

# JAHRESBERICHT

ANNUAL REPORT

# 2021



An-Institut der

Institut für Solarenergieforschung Hameln

1 1  
1 0 2  
1 0 0 4

Leibniz  
Universität  
Hannover

## 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 expand 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.

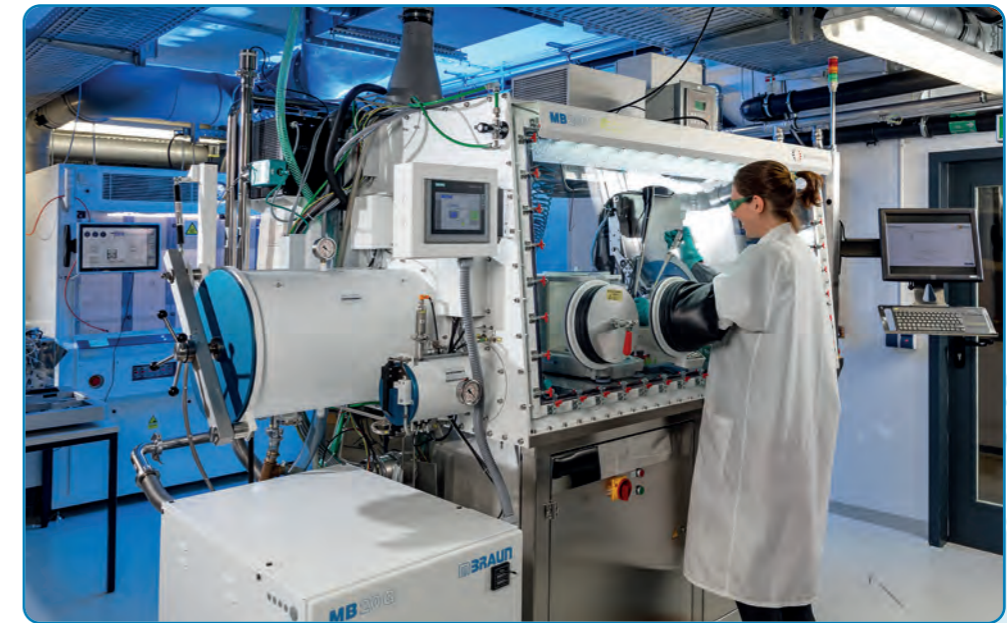
**Training.** We give students, technicians, engineers, and academics the opportunity to take part in basic and advanced training in excellent research infrastructure. We thereby provide a solid scientific foundation for the transition to a sustainable energy supply.

**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.



# JAHRESBERICHT

## ANNUAL REPORT



Handschuhbox für die nasschemische Prozessierung von Perowskit-Solarzellen.  
Glovebox for wet chemical processing of perovskite solar cells.

## Innovation with impact

Hinweise zu den Umschlagbildern/About the cover images:

A: ISFH Fassadenteststand. Links: solarthermisch-aktive Isolierglas-Fassade (aktivierte Fassadenfläche 22 m<sup>2</sup>). Rechts: solarthermisch-aktive Metall-Fassade (aktivierte Fassadenfläche 26 m<sup>2</sup>).  
ISFH façade test wall. Left: Solar-thermally active insulation glass façade (activated façade area 22 m<sup>2</sup>). Right: Solar-thermally active metal façade (active façade area 26 m<sup>2</sup>).

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: Wissenschaftsjournalist und Fernsehmoderator Jean Pütz besuchte das ISFH im November 2021.  
Science journalist and TV presenter Jean Pütz visited the ISFH in November 2021.



A B C D E





Abbildung/Figure 2: Vortragende in der Sitzung III - ZUVERLÄSSIGE UND NACHHALTIGE SOLAR-PV ÜBERALL auf der ETIP PV-Jahreskonferenz 2021. Obere Reihe von links nach rechts: Dr. Bianca Lim, Dr. David Moser, Dr. Gernot Oreski. Untere Reihe: Andreas Wade (links) und Paolo V. Chiantore (rechts). Speakers of Session III – RELIABLE AND SUSTAINABLE SOLAR PV EVERYWHERE of the ETIP PV annual conference 2021. Top row from left to right: Dr. Bianca Lim, Dr. David Moser, Dr. Gernot Oreski. Bottom row: Andreas Wade (left) and Paolo V. Chiantore (right).

Abbildung/Figure 3: Alexander Knebel, damaliger Pressereferent der Zuse-Gemeinschaft, begrüßt die Teilnehmenden der Zuse-Pressefahrt am ISFH. Alexander Knebel, then press officer of the Zuse Association, welcomes the participants of the Zuse press trip at ISFH.

Abbildung/Figure 4: Prof. Dr. Rolf Brendel stellt das ISFH vor. Prof. Dr. Rolf Brendel introduces the ISFH.

Abbildung/Figure 5: Dr. Verena Mertens (Dritte von links) informiert im ISFH-SolarTeC über aktuelle Arbeiten der Photovoltaik-Abteilung. Einklinker: Prof. Dr. Rolf Brendel (rechts) begrüßt den Wissenschaftsjournalisten und Fernsehmoderator Jean Pütz (links) während der Zuse-Pressefahrt. Dr. Verena Mertens (third from left) informs about current work of the photovoltaics department at ISFH-SolarTeC. Single clinker: Prof. Dr. Rolf Brendel (right) welcomes science journalist and TV presenter Jean Pütz (left) during the Zuse press trip.

Abbildung/Figure 6: Olaf Lies, Niedersächsischer Minister für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, (links) im Gespräch mit Prof. Dr. Rolf Brendel (Mitte) während des Niedersächsischen Forums Solarenergie. Moderiert wurde die Runde von Barbara Mussack (rechts) von der Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen (KEAN).

Olaf Lies, Lower Saxony Minister for the Environment, Energy, Building and Climate Protection, (left) in conversation with Prof. Dr. Rolf Brendel (center) during the Lower Saxony Solar Energy Forum. The round was moderated by Barbara Mussack (right) from the Climate Protection and Energy Agency of Lower Saxony (KEAN).

Abbildung/Figure 7: Dr. Sarah Kajari-Schröder (links) und Dr. Raphael Niepelt (rechts) präsentieren den mit Phovoltaik-Modulen ausgestatteten Streetscooter. Dr. Sarah Kajari-Schröder (left) and Dr. Raphael Niepelt (right) present the Streetscooter equipped with photovoltaic modules.

Streiflichter ♦ <a href="#">At a glance</a> .....	2
Inhalt ♦ <a href="#">Contents</a> .....	4
Vorwort ♦ <a href="#">Preface</a> .....	6
<b>1 Institut für Solarenergieforschung</b> .....	<b>8</b>
Kurzportrait ♦ <a href="#">Brief portrait</a> .....	8
Organisation ♦ <a href="#">Organization</a> .....	11
Abteilung Photovoltaik ♦ <a href="#">Photovoltaics department</a> .....	11
Abteilung Solare Systeme ♦ <a href="#">Solar systems department</a> .....	14
Calibration & Test Center (CalTeC) .....	17
Zentrale Dienste ♦ <a href="#">Central services</a> .....	19
Aufsichtsrat ♦ <a href="#">Supervisory Board</a> .....	21
Wissenschaftlicher Beirat ♦ <a href="#">Scientific Advisory Board</a> .....	21
Das Institut in Zahlen ♦ <a href="#">Statistics of the Institute</a> .....	24
Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V. (Förderverein) .....	27
<a href="#">Society for the Promotion of the Institute for Solar Energy Research (Friends of the ISFH)</a>	
<b>2 Forschungsabteilungen ♦ <a href="#">Research departments</a></b> .....	<b>30</b>
Abteilung Photovoltaik ♦ <a href="#">Photovoltaics department</a> .....	30
Forschungsthemen ♦ <a href="#">Research topics</a> .....	30
Dienstleistungen ♦ <a href="#">Services</a> .....	30
Apparative Ausstattung ♦ <a href="#">Equipment &amp; facilities</a> .....	30
Glanzlichter ♦ <a href="#">Highlights</a> .....	31
Abteilung Solare Systeme ♦ <a href="#">Solar systems department</a> .....	32
Forschungsthemen ♦ <a href="#">Research topics</a> .....	32
Dienstleistungen ♦ <a href="#">Services</a> .....	32
Apparative Ausstattung ♦ <a href="#">Equipment &amp; facilities</a> .....	33
Glanzlichter ♦ <a href="#">Highlights</a> .....	33
<b>3 Wissenschaftliche Ergebnisse ♦ <a href="#">Scientific results</a></b> .....	<b>34</b>
Abteilung Photovoltaik ♦ <a href="#">Photovoltaics department</a> .....	34
Lichtinduzierte Degradation und Regeneration der Ladungsträgerlebensdauer in Gallium-dotiertem Czochralski-Silizium .....	34
<a href="#">Light-induced degradation and regeneration of the charge-carrier lifetime in gallium-doped Czochralski-grown silicon</a>	
Lokale PECVD-Abscheidung von SiON/n-a-Si mittels Schattenmasken für die Prozessierung von POLO-IBC-Solarzellen .....	38
<a href="#">Local PECVD SiON/n-a-Si deposition using shadow masks for POLO IBC solar cell processing</a>	
Leistungsbestimmung an fehlerhaften PV-Modulen mittels Elektrolumineszenz .....	41
<a href="#">Power calculation of PV modules with cracked solar cells based on electroluminescence imaging</a>	
Photovoltaikmodule mit Naturmaterialien für die Bauwerkintegration .....	44
<a href="#">Photovoltaic modules with natural materials for seamless building integration</a>	
Potenzialberechnung für Dächer und Fassaden mittels Raytracing .....	47
<a href="#">Calculation of potential for roofs and façades using ray tracing</a>	

Abteilung Solare Systeme ♦ <a href="#">Solar systems department</a> .....	49
Stagnationssichere Solarabsorber mit dem $\lambda/4$ -Prinzip .....	49
<a href="#">Stagnation-proof absorbers (coatings) with the <math>\lambda/4</math> principle</a>	
Solarthermische Aktivierung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden als Quelle für wärmepumpenbasierte Versorgungssysteme .....	54
<a href="#">Solar-thermal activation of rear-ventilated façades as a source for heat-pump-based heat supply systems</a>	
Leistungsfähigkeit von großen Durchfluss-Trinkwassererwärmern für solare Kombi-Systeme .....	59
<a href="#">Performance of large instantaneous domestic water heaters for solar combi-systems</a>	
Energieversorgung von Gebäuden mit unterschiedlichen Dämmstandards durch regionale Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen .....	62
<a href="#">Energy supply of buildings with different insulation standards through regional wind energy and photovoltaic systems</a>	
Wasserstoffversorgung für ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland .....	66
<a href="#">Hydrogen supply for a climate neutral energy system in Germany</a>	
<b>4 Weiterbildung ♦ <a href="#">Education</a></b> .....	<b>70</b>
Akademische Ausbildung ♦ <a href="#">Academic education</a> .....	70
NILS – Die Lernwerkstatt im Wandel ♦ <a href="#">NILS – The Learning Workshop in transition</a> .....	74
<b>5 Dokumentation ♦ <a href="#">Documentation</a></b> .....	<b>80</b>
Partner aus Universitäten & Forschungseinrichtungen ♦ <a href="#">Partners from universities &amp; research facilities</a> .....	80
Inland ♦ <a href="#">National</a> .....	80
Ausland ♦ <a href="#">International</a> .....	81
Partner aus Industrie, Planung & Entwicklung ♦ <a href="#">Partners from industry, planning &amp; development</a> .....	82
Inland ♦ <a href="#">National</a> .....	82
Ausland ♦ <a href="#">International</a> .....	84
Institutsmitgliedschaften ♦ <a href="#">Institute memberships</a> .....	84
Institutskolloquien ♦ <a href="#">Institute colloquia</a> .....	84
Mitarbeit in Fachgremien ♦ <a href="#">Membership in professional bodies</a> .....	85
Ausstellungen & Fachtagungen ♦ <a href="#">Fairs &amp; congresses</a> .....	86
Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften ♦ <a href="#">Peer-reviewed publications</a> .....	86
Andere Veröffentlichungen ♦ <a href="#">Other publications</a> .....	88
Vorträge & Poster ♦ <a href="#">Oral &amp; visual presentations</a> .....	90
Studien- & Bachelorarbeiten ♦ <a href="#">Student research projects &amp; bachelor theses</a> .....	94
Diplom- & Masterarbeiten ♦ <a href="#">Diploma &amp; master theses</a> .....	94
Doktorarbeiten ♦ <a href="#">Ph.D. theses</a> .....	95
Lehrveranstaltungen ♦ <a href="#">Lectures</a> .....	95
Preise & Auszeichnungen ♦ <a href="#">Awards</a> .....	96
<b>6 Presse ♦ <a href="#">Press</a></b> .....	<b>98</b>
<b>7 Autoren ♦ <a href="#">Authors</a></b> .....	<b>105</b>
<b>8 Impressum ♦ <a href="#">Impress</a></b> .....	<b>106</b>



Wir kennen die Klimakrise seit spätestens Mitte der 80er Jahre. Und dennoch ist bei uns wenig gegen die Ursachen unternommen worden, weil der große Schaden „gefühl“ doch weit weg in der Zukunft zu liegen schien.

Wir kennen Kriege aus Jahrhunderten. Und dennoch sind wir der Kriegsgefahr in Europa lange Zeit nicht entschlossen genug entgegengetreten, weil wirtschaftliche Gründe dem entgegenstanden und die Kriege aus den Nachrichten bis vor kurzem doch fast alle sehr weit in der Ferne stattfanden.

Und jetzt - nur scheinbar plötzlich - sehen wir echten Gefahren unmittelbar ins Auge: Hier den Klimawandelfolgen in Form von katastrophalen tödlichen Unwettern wie an der Ahr mitten in Deutschland oder Missernten aufgrund von Dürre. Dort den 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 deutsche Abhängigkeit von russischem Gas könnte heute schon viel, viel kleiner sein, wenn wir den Umbau des Energiesystems seit den 80er Jahren energisch vorangetrieben hätten. Warum ist es nicht passiert? Ich vermute, weil wir, die Gesellschaft und ihre Repräsentanten, den Mut zu einer klaren Prioritätensetzung unter konkurrierenden Interessen nicht aufgebracht haben. Das macht handlungsunfähig.

Denn Notwendigkeit des Ausstiegs aus der fossilen Energieversorgung birgt an vielen Stellen kurzfristige Risiken und Unannehmlichkeiten für manche, um langfristig sehr große Risiken für alle abzuwenden. Für manche wird sie kurzfristig zu höheren Kosten als ein „weiter wie bisher“ führen. Schon kurzfristig werden Produkte aus dem Markt gedrängt, mit denen sich aktuell noch Geld verdienen lässt. Kompromissbereiter Naturschutz mutet manchen Tierarten Belastungen zu um langfristig allen Tierarten das Überleben zu sichern.

Jetzt stehen wir also in gleich mehreren verschränkten Krisen und müssen unsere Kräfte und unser Geld klug einteilen. Die Energieversorgung muss möglichst unabhängig von autoritären Staaten werden, die mit uns in einem Wettbewerb der politischen Systeme stehen. Um das leisten zu können, generiert das ISFH zusammen mit seinen Entwicklungspartnern neues Wissen und neue Produkte für die Energiesystemtransformation.



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 Hamelin.

We have known about the climate crisis since at least the mid-1980s. And yet, little has been done in our country to address the causes because the great damage was “perceived” to be far off in the future.

We have known wars for centuries. And yet, for a long time, we did not confront the danger of war in Europe decisively enough because economic reasons stood in the way and, until recently, almost all the wars in the news took place far away.

And now - only seemingly suddenly - we are facing real dangers directly: Here the consequences of climate change in the form of catastrophic deadly storms such as on the river Ahr in the middle of Germany or crop failures due to drought. There, the consequences of Russia's murderous and unjust war against Ukraine, which, in addition to the inconceivably great suffering of those directly involved, also make our energy supply uncertain.

Germany's dependence on Russian gas could already be much, much smaller today if we had vigorously pursued the restructuring of the energy system since the 1980s. Why didn't it happen? I suspect because we, society and its representatives, did not have the courage to set clear priorities among competing interests. That made us incapable of action.

The need to phase out the fossil fuel energy supply poses in many areas short-term risks and inconveniences for some in order to avert very great long-term risks for everyone. For some, it will lead to higher costs in the short term than "business as usual." And even in the short term, products with which money can currently still be made will be forced off the market. Compromise-oriented nature conservation imposes burdens on some animal species in order to ensure the survival of all species in the long term.

Now we are facing several intertwined crises and have to manage our energy and our money wisely. The energy supply must become as independent as possible from authoritarian states, which are in a competition of political systems with us. In order to be able to achieve this, the ISFH is creating new knowledge and new products for energy system transformation together with its development partners.

Wir wollen diese Produkte aber auch bei uns in Europa hergestellt wissen, denn sonst drohen neue gravierende Abhängigkeiten bei der Umsetzung der Energiewende. In Bezug auf die Solarenergie bedeutet das, dass wir in Deutschland dringend eine Fertigung von Photovoltaikzellen und -modulen sowie die dazugehörige Wertschöpfungskette aufbauen müssen. Denn schon der heutige, viel zu langsame Ausbau der Photovoltaik in Deutschland geschieht zu mehr als 90% mit importierten PV-Modulen. Die Zeit ist reif dafür, damit wir in Zukunft nicht wieder feststellen müssen, dass wir langfristige Perspektiven kurzfristigen Vorteilen geopfert haben.

Heute ist Ostern, für Christen ist es ein Fest der Hoffnung. Und das „Osterpaket“ der Regierung, das erstmals klar feststellt, dass die Nutzung der erneuerbaren Energien in Deutschland im überragenden öffentlichen Interesse liegt und der öffentlichen Sicherheit dient, macht mir in der Tat Hoffnung.

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 2021.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitarbeiter\*innen für die erfolgreichen Arbeit in unserem zweiten Corona-Jahr.

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!

Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Brendel, 17. April 2022 (Institutsleiter und Geschäftsführer)

However, we also want these products to be manufactured here in Europe because otherwise there is a threat of serious new dependencies in the implementation of the energy transition. In relation to solar energy, this means that we urgently need to establish a production base for photovoltaic cells and modules and the associated supply chain in Germany, as more than 90% of even today's far too slow expansion of photovoltaics in Germany is happening with imported PV modules. The time is ripe for this, so that in the future we do not have to realize again that we have sacrificed long-term perspectives for short-term advantages.

Today is Easter Sunday, for Christians it is a festival of hope. And the government's "Easter package", which, for the first time, clearly states that the use of renewable energy sources in Germany is in the supreme public interest and serves public safety, does indeed give me hope.

I would like to thank our research partners from industry and academia, as well as the Ministry of Science and Culture of Lower Saxony, the Ministry of the Environment of Lower Saxony, and especially the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action, as well as all other research sponsors, for their excellent cooperation in the past year 2021.

Special thanks go to all staff members for their successful work in our second Corona year.

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

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



## 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 seminar papers, bachelor, masters or Ph.D. theses, we encourage solar energy utilization through research and innovation.

The ISFH is a non-university research institute of the State of Lower Saxony with the legal status of a non-profit organization. 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.

The 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).

Siebdruckinsel im ISFH-SolarTeC für den vollautomatischen Siebdruck auf Silizium-Solarzellen.  
Screen printing island at ISFH-SolarTeC for fully automated screen printing on silicon solar cells.







Industrieller PECVD-Ofen für die Abscheidung von  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{AlO}_y$  und dotiertem amorphem Silizium.  
Industrial PECVD furnace for the deposition of  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{AlO}_y$  and doped amorphous silicon.

## 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.

An 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 stehen dabei sowohl industrielle PERC+ Solarzellen (Passivated Emitter and Rear Cell) mit Aluminium-Finger-Grid als auch 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 industrial bifacial PERC+ (Passivated Emitter and Rear Cell) solar cells with aluminum finger grids as well as 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 Tandem-Konfiguration, 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 Tandemsolarzellen 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. Ein weiterer Schwerpunkt ist das Porosizieren von Silizium für die sägefreie Herstellung von monokristallinen Siliziumwafern.

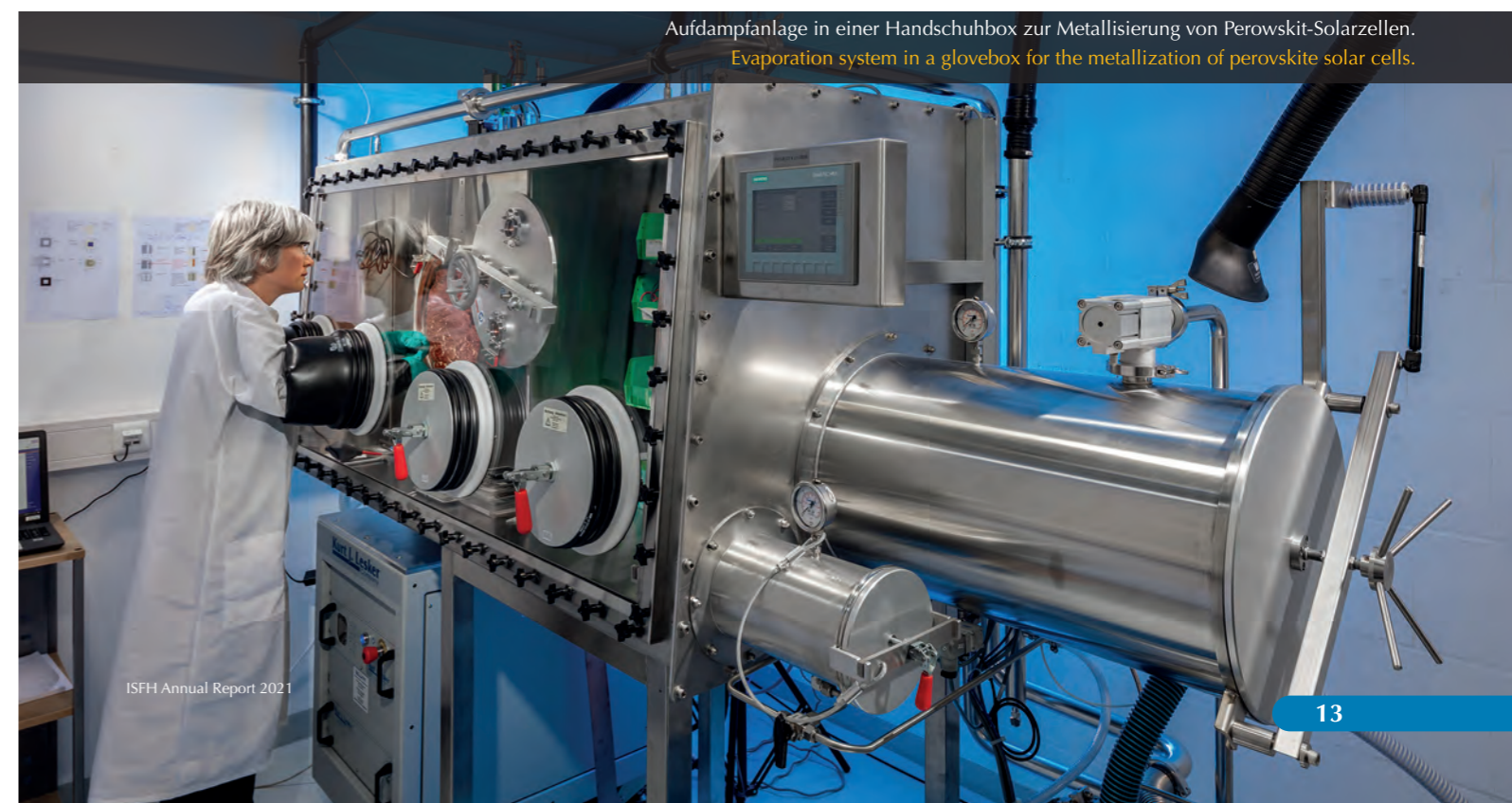
The group develops methods and technologies enabling new options for photovoltaics. The focus of our work is the development of cost-efficient tandem solar cells on silicon. These can reach an ever higher efficiency than single junction silicon solar cells. To achieve this we develop on co-evaporated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

## 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 Solarmodulen. Schwerpunkt sind bildgebende Verfahren, wie beispielsweise die kamerabasierte Erfassung der UV-Fluoreszenz im PV-Modullaminat. 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 in PV module laminates. These methods are further developed for the mostly automated use in ground-mounted systems. Contract work is being carried out for fault analysis of modules with accelerated ageing tests and standard tests.



Aufdampfanlage in einer Handschuhbox zur Metallisierung von Perowskit-Solarzellen.  
Evaporation system in a glovebox for the metallization of perovskite solar cells.



## Abteilung Solare Systeme

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

Die Forschungsaktivitäten der Abteilung Solare Systeme umfassen die Integration erneuerbarer Energie in 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. Die Sicherstellung der erwarteten Qualität unter Berücksichtigung der Schnittstellen zum Gebäude und der „konventionellen“ Systemkomponenten in Simulation, im Labor und im Feld ist eine wesentliche Aufgabe. Außerdem werden entwicklungsunterstützende und zertifizierende Auftragsprüfungen angeboten.

## Solar systems department

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

The research activities of the Solar systems department include the integration of renewable energy into cost-effective and reliable energy systems to supply buildings and neighborhoods with energy. Components with improved properties as well as new system combinations are being developed. These are proved and implemented in cooperation with our project partners. Ensuring the expected quality concerning the interfaces to the building and to the “conventional” system components with simulation methods, laboratory experiments and field investigations is essential. Development support and certification contract testing are also offered.

## 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 in die 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) wurde in Betrieb genommen.

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 for 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) was put into operation.

## 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 system-orientierter 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.



Drei Pyranometer und ein Pyrgeometer am Fassadenteststand messen die solare Einstrahlung in der vertikalen und horizontalen Ebene.  
Three pyranometers and one pyrgeometer at the façade test stand measure solar irradiance in the vertical and horizontal planes.



## 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, Brennwertkessel und Subsysteme wie beispielsweise Energiezentralen von Mehrfamilienhäusern. Besonders hervorzuheben sind die Entwicklung und Optimierung von Warmwasserspeichern und die dynamische Prüfung von Wärmepumpen unter kontrollierten Bedingungen.

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, condensing boilers and subsystems like central heat generation and distribution facilities in multifamily buildings. One main topic is the development and optimization of hot water storage tanks and the dynamic testing of heat pumps under controlled conditions.

