikanlage.“ Und das sogar im „Zentrum der Innovation“.

Neben dem niedersächsischen Umweltminister hatten die beiden Kandidaten Watermann und Grosch vier Experten mit in die Runde gebeten. Dr. Bianca Lim gab einen Einblick in die Arbeit des Solarforschungsinstituts und erntete Anerkennung. Forderungen an den Minister formulierten

die übrigen Teilnehmer: Frank Umbach von der Energiegenossenschaft Weserbergland machte sich für schnellere Genehmigungsverfahren für Windkraft und Photovoltaik stark. „Wir sind keine Bittsteller, wir bringen das Land voran“, sagte er. Die Behörden sollten unterstützen, nicht verhindern.

Er stellte aktuelle Regelungen in Frage: Der Wald müsse geschützt werden, dürfe aber nicht in jedem Fall tabu für Windkraftanlagen sein. Auch die Tiefflughöhe für die Bundeswehrhubschrauber aus Bü-

ckeberg sei oft ein Problem. „Ich weiß nicht, ob es da nicht Kompromisse gibt“, sagte Umbach. Tim Corinth (Stadtwerke Hameln Weserbergland) pflichtete ihm bei.

Einen anderen Bestandteil im heimischen Energiemix präsentierte Enertec-Geschäftsführer Stefan Pöschel: Die Fernwärme der Müllverbrennungsanlage in Hameln-Afferde. Die Sorge der Branche: Durch eine Änderung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes soll ab 2023 auch für die Müllverbrennung die CO₂-Bepreisung gelten. Die

Kosten für die Müllverbrennung dürften um bis zu 30 Prozent steigen, so Pöschel.

Eine lange Liste von Wünschen an die Politik präsentierte Stadtwerke-Prokurist Tim Corinth: Er forderte eine Abschaffung der Gasumlage, allerdings mit zeitlichem Vorlauf. Stromsteuern und Mehrwertsteuer auf Energie sollten sinken, Sozialleistungen steigen, energieintensiven Betrieben geholfen werden. Die Preise sollten gebremst werden, auch den EU-Vorschlägen zu einer Übergewinnsteuer kann Corinth etwas abgewinnen.

Abgeschlossen wurde die Veranstaltung durch Fragen aus dem Publikum. Photovoltaik auf Kiesteichen und anderen Wasserflächen – statt auf Ackerflächen – wurde unter anderem angeregt. Als „guten Gedanken“ bewertete Minister Lies den Vorschlag eines Berufskraftfahrers: Statt über Photovoltaik-Dächer über Autobahnen nachzudenken, sollten doch lieber erst mal die zahlreichen Raststätten mit Solardächern versehen werden. „Dann muss ich auch nicht bei 40 Grad in der Sonne schlafen.“

Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 25. Oktober 2022

Photovoltaik: Wissenschaftler fordern Produktion vor Ort

Institut für Solarenergieforschung hält Ausbau der Fertigung in Deutschland für wichtig / Sorge vor neuen Abhängigkeiten

VON CHRISTIAN BRANAHL

EMMERTHAL. Das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) in Emmerthal appelliert, dass die Energieversorgung möglichst unabhängig von autoritären Staaten werden müsse, die „mit uns in einem Wettbewerb der politischen Systeme stehen“. Das schreibt Prof. Dr. Rolf Brendel als Leiter und Geschäftsführer des Institutes im jüngst veröffentlichten Jahresbericht 2021. „Um das leisten zu können, generiert das ISFH zusammen mit seinen Entwicklungspartnern neues Wissen und neue Produkte für die Energiesystemtransformation.“

Brendel verweist in seinem Vorwort auf die Klimakrise ebenso wie auf die Folgen des „mörderischen und ungerechten Krieges von Russland gegen die Ukraine, die über das unfassbar große Leid der unmittelbar Betroffenen hinaus auch unsere Energieversorgung unsicher machen“. Die Notwendigkeit des Ausbaus der fossilen Energieversorgung berge an vielen Stellen kurzfristige Risiken und Unannehmlichkeiten für manche, um langfristig sehr große Risiken für alle abzuwenden, meint er mit Blick auf neue Produkte.

„Wir wollen diese Produkte aber auch bei uns in Europa hergestellt wissen, denn sonst drohen neue gravierende Abhängigkeiten bei der Umset-



Modulfertigung bei einem früheren Solarzellenhersteller in Sachsen: Inzwischen werden in Deutschland nach Angaben des Institutes für Solarenergieforschung mehr als 90 Prozent der PV-Module importiert.