## Elektrische Energiesysteme/Electrical energy systems

Leitung/Head: Dr. Tobias Ohrdes

Den Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe Elektrische Energiesysteme bilden Energieversorgungssysteme von Gebäuden und Quartieren unter Nutzung erneuerbarer Energien. Hierbei spielt insbesondere die Interaktion von Komponenten wie Photovoltaik-Batteriespeichern, Wärmepumpen und thermischen Speichern eine wichtige Rolle. Für einen optimalen Betrieb werden intelligente, modellbasierte Steuerungsstrategien und Fehlererkennungsverfahren entwickelt, um auf Gebäude- und Quartierebene eine erhöhte Nutzung erneuerbarer Energien zu ermöglichen. Ziel ist die dauerhafte Sicherstellung eines energieeffizienten und ökonomischen Betriebs solcher Systeme. Die Erprobung und Bewertung erfolgt dabei sowohl mittels Simulationen als auch in Laboruntersuchungen bis hin zu Feldtests unter realen Bedingungen. Die Arbeitsgruppe verfügt hierzu über Hardware-in-the-Loop-Laboreinrichtungen zur Abbildung von Energieversorgungssystemen von Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie Expertise im energetischen Monitoring von Gebäuden und Quartieren.

The research focus of the group Electrical energy systems concentrates primarily on energy supply systems for buildings and urban districts using renewable energies. In particular, the interaction of components such as photovoltaic battery storage systems, heat pumps and thermal storage systems play an important role. For optimal operation, intelligent, model-based control strategies and fault detection methods are being developed to enable increased use of renewable energies at building and district level. The aim is to permanently ensure the energy-efficient and economical operation of such systems. The testing and evaluation is carried out by means of simulations as well as laboratory tests up to field tests under real conditions. The group operates hardware-in-the-loop laboratory facilities for emulation of energy supply systems of detached and multi-family houses and has built up expertise in the energy monitoring of buildings and urban districts.

## Thermische Energiesysteme/Thermal energy systems

Leitung/Head: Dipl.-Ing. Peter Pärisch

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 Durchfluss-Trinkwassererwärmern (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 CO<sub>2</sub>-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 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>[1]</sup> 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<sup>[1]</sup>, run as the Calibration and Test Center (CalTeC) of ISFH. It is divided into four competence areas:

<sup>[1]</sup> Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien

<sup>[1]</sup> 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 12975<sup>[2]</sup>, EN 12976<sup>[3]</sup> und EN 12977<sup>[4]</sup> sowie dem internationalen Standard ISO 9806<sup>[5]</sup>. 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 12975<sup>[2]</sup>, EN 12976<sup>[3]</sup> and EN 12977<sup>[4]</sup> and the international standard of ISO 9806<sup>[5]</sup>. 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.

<sup>[2]</sup> Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren

<sup>[3]</sup> Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Vorgefertigte Anlagen

<sup>[4]</sup> Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen

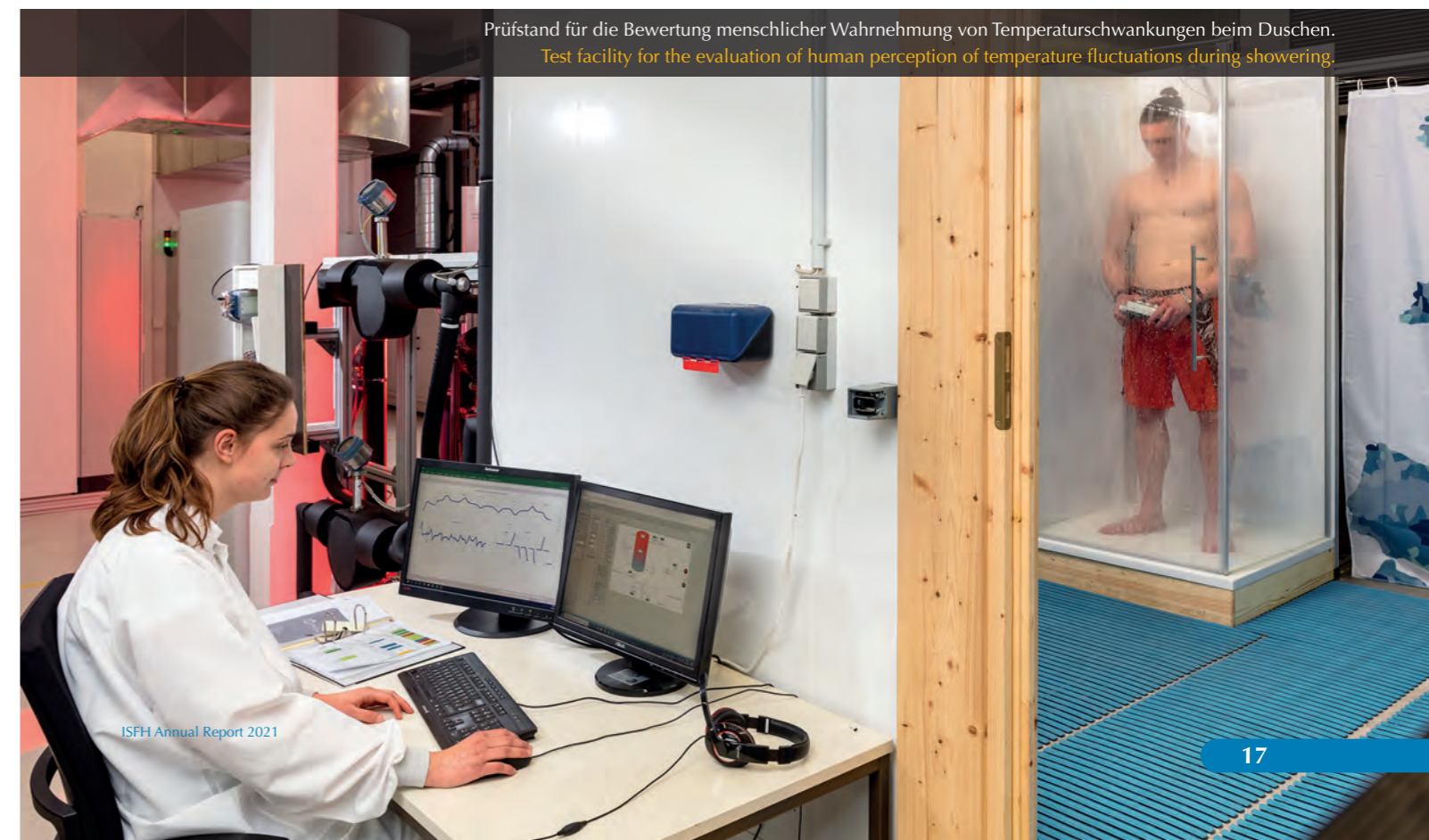
<sup>[5]</sup> Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren

<sup>[2]</sup> Thermal solar systems and components – Solar collectors

<sup>[3]</sup> Thermal solar systems and components – Factory made systems

<sup>[4]</sup> Thermal solar systems and components – Custom built systems

<sup>[5]</sup> Solar energy – Solar thermal collectors – Test methods





## 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<sup>[6]</sup> zertifizierten Prozedur.

<sup>[6]</sup> Photovoltaische Einrichtungen

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<sup>[6]</sup> certified procedure.

<sup>[6]</sup> 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 1 700 nm an. In der Regel handelt es sich bei den Strahlernormalen um Wolfram-Halogenlampen mit einer elektrischen Leistung zwischen 250 W und 1 000 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 1 700 nm. Usually tungsten halogen lamps with an electrical output between 250 W and 1 000 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.

Einstrahlungssensoren einer Wetterstation auf dem SolarTeC-Gebäude. Ein Pyrheliometer und zwei Pyranometer sind auf einem Suntracker montiert.  
Irradiance sensors of a weather station on the SolarTeC building. One pyrheliometer and two pyranometers are mounted on a suntracker.



## 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 50 000 nm, darüber hinaus für die Bestimmung des Brechungsindex und des Extinktionskoeffizienten mittels spektraler Ellipsometrie im Wellenlängenbereich von 240 nm bis 33 000 nm. Es werden Prüfungen der Alterungsbeständigkeit von Absorberschichten gemäß dem internationalen Standard ISO 22975-3<sup>[7]</sup> angeboten.

<sup>[7]</sup> Solarenergie – Kollektorbauteile und Materialien

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 50 000 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 33 000 nm. Tests of the aging resistance of absorber layers are offered in accordance with the international standard ISO 22975-3<sup>[7]</sup>.

<sup>[7]</sup> 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.

Die NILS ist außerdem anerkannter außerschulischer Lernstandort im BNE-Verbund<sup>[8]</sup> 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.

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

<sup>[8]</sup> Bildung für nachhaltige Entwicklung

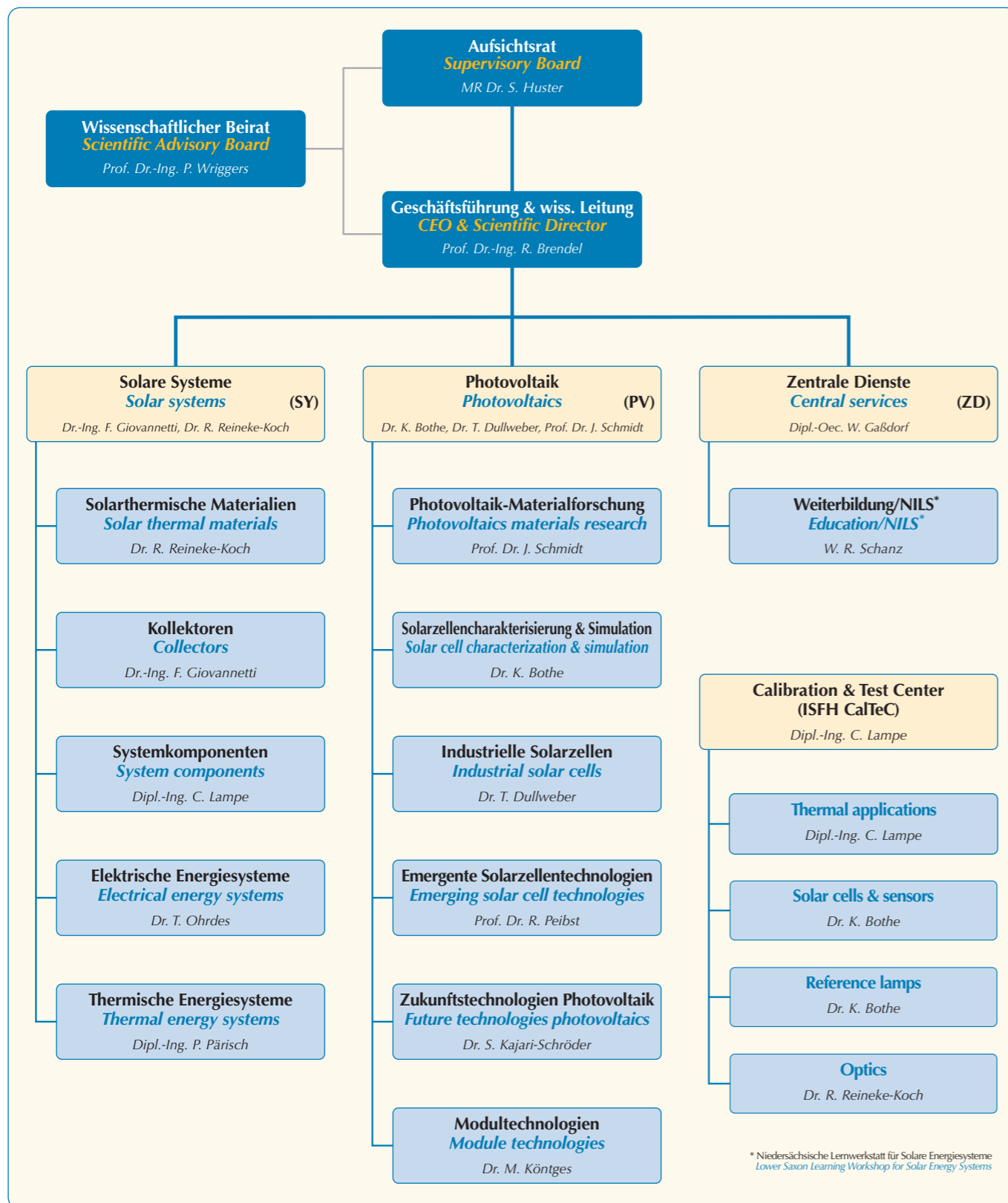
One of the first school laboratories at a scientific research institute was the Lower Saxon Learning Workshop for Solar Energy Systems (NILS) founded at ISFH as early as 2001. The learning workshop is an initiative which is supported by the Ministry of Education of the State of Lower Saxony. The aim 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.

NILS is also an extra-scholastic place of learning in the BNE-Verbund<sup>[8]</sup> 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.

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

<sup>[8]</sup> Education for Sustainable Development Association





Das Organigramm des ISFH, Stand 12/2021.

The organization of ISFH, effective 12/2021.

## 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 21. Juni und 7. Dezember 2021

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  
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 19. November 2021 in Form einer Hybridveranstaltung ab. Die Mitglieder des wissenschaftlichen Beirates sind:

## 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 21 June and on 7 December 2021.

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)  
(seit 30.08.2021)
- Ministerialrätin Petra Schröder  
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,  
Energie, Bauen und Klimaschutz  
Hannover
- Dr. Peter Wohlfart  
SINGULUS Technologies AG  
Kahl am Main  
(bis 06.09.2021)

## 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 19 November 2021, in the form of a hybrid event. The members of the Scientific Advisory Board are:



## Wissenschaftlicher Beirat

### Mitglieder/Members

- 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

## Scientific Advisory Board

Stand/Effective: 31.12.2021

- 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 Staß  
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung  
Baden-Württemberg (ZSW)  
Stuttgart
- Prof. Dr. Arthur Weeber  
TNO Energy Transition  
Petten, Niederlande



Roboterarm der automatischen Beladeeinheit am industriellen PECVD-Ofen.  
Robot arm of the automatic loading unit at the industrial PECVD furnace.



## 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 29% des Gesamtetats (Einnahmen im Jahr 2021) von 12,8 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 8,0 Millionen Euro, davon ist der größte Teil Verbundforschung mit der Industrie. Hinzu kommen direkte industrielle Drittmittel aus Dienstleistungen und Auftragsforschung in Höhe von 1,1 Millionen Euro.

Zum Ende des Jahres 2021 waren 159 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 m<sup>2</sup>. Darauf stehen vier Forschungsgebäude mit einer Gesamtnutzfläche von 7 500 m<sup>2</sup>. Zusätzlich gibt es auf dem Freigelände bzw. auf den Dachflächen die Möglichkeit, Außenversuche auf 2 000 m<sup>2</sup> Testfläche durchzuführen.

## Statistics of the Institute

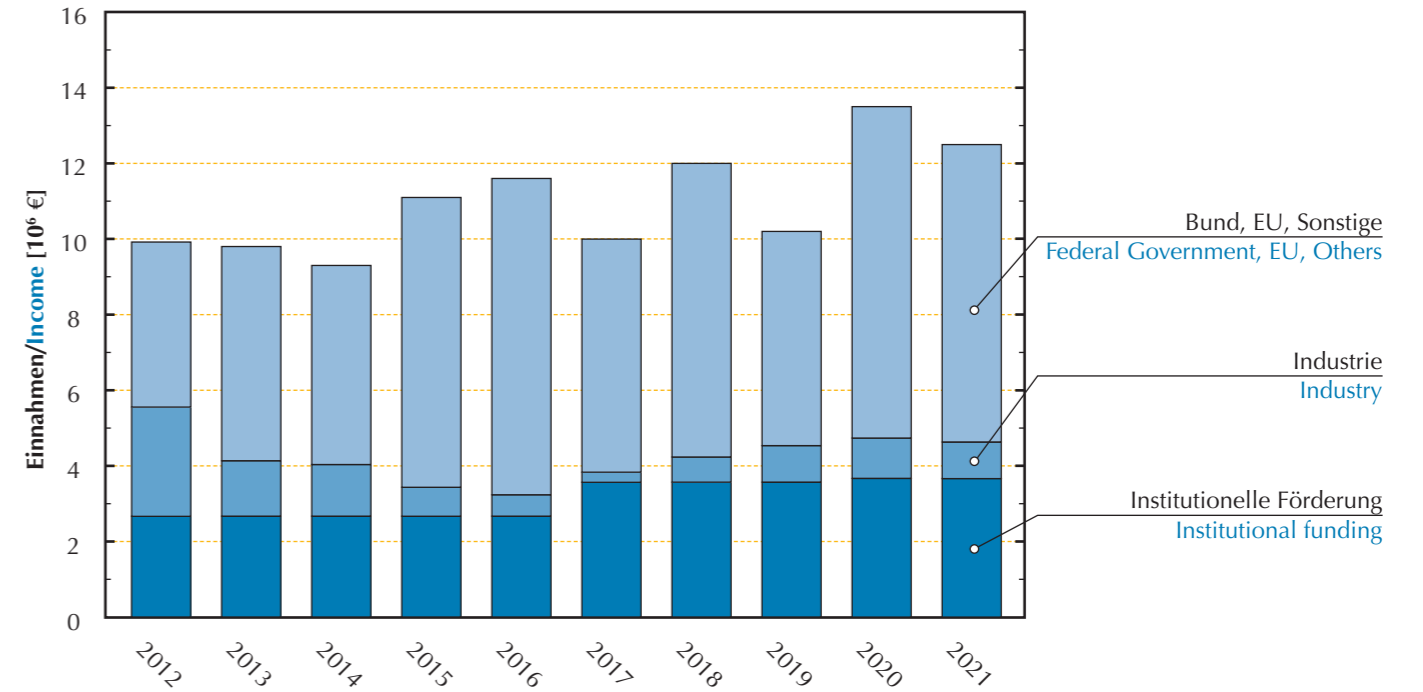
### Budget & personnel

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 29% of the total budget (income in 2021) of €12.8 million for the reporting year.

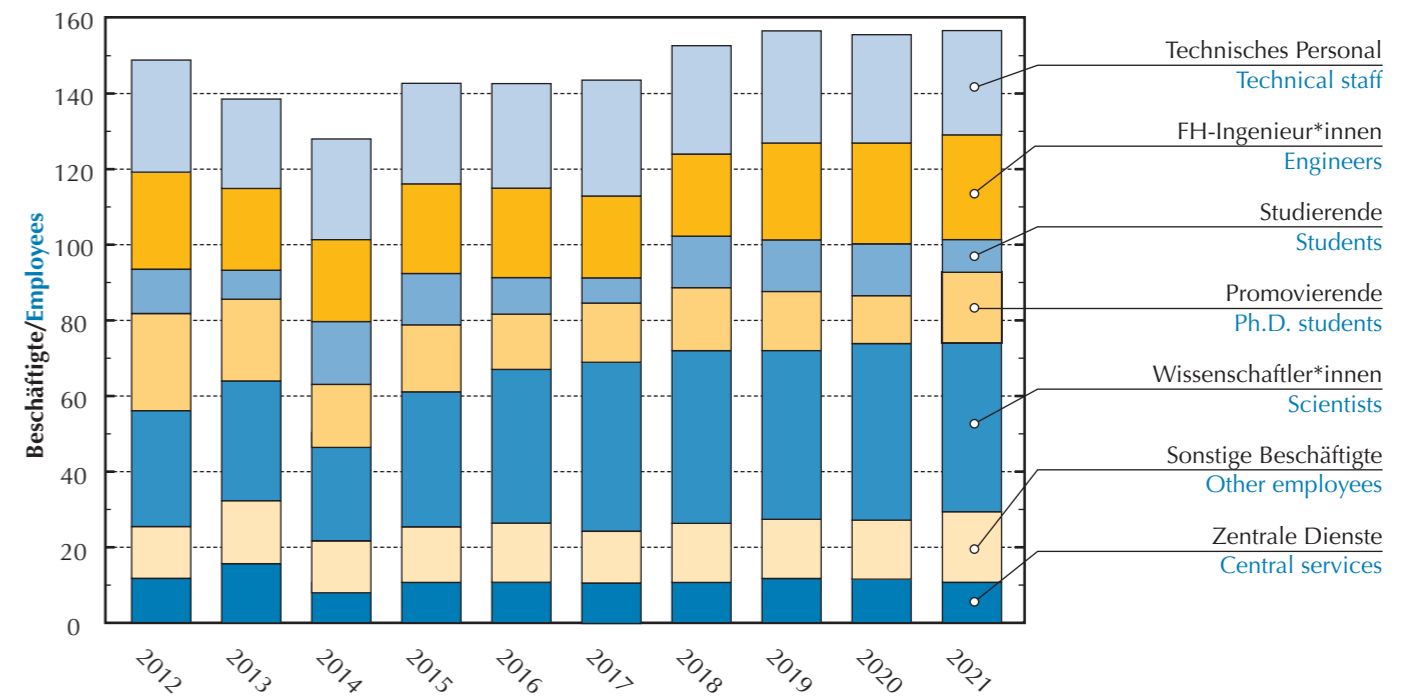
In addition to this institutional support from the State Government of Lower Saxony, the Institute receives so-called third-party funding from public research sponsors such as the Federal Government, the State Government of Lower Saxony or the European Union (EU). The income from public research projects was €8.0 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 €1.1 million.

At the end of 2021 ISFH had 159 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 m<sup>2</sup>. There are four research buildings on it with a total floor space of 7 500 m<sup>2</sup>. In addition, in the open-air areas or on the roofs there is the possibility to carry out outdoor tests on currently 2 000 m<sup>2</sup> of test area.



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

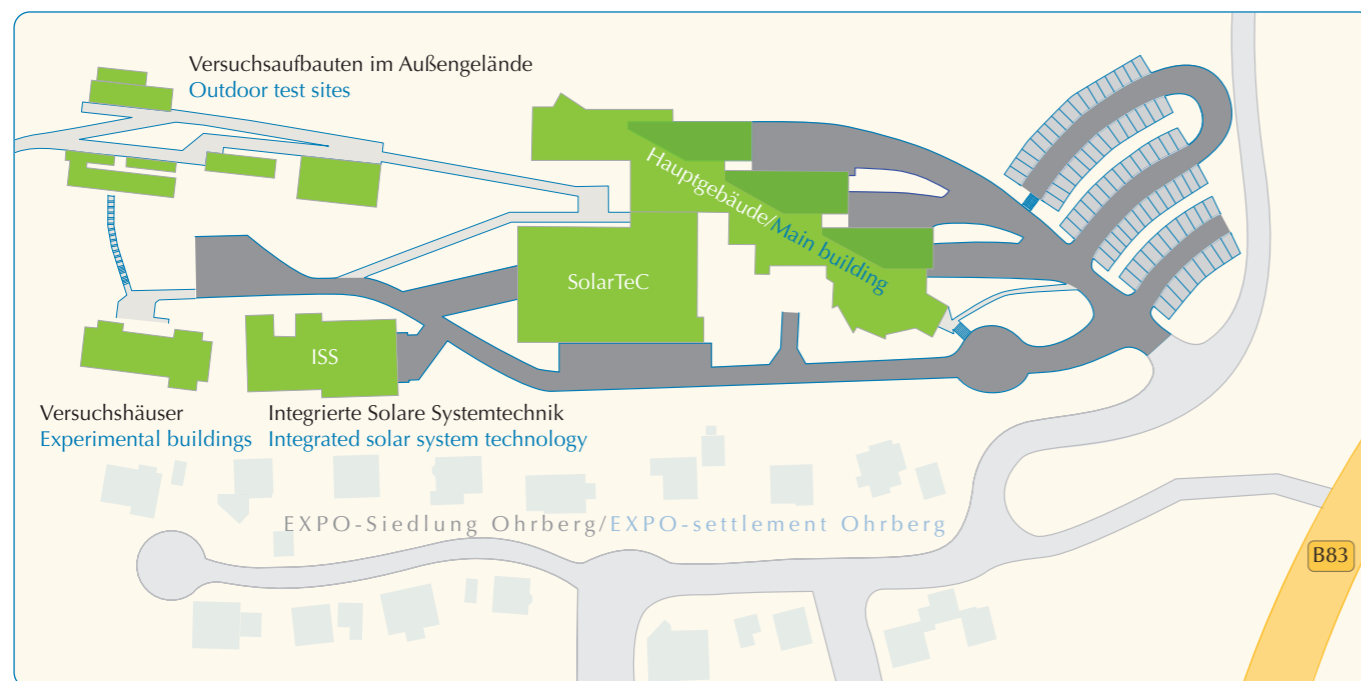


Die Personalstruktur und Beschäftigtenzahlen am ISFH. The structure of personnel and number of employees at ISFH.



Flächenkategorie Area category	Fläche/Area [m <sup>2</sup> ]
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<sup>191</sup> 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 30. November 2021 fand die jährliche Mitgliederversammlung des Fördervereins statt. Erneut wurde die Versammlung digital abgehalten.

Im Jahre 2021 hat der Förderverein die Anschaffung eines Wohnungsemulators für die kombinierte Prüfung von Trinkwassererwärmung und Heizung von Wohnungsstationen gefördert. Wohnungsstationen bieten ein hohes Effizienzsteigerungspotenzial bei der Bereitstellung von Trinkwarmwasser, da sie das Trinkwasservolumen reduzieren, gleichzeitig den Wasserwechsel erhöhen und so bei weiterhin hohem hygienischem Standard eine Temperaturabsenkung ermöglichen. Derzeit gibt es allerdings weder eine Norm noch andere Qualitätsanforderungen an diese Wohnungsstationen, so dass auch keine Vergleichbarkeit von verschiedenen Produkten gegeben ist. Mit Hilfe des Wohnungsemulators soll dies geändert werden.

<sup>191</sup> Gesellschaft zur Förderung des Instituts für Solarenergieforschung e.V., c/o Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeier 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"<sup>191</sup> 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 30, 2021, the annual general meeting of the Friends took place. Once again, the meeting was held digitally.

In 2021, the "Friends" sponsored the purchase of a dwelling emulator for the combined testing of domestic hot water and heating of dwelling stations. Dwelling stations offer a high potential for increasing efficiency in the provision of domestic hot water, as they reduce the volume of drinking water and at the same time increase the water change rate, thus enabling a reduction in temperature while maintaining high hygienic standards. At present, however, there is neither a standard nor other quality requirements for these dwelling stations, so that there is also no comparability of different products. With the help of the dwelling emulator, this will be changed.





Wohnungsemulator für die kombinierte Prüfung von Trinkwassererwärmung und Heizung von Wohnungsstationen.

Dwelling emulator for the combined testing of domestic hot water and heating of dwelling stations.

## Mitglieder/Members

Stand/Effective: 31.12.2021

### 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 energy-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, Holzminden
- Viega GmbH & Co. KG, Attendorn
- Westfalen Weser Netz GmbH, Paderborn
- Zacharias Gebäudetechnik GmbH, Hameln

### Natürliche Personen/Natural persons

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



Graphitboote eines industriellen PECVD-Ofens zur Abscheidung von dielektrischen Schichten oder dotiertem a-Si.  
Graphite boats of an industrial PECVD furnace for the deposition of dielectric layers or doped a-Si.



## Abteilung Photovoltaik

### Forschungsthemen

- Verlust- und Sensitivitätsanalysen von Solarzellen auf Basis von Solarzellensimulationen und präzise gemessenen Eingangsparametern
- Schlüsseltechnologien zur kostengünstigen Herstellung von Hocheffizienz-Solarzellen und PV-Modulen
- Oberflächenpassivierung von Silizium-Solarzellen ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , poly-Si)
- Hocheffiziente PERC und bifaziale PERC+ Siebdruck-Solarzelle
- Hocheffiziente Solarzellen mit poly-Si-on-Oxide (POLO)-Kontakten
- Hocheffiziente III-V//c-Si und Perowskit/c-Si-Tandem-Solarzellen
- Industrienaher Technologie- und Prozessentwicklung
- Kamerabasierte Charakterisierung für Silizium-Materialien, Solarzellen und PV-Module
- 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

- 800m<sup>2</sup>-Solar-Technikum (*SolarTeC*) für die Prozessierung von Solarzellen auf industrienahen Anlagen (Batch- und Inline-Nasschemie, Diffusions- und Oxidationsöfen, Direkt-Plasmaabschichtungsanlage (PECVD), Siebdrucker, Feueröfen)
- Reinraumlabore für 6"-Siliziumtechnologie (nasschemische Prozesse)
- Laserlabor mit vier 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

## 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 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , poly-Si)
- High-efficiency screen-printed PERC and bifacial PERC+ screen printed solar cells
- High-efficiency solar cells with poly-Si-on-oxide (POLO)-contacts
- High-efficiency III-V//c-Si and 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

- 800m<sup>2</sup> 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 6" silicon technology (wet chemical)
- Laser laboratory with four 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 tool
- Co-evaporation of perovskites
- Wet chemical deposition of perovskites

## Forschungsabteilungen

## Research departments

- Nasschemische Abscheidung von Perowskiten
- 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 Fluoreszenzmessplatz 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)
- Quasistatische Messung der Photoleitung (QSSPC)
- Mikrowellen-detektiertes Photoleitungsabklingen (MW-PCD)
- Temperatur- und injektionsabhängige Lebensdauerspektroskopie (TIDLS)
- Dotierprofilmessung mit ECV-Profilier
- Licht- und Rasterelektronenmikroskopie
- Kapazitäts-Spannungs-Messungen (CV)
- 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

- Nachweis lichtinduzierter Degradation in Gallium-dotiertem Czochralski-Silizium
- Ermittlung der Selektivität von elektronenselektiven Kontakten auf  $\text{TiO}_x$ -Basis auf Silizium nach Kontaktfeuerung
- Lokal durch Schattenmasken abgeschiedener PECVD-SiON/n-poly-Si-Schichtstapel ermöglicht schlanken POLO-IBC-Herstellprozess mit einem exzellenten  $iV_{oc}$  von 738 mV
- Geringer Temperaturkoeffizient von  $-0.3\% \text{ abs/K}$  für die Effizienz von industriellen POLO-Solarzellen nachgewiesen
- Erstmalige Demonstration einer monolithischen Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle mit industrieller p-Typ POLO/PERC-Silizium-Bottomzelle vom ISFH
- Entwicklung der lichtinduzierten Elektrolumineszenzmessung für PV-Module zur kontaktlosen Charakterisierung
- Erfolgreicher Aufbau eines praxistauglichen leichten E-Nutzfahrzeug-Demonstrators mit integrierter Photovoltaik und Hochvolt-Bordnetz-Einspeisung
- 8000 km erfolgreich absolvierte Testfahrten mit dem oben genannten leichten E-Nutzfahrzeug-Demonstrator

- Sequential deposition of perovskites
- 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 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)
- Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC)
- 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

- Detection of light-induced degradation in gallium-doped Czochralski silicon
- Determination of the selectivity of  $\text{TiO}_x$ -based electron-selective contacts on silicon after contact firing
- Locally through shadow mask deposited PECVD SiON/n-poly-Si layer stack enables lean POLO IBC fabrication process with excellent  $iV_{oc}$  of 738 mV
- Low temperature coefficient of  $-0.3\% \text{ abs/K}$  proven for efficiency of industrial POLO solar cells
- First demonstration of monolithic perovskite-silicon tandem solar cell with industrial p-type POLO/PERC silicon bottom solar cell from ISFH
- Development of light-induced electroluminescence measurements for PV modules for contactless characterisation
- Successful setup of a practical light commercial vehicle demonstrator with integrated photovoltaics and high-voltage on-board power supply.
- 8000 km successfully completed test drives with the above-mentioned light commercial vehicle demonstrator



### Abteilung Solare Systeme

#### Forschungsthemen

- Erneuerbare 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
- Thermische 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
- Entwicklung von Simulationsmodellen
- Entwicklung von innovativen Absorber- und Glasbeschichtungen
- Entwicklung von Komponenten für die Wasser-Elektrolyse, insbesondere PEM-Elektrolyse, Korrosionsforschung

#### 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-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen
- Charakterisierung von Frischwasserstationen mit einer Schüttleistung mit einstellbarer Zirkulationslast
- Charakterisierung von Dämmungen, Wärmerohren, Speicheranschlüssen, 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

#### Apparative Ausstattung

- Innenprüfstände mit zwei Sonnensimulatoren für Leistungs- und Gebrauchstauglichkeitstests, bis 1 200 W/m<sup>2</sup>
- Prüfanlagen für Druck-, Sog- und Schubprüfungen an Solarmodulen
- Testdächer mit 400 m<sup>2</sup> Nutzfläche für Gebrauchstauglichkeitstests an Sonnenkollektoren und Systemen sowie Leistungstests an Kollektoren bis 180 °C

### Solar systems department

#### Research topics

- Renewable energy supply concepts for buildings and districts
- Solar thermal collectors for new applications (collector arrays for solar district heating, industrial processes, source for heat pumps)
- Photovoltaic-thermal (PVT)- collectors for combined electricity and heat generation
- 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
- Development of simulation models
- Development of innovative coatings for absorbers and glazing
- Development of components for water electrolysis, in particular PEM electrolysis, corrosion research

#### 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, water/water, and brine/water heat pumps
- Characterization of central domestic hot water modules with a maximum flow rate 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 arrays with (solar) regeneration
- High-vacuum coatings for flat glasses, sheets and plane electrodes

#### Equipment & facilities

- Indoor test facilities with two sun simulators for performance and reliability tests, up to 1 200 W/m<sup>2</sup>
- Test facilities for pressure, suction and thrust loads on solar modules
- 400 m<sup>2</sup> test roofs for reliability tests on collectors and systems as well as performance tests on solar collectors up to 180 °C

- Prüfstand für Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen im dynamischen Betrieb bis 30 bzw. 60 kWth
- Zwei nachführbare Außenprüfstände mit 20 m<sup>2</sup> Nutzfläche
- Prüfstand für Systemtests an Solaranlagen nach EN 12976
- Prüfstände für Wärmespeicher, Reglerprüfstand nach EN 12977
- Begehbare Klimakammern (75 m<sup>3</sup> und 180 m<sup>3</sup>)
- Vakuum-Beschichtungsanlagen (Sputtern, PECVD)
- Optisches Labor für Transmissions- und Reflexionsmessungen (UV-VIS-NIR-MIR), spektrale Ellipsometrie (0,24 µm bis 33 µm)
- Spektral-Gonioradiometer (R=2,5 m). Messung 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 erneuerbarer 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 m<sup>2</sup>)
- Prüfstand für die Bewertung menschlicher Wahrnehmung von Temperaturschwankungen beim Duschen

#### Glanzlichter

- Entwicklung eines thermochromen Solarabsorbers mit hohem Emissionsgradwechsel zur Vermeidung der Stagnation bei solarthermischen Anlagen
- Experimentelle Validierung thermischer Modelle für solaraktivierte, vorgehängte hinterlüftete Fassaden
- Erfolgreiche Modellierung innovativer Demonstrationsanlagen mit stagnationssicheren Wärmerohr-Kollektoren
- Hocheffiziente Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern mit Vier-Leiter-Wohnungsstationen im Systemvergleich
- Konzeption und erfolgreicher Einsatz in der Praxis von fünf Messsystemen für die minimalinvasive Messung der Trinkwarmwasserlast in Gebäuden
- Entwicklung einer Methodik für die Erstellung von zeitlich hochaufgelösten Zapfprofilen für einzelne Zapfstellen fünf verschiedener Nutzertypen
- Demonstration von PVT-Wärmepumpensystemen mit minimalen CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Wärmeversorgung von Einfamilienhaus-Neubauten in TRNSYS
- Veröffentlichung eines Leitfadens mit Praxiserfahrungen und Planungshilfen für die Umsetzung von erneuerbar betriebenen Wind-Solar-Wärmepumpen-Quartieren

- Test facility for air/water-, water/water- and brine/water heat-pumps in dynamic operation up to 30 and 60 kWth, respectively
- Two solar-tracking test stands with an effective area of 20 m<sup>2</sup>
- 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 m<sup>3</sup> and 180 m<sup>3</sup>)
- Vacuum coating facilities (sputtering and PECVD)
- Optical laboratory for transmission and reflection measurements (UV-VIS-NIR-MIR), spectral ellipsometry (0.24 µm to 33 µm)
- Spectral-gonioradiometer (R=2.5 m). Measurement 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-sized solar thermal and photovoltaic façades (up to 50 m<sup>2</sup>)
- Test facility for the evaluation of human perception of temperature fluctuations during showering

#### Highlights

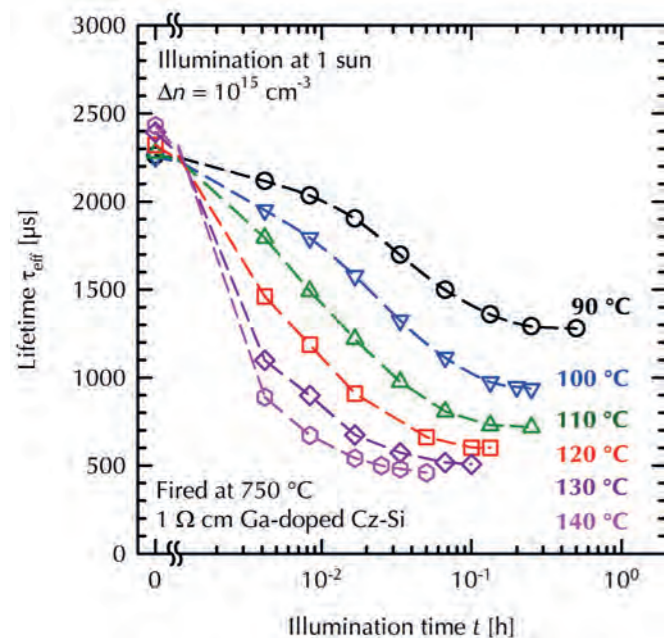
- Development of a thermochromic solar absorber with high emissivity change to avoid stagnation in solar thermal systems
- Experimental validation of thermal models for solar active rear-ventilated façades
- Successful modeling of innovative demonstration systems with stagnation-proof heat pipe collectors
- Highly efficient heat supply of multi-family houses with four-pipe dwelling stations in system comparison
- Design and successful field deployment of five metering systems for minimally invasive measurement of domestic hot water load in buildings
- Development of a methodology for generating high temporal resolution tap profiles for individual taps of five different user types
- Demonstration of PVT heat pump systems with minimal CO<sub>2</sub> emissions for the heat supply of new single-family houses in TRNSYS
- Publication of a guidebook with practical experience and planning aids for the implementation of renewable wind-solar heat pump quarters



### Abteilung Photovoltaik

#### Lichtinduzierte Degradation und Regeneration der Ladungsträgerlebensdauer in Gallium-dotiertem Czochralski-Silizium

Die Langzeit-Stabilität von Hocheffizienz-Solarzellen hängt unter anderem von der Passivierung von Ladungsträgerlebensdauer-limitierenden Defekten im Siliziumvolumen ab. Aufgrund der Limitierungen durch den bei Beleuchtung aktivierten Bor-Sauerstoff-Defekt („BO-Defekt“) in Bor-dotiertem Czochralski-Silizium (Cz-Si:B), dem bislang dominierenden Material in der Solarzellenproduktion, hat in den letzten Jahren eine Verschiebung zu Gallium-(Ga)-dotiertem Silizium-Material in der Solarzellenproduktion stattgefunden. Detaillierte Defekt-Analysen von Ga-dotierten Wafer-Materialien gibt es jedoch bislang nur sehr wenige. Diese Lücke wollten wir in den hier beschriebenen Untersuchungen schließen<sup>[10]</sup>. Wir konnten dabei insbesondere nachweisen, dass es auch in Gallium-dotierten Czochralski-Silizium-Wafern (Cz-Si:Ga) bei Beleuchtung zu einer Degradation der Ladungsträgerlebensdauer kommt, die durch den Hochtemperatur-Feuerschritt, wie er in der Solarzellenproduktion zur Kontaktbildung eingesetzt wird, verursacht wird. Diese Degradation ist allerdings sehr viel schwächer ausgeprägt als bei anderen Degradationsphänomenen, wie der BO-Degradation in Cz-Si:B oder der sogenannten ‚Light and elevated Temperature Induced Degradation‘ (LeTID), bekannt vor allem aus multikristallinem Silizium (mc-Si).



### Photovoltaics department

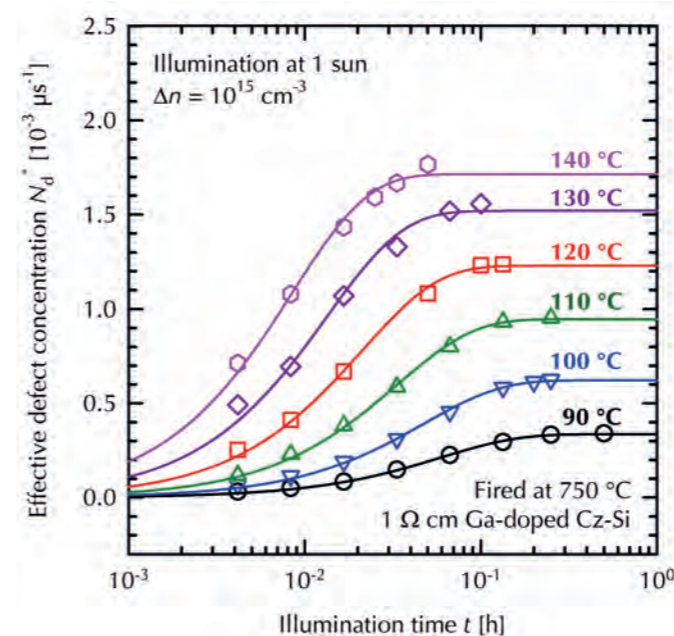
#### Light-induced degradation and regeneration of the charge-carrier lifetime in gallium-doped Czochralski-grown silicon

The long-term stability of high-efficiency silicon solar cells depends, among other things, on the passivation of charge-carrier-lifetime-limiting defects in the silicon bulk. Due to limitations caused by the boron-oxygen defect (BO defect) activated upon illumination in boron-doped Czochralski-grown silicon (Cz-Si:B), which has hitherto been the predominant material in solar cell production, a transition towards gallium-(Ga)-doped silicon materials has taken place in solar cell production in recent years. However, up to now detailed defect analyses of Ga-doped wafer materials have only been very scarce. The aim of the study described here was therefore to close this gap<sup>[10]</sup>. In particular, we were thus able to demonstrate that degradation of the charge-carrier lifetime also occurs in gallium-doped Czochralski-grown silicon (Cz-Si:Ga) wafers under illumination. This degradation is caused by the high-temperature firing step used in solar cell production for contact formation. However, it is very much less pronounced than other degradation phenomena, such as BO degradation in Cz-Si:B or the so-called ‚Light and elevated Temperature Induced Degradation‘ (LeTID), known above all from multicrystalline silicon (mc-Si).

Abbildung/Figure 24: Lebensdauerdegradation von Cz-Si:Ga in Abhängigkeit von der Beleuchtungszeit  $t$  in Stunden, beleuchtet mit 1 Sonne bei Temperaturen von 90°C bis 140°C. Die gepunkteten Linien dienen als Orientierungshilfe.  
Lifetime degradation of Cz-Si:Ga versus the illumination time  $t$  in hours, illuminated at 1 sun at temperatures ranging from 90°C to 140°C. Dotted lines serve as guide to the eye.

<sup>[10]</sup> M. Winter, D. C. Walter, J. Schmidt, „Carrier Lifetime Degradation and Regeneration in Gallium- and Boron-Doped Monocrystalline Silicon Materials“, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 11, no. 4, pp. 866-872 (2021).

Interessanterweise ist nicht nur die Defekt-Bildungsrate sondern auch das Ausmaß der beobachtbaren Degradation stark temperaturabhängig. In Abbildung 24 ist dies beispielhaft dargestellt. Neben der zu erwartenden Beschleunigung des thermisch aktivierten Prozesses ist eine zunehmende Reduzierung der vollständig degradierten Ladungsträgerlebensdauer ( $\tau_{deg}$ ) von 1300  $\mu$ s bei 90°C (schwarze Kreise) auf unter 500  $\mu$ s bei 140°C (pinke Hexagone) zu beobachten, jeweils bei einer Beleuchtungsintensität von 1 Sonne. Die initiale Ladungsträgerlebensdauer  $\tau_0$  beträgt ca. 2300  $\mu$ s. Diese Reduzierung der degradierten Ladungsträgerlebensdauer mit zunehmender Temperatur entspricht einer Verfünffachung der effektiven Konzentration  $N_d^* = 1/\tau_{deg} - 1/\tau_0$  des aktivierten Defekts, wie sie in Abbildung 25 dargestellt ist.



Der sich einstellende Gleichgewichtszustand zwischen aktivierten und deaktivierten Defektzentren ist abhängig von der Temperatur und Aktivierung sowie Deaktivierung sind reversible Prozesse. Dies wird in Abbildung 26 verdeutlicht. Eine degradierte Lebensdauerprobe wird bei geringer Temperatur beleuchtet (44°C, 0,5 Sonnen), was den Defekt vollständig deaktiviert. Danach wird bei einer konstanten Beleuchtungsintensität von 1 Sonne die Temperatur schrittweise erhöht. Dies führt zu stufenförmig abnehmenden Plateaus der Ladungsträgerlebensdauer, was einer sukzessiven Erhöhung der Defektkonzentration entspricht. Dass dies reversibel verläuft, zeigt sich bei der anschließenden Reduzierung der Temperatur auf 80°C und dann 44°C, wobei am Ende der Versuchsreihe mit 2000  $\mu$ s wieder nahezu der Ausgangswert erreicht wird. Die Tatsache, dass die Ladungsträgerlebensdauer am Ende des Experiments mit 2000  $\mu$ s etwas höher ist als nach dem anfänglichen 44°C-Schritt (1800  $\mu$ s) führen wir darauf zurück, dass ein Anteil der Defekte während der Versuchsreihe permanent deaktiviert wird.

Interestingly, not only the defect formation rate but also the extent of observable degradation displays a pronounced dependence on the temperature during illumination. Figure 24 demonstrates this clearly. In addition to the expected acceleration of the thermally activated process, an increasing reduction of the fully degraded charge-carrier lifetime ( $\tau_{deg}$ ) from 1300  $\mu$ s at 90°C (black circles) to below 500  $\mu$ s at 140°C (pink hexagons) is observed, each at an illumination intensity of 1 sun. The initial charge-carrier lifetime  $\tau_0$  is around 2300  $\mu$ s. This reduction of the degraded charge-carrier lifetime with increasing temperature corresponds to a five-fold increase in the effective defect concentration  $N_d^* = 1/\tau_{deg} - 1/\tau_0$ , as shown in Figure 25.

Abbildung/Figure 25: Effektive Defektkonzentration  $N_d^*$  in Abhängigkeit von der Beleuchtungszeit  $t$  in Stunden. Die Beleuchtungsbedingungen reichen von 90°C bis 140°C bei 1 Sonne. Die Linien sind exponentielle Fits der gemessenen Daten.

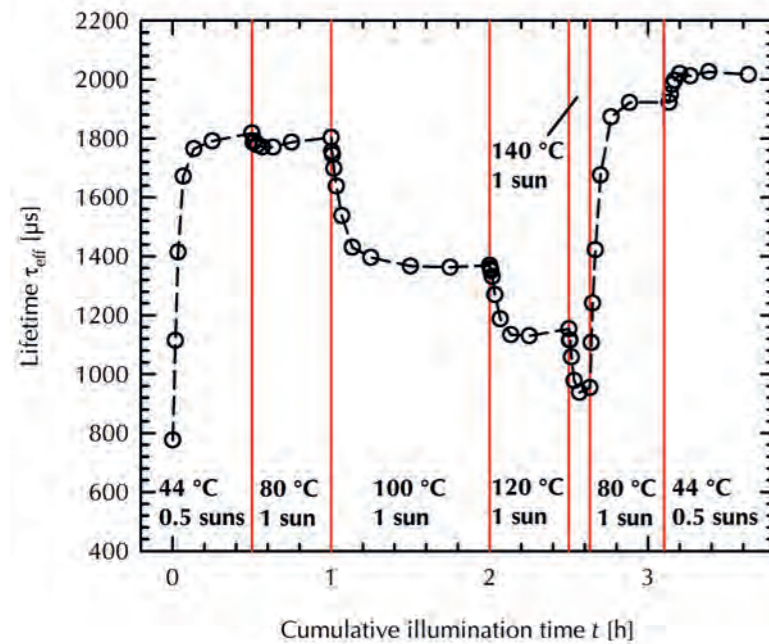
Effective defect concentration  $N_d^*$  versus the illumination time  $t$  in hours. Illumination conditions ranging from 90°C to 140°C at 1 sun. The lines are exponential rise-to-maximum fits of the measured data.

The equilibrium state establishing itself between activated and deactivated states of the defect is dependent on the temperature and the activation and deactivation are reversible processes. This is illustrated in Figure 26. A degraded lifetime sample is illuminated at a low temperature (44°C, 0.5 suns), which completely deactivates the defect. Afterwards the temperature is increased step-by-step at a constant illumination intensity of 1 sun. This leads to the charge-carrier lifetime decreasing in step-shaped plateaus corresponding to a successive increase in defect concentration. The subsequent reduction of the temperature to 80°C and then 44°C shows that the degradation is reversible. At the end of the series of experiments almost the same charge-carrier lifetime at 2000  $\mu$ s is attained as at the beginning. We attribute the fact that the charge-carrier lifetime at the end of the experiment at 2000  $\mu$ s is somewhat higher than after the initial 44°C step (1800  $\mu$ s) to a permanent deactivation of some of the defects during the series of experiments.



Diese permanente Deaktivierung der Defektzentren (entspricht einer „Regeneration“ der Ladungsträgerlebensdauer) wird in Abbildung 27 verdeutlicht. In Abbildung 27-a ist der Wechsel zwischen aktiviertem Defektzustand (nach Beleuchtung bei 135 °C und 1 Sonne) und deaktiviertem Defektzustand (nach Beleuchtung bei 44 °C und 0.5 Sonnen) in mehreren aufeinander folgenden Zyklen gezeigt. Dies demonstriert erneut die Reversibilität der Aktivierung und Deaktivierung des Defekts. Durch längere Beleuchtung bei erhöhter Temperatur (135 °C, 1 Sonne, Abb. 27-b) werden die Defektzentren hingegen zum Teil in einen permanent deaktivierten Zustand versetzt. Der aktivierte Defektzustand entspricht nun dem Zustand nach Regeneration (Abb. 27-c), die degradierte Ladungsträgerlebensdauer ist höher.

This permanent deactivation of the defect centers (corresponding to a "regeneration" of the charge-carrier lifetime) is illustrated in Figure 27. Figure 27-a shows the change between the activated defect state (after illumination at 135 °C and 1 sun) and the deactivated state (after illumination at 44 °C and 0.5 suns) in several consecutive cycles. This again demonstrates the reversibility of the activation and deactivation of the defect. A prolonged illumination at an elevated temperature (135 °C, 1 sun, Fig. 27-b), however, transforms some of the defect centers into a permanently deactivated state. The activated defect state now corresponds to the state after regeneration (Fig. 27-c) and the degraded charge-carrier lifetime is increased.



Abbildung/Figure 26: Lebensdauerdegradation von Cz-Si:Ga in Abhängigkeit von der kumulativen Beleuchtungszeit  $t$ . Die schrittweise Änderung der angewendeten Temperatur führt zu verschiedenen Degradationszuständen, was die Abhängigkeit des Gleichgewichtszustands zwischen aktivierten und deaktivierten Defektzentren von der Temperatur zeigt. Lifetime degradation of Cz-Si:Ga versus the cumulative illumination time  $t$ . The gradual change of the applied temperature leads to different degraded states, showing the dependence of the equilibrium state between activated and deactivated defect centers on the temperature.

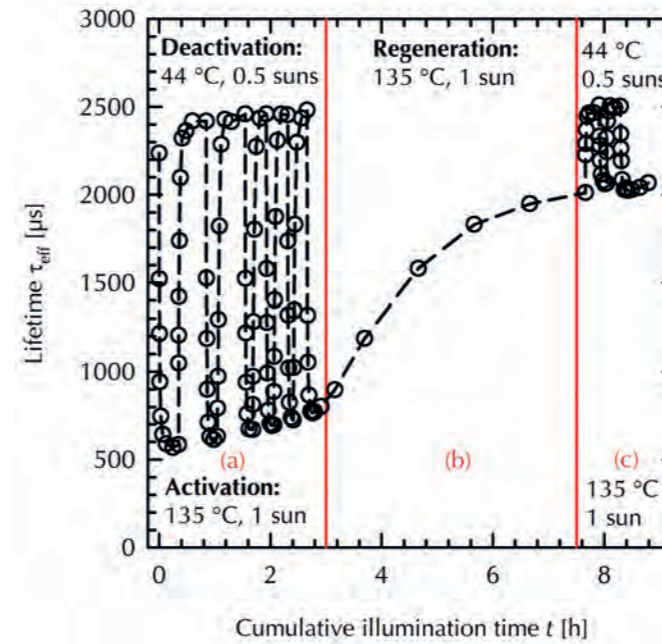
In unseren Breiten in Mitteleuropa werden bei freistehenden Photovoltaik(PV)-Modulen im Mittel Temperaturen um 20 °C bis 40 °C gemessen. Spitzenwerte im Sommer bei Sonnenhöchststand liegen für gewöhnlich bei 50 °C bis 55 °C. Diese Werte können sich in südlicheren Breiten und in dachintegrierten PV-Modulen um bis zu 20 °C nach oben verschieben. Diese Temperaturen würden in der Tat nur zu geringen Effizienzverlusten in Cz-Si:Ga PV-Modulen aufgrund von Ladungsträgerlebensdauer-Limitierungen führen.

In our latitudes in Central Europe temperatures of on average around 20 °C to 40 °C are measured for free-standing photovoltaic (PV) modules. Peak PV module temperatures in summer, when the sun is at its highest, are usually around 50 °C to 55 °C. Temperatures can be up to 20 °C higher in more southerly latitudes and in roof-integrated PV modules. These temperatures would, indeed, result in only minor efficiency losses in Cz-Si:Ga PV modules due to charge-carrier lifetime limitations.