FOTO: DPA

zung der Energiewende“, erklärt der wissenschaftliche Leiter. „In Bezug auf die Solarenergie bedeutet das, dass wir in Deutschland dringend eine Fertigung von Photovoltaikzellen und -modulen sowie die dazugehörige Wertschöpfungskette aufbauen müssen.“ Schon der heutige, viel zu langsame Ausbau der Photovoltaik in Deutschland erfolge zu mehr als 90 Prozent mit importierten PV-Modulen. Brendel: „Die Zeit ist reif dafür, damit wir in Zukunft nicht wieder feststellen müssen, dass

wir langfristige Perspektiven kurzfristigen Vorteilen geopfert haben.“

In dem Jahresbericht erklären die Wissenschaftler des Institutes, dass ihre Forschung weit über die Photovoltaik hinausgeht. Mit 159 Beschäftigten zum Ende des Jahres 2021 blieb die Zahl gegenüber dem Vorjahr nahezu konstant. Der Haushalt fiel in Einnahmen im Vergleich zu 2020 etwas geringer aus, wobei diese Schwankungen beim Institut wegen der bei bestimmten Förderprojekten teils hohen

Summen nicht ungewöhnlich sind.

Neben der institutionellen Förderung aus dem Haushalt des niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur – das Land ist alleiniger Gesellschafter – in Höhe von 12,8 Millionen Euro erzielt das Institut Drittmitteleinnahmen aus öffentlicher Forschungsförderung des Bundes, des Landes und der Europäischen Union. Dieser Posten umfasst im Berichtsjahr 8,0 Millionen Euro, davon ist der größte Teil Verbundforschung mit der In-

dustrie. Hinzu kommen laut Jahresbericht direkte industrielle Drittmitteleinnahmen aus Dienstleistungen und Auftragsforschung in Höhe von 1,1 Millionen Euro.

Jüngste Meldungen des Institutes aus den vergangenen Wochen zeigen, wie praxisnah die heimischen Wissenschaftler ihre Arbeit fortsetzen. Aktuelle Forschungsergebnisse stellten sie beispielsweise bei der „EuroSun22“ als internationale Tagung für Solarenergie im Gebäude- und Industriebereich vor. Bei der „IAA Nutzfahrzeuge“-Messe in Hannover präsentierte das ISFH gemeinsam mit dem Spezialsolarmodulbauer „a2-solar advanced and automotive“ einen Prototyp eines leichten Nutzfahrzeuges mit integrierter Photovoltaik, der im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Kooperationsprojektes entwickelt wurde. Im April besuchte der niedersächsische Wissenschaftsminister Björn Thümler das Institut, um sich über die Umsetzung einer Forschungsinfrastruktur zu informieren. Wie berichtet, hatte das ISFH Ende letzten Jahres einen Förderbescheid in Höhe von 1,5 Millionen Euro aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung erhalten, um ein Labor für flexible Produktionstechnologien gebäudeintegrierter Photovoltaikmodule einzurichten.

ZEIT GERMANY (2022/2023), 12. Juli 2022



In late February 2022, the United Nations' Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) voiced a dire warning. Climate change is now irreversible, it said, and there's little time left to avert its worst consequences. Amid headlines announcing Russia's invasion of Ukraine, however, the news was largely lost, in Germany as everywhere else.

Yet the two crises are far from distinct. War in Ukraine has now highlighted Germany's precarious dependence on Russian fossil fuels and confirmed that transitioning to renewables is a matter of security as much as climate.

"The war has made politicians much more sensitive to our [energy] dependency," says Andreas Bett, director of the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE in Freiburg, the largest solar research institute in Europe. "Three years ago, no one wanted to hear it."

It's high time, say solar researchers throughout Germany. Solar power as an industry has experienced booms and busts over the past two decades. But scientists at large and small research institutes alike in the country have continued to forge ahead with trailblazing research and development in the field.

Indeed, much cutting-edge solar research originated in Germany. In 2007, the German Aerospace Center even developed the world's largest artificial sun. Located at a site not far from Cologne, it continues to serve in experiments producing CO₂-neutral fuels using solar energy. Now, as Europeans wake up to the manifold benefits of solar energy, industry has a chance to put years of research into practice. Bett is not only concerned with Germany's dependence on fossil fuel imports. He believes that Germany also relies too heavily on imports for the materials necessary to install solar energy. "We are pushing for technological sovereignty here in Europe and Germany," he says, explaining that Germany shouldn't be fully dependent on external sourcing.