Unsere Untersuchungen deuten derzeit darauf hin, dass eine wesentliche Komponente des bei Beleuchtung und erhöhter Temperatur aktivierten Defekts in Cz-Si:Ga Wasserstoff ist, der während des Kontaktbildungs-Feuerschritts aus den wasserstoffhaltigen dielektrischen Schichten auf der Solarzellenoberfläche in das Solarzellenvolumen eindiffundiert. Eine Verminderung dieser Eindiffusion z. B. mittels Aluminiumoxid( $Al_2O_3$ )-Barriere-

Our investigations suggest that hydrogen plays an important part in the defect activation in Cz-Si:Ga upon illumination at elevated temperatures. Thereby, hydrogen diffuses from the hydrogen-containing dielectric layers on the solar cell surface into the bulk of the solar cell during the contact-forming firing step. Reducing this in-diffusion, e.g. by means of aluminium oxide ( $Al_2O_3$ ) barrier layers, would thus be a simple way to suppress the observed new degradation effect.

schichten wäre somit ein einfacher Weg, um die beobachtete neuartige Degradation zu unterdrücken.

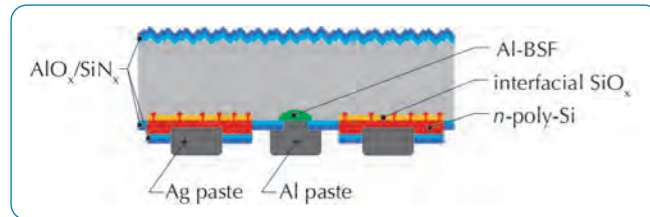


Abbildung/Figure 27: Wiederholte Aktivierungs-/Deaktivierungszyklen der Degradation in Cz-Si:Ga, unterbrochen durch einen permanenten Deaktivierungsschritt (Regeneration) bei längerer Beleuchtung bei erhöhter Temperatur (hier 135 °C). Repeated activation/deactivation cycles of degradation in Cz-Si:Ga interrupted by a permanent deactivation step (regeneration) under prolonged illumination at elevated temperature (i.e. 135 °C).



### Lokale PECVD-Abscheidung von SiON/n-a-Si mittels Schattenmasken für die Prozessierung von POLO-IBC-Solarzellen

Die POLO-IBC-Solarzelle verbindet die poly-Si-on-oxide (POLO)-Technologie mit der Rückkontaktarchitektur (interdigitated back contact, IBC) für Solarzellen<sup>[11], [12]</sup>. Sie ist eine interessante Möglichkeit zur Integration von passivierenden Kontakten in eine Solarzellenstruktur (siehe Abbildung 28). Da sich das poly-Silizium auf der Zellrückseite befindet, können so optische Verluste durch parasitäre Absorption in der Schicht minimiert werden. Das ISFH arbeitet bereits seit einiger Zeit an dieser Solarzellenstruktur und konnte einen vielversprechenden Wirkungsgrad von 23,7% auf Laborflächen von 4 cm<sup>2</sup> und mittels ganzflächiger LPCVD-Abscheidung des poly-Si und nachfolgender Strukturierung erzielen<sup>[13]</sup>.



### Local PECVD SiON/n-a-Si deposition using shadow masks for POLO IBC solar cell processing

The POLO IBC solar cell combines poly-Si-on oxide (POLO) technology with the interdigitated back contact (IBC) architecture for solar cells<sup>[11], [12]</sup>. It is an interesting option to integrate passivating contacts in a solar cell (see figure 28). The polysilicon is located on the rear side of the solar cell device so that optical losses due to parasitic absorption within this layer can be minimized. The ISFH has worked on this solar cell structure for already some time and has achieved a promising efficiency of 23.7% on lab scale devices with an active area of 4 cm<sup>2</sup> using full area LPCVD polysilicon deposition followed by laser structuring<sup>[13]</sup>.

Abbildung/Figure 28: Schemazeichnung der POLO-IBC-Solarzellenstruktur  
Schematic of the POLO IBC solar cell structure

In diesem Jahr hat das BMWK-geförderte Forschungsprojekt POPEI (Förderkennzeichen 03EE1102E) begonnen, das sich mit der Entwicklung eines potenziell kostengünstigen Prozessflusses für die POLO-IBC-Solarzelle auf Basis von lokaler Abscheidung des poly-Siliziums befasst.

Die n-poly-Silizium-Schicht wird dabei mittels plasma-unterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) durch eine Schattenmaske direkt strukturiert auf die Rückseite des Silizium-Wafers aufgebracht. Das für die exzellente Passivierung von poly-Silizium notwendige dünne Grenzflächensiliziumoxid zwischen Silizium-Wafer und poly-Silizium-Schicht kann wahlweise nasschemisch oder aber ebenfalls mittels PECVD-Verfahrens in einer Lachgasatmosphäre (N<sub>2</sub>O) direkt vor der n-poly-Silizium-Abscheidung in Anwesenheit der Schattenmaske hergestellt werden.

Die verwendeten Schattenmasken werden von der Firma LPKF AG aus Garbsen/ Niedersachsen aus dünnen Glassubstraten gefertigt und in Kooperation mit dem ISFH bereits für die Solarzellenanwendung optimiert. Wurden die Masken zunächst für den

In 2021 the research project POPEI started which is funded by the Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action: it deals with development of a potentially cost-effective process flow for the POLO IBC solar cell based on local polysilicon deposition.

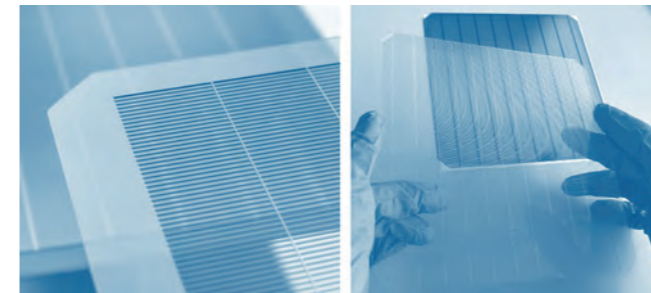
The n-polysilicon layer is deposited using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). A shadow mask is applied to achieve an area-selective deposition on the rear side of the silicon wafer. For this process the thin interfacial silicon oxide which is mandatory for an excellent surface passivation using a polysilicon layer can either be prepared wet chemically or by PECVD in presence of the shadow mask in a nitrous oxide atmosphere right before the PECVD-polysilicon deposition step.

The shadow masks utilized for this process are fabricated from thin glass substrates by the company LPKF AG located in Garbsen/ Lower Saxony. The optimization for solar cell application is done in cooperation with ISFH. At the start, the masks were developed for an application on the front side of a solar cell, however current work deals with optimization of their utilization

<sup>[11]</sup> F. Haase, C. Hollemann, S. Schäfer, J. Krügener, R. Brendel, R. Peibst, Proc. of the 46th IEEE PVSC, Chicago, IL, USA, 2200 (2019).

<sup>[12]</sup> EE. Bende, Proc. of the 7th Metallization and Interconnection Workshop, Konstanz, Germany (2017).

<sup>[13]</sup> R. Peibst, F. Haase, B. Min, C. Hollemann, B. Min, K. Bothe, R., Brendel, Prog. Photovolt. Res. Appl., 2022, doi: 10.1002/pip.3545.



Abbildung/Figure 29: Fotos zwei verschiedener Generationen von Glas-Schattenmasken für die POLO-IBC-Solarzelle: links: erste Generation mit (noch) breitem Rand, rechts: zweite Generation mit schmalem umlaufenden Rand

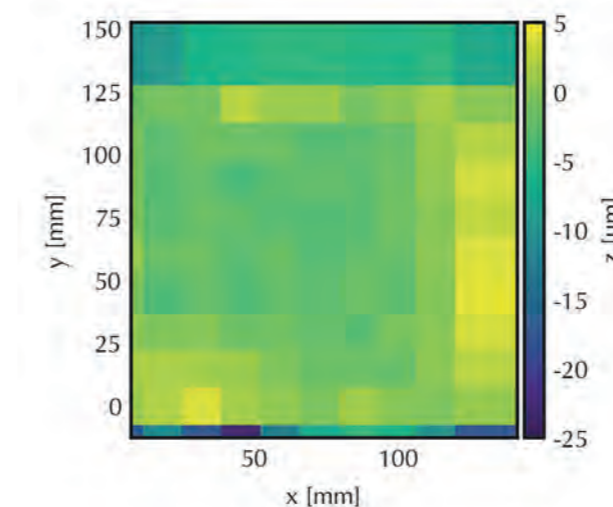
Photographs of two different generations of glass shadow masks: first generation with broad glass frame, second generation with narrow frame.

Einsatz auf der Solarzellenvorderseite entwickelt, so sind die aktuellen Arbeiten nun auf deren Optimierung für den Einsatz bei der IBC-Solarzellenprozessierung ausgerichtet<sup>[14], [15]</sup>. Abbildung 29 zeigt beispielhaft zwei Generationen von Schattenmasken für die POLO-IBC-Solarzelle.

in POLO IBC solar cell processing<sup>[14], [15]</sup>. Figure 29 shows photographs of two generations of shadow masks for POLO IBC solar cells as an example.

Ein sehr wichtiger Aspekt bei der lokalen Abscheidung von n-poly-Silizium ist die Abbildungstreue der Schattenmaske. Die durch die Schattenmaske abgeschiedenen lokalen n-poly-Silizium-Bereiche weisen eine geringe Verbreiterung sowie eine hohe Präzision auf. Letztere ist wichtig für die Abstimmung auf folgende Prozessschritte wie z. B. für die Herstellung der Siebdruckkontakte. Die Verbreiterung der n-poly-Silizium-Finger in p-Fingergebiete kann potenziell zu Verlusten in der fertigen Solarzelle führen. Um diese zu reduzieren, wird ein Nachbehandlungsverfahren nach der strukturierten Abscheidung angeschlossen, das die Abweichung von der Zielbreite auf +5 µm bis -25 µm reduziert (Abbildung 30). Negative Abweichungen von der Sollbreite bedeuten eine geringere Breite als ursprünglich vorgesehen.

One important aspect for the local deposition of n-polysilicon is to reproduce the mask pattern as true as possible. The locally processed n-polysilicon regions exhibit low broadening of the structures and high precision. The latter is important for alignment to following processing steps such as for instance, screen printing of metal contacts. The broadening of n-polysilicon fingers to p-finger regions can potentially lead to losses in the fabricated solar cell. To minimize the finger broadening we apply a post treatment after local deposition which reduces the deviation from target width from +5 µm to -25 µm (Figure 30). Negative deviations mean lower widths than the actual target width.



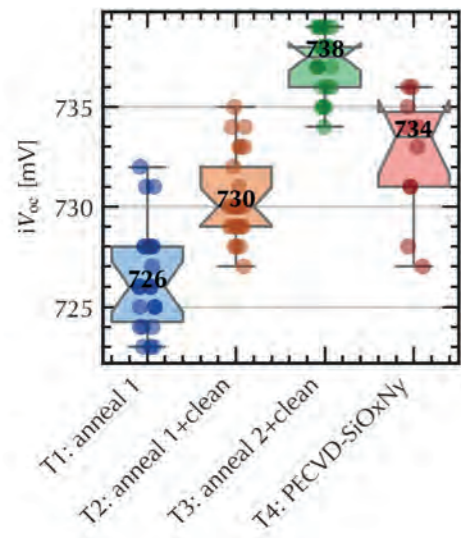
Abbildung/Figure 30: Ortsaufgelöste Messung der Fingerbreite nach n-poly-Silizium-Abscheidung und Nachbehandlung. Dargestellt ist die Abweichung der tatsächlichen Fingerbreite von ihrem Zielwert in Mikrometern.

Spatially resolved measurement of finger broadening after n-polysilicon deposition and subsequent post-treatment. The mapping gives the deviation of actual finger width from the target value in micrometers.

<sup>[14]</sup> M. Stöhr, J. Aprozanz, R. Brendel, T. Dullweber, Proc. of the 37th EUPVSEC, 521 (2020).

<sup>[15]</sup> T. Dullweber, M. Stöhr, V. Mertens, N. Ambrosius, H. Haverkamp, SNEC (2021).





Abbildung/Figure 31: Implizierte Leerlaufspannungswerte für POLO-IBC-Solarzellenvorläufer. Gruppen T1 bis T3 verwenden ein nasschemisches Grenzflächensiliziumoxid, Gruppe T4 ein PECVD-Grenzflächensiliziumoxid, alle Gruppen wurden mit PECVD-n-poly-Silizium lokal abgeschieden durch eine Glasschattenmaske hergestellt. Gezeigt sind verschiedene Prozessoptimierungen, die in der Spitze implizierte Leerlaufspannungen von 738 mV (T3) für nasschemisches Grenzflächensiliziumoxid und 734 mV (T4) für PECVD-Grenzflächensiliziumoxid erzielen. Implied open-circuit voltage ( $iV_{oc}$ ) values for POLO IBC solar cell precursors. Groups T1 to T3 have a wet chemical interfacial silicon oxide, group T4 a PECVD interfacial silicon oxide. All groups are processed using local n-polysilicon deposition through a glass shadow mask. We show different process optimization routes, which give at best  $iV_{oc}$  values of 738 mV (T3) for the wet chemical interfacial oxide and 734 mV (T4) for the PECVD interfacial oxide.

Zur Optimierung des Gesamtprozessflusses zur Herstellung von POLO-IBC-Solarzellen durch Einsatz von Schattenmasken wurden Solarzellenvorläufer, also Solarzellen ohne Metallisierung prozessiert. Die Qualität dieser Proben wird durch Messung der implizierten Leerlaufspannung auf Basis von Lebensdauer-messungen bestimmt mit dem Ziel möglichst hohe Werte zu erreichen.

Abbildung 31 zeigt beispielhaft die bisher besten Experimentergebnisse solcher Solarzellenvorläufer mit verschiedenen Prozessvarianten. Unter Verwendung eines nasschemischen Grenzflächensiliziumoxids wurde durch Optimierung des Ausheilschrittes für das PECVD-poly-Silizium und Einführung eines Reinigungsschrittes vor Abscheidung der Aluminiumoxid-Siliziumnitrid-Passivierschichten auf Zellvorder- und Rückseite eine Verbesserung der implizierten Leerlaufspannung von 726 mV auf exzellente 738 mV erzielt<sup>[16]</sup>. Der analoge Prozess mit den beschriebenen Optimierungen erzielt mit PECVD-Grenzflächensiliziumoxid und PECVD-poly-Silizium für Solarzellenvorläufer eine implizierte Leerlaufspannung von ebenfalls sehr guten 734 mV. Diese Ergebnisse zeigen die prinzipielle Vereinbarkeit der Verwendung von Glasschattenmasken für die lokale poly-Silizium-Abscheidung und sehr guter Oberflächenpassivierung. Als nächster Schritt erfolgt nun die Herstellung kompletter POLO-IBC-Solarzellen auf der Waferfläche M2 (d. h. mit einer Kantenlänge von 156,75 mm). Zudem arbeitet das ISFH zusammen mit dem Projektpartner centrotherm international AG aus Blaubeuren an der Übertragung der lokalen PECVD-Abscheidung von der ISFH-Laboranlage auf eine industrielle Produktionsanlage.

In order to optimize the full solar cell process flow, we process solar cell precursors, i.e. solar cells without metallization, using the shadow masks. The quality of the samples is evaluated measuring the implied open-circuit voltage done by lifetime measurements which should be as high as possible.

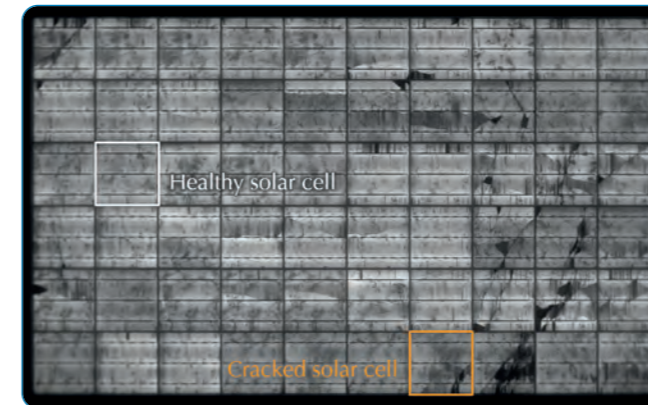
Figure 31 shows as an example the currently best experimental results for such solar cell precursors processed by different process variants. Using a wet chemical interfacial oxide, the optimization of the annealing step for PECVD polysilicon and the introduction of an additional cleaning step prior to the aluminum oxide/ silicon nitride passivation of the front and rear side could improve the median implied open-circuit voltage from 726 mV to excellent 738 mV<sup>[16]</sup>. The same optimized process sequence applied using a PECVD interfacial oxide leads to a median implied open-circuit voltage of 734 mV. These results demonstrate the principal compatibility of glass shadow masks for local polysilicon deposition and high-quality surface passivation. The next step is the fabrication of full POLO IBC solar cells using the new process flow on the wafer format M2, i.e. 156.75 mm edge length. In addition, the ISFH collaborates with the project partner centrotherm international AG from Blaubeuren/ Germany to transfer the local PECVD deposition from the lab tool at ISFH to their industrial production tool.

<sup>[16]</sup> V. Mertens, S. Schäfer, M. Stöhr, A. Mercker, A. Köhler, L. Mettner, R. Brendel, N. Ambrosius, T. Pernau, H. Haverkamp, T. Dullweber, Proc. of the 38th EUPVSEC, 135 (2021).

Verena Mertens, Sören Schäfer, Maximilian Stöhr, Ulrike Baumann, Jonathan Langlois, Adrian Köhler, Larissa Mettner, Anja Mercker, Rolf Brendel, Thorsten Dullweber

### Leistungsbestimmung an fehlerhaften PV-Modulen mittels Elektrolumineszenz

Während der Installation oder des Betriebs von PV-Anlagen kann es zu einer Beschädigung von PV-Modulen kommen. Die auftretenden Schäden können zu einem Leistungs- bzw. Ertrags- und damit Gewinnverlust der PV-Anlage führen. Zur sicheren Bestimmung des Schadenstyps wird die Elektrolumineszenz(EL)-Methode verwendet. Hierbei wird Strom in das PV-Modul injiziert, so dass es mit nahem Infrarot(NIR)-Licht leuchtet. Der Schadenstyp kann dann anhand einer NIR-Fotografie identifiziert werden (Abbildung 32). Diese Messmethode ist günstiger als elektrische Messungen der Leistung. Es fehlt allerdings die Quantifizierung des Leistungs- und somit Gewinnverlusts der PV-Anlage. Ziel des hier vorgestellten Verfahrens ist die Bestimmung der elektrischen Leistung von geschädigten PV-Modulen für große PV-Anlagen auf Basis von NIR-Aufnahmen. Als typischen, repräsentativen Schadensfall werden PV-Module mit gebrochenen Solarzellen („Cracks“) untersucht. Cracks können während der Installation der PV-Anlage oder während des Betriebs, z. B. durch Hagelschlag oder unsachgemäße Reinigung, auftreten.



### Power calculation of PV modules with cracked solar cells based on electroluminescence imaging

PV modules can be damaged during installation or operation of a PV system. The caused damage could lead to power, yield and therefore margin losses. Commonly the electroluminescence (EL) method is applied to identify reliably the type of damage of PV modules. In this method, an electrical current is induced in the PV module to force a near infrared (NIR) emission. The type of damage is identified on basis of NIR photography (Figure 32). The EL method is cheaper than the electrical measurements but we cannot derive the power or yield loss from it. Hence, we aim for a procedure to determine the electrical power on basis of NIR images of damaged PV modules of large PV systems. We focus on broken solar cells („cracks“) as a typical type of defect that can occur during installation and/or operation, e.g. due to hailstorm events or inappropriate cleaning, of the PV system.

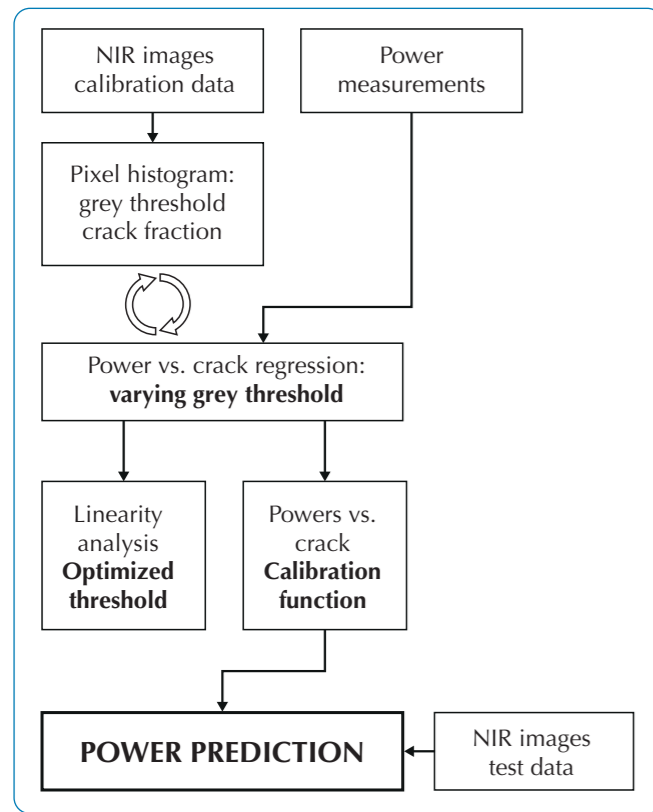
Abbildung/Figure 32: Nahinfrarot(NIR)-Aufnahme eines PV-Moduls mit gebrochenen Solarzellen („cracked solar cells“). Near infrared (NIR) image of PV module with broken solar cells.

Im ersten Schritt des Verfahrens, das in Abbildung 33 schematisch gezeigt wird, werden Leistungsmessungen und NIR-Aufnahmen an einem kleinen Teil der PV-Module der PV-Anlage durchgeführt. Pro PV-Modul wird anhand der NIR-Aufnahmen der Anteil der gebrochenen Solarzellen bestimmt. Dafür wird für die Graustufen-NIR-Aufnahmen ein Schwellwert festgelegt, unterhalb dessen alle Pixel als defekte Zellfläche definiert werden. Um den optimalen Graustufenschwellwert zu ermitteln, wird im zweiten Schritt die Leistung der PV-Module in Abhängigkeit von der defekten Zellfläche betrachtet. Diese Abhängigkeit ist nach Ref.<sup>[17]</sup> im Wesentlichen linear. Der optimale Graustufenschwellwert ist ermittelt, wenn das Bestimmtheitsmaß eines linearen Fits der Leistung als Funktion der defekten Zellfläche maximal ist

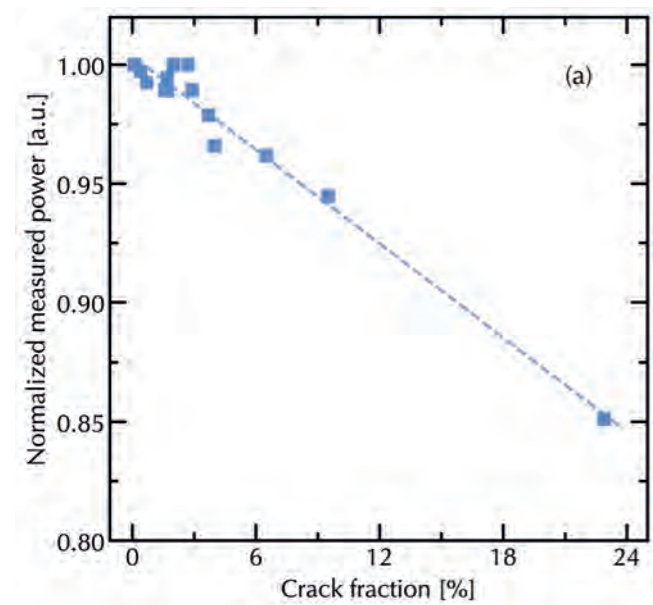
Figure 33 depicts a scheme of the presented procedure. In the first step, the power measurements and NIR images are carried out on a small set of PV modules from the entire PV system. The fraction of broken solar cells is determined for each NIR image by associating each pixel below a certain threshold as broken solar cell fraction. We find iteratively the optimal threshold by varying the threshold until we find the highest linearity of the relationship between the power of the PV module and the fraction of broken solar cells. This relationship is linear according to Ref.<sup>[17]</sup>. We consider the coefficient of determination as a figure of merit for the linearity (Figure 33). We use the optimal threshold to set up a calibration function of the power of the PV modules and the fraction of broken solar cells. In the last step, we apply the calibration function

<sup>[17]</sup> J.I. van Mölken et al. Energy Procedia 27 (2012) pp. 167–172.

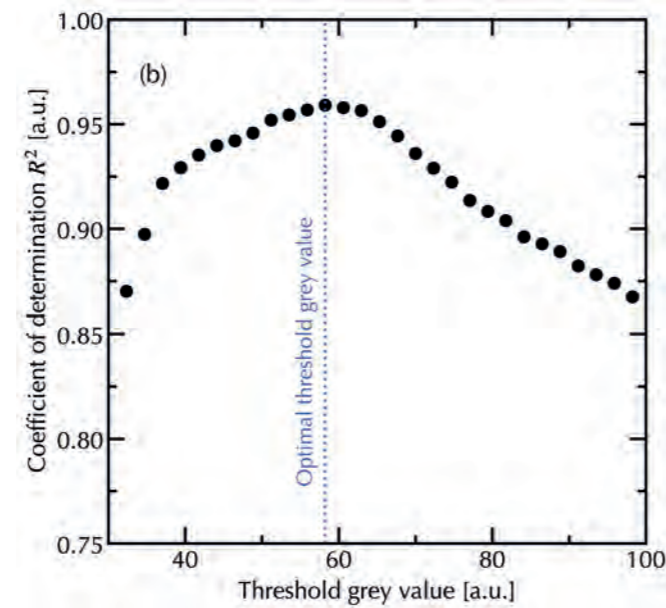




Abbildung/Figure 33: Schematische Darstellung der Bestimmung der Schadensstärke anhand von NIR-Aufnahmen und der Vorhersage der Leistung von PV-Modulen.  
 Scheme of procedure: Determination of optimized grey threshold and prediction of output power of PV modules.



Abbildung/Figure 34: (a) Regression der gemessenen Leistung der PV-Module als Funktion der defekten Zellfläche ermittelt aus den NIR-Aufnahmen mit einem Graustufenschwellwert (in dem Fall 58). (b) Bestimmtheitsmaß der Funktion aus (a) für die Variation des Graustufenschwellwerts.



(a) Regression of measured power of the PV modules as a function of the crack fraction obtained from the NIR images for a certain grey threshold (in this case 58). (b) Coefficient of determination of the function in (a) for a varying grey threshold value.

(Abbildung 33). Mit Hilfe des optimalen Graustufenwerts wird die lineare Korrelation zwischen PV-Leistung und defekter Zellfläche kalibriert. Diese Kalibrierungsfunktion wird im letzten Schritt auf weitere zu prüfende PV-Module angewendet, an welchen die Leistung nur auf Basis der NIR-Aufnahmen vorhergesagt wird.