Moves to re-establish a domestic solar industry are topping the agenda as Germany's solar-power sector undergoes a second wave of expansion. Historically, solar power expanded at breakneck speed in the wake of Germany's Renewable Energy Act in 2000, when a feed-in tariff was introduced to accelerate investment in renewable energy technologies. German solar cell manufacturers proliferated as the market for photovoltaic (PV) systems boomed.

But the country fell behind after 2012 when competitors in China, aided by more favorable industrial policies such as credit guarantees, began offering solar panels for a lot less.

Investors swapped German for foreign supplies, prices plummeted, and German companies went bankrupt. Between 2013 and 2015, solar expansion in Germany fell by 80 percent despite doubling globally during the same period, according to Clean Energy Wire, a news platform focused on the global energy transition.

Today, however, solar power has become the cheapest way to generate power in Germany. According to Fraunhofer ISE, solar panels can generate one kilowatt-hour of energy

at 3.7 euros cents, compared to 3.99 euros cents generated through onshore wind power, or 11.03 euros cents or more through gas power plants. That is largely due to technological innovations, which have continued to thrive in Germany despite the market turbulence.

Bianca Lim witnessed the waxing, then waning interest in solar power firsthand. She is a physicist on the strategic planning team at the Institute for Solar Energy Research in Hameln (ISFH), which punches above its weight in terms of size. Compared to Fraunhofer ISE's roughly 1,400 employees, ISFH is home to just 155 employees; around 90 of them work in the PV department.

Lim, who grew up in the Wilmsdorf district of Berlin, joined the institute as a doctoral student in 2007. She recalls noticing the shift from boom to bust most starkly at the annual European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.

"People were convinced that they were doing good work ... but the global competition was so fierce"

"The exhibition was big when I started. There were a lot of European companies, and it grew even larger in the following years," she recalls. "Then around 2012, everything got smaller. There were fewer exhibitors. A lot of the companies used to show parties during the exhibition week, and that completely disappeared."

The collapse of Germany's solar industry meant the loss of industrial partners for its research institutes. "It was really tough when solar cell production ceased," says Lim, because industry is "at the heart of solar research in Germany. If you don't have among industrial partners to invest in your projects and collaborate with, it's much more difficult."

She recalls the sense of frustration that gripped researchers: "People were convinced that they were doing good work, that they had good ideas, that the industry was making good products. But the global competition was so fierce."

Unlike production, solar research managed to retain its edge in Germany. Government funding stepped in to fill the gap when industrial investors pulled out. "The German government did a good job keeping PV research going even in the face of a disappearing solar industry," says Eicke Weber, co-chair of the European Solar Manufacturing Council (ESMC) and director of Fraunhofer ISE from 2006 through 2016. "Most of the technological breakthroughs of the last years were achieved in Germany as a result."

As proof, Weber ticks off recent solar cell innovations that have emerged from German research institutes. Not surprisingly, these new technologies come with some complicated acronyms. There's the TOPCon technology developed by



Solar panels in Berlin-Mariendorf. Where sheep may safely graze.

Fraunhofer ISE in 2013, a game-changer in conversion efficiency. Then there are bifacial PERC-cells, developed by Fraunhofer ISE and ISFH for SolarWorld in 2014. And lastly, IBC cells developed by the International Solar Energy Research Center Konstanz are a cost-effective technology now available on the PV market, according to the institute. (PERC stands for Passivated Emitter Rear Contact, while IBC stands for Interdigitated Back Contact.)

Another outcome of that perseverance? Today, the German solar research landscape attracts new talent from home as well as abroad. Large research institutes like ISFH and Fraunhofer ISE are one feature of that landscape; universities like the University of Konstanz, with its highly regarded photovoltaics department, also have a strong global reputation in their fields.

Kasharina Genowoski, from Lindlar in North Rhine-Westphalia, is one beneficiary of that landscape. One of 93 doctoral students currently based at Fraunhofer ISE, she's conducting research on dispensing – a process that applies metal contacts to solar cells, which conduct the current. She came to the institute for a master's degree, intending to stay six months; she's been there for five years. "The field is vast," Genowoski says. "I would never say I understand solar

cells from A to Z. It's just that I'm the expert on solar cell metallization, and even that is a big topic. You can find at least one expert for each subtopic."

Elsewhere, at the Potsdam Institute for Climate Research (PIK), doctoral student Kelsey Barron-Henry is using AI methodologies to understand individual decision-making around issues related to climate change. These include a household's decision to put up a solar panel. She found that, compared to other socio-economic and demographic variables, the most important factor influencing this decision was the density of nearby solar panels.

Barron-Henry, who hails from Connecticut and is two years into her degree, enjoys the diversity of research projects at PIK as well as Germany's "forward-looking" approach to climate issues. "It's easy to see internationally that Germany is moving forward on the climate mitigation front," Barron-Henry says. "It's definitely a good environment for a Ph.D. related to climate change."

In January, Germany's new coalition government announced its ambition to quadruple its solar capacity to 200 gigawatts by the year 2030. Among other things, this will make rooftop solar mandatory for all new commercial buildings in the country.

For Bett at Fraunhofer ISE, the focus of this second wave of expansion should be on re-establishing PV production in Germany and Europe – a measure that will lower transport costs and shipping emissions, create more industrial partners for solar research, and greatly improve energy security. "We have to build up capacity very quickly," Bett says.

Weber is pushing for this at ESMC as well. "When people say we are having a second solar boom, they think about accelerating the installation of solar systems, which is exactly right," he says. "But we should also be talking about manufacturing. Do we want to base the transformation of our energy system on imported modules? Shouldn't we go for domestic production?"

His concerns go well beyond overreliance on Russian energy exports. In addition to Germany's dependence on Russia – or even the US – for fossil fuels, Weber is also worried about solar manufacturing imports from China.

"Especially troubling are imports from authoritarian countries that are not part of our democratic value chain," he says. "Things can happen in the future that we can't predict, and if it concerns our energy system, this dependency is painful to see. We need to build up our own manufacturing base. We have the research."

Fast Facts about Solar Research

- CHEAPEST MODE OF POWER**
Solar panels (3.7 euros cents per kilowatt hour)
- LARGEST SOLAR RESEARCH INSTITUTE IN EUROPE**
Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg
- WORLD'S LARGEST ARTIFICIAL SUN**
Housed at the German Aerospace Center (DLR), near Cologne
- 200 GIGAWATTS OF PHOTOVOLTAIC CAPACITY**
Germany's goal for 2030, announced in January 2022
- GERMANY'S RENEWABLE ENERGY ACT (EEG)**
Introduced in 2000 to accelerate investment in renewable energy technology



Ein Silizium-Wafer auf dem Weg in den Feuerofen.
A silicon wafer on its way into the fast-firing furnace.

Barnscheidt, Verena, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-643, barnscheidt@isfh.de

Brendel, Rolf, Prof. Dr.-Ing., Diplom-Physiker, Institutsleiter,
☎ 05151-999-100, r.brendel@isfh.de

Brockmann, Lukas, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-306, l.brockmann@isfh.de

Diederich, Marvin, Dr., Master of Science, Abteilung Photovoltaik

Dullweber, Thorsten, Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Photo-
voltaik, ☎ 05151-999-642, dullweber@isfh.de

Gaßdorf, Wolfgang, Diplom-Ökonom, Stv. Institutsleiter,
☎ 05151-999-405, w.gassdorf@isfh.de

Giovannetti, Federico, Dr., Diplom-Ingenieur Bauwesen, Ab-
teilung Solare Systeme, ☎ 05151-999-501, giovannetti@isfh.de

Grimm, Benjamin, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-632

Haase, Felix, Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-313, f.haase@isfh.de

Jensen, Julian, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,
☎ 05151-999-523, jensen@isfh.de

Kajari-Schröder, Sarah, Dr., Diplom-Physikerin, Abteilung
Photovoltaik, 05151-999-414, s.kajari-schroeder@isfh.de

Köntges, Marc, Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-432, koentges@isfh.de

Krenzel, Andre, M.Sc. Regenerative Energien, HTW Berlin,
aktuell: Hamburg

Kunze, Iris, Abteilung Photovoltaik, ☎ 05151-999-415,
kunze@isfh.de

Larionova, Yevgeniya, Dr., Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-423, larionova@isfh.de

Mertens, Verena, Dr., Diplom-Chemikerin, Abteilung Photo-
voltaik, ☎ 05151-999-315, v.mertens@isfh.de