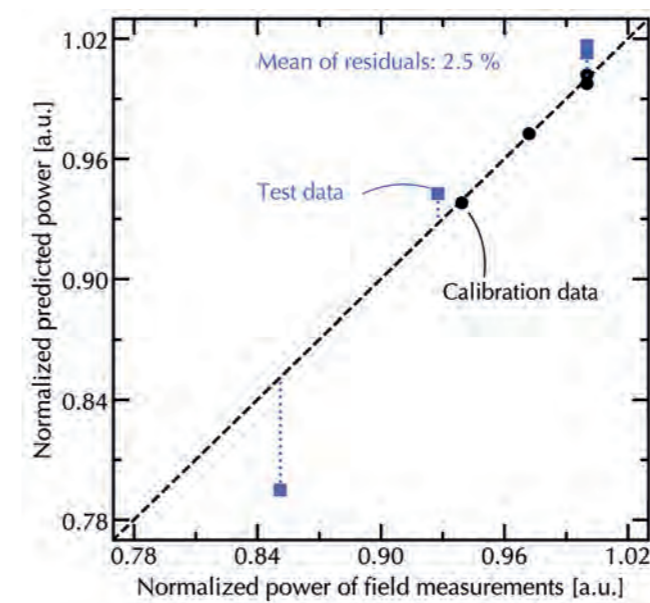
Das Verfahren wird anhand von Feldmessdaten erprobt, bei denen die Leistung von vier PV-Modulen mittels Feldmessinstrumenten über einen Zeitraum von drei Tagen erfasst wurde. Mit Hilfe der Methode von IEC60891 (Verfahren 2) wurde die PV-Modulleistung unter Standard-Testbedingungen hochgerechnet. Mit diesen Daten wird die Kalibrierungsfunktion von PV-Leistung zu Defekt-Anteil erstellt (schwarze Symbole Abbildung 35). Für vier weitere PV-Module wurde die PV-Leistung vorhergesagt, ohne dass eine Leistungsmessung im Feld erfolgte (blaue Symbole Abbildung 34). Ein Vergleich mit den kalibrierten Laborleistungsmessungen ermöglicht die Überprüfung des Messverfahrens. Für die vier Test-PV-Module beträgt die mittlere Abweichung zwischen dem Messwert und der Vorhersage 2,5%, was bei einer PV-Modulleistung von 350W ca. 9W entspricht.

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht somit Unterschiede in der Leistung von PV-Modulen anhand von NIR-Aufnahmen zu ermitteln, um die Auswirkungen von Schäden an großen PV-Anlagen zu quantifizieren. So kann kostengünstig bewertet werden, ob PV-Module ggf. ersetzt werden müssen.

to predict the power of PV modules only on basis of their NIR images.

We applied the presented procedure to measurements obtained in a field site. We detect the power of four PV modules during a period of three days. On basis of the method reported in the IEC 60891 (procedure 2), we calculate the power of the PV modules under standard test conditions. These results serve as calibration data set shown as black symbols in Figure 35. Further four PV modules are dedicated as test data set. We predict the power of the PV modules using the calibration function and the fraction of broken solar cells as extracted from the NIR images. We verify the quality of the prediction by a comparison with measurement done in the laboratory under standard test conditions. The mean deviation between this measurement and the prediction is 2.5%, which is about 9W when the maximum power of the PV module is 350W.

In conclusion, the presented procedure allows quantifying power differences of PV modules on basis of their NIR images obtained by the electroluminescence method. We can relate the impact of damages in large PV systems. Hence, in a cheap way the evaluation of replacing PV modules is possible by analysing the possible yield and margin loss



Abbildung/Figure 35: Vorhergesagte, normierte Leistung als Funktion der Feld-gemessenen, normierten PV-Leistung. Schwarze Symbole: Kalibrierungsdaten der Korrelation zwischen PV-Leistung und Crack-Anteil. Blaue Symbole: Test-Daten für Vorhersage der PV-Leistung auf Basis des Crack-Anteils.  
 Predicted, normalized power as a function of field-measured, normalized PV module power. Black symbols: Calibration data of correlation of PV power and crack fraction. Blue symbols: Test data used for prediction of PV power based on the crack fraction.



### Photovoltaikmodule mit Naturmaterialien für die Bauwerkintegration

Photovoltaik(PV)-Anlagen werden im Gebäudesektor bisher überwiegend auf den vorhandenen Dachflächen installiert ohne den Anspruch einer dekorativ ansprechenden Integration in die Gebäudehülle. Dies ist in der Regel technisch einfach umzusetzen, genügt jedoch oft nicht den ästhetischen Kriterien von Bauherren und Architekten. Zudem decken die auf den Dachflächen installierten PV-Anlagen bei Wohn- und/oder Gewerbebauten mit einer Vielzahl an Nutzern den Energiebedarf nur teilweise.

Eine zusätzliche energetische Aktivierung der Fassade kann die Deckung des Energiebedarfs durch lokal erzeugte erneuerbare Energie erhöhen. Eine aktuelle Studie zeigt, dass die in Deutschland potenziell nutzbare Fassadenfläche etwa doppelt so groß ist wie die für Dachflächen<sup>[18]</sup>. Zwar sind die Erträge an vertikalen Fassaden häufig geringer als bei Dachanlagen, jedoch deckt sich das Erzeugungsprofil einer Fassadenanlage besonders gut mit dem Lastprofil von z. B. Wohn- und Bürogebäuden, da ihre Ausrichtung besonders in den Morgen- und Abendstunden und im Winter vorteilhaft ist<sup>[19]</sup>. Im Fassadenbereich steigen noch die ästhetischen Ansprüche an die PV-Anlage, die visuell ansprechend in die Gebäudehülle integriert werden muss. Ein üblicher Ansatz zur Realisierung diskreter in Gebäude integrierbarer PV-Module ist die Integration einer farbigen Schicht in das Laminat. Ein solcher Ansatz ermöglicht z. B. die Nachbildung von Dächern mit tonfarbigen Dachschindeln. Die Anpassung der Farbe der PV-Module an die der umgebenden Flächen ist eine Technik, die den in der Regel großen Abstand zwischen einem Beobachter und den PV-Modulen nutzt. PV-Module, die als Fassadenelemente eingesetzt werden, werden jedoch in vielen Fällen auch aus geringerer Entfernung und flachem Sichtwinkel wahrgenommen. Die glatte Glasoberfläche verleiht den PV-Modulen ein unnatürliches Erscheinungsbild und kompromittiert die Unauffälligkeit der PV-Module. Die exzellente Integration von Photovoltaik hat daher nicht nur die Optik von natürlichen Materialien wie Stein, Ziegel oder Holz, sondern idealerweise auch die gleiche Haptik und die gleiche Oberflächenstruktur.

Am ISFH werden zu diesem Zweck Photovoltaikmodule mit einer Natursteinschicht ausgestattet. Diese Steinschicht ist dünner als 500 µm und wird mit einer Glasfaser-verstärkten Polymer-Trägerschicht unterstützt. Die Steinschicht ist monolithisch und wird an die Glasvorderseite des PV-Moduls laminiert, um dem PV-Modul den Aspekt eines einzelnen Steinblocks zu verleihen. Die Steinschicht kann aus unterschiedlichen Steinarten erzeugt werden. In dieser Studie wurden Sandsteinfurniere sowie Glimmerschieferfurniere verwendet. Die Sandsteinfurniere weisen eine poröse Oberfläche auf, mit unregelmäßigen Farbmustern.

<sup>[18]</sup> M. Behnisch, M. Münzinger, H. Poglitsch, B. Willenborg, T. Kolbe, Anwendungsszenarien von Geomassendaten zur Modellierung von Grünvolumen und Solarflächenpotenzial, IÖR Schriften, 78, 2020, 251-261.

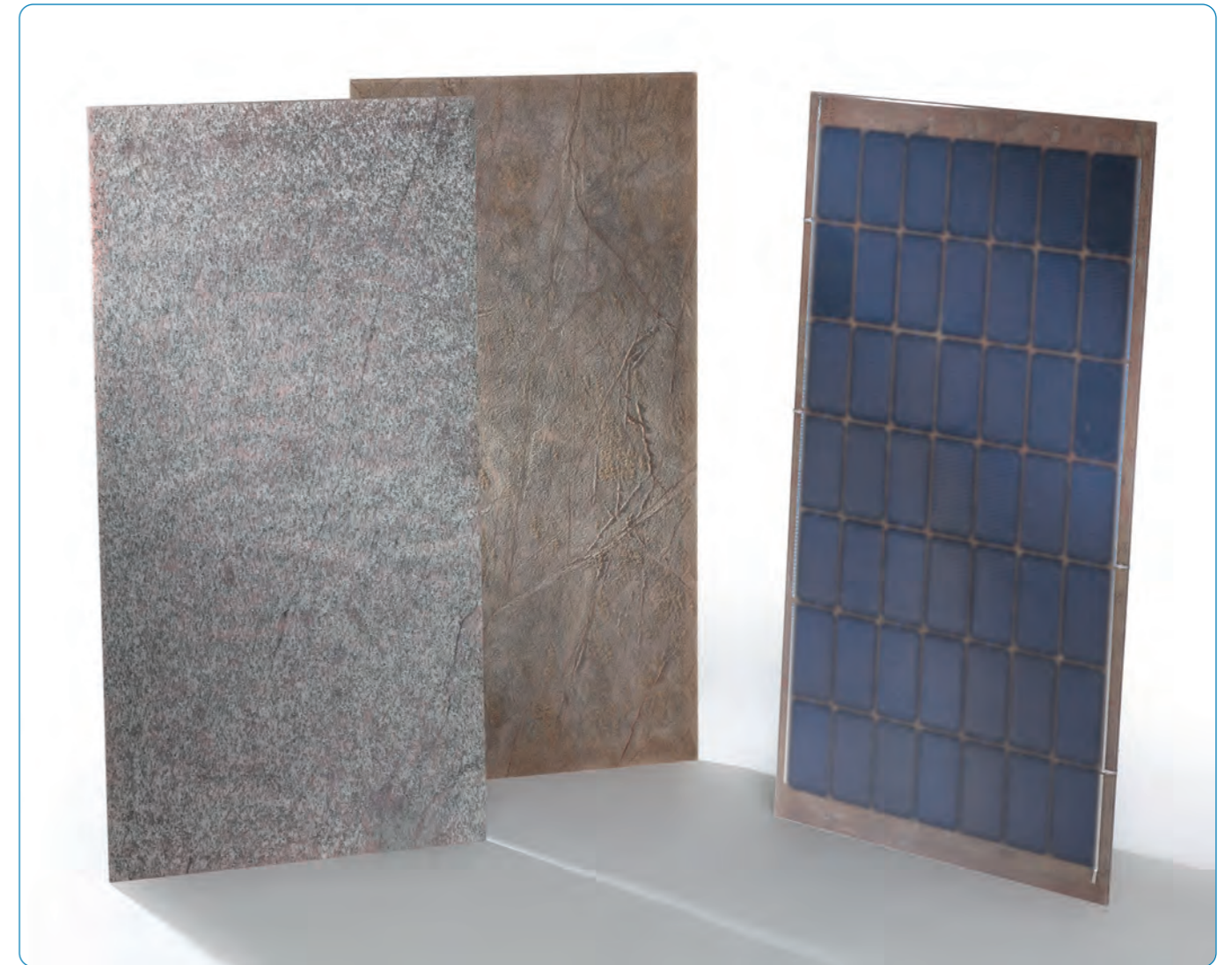
<sup>[19]</sup> ZSW-Pressemitteilung vom 17.2.2021, Photovoltaik an der Fassade und auf dem Dach macht Stromversorgung von Bürogebäuden grüner

### Photovoltaic modules with natural materials for seamless building integration

Up to now, photovoltaic (PV) systems in the building sector have mainly been installed on the existing roof surfaces without requiring a decoratively appealing integration into the building envelope. This is usually technically easy to implement, but often does not satisfy the aesthetic criteria of building owners and architects. In addition, the PV systems installed on roof surfaces of residential and/or commercial buildings cover only partially the ever-growing energy demand.

Additional energy activation of the façade can increase the coverage of the energy demand by locally generated renewable energy. A recent study shows that the potentially usable façade area in Germany is about twice as large as the usable roof area<sup>[18]</sup>. Although the yields from vertical façades are often lower than from roof systems, the generation profile of a façade system coincides particularly well with the load profile of residential and office buildings, as their orientation is particularly advantageous in the morning and evening hours and in winter<sup>[19]</sup>. On façade areas, the aesthetic demands on the PV system increase further, and photovoltaic PV modules must be integrated into the building envelope in a visually appealing way. A common approach to realize discrete modules that can be integrated into buildings is to integrate a colored layer into the laminate. Such an approach allows, for example, the mimicking of roofs with clay-colored shingles. Matching the color of the PV modules to that of the surrounding surfaces is a technique that takes advantage of the generally large distance between an observer and the PV modules. However, PV modules used as façade elements are in many cases perceived from a shorter distance and a shallow viewing angle. The smooth glass surface gives the PV modules an unnatural appearance and compromises the PV modules' unobtrusiveness. An excellent integration of photovoltaics therefore not only requires the appearance of natural building materials such as stone, brick or wood, but ideally also the same feel and surface structure.

At ISFH, photovoltaic modules are equipped with a natural stone layer for this purpose. This stone layer is thinner than 500 µm and is supported with a glass fiber-reinforced polymer backing layer. This stone layer is monolithic and is laminated to the glass front of the PV module to give the PV module the aspect of a single block of stone. This stone layer can be obtained from different types of stone. In this study, sandstone veneers, as well as mica slate veneers were used. The sandstone veneers have a porous surface with random color patterns.



Abbildung/Figure 36: PV-Module mit Natursteinoberfläche. Links: Glimmerschiefer, Vorderseite. Mitte: Sandstein, Vorderseite, rechts: Schiefer, Rückseite. PV modules with natural stone front sides. Left: mica schist, front side. Center: sandstone, front side. Right: schist, rear side.

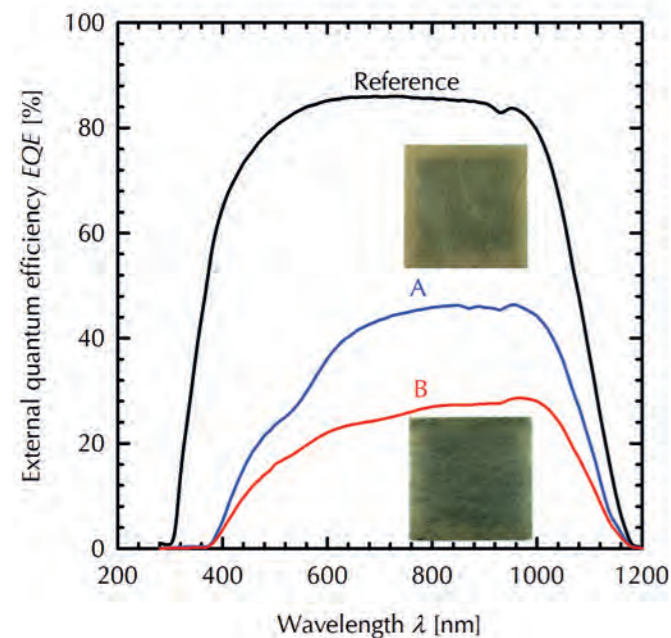
Die Glimmerschieferfurniere weisen eine glänzende Oberfläche mit einer lamellaren Struktur auf. Die Abbildung 36 zeigt verschiedene Exemplare von solchen PV-Modulen. Die Größe dieser PV-Module beträgt 120 cm x 61 cm, jedoch sind Steinurniere bis zu einer Größe von 240 cm x 120 cm erhältlich und an die Größe der PV-Module anpassbar. Diese PV-Module können idealerweise als Vorhängefassadenelemente an Stelle der herkömmlichen Verbundplatten verwendet werden. Obwohl die Steinschicht die Solarzellen und die weiteren Komponenten des PV-Moduls effizient kaschiert, bleibt die photovoltaische Effizienz eines mit Steinurnier ausgestatteten PV-Moduls höher als die Hälfte der Effizienz des herkömmlichen PV-Moduls. Die Abbildung 37 zeigt die externe Quanteneffizienz eines PV-Moduls, in dem zwischen Glas und Rückseitenfolie Heterojunction(HJT)-Solarzellen einlaminiert

The mica slate veneers have a glossy surface with a lamellar structure. Figure 36 shows different specimens of such PV modules. The size of these PV modules is 120 cm x 61 cm, but stone veneers are available up to a size of 240 cm x 120 cm and are easily cut to adapt to the PV module size. PV modules of this size can ideally be used as wall cladding elements in place of the conventional composite panels. Although the stone layer efficiently hides the solar cells and other components of the PV module, the photovoltaic efficiency of the PV modules remains higher than half of the efficiency of the blank PV module. Figure 37 shows the external quantum efficiency of heterojunction (HJT) solar cells laminated between glass and backsheet foil with a sandstone veneer or a mica slate veneer laminated to the glass front surface and a reference measurement without veneer. The



sind und auf dessen Glasvorderseite ein Sandsteinfurnier oder ein Glimmerschieferfurnier laminiert wurde. Die Abbildung enthält zudem eine Referenzmessung ohne Furnier. Die Furniere weisen einen Cut-off bei einer Wellenlänge von 380 nm auf, während die Referenz diesen Cut-off bei einer Wellenlänge von 320 nm aufweist. Zudem ist die Transparenz des Furniers über den gesamten Absorptionsbereich der Solarzelle von der Steinart, vom Farbmuster sowie von der Steinschichtdicke abhängig. Die Homogenität der Steinschichtdicke ist nur durch die Natur des Gewinnungsverfahrens der Steinfurniere begrenzt.

Diese Technik weist den Vorteil auf, dass jedes kommerzielle PV-Modul mit einer Steinschicht nach der Produktion ausgestattet werden kann. Dies ermöglicht eine maximale Flexibilität bei der projektspezifischen Anpassung des Erscheinungsbildes des PV-Moduls vor der Installation der PV-Anlage. Diese Gestaltungsflexibilität sowie die Möglichkeit, grenzenlos PV-Module in Fassaden zu integrieren, kompensieren die Leistungseinbußen. Jedoch können höhere photovoltaische Effizienzen durch weitere Optimierungen der Steinfurniere erreicht werden. Insbesondere können die Verwendung von transparenteren Polymer-Trägerschichten sowie die Homogenisierung der Dicke der Steinschicht dazu beitragen, dass mehr Licht die Solarzellen im PV-Modul erreicht.



veneers exhibit a cut-off at a wavelength of 380 nm, while the reference exhibits this cut-off at a wavelength of 320 nm. In addition, the transparency of the veneer over the entire absorption range of the solar cell depends on the stone type, the color pattern, and the stone layer thickness. The homogeneity of the stone layer thickness is limited by the nature of the stone veneer spalling process.

This technique has the advantage that any commercial PV module can be equipped with a stone layer after production. This allows maximum flexibility in customizing the appearance of the PV module for specific projects before the PV system is installed. This design flexibility, as well as the ability to integrate PV modules into façades without limits, compensates the loss of performance. However, higher photovoltaic efficiencies can be achieved by further optimizing the stone veneers. In particular, the use of more transparent polymer substrate layers, as well as the homogenization of the thickness of the stone layer, can contribute to an increased amount of light to reach the solar cells in the PV module.

Abbildung/Figure 37: Externe Quanteneffizienz (EQE) von Solarzellen hinter einer Glasscheibe (Reference) und hinter einer Glasscheibe und einem Natursteinfurnier aus Sandstein (A) und Glimmerschiefer (B) laminiert. Bilder der Vorderseiten sind als Miniatur unter und über den EQE-Kurven eingebettet.

External quantum efficiency (EQE) of solar cells laminated in a glass front sided PV module (Reference) and in a glass and natural stone veneer front sided PV module with sandstone (A) and mica schist (B). Pictures of the front sides are embedded below and above the EQE curves.

## Potenzialberechnung für Dächer und Fassaden mittels Raytracing

Um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen, ist eine erhebliche Minderung der Treibhausgasemissionen erforderlich. Hierzu wird eine Umwandlung des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energiequellen benötigt. Niedrige Stromgestehungskosten machen photovoltaische (PV) Energieerzeugung zu einer Schlüsseltechnologie bei dieser Umwandlung. Jedoch werden mit der anhaltenden Verdichtung der Wohnviertel und dem vermehrten Energieverbrauch geeignete Flächen für PV-Anlagen zunehmend knapp.

Daher sind genaue Voraussagen des Energieertrags von nachträglich angebaute PV und gebäudeintegrierter PV entscheidend bei der Auswahl der geeignetsten Standorte und bei der Beurteilung der wirtschaftlichen Durchführbarkeit. Jedoch stellt die Berechnung des Ertrags von Aufdach- und Fassaden-PV-Anlagen in städtischer Umgebung eine Herausforderung dar, da solche Anlagen oft komplexer und zeitabhängiger Verschattung des Sonnenlichts ausgesetzt sind.

Wir benutzen optische Raytracing-Simulationen, die sehr genau aber zugleich rechnerisch intensiv sind, um die Einstrahlung an solchen komplexen Standorten zu berechnen. Unsere Toolbox berechnet die diffuse und direkte Einstrahlung auf beliebige Flächen auf Grundlage öffentlich zugänglicher geographischer Daten und meteorologischer Zeitreihen. Mit diesem Ansatz können wir den Einfluss der Architektur, der Dimensionen des Gebäudes und der Vegetation auf den solaren Ertrag in solchen Umgebungen untersuchen. Wir beschleunigen unsere Berechnung, indem wir massiv-parallele Berechnung auf Grafikprozessoren durchführen. Abbildung 38 zeigt, wie unsere Raytracing-Toolbox auf einen Bereich von Hannover angewendet wird. Jede Oberfläche in Abbildung 38 ist gemäß der Summe ihrer Jahreseinstrahlung eingefärbt.

Die vorhandene Einstrahlung an der Erdoberfläche hängt von den Wetterbedingungen ab. Gemessene Globalstrahlungs- (GHI), Diffusstrahlungs- (DHI) und Direktnormalstrahlungswerte (DNI) sind mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung verfügbar. Für jede Oberfläche in der Szene berechnet unser Raytracer die Einstrahlung relativ zu den meteorologischen Daten. Die Benutzung von relativen Einstrahlungswerten entkoppelt das Raytracing von den gemessenen Einstrahlungsdaten für ein spezifisches Jahr. Dieses ist besonders nützlich, weil sich die Raytracing-Ergebnisse von einem spezifischen Jahr auf andere Jahre mit unterschiedlichen Wetterbedingungen anwenden lassen, indem die relativen Einstrahlungswerte mit den spezifischen Wetterbedingungen des Interessensjahrs multipliziert werden.

Eine andere Stärke unserer Vorgehensweise ist die Anwendung fortschrittlicher Datenstrukturen, die die geometrischen Daten für die Raytracing-Berechnung speichern. Bei einem naiven Raytracing-Ansatz muss jeder hereinkommende Strahl gegen jedes

## Calculation of potential for roofs and façades using ray tracing

In order to achieve the goals of the Paris Agreement, a significant reduction in greenhouse gas emissions is necessary. This requires a transition of the energy system towards renewable energy sources. Low levelized costs of electricity make photovoltaic (PV) energy generation a key technology in this transition. However, with the ongoing densification of residential areas and increasing energy consumption, suitable space for PV installations becomes increasingly scarce.

Thus, accurate predictions of the energy yield of building-added PV (BAPV) and building-integrated PV (BIPV) are crucial for selecting the best suited locations and for assessing the economic viability. However, calculating the yield of rooftop and façade PV installations in urban environment can be challenging. Such installations are often exposed to complex and time-dependent shadowing of sunlight.

We use optical ray tracing simulation which are very accurate but at the same time computationally intensive for calculating the insolation in such complex environments. Our toolbox calculates diffuse and direct insolation on arbitrary surfaces based on publicly available geographic data and meteorological time-series. With this approach, we can investigate the influence of architecture, building dimensions and vegetation on the solar yield in such environments. We speed up our calculations using massively parallel computation on graphics processors. Figure 38 shows our ray tracing toolbox applied to a section of Hannover. Each surface in Figure 38 is colored according to its annual sum of insolation.

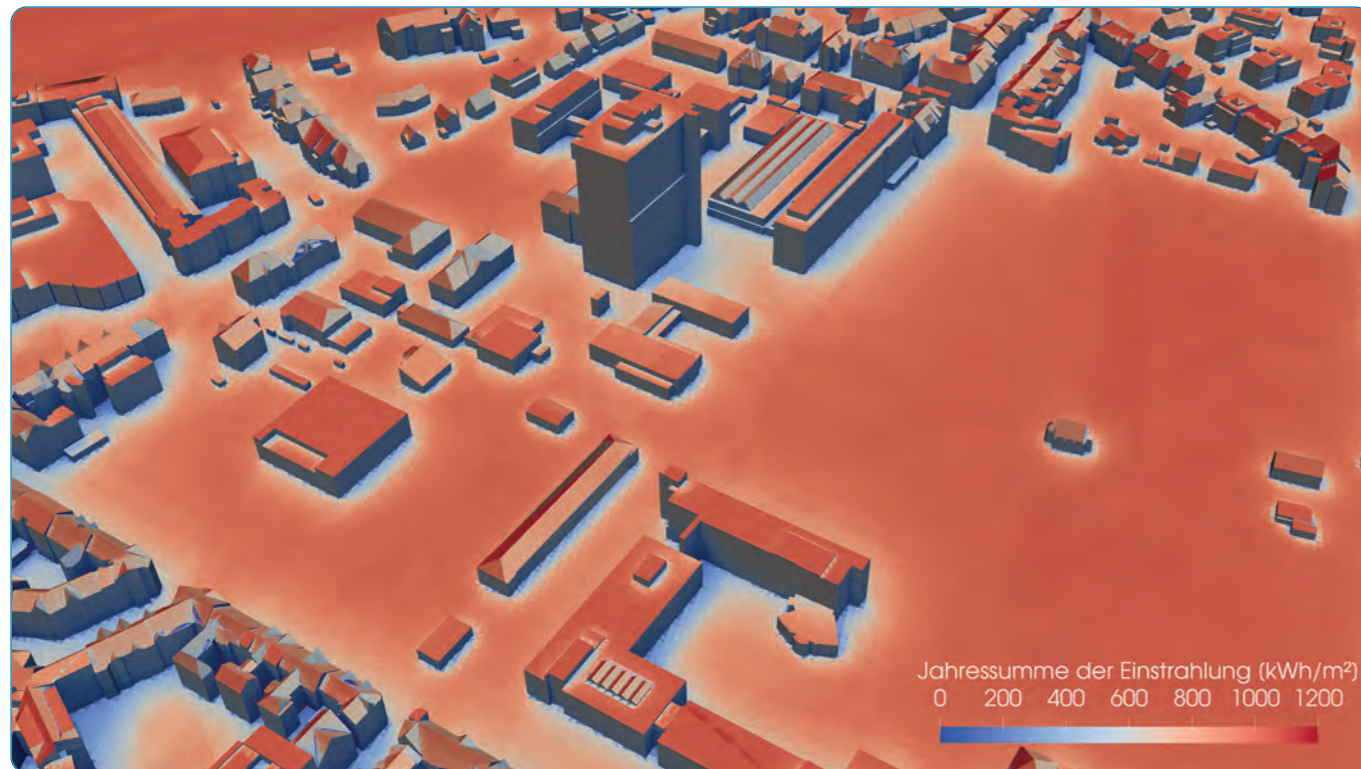
The insolation available at the surface of the earth depends on meteorological conditions. Measured values for the global horizontal irradiance (GHI), diffuse horizontal irradiance (DHI) and direct normal irradiance (DNI) are available with high temporal and spatial resolution. For each surface in the scene, our ray tracer calculates the irradiation relative to the meteorological data. The use of relative irradiation values decouples the ray tracing from measured irradiation data specific to a single year. This is particularly useful, because ray tracing results from a specific year can be applied to other years with different meteorological conditions by multiplying the relative irradiation values with the meteorological conditions specific to the year of interest.