Min, Byungsul, Dr.-Ing., Diplom-Ingenieur, Abteilung Photo-
voltaik, ☎ 05151-999-644, b.min@isfh.de

Napp, Volker, Oberstudienrat, Lehrkräftefortbildung,
☎ 05151-999-100, nils@isfh.de

Niepert, Raphael, Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Solare
Systeme, ☎ 05151-999-505, niepert@isfh.de

Pärisch, Peter, Diplom-Ingenieur, Abteilung Solare Systeme,
☎ 05151-999-648, p.paerisch@isfh.de

Peibst, Robby, Prof. Dr., Diplom-Ingenieur, Abteilung Photo-
voltaik, ☎ 05151-999-313, r.peibst@isfh.de

Reineke-Koch, Rolf, Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Solare
Systeme, ☎ 05151-999-431, r.reineke-koch@isfh.de

Schanz, Wolf-Rüdeger, Oberstudienrat, Lehrkräftefortbildung,
☎ 05151-999-100, nils@isfh.de

Schiebler, Bert, Diplom-Ingenieur (FH), Abteilung Solare Sys-
teme, ☎ 05151-999-524, schiebler@isfh.de

Schmidt, Jan, Prof. Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Photovol-
taik, ☎ 05151-999-425, j.schmidt@isfh.de

Steckenreiter, Verena, Diplom-Ingenieurin (FH), Abteilung
Photovoltaik, ☎ 05151-999-325, v.steckenreiter@isfh.de

Tittel, Frank, Oberstudienrat, Lehrkräftefortbildung,
☎ 05151-999-100, nils@isfh.de

Weiland, Finn, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,
☎ 05151-999-524, weiland@isfh.de

Wersebe-Wetzig, Vivienne, Studienrätin, Lehrkräftefortbildung,
☎ 05151-999-100, nils@isfh.de

Wietler, Tobias, Prof. Dr.-Ing., Diplom-Physiker, Abteilung
Photovoltaik, ☎ 05151-999-644, t.wietler@isfh.de

Wolter, Sascha, Dr., Master of Science

Xu, Chencheng, Dr., Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,
☎ 05151-999-632, c.xu@isfh.de

Impressum

Gestaltung/Design

Dipl. Grafik-Designerin Catharina Zeropa-Stangenberg, caze • werbung & kommunikation, Hameln, www.caze.de

Redaktionsadresse/Editorial office address

Institut für Solarenergieforschung Hameln
Am Ohrberg 1
31860 Emmerthal

Telefon (0 49) 05151-999-100

Telefax (0 49) 05151-999-400

eMail info@isfh.de

Internet https://www.isfh.de

Publikationskennung/International Standard Serial Number

ISSN 1613-5970

Redaktionsschluss/Editorial deadline

30.4.2023

Druck/Print

Wanderer Werbedruck GmbH, Ronnenberg, www.wanderer-druck.de

Papier/Paper

Der Jahresbericht wurde auf chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Umschlag: Chlorfrei gebleicht, glänzend gestrichen.
The annual report was printed on chlorine-free bleached paper. Cover: chlorine-free bleached, glossy coated.

Bildquellen/Origin of photo material

Bilder A, B, C, D, E, 1–14, 16, 17, 21, 22, 47, 61–63, 69 Salzman PhotoDesign, Hameln.

Bilder 25, 28, 29: Überarbeitung durch caze • werbung & kommunikation, Hameln.

Bild: 36 © Dr. Rolf Reineke-Koch

Alle übrigen Bilder: ISFH.

Images A, B, C, D, E, 1–14, 16, 17, 21, 22, 47, 61–63, 69: Salzman PhotoDesign, Hameln.

Images 25, 28, 29: revision by caze • werbung & kommunikation, Hameln.

Image: 36 © Dr. Rolf Reineke Koch.

All other images: ISFH.