Another strength of our approach is the use of advanced data structures which store the geometric data for the ray tracing calculation. In a naïve ray tracing approach, each incoming ray needs to be checked against each surface element in the geometry. Tracing a large number of rays in a large environment thus leads to correspondingly high calculation times. To overcome this problem, we build a hierarchy of bounding boxes. The first bounding box holds all surface elements. If a particular ray does



Oberflächenelement in der Geometrie geprüft werden. Das Verfolgen einer hohen Anzahl von Strahlen in einer großen Umgebung führt folglich zu entsprechend hohen Berechnungszeiten. Um dieses Problem zu überwinden, bauen wir eine Hierarchie von sogenannten Bounding-Boxen. Die erste Bounding-Box enthält alle Oberflächenelemente. Wenn ein einzelner Strahl diese Bounding-Box nicht trifft, kann dieser auch keine Struktur darin treffen. Wenn es einen Treffer gibt, spalten wir die anfängliche Bounding-Box in zwei Teile und prüfen den Strahl erneut gegen jede der neuentstandenen Bounding-Boxen. Dieser Vorgang wird rekursiv wiederholt, bis wir eine Bounding-Box erreichen, die nur eine vorher festgelegte Anzahl von Oberflächenelementen enthält. Mit dieser Vorgehensweise steigt die benötigte Rechenzeit nicht mehr linear sondern logarithmisch mit der Größe der Geometrie, was uns auch erlaubt, Raytracing bei sehr großen Geometrien bis hin zu ganzen Städten durchzuführen.

not hit this bounding box, it cannot hit any structure inside it. If there is a hit, we divide the initial bounding box in two and again check the ray against each of the new bounding boxes. This process is repeated recursively until we reach a bounding box which only contains a pre-defined number of single surface elements. With this approach, the computation time no longer increases linearly but logarithmically with the size of the geometry, which also allows us to ray trace very large geometries up to whole cities.



Abbildung/Figure 38: Jährliche Summe der Sonneneinstrahlung für einen Ausschnitt in der Stadt Hannover, berechnet mit unserer Raytracing-Toolbox. Der Datensatz enthält die Zeitreihen der jährlichen Sonneneinstrahlung für jedes Oberflächenelement mit einer Auflösung von einer Stunde. Quelle für die Gebäudegeometrien und des digitalen Höhenmodells: CC-BY-4.0 - Bereich Geoinformation - LH Hannover.

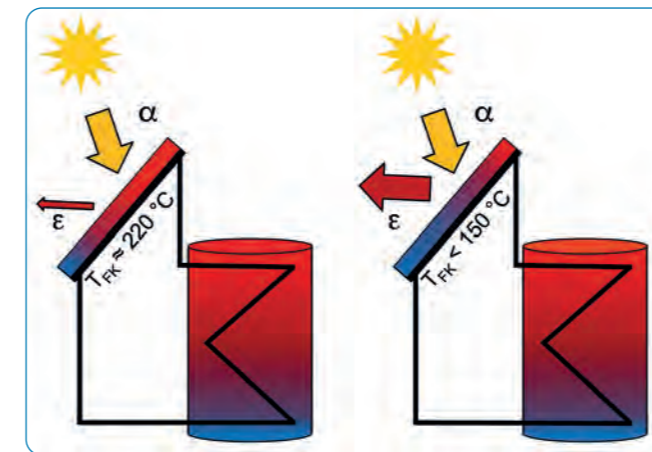
Annual sum of insolation for a section in the city of Hanover (Germany) calculated using our ray tracing toolbox. The dataset contains the time-series of annual insolation for each surface element with a one-hour resolution. Source for building geometries and digital elevation model: CC-BY-4.0 – Bereich Geoinformation – LH Hannover.

Dennis Bredemeier, Carsten Schinke, Timo Gewohn, Raphael Niepelt, Rolf Brendel

## Abteilung Solare Systeme

### Stagnationssichere Solarabsorber mit dem $\lambda/4$ -Prinzip

Die direkte Umwandlung von Solarstrahlung zu nutzbarer Wärmeenergie mit Hilfe von Solarkollektoren ist ein wichtiger Baustein der erneuerbaren Wärmeerzeugung und trägt zur Dekarbonisierung der Wärmeenergieversorgung bei. Da Solarkollektoren bereits seit vielen Jahren ein Schwerpunkt aktueller Forschung sind, ist ihre Effizienz durch die stetige Verbesserung der solaren Absorption und durch die Minimierung der Wärmeverluste schon auf einem sehr hohen Niveau angekommen. Eine hohe Solarkollektoreffizienz kann im Hochsommer jedoch auch zu einem Problem im Heizungssystem führen, denn zu dieser Jahreszeit ist der Anteil der solar gewonnenen Wärme oft viel größer als der Bedarf und die Speicherkapazität eines Hauses. Ist dann der Warmwasserspeicher voll beladen, schaltet der Solarkreislauf ab, während der Kollektor sich weiter erwärmt. In diesem sogenannten Stagnationsfall treten je nach Bauart Temperaturen von 180°C bis 220°C auf. Diese hohen Temperaturen führen zum Verdampfen des Wärmeträgerfluides und zu hohen thermischen Belastungen an den Solarkreislaufkomponenten. Damit diese Komponenten nicht beschädigt werden, sind der Einsatz verschiedener Schutzmaßnahmen und ein erhöhter Wartungsaufwand erforderlich, was zu unerwünschten Kosten bei der Systemauslegung führt.



Am ISFH wird deshalb an sogenannten stagnationssicheren Kollektoren geforscht, die sich im Stagnationsfall nicht weiter aufheizen sollen. Ein Lösungsansatz dafür, der in Zusammenarbeit mit der Viessmann Werke GmbH erforscht wird, ist der Einsatz von thermochromen Absorberbeschichtungen. Diese dünnen Schichten verändern ihre infrarot-optischen Eigenschaften in Abhängigkeit

## Solar systems department

### Stagnation-proof absorbers (coatings) with the $\lambda/4$ principle

The direct conversion of solar radiation into usable heat energy with the help of solar collectors is an important component of renewable heat generation and contributes to the decarbonization of the heat energy supply. As solar collectors have been a focus of current research for many years, their efficiency has already reached a very high level due to the continuous improvement of solar absorption and minimization of heat losses. However, high solar collector efficiency can also lead to a problem in the heating system in high summer, as at this time of year the amount of solar-generated heat is often much greater than the demand and the storage capacity of a house. If the hot water tank is then fully loaded, the solar circuit switches off while the collector continues to heat up. In this so-called stagnation event, temperatures of 180°C to 220°C occur depending on the design. These high temperatures lead to the evaporation of the heat transfer fluid and to high thermal loads on the solar circuit components. In order to prevent these components being damaged, the use of various protective devices and an increased maintenance effort are required, resulting in undesirable additional system costs.

Abbildung/Figure 39: Skizze eines solar unterstützten Heizungssystems im Stagnationsfall. Linke Skizze: Durch die konstant hohe solare Absorption  $\alpha$  und geringe Emission der Wärmestrahlung  $\epsilon$  können sich Standard-Flachkollektoren bis zu 220°C aufheizen. Rechte Skizze: Durch den Einsatz eines thermochromen Flachkollektors steigt mit zunehmender Absorbentemperatur die Emission der Wärmestrahlung an, sodass die maximale Flachkollektortemperatur ( $T_{FK}$ ) auf unter 150°C reduziert werden kann.

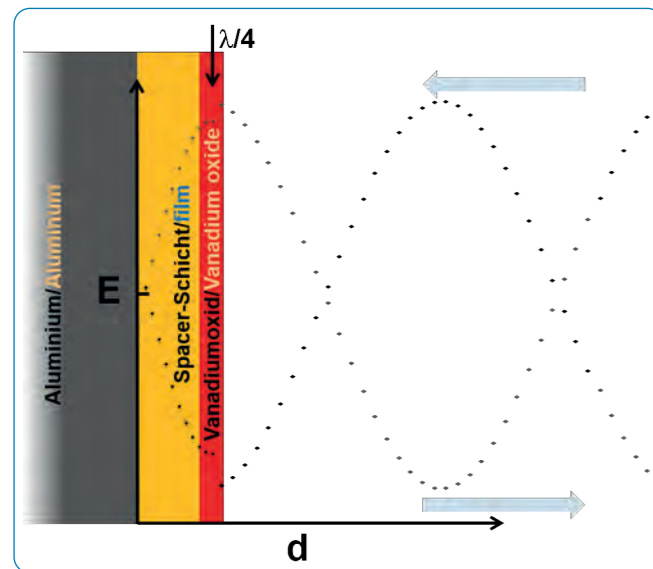
Sketch of a solar-assisted heating system during stagnation. Left sketch: Due to the constantly high solar absorption  $\alpha$  and low emission of heat radiation  $\epsilon$ , standard flat-plate collectors can heat up to 220°C. Right sketch: By using a thermochromic flat-plate collector, the emission of heat radiation rises with increasing absorber temperature, so that the maximum flat-plate collector temperature ( $T_{FK}$ ) can be reduced to below 150°C.

At the ISFH research is therefore being carried out on so-called stagnation-proof collectors, which should not heat up further in the event of stagnation. One approach to solving this problem, which is being developed in collaboration with Viessmann Werke GmbH, is the use of thermochromic absorber coatings. These thin films change their infrared optical properties depending on



von der Absorbentemperatur. Der ideale thermochrome Absorber hat bei typischen Betriebstemperaturen ein gleich gutes Absorptionsvermögen und die gleichen niedrigen Abstrahlungsverluste wie ein Standardabsorber. Erreicht der thermochrome Absorber jedoch den Überhitzungsbereich des Solarkreises, ändert die Beschichtung die Stärke ihrer Wärmeabstrahlung und gibt zusätzliche Energie an die Umgebung ab. So ist ein mit thermochromen Schichten versehener Absorber in der Lage, die maximale Stagnationstemperatur des Kollektors deutlich zu reduzieren (siehe Abbildung 39). Dieser Effekt sorgt für weniger Temperaturbelastung im Stagnationsfall, was wiederum eine weniger aufwändige und kostengünstigere Auslegung des Solarkreises ermöglicht.

Eine sehr effektive temperaturabhängige Änderung der infrarot-optischen Eigenschaften einer Absorberbeschichtung kann mit dem sogenannten  $\lambda/4$ -Prinzip erreicht werden. Das physikalische Prinzip basiert auf einem temperaturabhängigen Absorptions- und Antireflex-Mechanismus im Spektralbereich der Wärmestrahlung, deren Verteilung durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben wird. Trifft eine elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 7 \mu\text{m}$  (entspricht der Position des Maximums der Planck'schen Strahlungsverteilung für 423 K) auf ein metallisches Substrat, so bildet das elektrische Feld (E-Feld) einen Knotenpunkt im Bereich der Metalloberfläche mit einem Maximum im Abstand  $d = \lambda/4$  (siehe Abbildung 40). Da das E-Feld im Bereich eines Maximums sehr sensitiv auf Absorptionen durch freibewegliche Ladungsträger reagiert, ist dies eine sehr günstige Lage, um eine dünne Schicht eines thermochromen Materials wie Vanadiumoxid ( $\text{VO}_2$ ) zu positionieren.



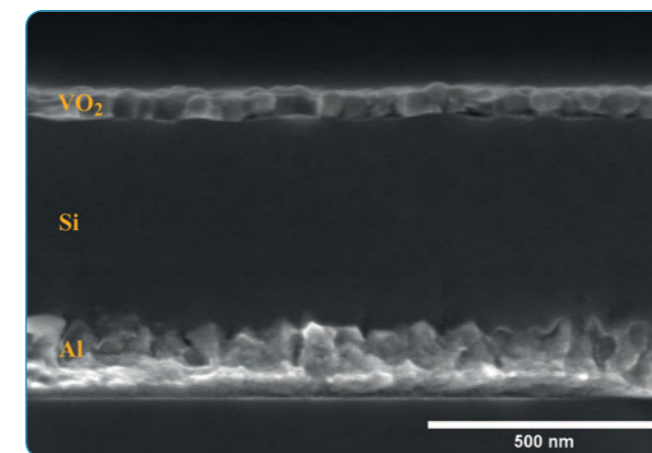
the absorber temperature. At typical operating temperatures the ideal thermochromic absorber has an equally good absorption performance and equally low radiation losses as a standard absorber. However, when the thermochromic absorber reaches the overheating range of the solar circuit, the coating changes the strength of its heat radiation and releases excess energy into the atmosphere. In this way an absorber coated with thermochromic films is able to significantly reduce the maximum stagnation temperature of the collector (see Figure 39). This effect ensures a lower temperature load in the event of stagnation, which in turn permits a less complex and more economical design of the solar circuit.

A very effective temperature-dependent change of the infrared optical properties of an absorber coating can be achieved with the so-called  $\lambda/4$  principle. The physical principle is based on a temperature-dependent absorption and anti-reflection mechanism in the spectral range of thermal radiation, the distribution of which is described by Planck's radiation law. For example, if an electromagnetic wave with a wavelength of  $\lambda = 7 \mu\text{m}$  (corresponding to the position of the maximum of Planck's radiation distribution for 423 K) hits a metallic substrate, the electrical field (E-field) forms a node in the region of the metal surface with a maximum at a distance  $d = \lambda/4$  (see Figure 40). As the E-field in the vicinity of a maximum reacts very sensitively to absorption by free-moving charge carriers, this is a very suitable position to apply a thin film of a thermochromic material such as vanadium oxide ( $\text{VO}_2$ ).

Abbildung/Figure 40: Skizze zur Veranschaulichung des  $\lambda/4$ -Absorberkonzeptes. Eine dünne thermochrome  $\text{VO}_2$ -Schicht befindet sich im Maximum des elektrischen Feldes einer elektromagnetischen Welle, die von einem Metallsubstrat reflektiert wird. Eine infrarot-transparente Spacer-Schicht mit einer optischen Dicke von  $\lambda/4$  sorgt dabei für den richtigen Abstand zum Metallsubstrat.

Sketch to illustrate the  $\lambda/4$  absorber concept. A thin thermochromic  $\text{VO}_2$  film is positioned at the maximum of the electrical field of an electromagnetic wave reflected from a metal substrate. An infrared-transparent spacer film with an optical thickness of  $\lambda/4$  ensures the correct distance from the metal substrate.

Dieses Material besitzt im kalten Zustand ( $25^\circ\text{C}$ ) sehr wenige frei bewegliche Ladungsträger und ist im infraroten Spektralbereich fast transparent. Deswegen kann in diesem Zustand ein hoher spektraler Reflexionsgrad bzw. ein niedriger Emissionsgrad durch die spiegelnde Metalloberfläche erreicht werden. Im heißen Zustand (über  $70^\circ\text{C}$ ) liegen im  $\text{VO}_2$  sehr viele frei bewegliche Ladungsträger vor, die zu einer erhöhten Absorption von Infrarot-Strahlung führen. Gleichzeitig wird durch die nun semi-transparente Schicht eine Antireflexwirkung erzeugt, die durch den Gangunterschied von  $\lambda/2$  der beiden von Substrat- und Schichtoberfläche reflektierten Strahlen zu einer destruktiven Interferenz führt und somit eine gewünscht niedrige spektrale Reflektivität bzw. hohe Emissivität im infraroten Spektralbereich bewirkt. Damit die thermochrome Schicht den richtigen Abstand zum Substrat einnimmt, ist es nötig, eine sogenannte Spacer-Schicht darunter zu platzieren, die eine hohe Transparenz im infraroten Spektralbereich besitzt.



This material has very few free-moving charge carriers in the cold state ( $25^\circ\text{C}$ ) and is almost transparent in the infrared spectral range. Therefore high spectral reflectance or low emissivity levels can be achieved through the reflective metal surface. In the hot state (above  $70^\circ\text{C}$ ), a large number of free-moving charge carriers are present in the  $\text{VO}_2$ , resulting in an enhanced absorption of infrared radiation. At the same time the now semi-transparent film generates an anti-reflection effect that leads to destructive interference due to the different  $\lambda/2$  path of the two beams reflected from the substrate and film surfaces resulting in desirably low spectral reflectivity or high emissivity respectively in the infrared spectral range. In order to ensure that the thermochromic film is at the correct distance from the substrate, it is necessary to place a so-called spacer film underneath it, which has a high transparency in the infrared spectral range.

Abbildung/Figure 41: Elektronenmikroskopische Aufnahme vom Schichtaufbau eines thermochromen  $\lambda/4$ -Absorbers auf einem Si-Substrat. Aktiver Bestandteil ist hierbei eine 51 nm dicke thermochrome  $\text{VO}_2$ -Schicht, die sich auf einer 450 nm dicken Si-Spacer-Schicht befindet. Unterhalb dieser Schichten befindet sich zusätzlich eine 150 nm dicke Al-Schicht, die als Infrarot-Reflektor dient.

Electron micrograph of the film structure of a thermochromic  $\lambda/4$  absorber on a Si substrate. The active component is a thermochromic  $\text{VO}_2$  film with a thickness of 51 nm, which is located on a Si spacer film with a thickness of 450 nm. Below these layers is an additional 150 nm Al film, which is used as an infrared reflector.

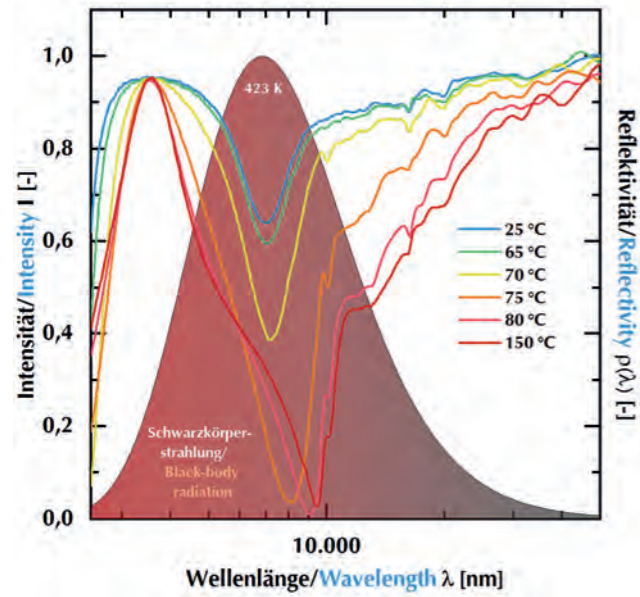
Die Herstellung des thermochromen  $\lambda/4$ -Solarabsorbers erfolgt mit Hilfe eines industrienahe Magnetron-Sputterprozesses, bei dem zunächst eine etwa 450 nm dünne Silizium-Schicht auf einem Aluminium-Substrat abgeschieden wird, gefolgt von einer etwa 30 nm dünnen metallischen Vanadium-Schicht, die im Anschluss in einem Bandofen zu  $\text{VO}_2$  oxidiert wird (Abbildung 41).

Der temperaturabhängige Verlauf der Reflektivität  $\rho(\lambda)$  des Solarabsorbers ist in Abbildung 42 dargestellt. Im kalten Zustand (blaue Reflexionskurve) ist eine hohe Reflektivität im Bereich der Wärmestrahlung (2 500 nm bis 50 000 nm) zu erkennen. Steigt die Temperatur des Absorbers auf  $150^\circ\text{C}$  an (rote Kurve), so ist eine deutliche Reduktion der Reflektivität im Minimum bei  $7 \mu\text{m}$  von  $\rho(25^\circ\text{C}, 7 \mu\text{m}) = 63,9\%$  auf  $\rho(150^\circ\text{C}, 7 \mu\text{m}) = 2,6\%$  zu erkennen, was einer Änderung von  $\Delta\rho(7 \mu\text{m}) = 61,3\%$  entspricht. Diese Änderung der Reflektivität spiegelt sich ebenfalls im temperaturabhängigen Verlauf der Emissivität  $\epsilon$  der Wärmestrahlung wider (Abbildung 43). Insgesamt kann eine reversible Änderung der Emissivität um  $\Delta\epsilon = 42,9\%$  im Temperaturbereich zwischen  $25^\circ\text{C}$

The thermochromic  $\lambda/4$  solar absorber is produced by using an industrially relevant magnetron sputtering process, in which an approximately 450-nm-thick silicon film is first deposited on an aluminum substrate, followed by an about 30-nm-thick metallic vanadium film, which is afterwards oxidized into  $\text{VO}_2$  in a belt furnace (Figure 41).

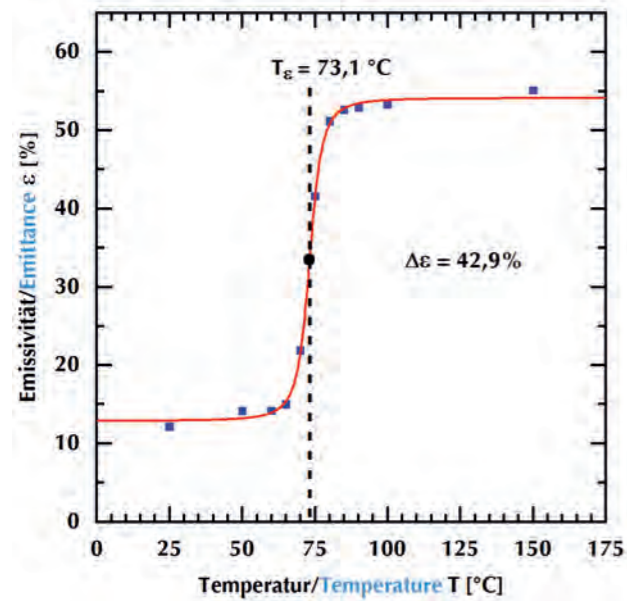
The temperature-dependent curve of the reflectivity  $\rho(\lambda)$  of the solar absorber is shown in Figure 42. In the cold state (blue reflectivity curve), a high reflectivity can be seen in the thermal radiation range (2 500 nm to 50 000 nm). When the temperature of the absorber increases to  $150^\circ\text{C}$  (red curve), a significant reduction in the minimum of the reflectivity at  $7 \mu\text{m}$  is seen from  $\rho(25^\circ\text{C}, 7 \mu\text{m}) = 63.9\%$  to  $\rho(150^\circ\text{C}, 7 \mu\text{m}) = 2.6\%$ , corresponding to a change of  $\Delta\rho(7 \mu\text{m}) = 61.3\%$ . This change in reflectivity is also reflected in the temperature-dependent behavior of the emissivity  $\epsilon$  of the thermal radiation (Figure 43). Overall a reversible change in emissivity of  $\Delta\epsilon = 42.9\%$  in the temperature range between  $25^\circ\text{C}$  and  $150^\circ\text{C}$  can be observed. This change in emissivity using  $\lambda/4$





Abbildung/Figure 42: Temperaturabhängige Reflexionsspektren von einem  $\lambda/4$ -Solarabsorber in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  im infraroten Spektralbereich der Schwarzkörperstrahlung zwischen 2500nm und 50000nm. Im kalten Zustand (-) besitzt der Absorber eine hohe Reflexivität und dementsprechend eine niedrige Emissivität der Wärmestrahlung. Umgekehrt ist es im heißen Zustand (+), denn hier liegt eine sehr niedrige Reflexivität im infraroten Spektralbereich bei etwa 9000nm vor, sodass eine hohe Emissivität erreicht wird. Die Reflexivität im solaren Spektralbereich zeigt hingegen nur eine schwache Temperaturabhängigkeit.

Temperature-dependent reflectance spectra from a  $\lambda/4$  solar absorber as a function of wavelength  $\lambda$  in the infrared spectral range of blackbody radiation between 2500nm and 50000nm. In the cold state (-), the absorber has a high reflectivity and, consequently, a low emissivity of thermal radiation. The opposite is the case for the hot state (+), because here there is a very low reflectivity in the infrared spectral range at about 9000 nm, so that a high emissivity is achieved. The reflectivity in the solar spectral range, on the other hand, exhibits only a slight temperature dependence.

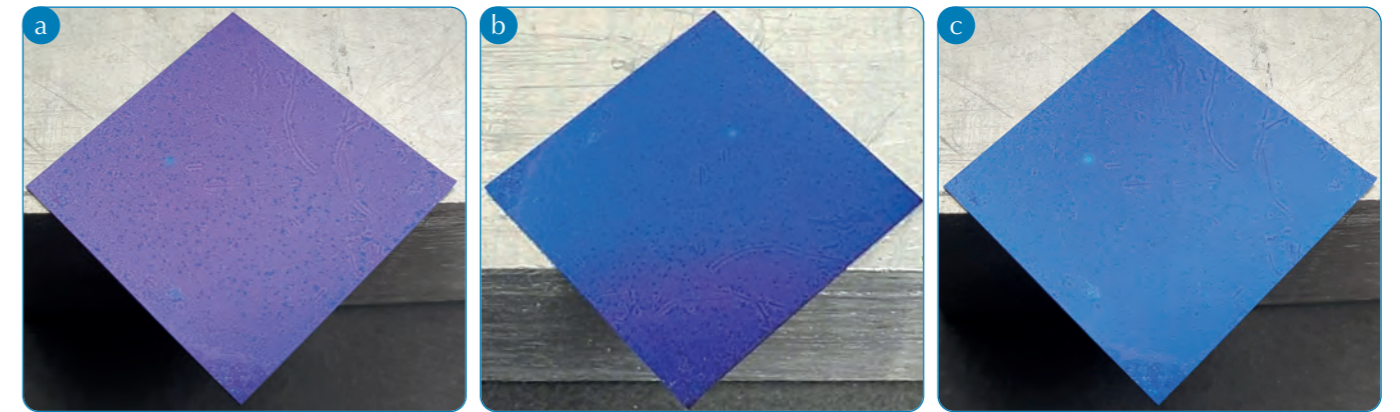


Abbildung/Figure 43: Temperaturabhängiger Verlauf der Emissivität  $\epsilon$  berechnet aus den Reflexionsspektren aus Abbildung 42. Es ist ein sprunghafter Anstieg der Emissivität bei einer Temperatur von 73,1 °C von  $\epsilon(25\text{ °C}) = 12,2\%$  auf  $\epsilon(150\text{ °C}) = 55,1\%$  zu erkennen, was einer Änderung von  $\Delta\epsilon = 42,9\%$  entspricht.

Temperature-dependence of the emissivity  $\epsilon$  calculated from the reflection spectra from Figure 42. There is an abrupt increase in emissivity at a temperature of 73.1 °C from  $\epsilon(25\text{ °C}) = 12.2\%$  to  $\epsilon(150\text{ °C}) = 55.1\%$ , which corresponds to a change of  $\Delta\epsilon = 42.9\%$ .

und 150 °C beobachtet werden. Diese Änderung der Emissivität liegt bei Einsatz der  $\lambda/4$ -Geometrie um etwa 8% höher als bei bisher verwendeten thermochromen Absorbern ohne Spacer-Schicht, sodass die Temperaturbelastungen für den Solarkollektor weiter reduziert werden könnten. In einem nächsten Entwicklungsschritt sollen zusätzlich aufgetragene Schichten z. B. aus Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) und Magnesiumfluorid ( $\text{MgF}_2$ ) für eine verbesserte solare Absorption sorgen.

geometry is about 8% higher than with the thermochromic absorbers without the spacer film used previously, so the temperature loads for the solar collector could be further reduced. In a further development step, additionally deposited film, e.g. of silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) and magnesium fluoride ( $\text{MgF}_2$ ) could provide enhanced solar absorption.



Abbildung/Figure 44: Fotoaufnahmen eines thermochromen  $\lambda/4$ -Absorbers, der auf der Kante eines kalten Aluminiumblocks liegt: a) Absorber im heißen Zustand (ganzflächig dunkelviolet), b) während des Abkühlprozesses im Moment des Farbumschlags (uneinheitliche Farbe) und c) im kalten Zustand nach dem Abkühlprozess (ganzflächig hellblau).

Photographs of a thermochromic  $\lambda/4$  absorber placed on the edge of a cold aluminum block: a) absorber in the hot state (whole surface dark purple), b) during the cooling process at the moment of color change (inconsistent color) and c) in the cold state after the cooling process (whole surface light blue).

Der thermochrome Effekt eines sich abkühlenden  $\lambda/4$ -Absorbers lässt sich mit dem bloßen Auge durch einen Farbumschlag von dunkelviolet zu hellblau beobachten (Abbildung 44).

The thermochromic effect of a cooling  $\lambda/4$  absorber is visible to the naked eye due to a color change from dark purple to light blue (Figure 44).

Wir danken dem BMWK für die Förderung des Verbundprojekts „ProTASK“ (FZ 0325858) und unserem Projektpartner Viessmann Werke GmbH für die gute Zusammenarbeit.

We thank the BMWK for sponsoring the „ProTASK“ joint project (FZ 0325858) and our project partner Viessmann Werke GmbH for their good collaboration.



## Solarthermische Aktivierung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden als Quelle für wärme-pumpenbasierte Versorgungssysteme

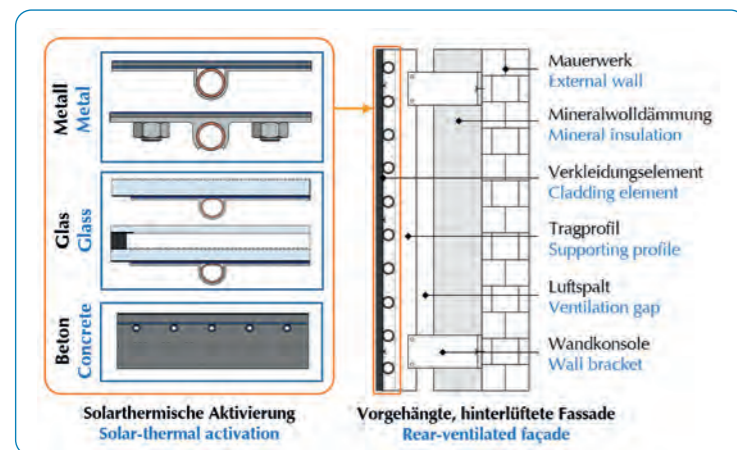
## Solar-thermal activation of rear-ventilated façades as a source for heat-pump-based heat supply systems

Die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudesektor erfordert einen erheblichen Ausbau der erneuerbaren Energien sowohl im Bestand als auch bei Neubauten. Die Kombination aus Solarthermie und Wärmepumpe kann dabei einen entscheidenden Beitrag für eine klimaneutrale Wärmeversorgung leisten. Während sich beide Technologien im Bereich der Einfamilienhäuser etablieren konnten, mangelt es im Geschosswohnungsbau an wirtschaftlichen und architektonisch attraktiven Lösungen. Bei Wärmepumpen sind dabei häufig die Geräuschentwicklung von Luft-Wasser-Wärmepumpen oder der Platzmangel für geeignete Wärmequellen für erdreichgekoppelte Wärmepumpen ein Ausschlusskriterium. Bei der Solarthermie sind der begrenzte Platz für Solarkollektoren, zu hohe Kosten oder eine technisch aufwändige Umsetzung häufige Umsetzungs Hindernisse.

The reduction of CO<sub>2</sub> emissions in the building sector requires a considerable build-up of renewable energies, both in existing buildings and in new ones. The combination of solar thermal energy and heat pumps can decisively contribute to a climate-neutral heat supply. While both technologies have established themselves in the area of single-family house, there is a lack of economical and architecturally attractive solutions for multi-story apartment housings. In the case of heat pumps, the noise generated by air-to-water heat pumps or the lack of space for suitable heat sources for ground-source heat pumps are often exclusion criterias. In the case of solar thermal energy, the limited space for solar collectors, too high costs or a technically complex implementation are frequent obstacles to implementation.

Fassadenintegrierte Solarthermie bietet ein bislang ungenutztes Potenzial, um neue, optisch ansprechende Lösungen in Mehrfamilienhäusern umzusetzen. Vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) eignen sich aufgrund ihrer bauphysikalischen Vorteile, ihrer Modularität und der Vielzahl an einsetzbaren Fassadenmaterialien besonders für die solarthermische Aktivierung. Der Luftspalt zwischen Fassadenbekleidung und Gebäudedämmung bietet zudem genügend Raum für die unsichtbare Installation von Systemtechnik. Im BMWK-geförderten Forschungsprojekt „Solar-VHF“ werden unterschiedliche Konzepte für thermisch aktivierte VHF umgesetzt und das energetische Potenzial der Fassaden als alternative oder zusätzliche Quelle in Wärmepumpenbasierten Wärmeversorgungssystemen untersucht.

Façade-integrated solar thermal systems offer a previously unexploited potential for implementing new, visually appealing solutions in multi-family houses. Rear-ventilated façades (RVF; in German: vorgehängte hinterlüftete Fassade - VHF) are particularly suitable for solar thermal activation due to their advantages in terms of building physics, their modularity and the large number of façade materials that can be used. The air gap between the façade cladding and the building insulation also offers sufficient space for the invisible installation of system technology. In the BMWK-funded research project "Solar-VHF", different concepts for thermally activated RVFs are being implemented and the energy potential of the façades as an alternative or additional source in heat pump-based heat supply systems is studied.



Abbildung/Figure 45: Unterschiedliche Konzepte für die solarthermische Aktivierung von vorgehängten, hinterlüfteten Fassaden mit Bekleidungs-materialien aus Metall, Glas und Beton.  
Different concepts for the solar-thermal activation of rear-ventilated façades with cladding materials out of metal, glass and concrete.



Abbildung/Figure 46: ISFH-Fassadenteststand. Links: solarthermisch-aktive Isolierglas-Fassade (aktivierte Fassadenfläche 22 m<sup>2</sup>). Rechts: solarthermisch-aktive Metall-Fassade (aktivierte Fassadenfläche 26 m<sup>2</sup>)

ISFH façade test wall. Left: Solar-thermally active insulation glass façade (activated façade area 22 m<sup>2</sup>). Right: Solar-thermally active metal façade (active façade area 26 m<sup>2</sup>)

Betrachtet werden dafür nach dem Schema in Abbildung 45 aufgebaute VHF mit Verkleidungselementen aus Metall, Glas und Beton. Die solarthermische Aktivierung erfolgt durch eine Nutzung der Fassadenelemente als Solarabsorber, während die entstehende Wärme über integrierte Wärmeübertrager abgeführt wird. Ein wesentlicher Ansatz ist dabei, keine grundsätzlichen konstruktiven Änderungen an den bestehenden Fassadensystemen der Projektpartner vorzunehmen, um bereits auf dem Markt erhältliche Komponenten zur Aktivierung verwenden zu können. Für die Metallfassade werden dafür die Bekleidungs-elemente aus Aluminium rückseitig mit Flächenwärmetauschern ausgestattet, wobei verschiedene Wärmetauscher-Konzepte und Verbindungstechniken untersucht werden. Bei der Glasfassade werden ebenfalls Wärmeübertrager auf der Rückseite von emaillierten Glasscheiben appliziert. Der Fokus liegt auf der Verwendung von Einfach- und Zweifach-Verglasungen mit einer niedrig-emittierenden Beschichtung (Low-E), um auch Wärme auf einem höheren Temperaturniveau zu erzeugen und damit eine direkte Trinkwassererwärmung zu ermöglichen. Für die Aktivierung der Betonfassade werden Kapillarrohmatten aus Polypropylen direkt in die Bekleidungs-elemente aus Faserzement eingebettet.

For this purpose, rear-ventilated façades with cladding elements made of metal, glass and concrete are considered according to the scheme in Figure 45. The solar-thermal activation is achieved by using the cladding elements as solar absorbers, while the generated heat is dissipated with the help of integrated heat exchangers. A key development approach for the activation is to make minimal design changes to the project partners' existing façade systems in order to be able to use components that are already available on the market. For the metal façade, heat exchangers are being equipped on the rear side of the cladding elements made out of aluminium, while different heat exchanger geometries and application techniques are being investigated. In case of the glass façade heat exchangers are also applied to the rear side of enamelled glass panels. Here, the focus lies on the use of single glazing as well as insulation glasses with a low-emitting layer, to be able to generate heat at a higher temperature level and enable a direct domestic hot water heating. For the activation of the concrete façade, capillary tube mats made out of polypropylene are embedded directly into the cladding elements made out of fiber cement.



Typ/Type	0 [-]	a1 bzw. b1 [W/(m <sup>2</sup> K)]	a2 [W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	b2 [J/m <sup>3</sup> K]	b <sub>u</sub> [s/m]
Glasfassade (unabgedeckt), ISFH, Feld, Outdoor Glass façade (unglazed), ISFH, array, outdoor	0,774	9,33	-	3,74	0,029
Isolierglas-Fassade, ISFH, Modul, Simulator 90° Insulation glass façade, ISFH, module, simulator 90°	0,56	3,48	0,010	-	-
Metallfassade, ISFH, Feld, Outdoor Metal façade, ISFH, array, outdoor	0,60	11,24	-	0,84	0,024
Metallfassade, ISFH, Modul, Simulator 90° Metal façade, ISFH, module, simulator 90°	0,56	9,86	-	1,22	0,069
Betonfassade, Fraunhofer IBP, Modul, Outdoor Concrete façade, Fraunhofer IBP, module outdoor	0,40	11,30	-	4,04	0,052

Tabelle/Table 2: Kollektorparameter der gemessenen solarthermisch-aktiven VHF nach stationärer Leistungsmessung in Anlehnung an die DIN EN ISO 9806 für unabgedeckte Kollektoren ( $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_u$ ) und abgedeckte Kollektoren ( $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ).

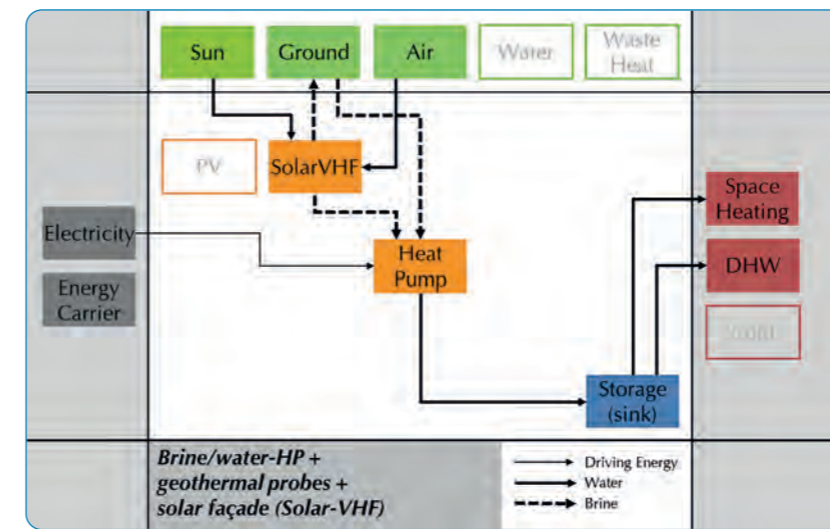
Für einen Vergleich der verschiedenen Fassadenkollektorkonzepte haben wir Laboruntersuchungen an verschiedenen Fassaden-Prototypen mit einer theoretischen Analyse des Wärmetransports mit Hilfe von Finite-Elemente-Methoden(FEM)-Simulationen kombiniert. Zusätzlich wurden für praxisnahe experimentelle Untersuchungen am ISFH zwei großflächige solarthermisch aktive VHF an einer Testwand installiert (Abbildung 46). Fassade A besteht dabei aus 10 Aluminiumpaneelen im Format 2 250 × 1 166 mm<sup>2</sup> (aktivierte Gesamtfläche ca. 26 m<sup>2</sup>) mit einer anthrazitfarbenen Beschichtung (RAL 7016, Absorptionsgrad 92%). Als Wärmeübertrager kommen mäanderförmige Kupferrohrregister, die mit Klemmprofilen über eine Verbindung mit Schweißbolzen an den Fassadenelementen angebracht wurden, zum Einsatz. Fassade B besteht aus 8 schwarz-emaillierten (RAL 9005, Absorptionsgrad 94%) Isolierglas-Modulen im Format 2 500 × 1 100 mm<sup>2</sup> (aktivierte Gesamtfläche ca. 22 m<sup>2</sup>). Die Wärmetauscher wurden über Wärmeleitbleche und eine temperaturbeständige Klebstoffschicht auf die Gläser appliziert. Um den Wärmetransport durch den gesamten Wandaufbau realistisch abbilden zu können, ist die Rückseite der Testwand mit einer elektrischen Flächenheizung ausgestattet, mit der sich die Innenraumtemperatur eines Gebäudes emulieren lässt.

In einem ersten Schritt wurden thermische Leistungsmessungen in Anlehnung an die Kollektorprüfnorm DIN EN ISO 9806 – sowohl an Einzelmodulen im Sonnensimulator als auch Outdoor an großflächigen Fassaden – durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die dabei ermittelten solarthermischen Kennwerte für eine Auswahl an untersuchten Fassadentypen. Die Parameter dienen der Bewertung der Leistungsfähigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Solarkollektoren und als Input für die Durchführung von Systemsimulationen.

Measured collector parameters of the solar-thermally active rear-ventilated façades after steady-state performance measurements based on DIN EN ISO 9806 for unglazed collectors ( $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_u$ ) and glazed collectors ( $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ).

For a comparison of the different façade collector concepts, laboratory tests on various prototypes and a theoretical analysis of the heat transfer using finite element method (FEM) simulations were combined. Additionally, two large-area solar-thermally active RVF were installed on a test wall for practical experimental investigations at ISFH (Figure 46). Façade A consists of 10 aluminum panels with an anthracite coating (RAL 7016, solar absorptance 92%) in the format 2 250 × 1 166 mm<sup>2</sup> (total active façade area 26 m<sup>2</sup>). Meander-shaped copper pipe registers, which were attached to the façade elements with clamping profiles via a connection with welding studs, are used as heat exchangers. Façade B consists of 8 black enameled (RAL 9005, solar absorptance 94%) insulation glass modules in the format 2 500 × 1 100 mm<sup>2</sup> (total active façade area 22 m<sup>2</sup>). The heat exchangers were applied to the glasses via heat conducting plates and a temperature-resistant adhesive layer. In order to be able to realistically reproduce the heat transport through the entire wall structure, the back of the test wall is equipped with an electric panel heating system that can be used to emulate the interior temperature of a building.

In a first step, thermal performance measurements were carried out in accordance with the collector test standard DIN EN ISO 9806 on single façade modules in the ISFH sun simulator as well as outdoor on large-scale façades. Table 2 shows the determined collector parameters for a selection of investigated façade types. The parameters are used to evaluate the performance in comparison to conventional solar collectors and as input for the of system simulations.



Abbildung/Figure 47: Schematische Darstellung der Energieflüsse des betrachteten Wärmeversorgungssystems (Grün: Umweltenergie, Orange: Energieumwandlung, Blau: thermische Speicher, Rot: Nutzenergie). Schematic of energy flows in the investigated heat supply system (green: environmental energy, orange: energy conversion, blue: thermal energy storage, red: useful energy).

Um das Verhalten der untersuchten Fassaden-Typen in dem Wärmeversorgungssystem eines Mehrfamilienhauses bewerten zu können, wurden Systemsimulationen mit der Software TRNSYS durchgeführt. Das simulierte Mehrfamilienhaus besteht aus vier Etagen mit jeweils zwei Wohnungen mit einer Wohnfläche von 84 m<sup>2</sup>. Der Energiebedarf zur Erwärmung des Gebäudes und des Trinkwarmwassers beläuft sich auf ca. 34 MWh/a (entspricht 50 kWh/(m<sup>2</sup>a)). Das simulierte Wärmeversorgungssystem besteht aus einer modulierenden Sole-Wasser-Wärmepumpe, der solaraktiven Fassade, einem Erdwärmesondenfeld (verbunden über eine hydraulische Weiche), einem zentralen 1 000-l-Pufferspeicher sowie Wohnungsstationen, die eine hygienische elektrische dezentrale Nacherwärmung des Trinkwarmwassers ermöglichen.

Die Sole-Wasser-Wärmepumpe belädt den Pufferspeicher, sodass eine Vorlauftemperatur von 35 °C an den Wohnungsstationen verfügbar ist. Dabei nutzt sie sowohl die Fassade als auch das Sondenfeld als Wärmequelle. Die Fassade arbeitet dabei je nach Betriebsbedingung als Solarkollektor oder als Umweltwärmetauscher. Zusätzlich ermöglicht die Fassade die Regeneration des Erdreiches. Dadurch wird eine Reduktion der Größe des Sondenfeldes ermöglicht. Die Fassade wird in der TRNSYS-Simulation über den TRNSYS-Type 832 abgebildet und nutzt die Kollektorparameter aus Tabelle 2.

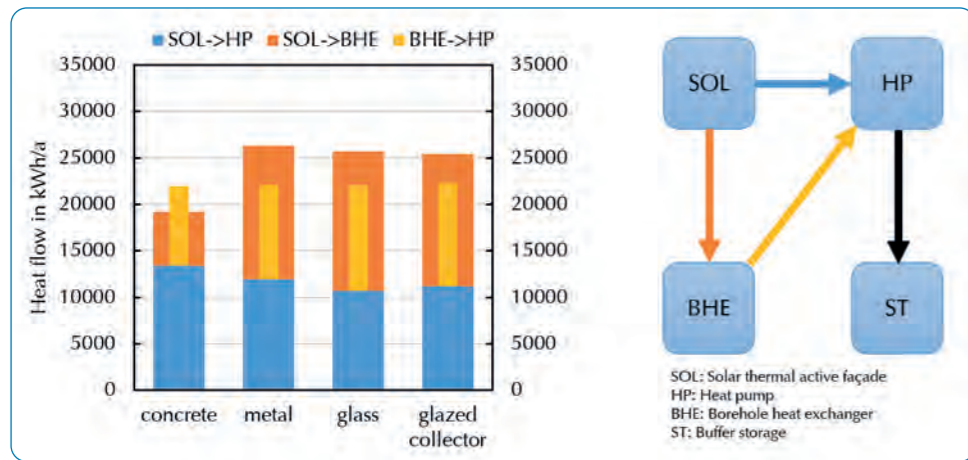
Abbildung 47 zeigt die Wärmeflüsse zwischen der Solarfassade, der Wärmepumpe und dem Erdwärmesondenfeld als Ergebnis der Systemsimulation für ein Gebäude mit einer aktivierten Fassadenfläche von 94 m<sup>2</sup> (48 m<sup>2</sup> Südfassade, 33 m<sup>2</sup> Ostfassade, 13 m<sup>2</sup> Westfassade). Für die Regelung wurde für diesen Vergleich eine minimale Eintrittstemperatur in die Fassade von -1 °C zugelassen. Die Abbildung 48 zeigt die jährlichen Wärmeflüsse im System mit einer Betonfassade, einer Metallfassade, einer unabgedeckten Glasfassade, oder, als Referenzfall, mit einem konventionellen Flachkollektorfeld im Vergleich. Die Ergebnisse zeigen, dass die aktiven Fassaden sowie das Kollektorfeld ca. 50% des Wärmebedarfs der

In order evaluate the behavior of the investigated façade types in the heat supply system of a multi-family house, system simulations using the TRNSYS software were carried out. The simulated multi-family house consists of four floors, each with two apartments with a living area of 84 m<sup>2</sup>. The energy demand for space heating and domestic hot water preparation of the building is about 34 MWh/a (50 kWh/(m<sup>2</sup>a)). The simulated heat supply system consists of a modulating brine-to-water heat pump, the solar-thermally active façade, borehole heat exchangers (connected via a hydraulic separator), a centralized 1 000l buffer storage tank as well as dwelling stations that enable hygienic electrical decentralized reheating of the domestic hot water.

The brine-to-water heat pump loads the buffer storage so that a supply temperature of 35 °C is available at the dwelling stations. It uses the façade as well as the borehole array as a heat source. Depending on the operation conditions, the façade works as a solar collector or as an environmental heat exchanger. Additionally, the façade enables the regeneration of the ground. Therefore a reduction of the size of the borehole array can be achieved. The solar-active façade is modelled using the TRNSYS Type 832 and uses the collector parameters from Table 2.

Figure 47 shows the heat flows between the solar façade, the heat pump and the borehole field as results of the system simulations for a building with an activated façade area of 94 m<sup>2</sup> (48 m<sup>2</sup> south façade, 33 m<sup>2</sup> east façade, 13 m<sup>2</sup> west façade). For the temperature control, a minimum inlet temperature into the façade of -1 °C was set here as an example. Figure 48 compares the annual heat flows in the system for a concrete façade, a metal façade, an unglazed glass façade and, as a reference, a conventional flat plate collector array. The results show that the active façades can provide about 50% of the heat demand of the heat pump. Due to the limitation of the heat pump evaporator temperature, the provided heat slightly decreases for façades with a higher efficiency (glass- and metal façade) compared to the concrete façade. For these façades





Abbildung/Figure 48: Ergebnisse der TRNSYS-Systemsimulationen: Jährlicher Wärmefluss zwischen der Wärmepumpe, der solaraktiven Fassade und dem Erdwärmesondenfeld für verschiedene Fassadentypen. Vergleich zwischen Betonfassade, Metallfassade, unabgedeckter Glasfassade und konventionellem Flachkollektorfeld.

Wärmepumpe decken können. Aufgrund der Begrenzung der Verdampfer Temperatur der Wärmepumpe sinkt der Anteil der zur Verfügung gestellten Wärme bei Fassaden mit höherer Leistungsfähigkeit (Glas- und Metallfassade) im Vergleich zur Betonfassade leicht. Stattdessen wird durch diese Fassaden ein deutlich höherer Anteil der aus dem Erdreich entzogenen Wärme regeneriert. Während sich mit der Betonfassade etwa 70% der entzogenen Erdwärme regenerieren lässt, erreichen die Glas- und Metallfassade eine Regeneration von über 100%. Die Glas- und Metallfassade stellen dem System damit ähnliche Wärmemengen zur Verfügung wie das konventionelle Kollektorfeld. Die Entlastung und Regeneration der Erdwärmequelle durch die Fassade ermöglichen im betrachteten System eine Verkleinerung des Erdwärmesondenfeldes um ca. 50% (entweder Sondenlänge oder -anzahl).

Da die Regelung des Systems einen entscheidenden Einfluss auf die Systemleistung hat, wird in der nächsten Projektphase eine optimierte Regelungsstrategie entworfen. Dabei soll vor allem die Frage geklärt werden, welche Aufgabe (Quelle für die Wärmepumpe, Regeneration des Erdreiches) die Solarfassade unter bestimmten Betriebsbedingungen übernehmen soll. Die Regeneration des Erdreiches über 100%, wie in der dargestellten Simulation, ist in der Praxis nicht zulässig und wird deshalb durch die Regelung limitiert. Die überschüssigen Wärmeerträge der Fassade können dadurch für eine direkte Beladung des Pufferspeichers genutzt werden. Die Betriebsweise der installierten Testfassaden im Gesamtsystem wird im Hardware-in-the-Loop-Betrieb unter realen Wetterbedingungen untersucht. Dabei werden vor allem das Verhalten der Fassaden bei Betrieb unterhalb der Taupunkttemperatur und des Gefrierpunktes und der Einfluss von Kondensationseffekten und Eisbildung untersucht.