Urheberrecht/Copyright

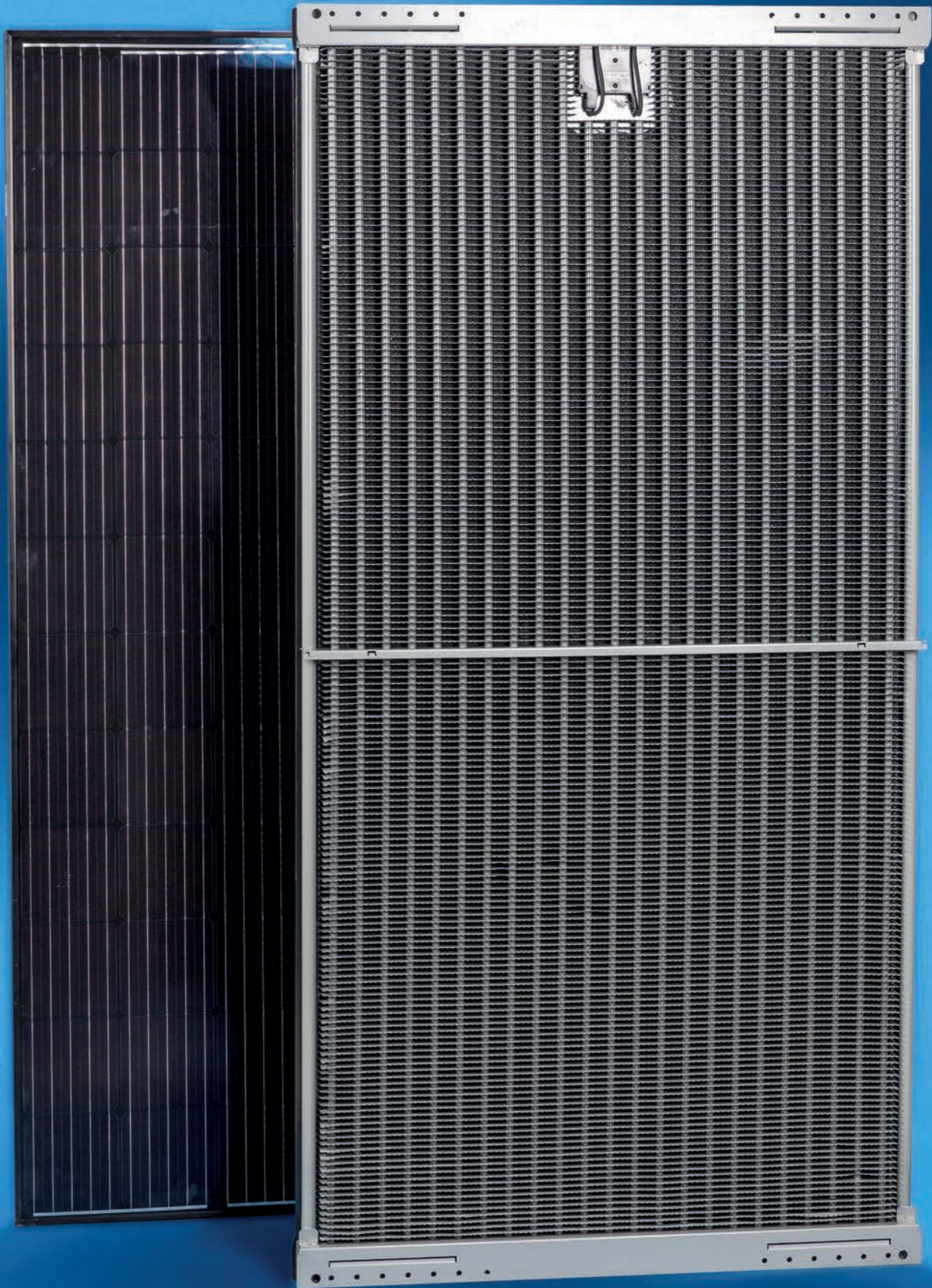
Vervielfältigung oder Abdruck von Teilen dieses Berichtes grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Einwilligung der Redaktion.

Duplication or reproduction even of parts of this report only with previous written consent of the editorial office.

Danksagung/Acknowledgment

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die zum aktuellen Jahresbericht beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Ein besonderer Dank geht an Nicholas Moon aus Hameln für seine professionelle und freundliche Unterstützung.

Thank to all colleagues, who have contributed to this annual report. Our particular gratitude goes to Nicholas Moon from Hameln for his professional and kind support.



PVT-Kollektor optimiert als Umgebungsluft-Wärmetauscher.
PVT collector optimized as ambient air heat exchanger.



**Institut für
Solarenergieforschung
Hameln**

2022 / 2023

Am Ohrberg 1
D-31860 Emmerthal

Telefon +049 (0) 5151-999-100

Telefax +049 (0) 5151-999-400

eMail info@isfh.de

Internet www.isfh.de



ISSN 1613-5970