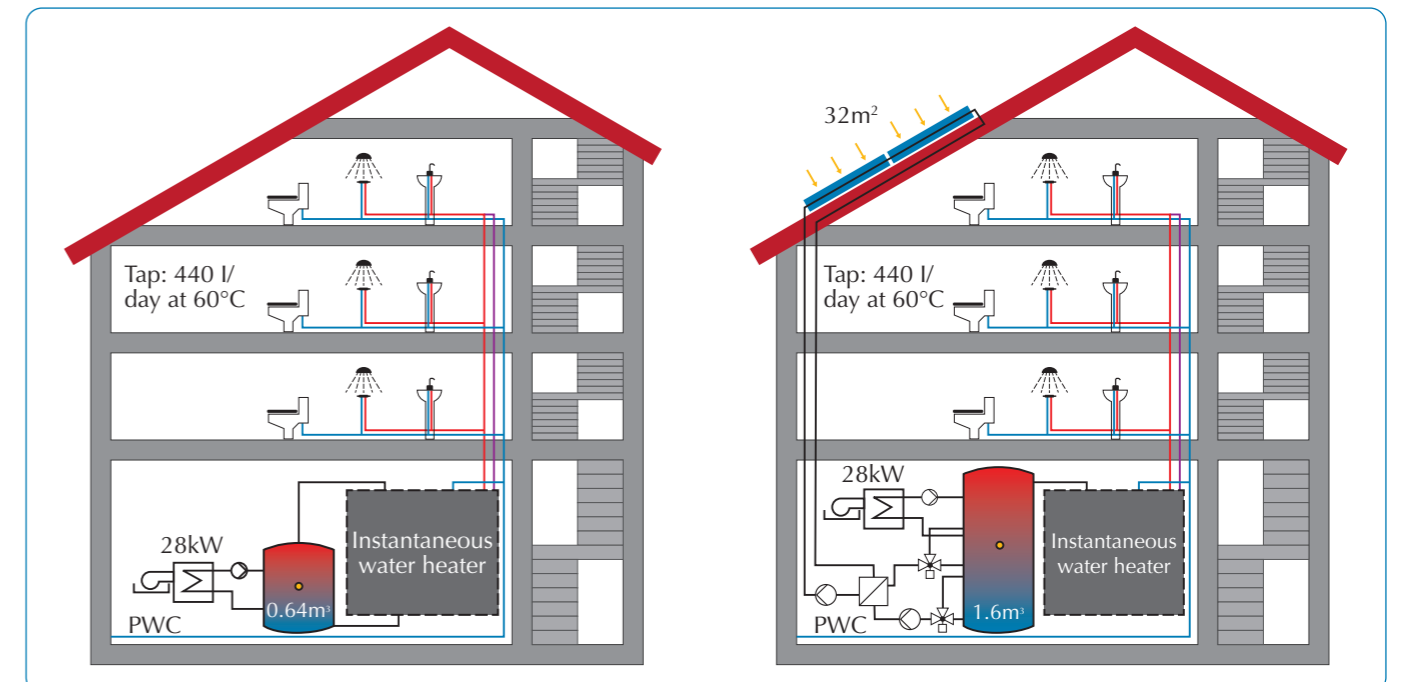
Edward Frick, Maik Kirchner, Christoph Büttner, Federico Giovannetti

## Leistungsfähigkeit von großen Durchfluss-Trinkwassererwärmern für solare Kombi-Systeme

Der Endenergieeinsatz zur Trinkwassererwärmung in Deutschland liegt in den letzten Jahren konstant bei ca. 5%. Ein Großteil (ca. 3,9%) entfällt hierbei auf Privathaushalte<sup>[20]</sup>. Hier bieten zentrale Durchfluss-Trinkwassererwärmer (DTE) hygienische<sup>[21]</sup> und durch den Einsatz eines Pufferspeichers auch energetische Vorteile. Im Pufferspeicher entsteht eine kalte Vorwärmzone, die eine effizientere Einbindung von erneuerbaren Wärmeerzeugern wie Wärmepumpen und Solarthermieanlagen ermöglicht. Wie die gesamte Energieversorgung muss auch die Wärmebereitstellung in Gebäuden in Zukunft klimaneutral werden. Effizienzsteigernde Komponenten, die eine Integration von erneuerbarer Energie in Wärmesysteme befördern, werden vor diesem Hintergrund an Bedeutung gewinnen. In dieser Arbeit werden die technischen Eigenschaften von DTE durch eine Parameterstudie mit dem Simulationsprogramm TRNSYS untersucht, um deren Einfluss auf die Effizienz eines solaren Kombisystems in einem typischen Mehrfamilienhaus zu ermitteln und die Vorteile, die ein solches System mit sich bringt, zu quantifizieren.

## Performance of large instantaneous domestic water heaters for solar combi-systems

Final energy use for domestic hot water (DHW) heating in Germany has remained constant at around 5% in recent years. A large proportion (approx. 3.9%) of this is accounted for by private households<sup>[20]</sup>. Here, central instantaneous water heaters (IWH) offer hygienic<sup>[21]</sup> and, through the use of a buffer storage, also energy-saving advantages. A cold preheating zone is created in the buffer storage, which enables a more efficient integration of renewable heat generators such as heat pumps and solar thermal systems. Like the entire energy supply, the provision of heating in buildings must also become climate-neutral in the future. Against this background, efficiency-enhancing components which promote the integration of renewable energy into heating systems will become increasingly important. This study investigates the technical characteristics of IWH through a parameter study using the TRNSYS simulation program to determine their influence on the efficiency of a solar combi-system in a typical multi-family house and to quantify the benefits that such a system brings.



Abbildung/Figure 49 : Schema des untersuchten Warmwasser-Systems eines Mehrfamilienhauses (Referenzsystem auf der linken Seite).

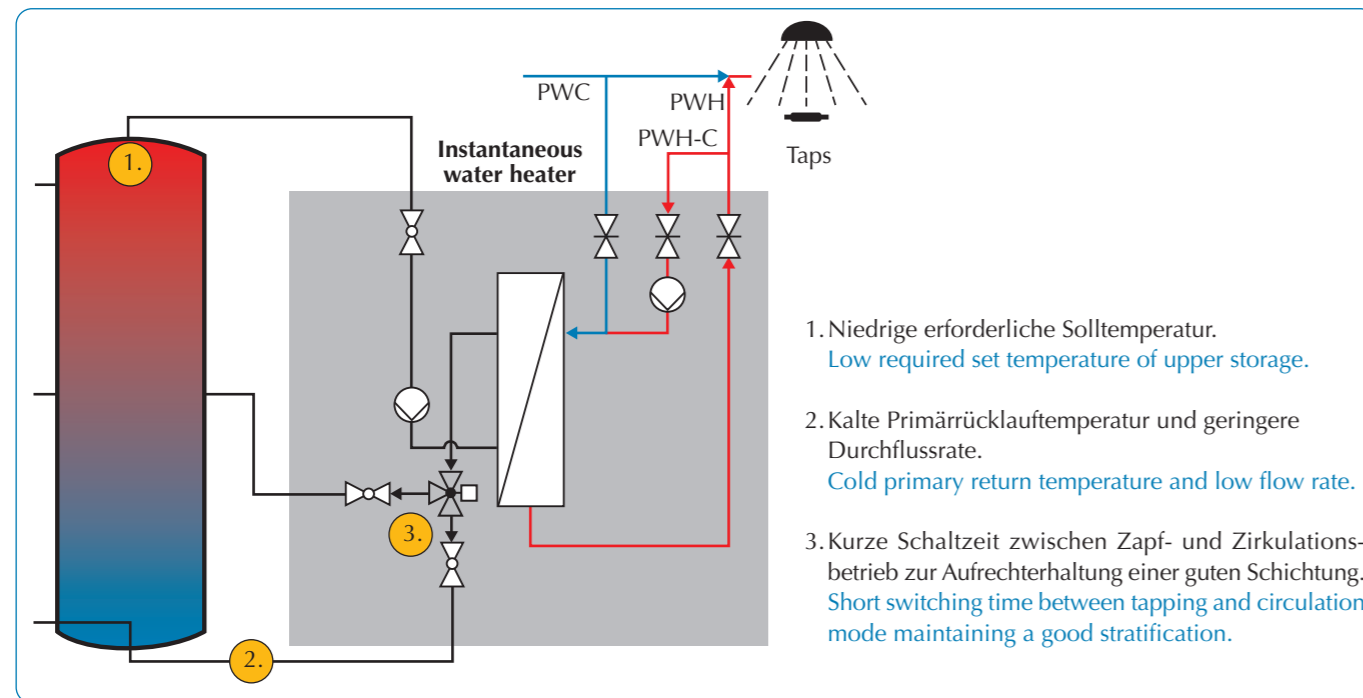
Schematic of the investigated DHW-system of a multi-family house (reference system on the left side).

<sup>[20]</sup> AGEB e.V., 2019. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken.  
<sup>[21]</sup> Pärish, P., Büttner, C., Keuler, J., Chhugani, B. and Lampe, C., 2020. 'Warum sind Frischwasserstationen wichtig für die Dekarbonisierung großer Trinkwasserinstallationen?', in Online-Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme: 12.-14. Mai 2020 : Tagungsunterlagen, Pforzheim, Deutschland, Conexio GmbH.



In den Simulationen wird für ein Mehrfamilienhaus mit 8 Wohneinheiten untersucht, wie sich die Nutzung eines solaren Kombisystems mit 32 m<sup>2</sup> Kollektorfläche und einer Gastherme (Abbildung 49 rechts) im Vergleich zur reinen Nutzung der Gastherme auswirkt (Abbildung 49 links). Dabei wurde den Jahressimulationen ein konstantes Zapfprofil bei drei verschiedenen Zirkulationslasten zugrunde gelegt, die eine kurze gedämmte, eine kurze ungedämmte sowie eine lange ungedämmte Zirkulationsleitung repräsentieren.

In the simulations the effect of using a solar combi-system with a 32 m<sup>2</sup> collector area and a gas boiler (figure 49 right) is compared with the use of a pure gas boiler (figure 49 left) for a multi-family house. The annual simulations were based on a constant tapping profile with three different circulation loads, which represent a short insulated a short uninsulated and a long uninsulated circulation line.



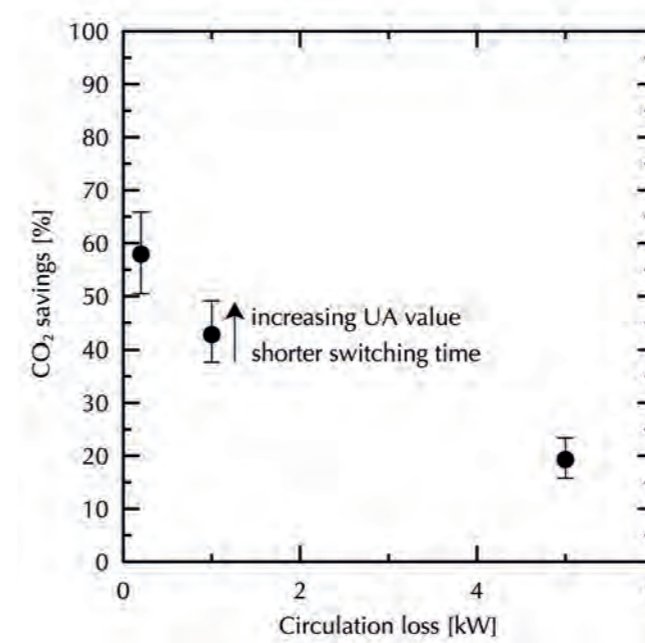
Abbildung/Figure 50 : Allgemeines Durchlauferhitzer-Modell zur Simulation großer Warmwassersysteme mit drei Qualitätsmaßnahmen.

Generic instantaneous water heater model for simulating large DHW systems with three quality measures.

Es werden drei Faktoren, die einen Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems haben, untersucht. Diese Faktoren sind in Abbildung 50 dargestellt. Es wurden zwei Parameter von DTE identifiziert, die diese Faktoren beeinflussen. Erstens der UA-Wert der Station, welcher die Wärmeübertragungsfähigkeit der DTE, insbesondere des Platten-Wärmeübertragers, angibt und als zweites die Umschaltzeit der Rücklaufverteilung, um im reinen Zirkulationsbetrieb den primären Rücklauf in der Mitte des Speichers einzuschichten und so die Schichtung im Speicher aufrechtzuerhalten. An Testständen des ISFH wurden sechs verschiedene DTE vermessen. Auf Grundlage dieser Messdaten haben wir für verschiedene Werte von UA eine Abhängigkeit vom Sekundärvolumenstrom und von der Primärtemperatur ermittelt. Die untersuchten DTE beruhen auf unterschiedlich komplexen internen Verschaltungskonzepten. Bei Anwendungen, bei denen hohe Übergabeleistungen benötigt werden, kommen in der Regel komplexer aufgebaute Einheiten zum Einsatz als bei den einfacher zu versorgenden Systemen. Durch einen Skalierungsfaktor können die Übergabeleistungen an verschiedene Stationen angepasst und simuliert werden. Die Umschaltzeiten zwischen den primären Rückläufen wurden auf Basis

Three factors that influence the efficiency of the overall system are investigated. These factors are shown in Figure 50. Two parameters of IWH were identified that influence these factors; firstly the UA-value (unit of heat transmission) of the system, which indicates the heat transfer capability of the IWH, especially the plate heat exchanger, and secondly the switching time of the return flow distribution to stratify the primary return flow in the middle of the storage and thus to maintain the stratification in the storage.

Six different IWHs were measured on test facilities at the ISFH and a dependency on the secondary volume flow and the primary temperature were determined on the basis of this measurement data for various UA-values. The IWHs studied are based on internal circuit concepts of varying complexity. In applications where high transfer capacity is required, units with a more complex design are generally used than in the systems which are simpler to provide for. The transfer capacities at different stations can be adapted and simulated with the help of a scaling factor. The switching times between the primary return flows were varied on the basis



Abbildung/Figure 51 : CO<sub>2</sub>-Einsparungen in Abhängigkeit von den Zirkulationsverlusten. Der Einfluss der DTE-Parameter ist in den Fehlerbalken zu erkennen.

CO<sub>2</sub> savings as a function of the circulation losses. The influence of the IWH parameters can be seen in the error bars.

einer Marktrecherche zwischen 2 s und 130 s variiert, zusätzlich wurde der Fall mit nur einem unteren Rücklauf untersucht.

of market research between 2 s and 130 s. In addition, the case of only one return flow at the bottom was also investigated.

Für alle Varianten wurde untersucht, welchen Einfluss der DTE auf die benötigte Speichertemperatur hat. Dabei zeigt sich, dass der Wert von UA einen sehr deutlichen Einfluss hat und die benötigte Speichertemperatur um bis zu 15 K senken kann. Die Umschaltzeit der Rücklaufverteilung hat dagegen keinen erkennbaren Einfluss auf die benötigte Speichertemperatur.

For all variations the influence of the IWH on the required storage temperature was studied. It was found that the UA-value has a very strong influence and can reduce the required storage temperature by up to 15 K. The switching time of the return flow, on the other hand, has no discernible influence on the required storage temperature.

Die technischen Parameter der DTE beeinflussen die CO<sub>2</sub>-Einsparung um ±15 % (Abbildung 51) unabhängig von der Zirkulationslast. Hierbei erweisen sich ein hoher UA-Wert und eine kurze Umschaltzeit der Rücklaufverteilung als vorteilhaft. Die Zirkulationslast hat bei der untersuchten Kollektorfläche den größten Einfluss auf das CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial. So liegt das Einsparpotenzial bei einer Verlustleistung von ca. 5 kW im Mittel bei 19% und steigt bei einer Reduktion der Verlustleistung auf 1 kW auf 43%. Eine weitere Reduktion der Zirkulationsverluste auf 0,2 kW führt zu CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 58%.

The technical parameters of the IWH influence the CO<sub>2</sub> savings by ±15 % (Figure 51) independently of the circulation load. Here a high UA-value and a short switching time of the return flow prove to be advantageous. The circulation load has the greatest influence on the CO<sub>2</sub> reduction potential for the collector area studied. The savings potential is on average 19% for a circulation loss is reduced to 1 kW. A further reduction of circulation losses to 0.2 kW leads to CO<sub>2</sub> savings of 58%.

Die Untersuchungen zeigen zum einen, dass die technischen Parameter der DTE unabhängig von den Zirkulationsverlusten des Systems einen signifikanten Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems haben, weshalb hier ein transparenter Vergleich der Stationen wichtig ist. Das ISFH beteiligt sich daher an der Erstellung einer Norm, damit zukünftig Transparenz und Vergleichbarkeit der DTE gegeben ist. Unabhängig vom Einsatz einer DTE ist es außerdem wichtig, die Verluste des Zirkulationssystems durch möglichst kurze Leitungswege und gute Dämmung zu reduzieren.

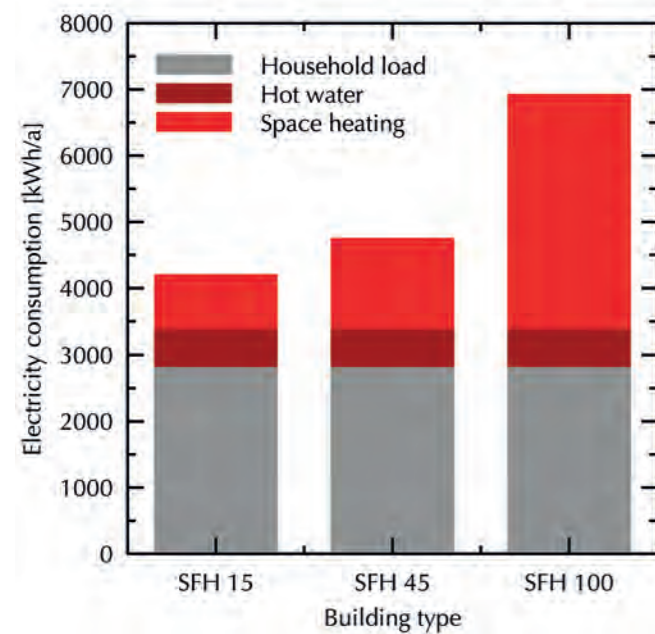
The studies show, on the one hand that the technical parameters of the IWH have a significant influence on the efficiency of the overall system, independent of the circulation losses of the system, which is why a transparent comparison of the devices is important. The ISFH is therefore involved in the preparation of a standard, so that transparency and comparability of the IWHs will be possible in the future. Regardless of the use of an IWH, it is also important to reduce the losses of the circulation system by using the shortest possible pipe routing and good insulation.

Jonas Keuler, Peter Pärtsch, Christoph Büttner



## Energieversorgung von Gebäuden mit unterschiedlichen Dämmstandards durch regionale Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen

Die Kombination von Photovoltaik (PV) und Windenergieanlagen (WEA) ist eine effektive Maßnahme, den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf von Gebäuden, die mit Wärmepumpen (WP) beheizt werden, zu reduzieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens Wind-Solar-Wärmepumpenquartiere konnte auf Basis von Messdaten in zwei Quartieren in Verbindung mit Simulationen der Quartiersenergieversorgung gezeigt werden, dass das optimale Verhältnis von Windenergie zu PV-Anlagen für eine Versorgung aus regional erzeugter erneuerbarer Energie (EE) vom Wärmedämmstandard und vom Lastverschiebungspotenzial der Gebäude abhängt.



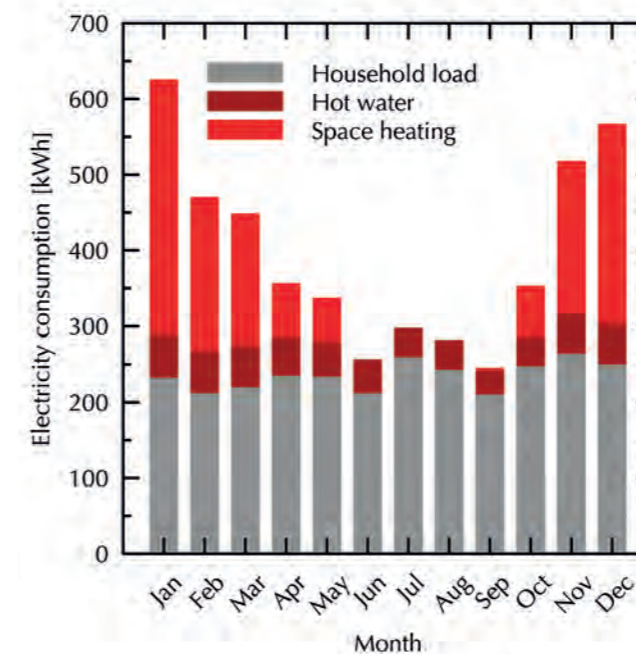
## Energy supply of buildings with different insulation standards through regional wind energy and photovoltaic systems

The combination of photovoltaics (PV) and wind turbines (WT) is an effective measure to reduce the non-renewable primary energy demand of buildings heated by heat pumps (HP). Within the research project "Wind-Solar-Heat Pump Quarters", it could be shown on the basis of measured data from two quarters in combination with simulations of the district energy supply that the optimal ratio of wind energy to PV systems for a supply from regionally generated renewable energy (RE) depends on the thermal insulation standard and the load shifting potential of the buildings.

Abbildung/Figure 52: Strombedarf für Haushaltslasten, Raumheizung und Warmwasser von mit Wärmepumpen beheizten Gebäuden mit unterschiedlichen Wärmedämmstandards. Electricity demand for household loads, space heating and hot water of buildings with different thermal insulation standards heated with heat pumps.

The total energy demand of single-family houses (SFH) is mainly composed of electricity for household loads as well as energy for space heating and hot water. In a heat pump quarter, all of this energy is provided electrically. Depending on the thermal insulation standard, buildings heated with heat pumps exhibit different electricity consumption. These are shown in Figure 52 for three building types with heating energy requirements between 15 kWh/m<sup>2</sup> (SFH 15) and 100 kWh/m<sup>2</sup> (SFH 100). In buildings with a high thermal insulation standard and correspondingly low heating energy demand, household electricity and electricity for water heating account for the largest part of total electricity consumption. Both are relatively constant over the course of the year, as Figure 53 shows. The heating energy demand, on the other hand, shows a strong seasonal dependency due to the low outdoor temperatures in winter. The higher the share of heating energy in the total energy

zeitliche Abhängigkeit auf. Je höher der Anteil der Heizenergie am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes ist, desto stärker ist auch die jahreszeitliche Abhängigkeit des Gesamtstromverbrauchs ausgeprägt. Dem gegenüber stehen die ebenfalls jahreszeitabhängigen Verfügbarkeiten von PV und Windenergie: In Abbildung 54 werden die Stromerzeugung lokaler PV und WEA dargestellt. Werden diese Erzeugungsverläufe den Lastverläufen gegenübergestellt, ist zu erkennen, dass der Heizenergiebedarf über das Jahr einen ähnlichen Verlauf wie die lokale Windenergieerzeugung aufweist. Zur Deckung von Haushaltsstrom und Warmwasser-Bedarf ist dagegen eine von Monat zu Monat möglichst konstante Erzeugungsleistung erforderlich, die sich durch die Kombination von PV- und Windenergie annähern lässt. Je höher die Übereinstimmung der Erzeugungsprofile aus EE mit den Verbrauchsprofilen ist, desto größer wird auch die durch Nutzung regional erzeugter EE erzielte Primärenergieeinsparung, da direkt erneuerbarer Strom verwendet werden kann und der Einsatz von Strom aus fossilen Quellen minimiert wird.



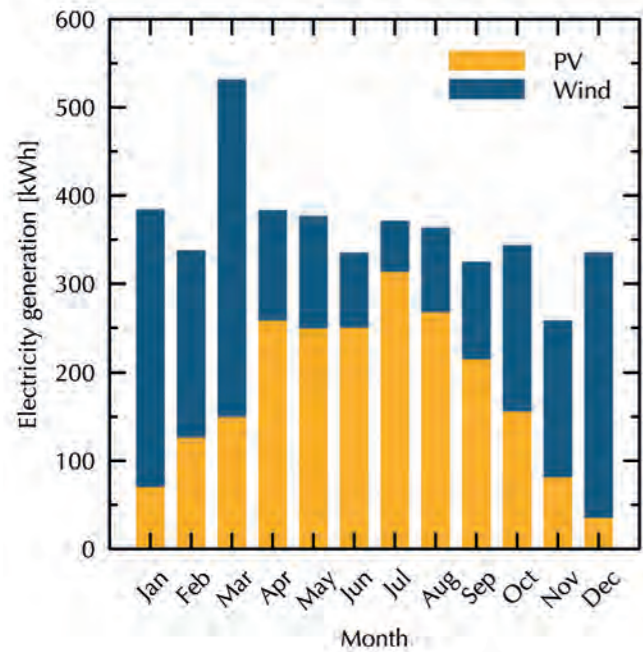
demand of the building, the more pronounced the seasonal dependency of the total electricity consumption is. This is contrasted by the seasonal availability of PV and wind energy: Figure 54 shows the electricity generation of local PV systems and wind turbines. If these generation curves are compared with the load curves, it can be seen that the heating energy demand shows a similar curve as the local wind energy generation over the year. In order to cover household electricity and hot water demand, on the other hand, a generation capacity that is as constant as possible for every month is required, which can be approximated by combining PV and wind energy. The higher the match between the RE generation profiles and the consumption profiles, the greater the primary energy savings achieved by using regionally generated RE, as renewable electricity can be directly utilized and the use of electricity from fossil sources is minimized.

Abbildung/Figure 53: Jahresverlauf des Stromverbrauchs eines SFH 45 Gebäudes mit Wärmepumpe für Raumheizung und Warmwasser. Annual electricity consumption of a SFH 45 building with heat pump for space heating and hot water.

Mittels Quartierssimulationen wurden die erzielbaren Einsparungen in Abhängigkeit von den erzeugten PV- und Windenergie-mengen ermittelt. Als zusätzliche Dimension wurden verschiedene Lastverschiebungspotenziale des Gebäudeenergiesystems berücksichtigt. Lastverschiebungen können durch Maßnahmen wie elektrische Speicher oder optimierte WP-Steuerungen in Kombination mit thermischen Speichern ermöglicht werden. Zur Berücksichtigung dieser wurden verschiedene Intervallgrößen betrachtet, innerhalb derer ein Ausgleich zwischen Erzeugung aus EE und Verbrauch berechnet wird. Die Minutenbilanzierung entspricht dabei einem Energiesystem ohne Lastverschiebung. Die Tagesbilanzierung beinhaltet ein Lastverschiebungspotenzial, welches z. B. durch Energiespeicherung innerhalb 24-Stunden-Bilanzen Last und EE-Erzeugung in Übereinstimmung bringt.

District simulations were used to determine the achievable primary energy savings as a function of the PV and wind energy generated. As an additional dimension, various load shifting potentials of the building energy system were considered. Load shifts can be made possible by measures such as electrical storage or optimized HP controls in combination with thermal storage. To take these into account, different interval sizes were considered, within which a balance between generation from RE and consumption is calculated. The per-minute balancing corresponds to an energy system without load shifting. The daily balancing includes a load shifting potential, which brings load and RE generation in line within 24-hour balances, e.g. through energy storage.





Abbildung/Figure 54: Jahresverlauf der erzeugten Energie von PV und Windenergieanlagen. Wind und PV erzeugen die gleiche Jahresenergie. Wetterdaten: DWD TRY 2015 Ohr/Emmerthal.  
Annual course of energy generated by PV and wind turbines. Wind and PV generate the same annual energy sum. Meteorological data: DWD TRY 2015 Ohr/Emmerthal.

Für das untersuchte Quartier am Ohrberg bei Hameln ergeben sich die in Abbildung 55 dargestellten Einsparungen von nicht erneuerbarer oder extern bereitgestellter Primärenergie in Abhängigkeit vom lokal erzeugten Wind- und PV-Strom sowie des Lastverschiebungspotenzials. Die durchgezogenen diagonalen Linien kennzeichnen die mit verschiedenen WEA-PV-Kombinationen erzielbaren Einsparungen für ein Gebäude mit einem bestimmten Heizenergieanteil am Gesamtbedarf. Anhand dieser Linien lässt sich für verschiedene Dämmstandards das optimale Verhältnis zwischen lokaler PV- und Windenergie ermitteln, welches durch die blau gestrichelte Linie dargestellt ist. Die optimalen PV-Wind-Verhältnisse für die drei Gebäudetypen aus Abbildung 52 sind als rote Linien in Abbildung 55 markiert sowie in Tabelle 3 aufgeführt.

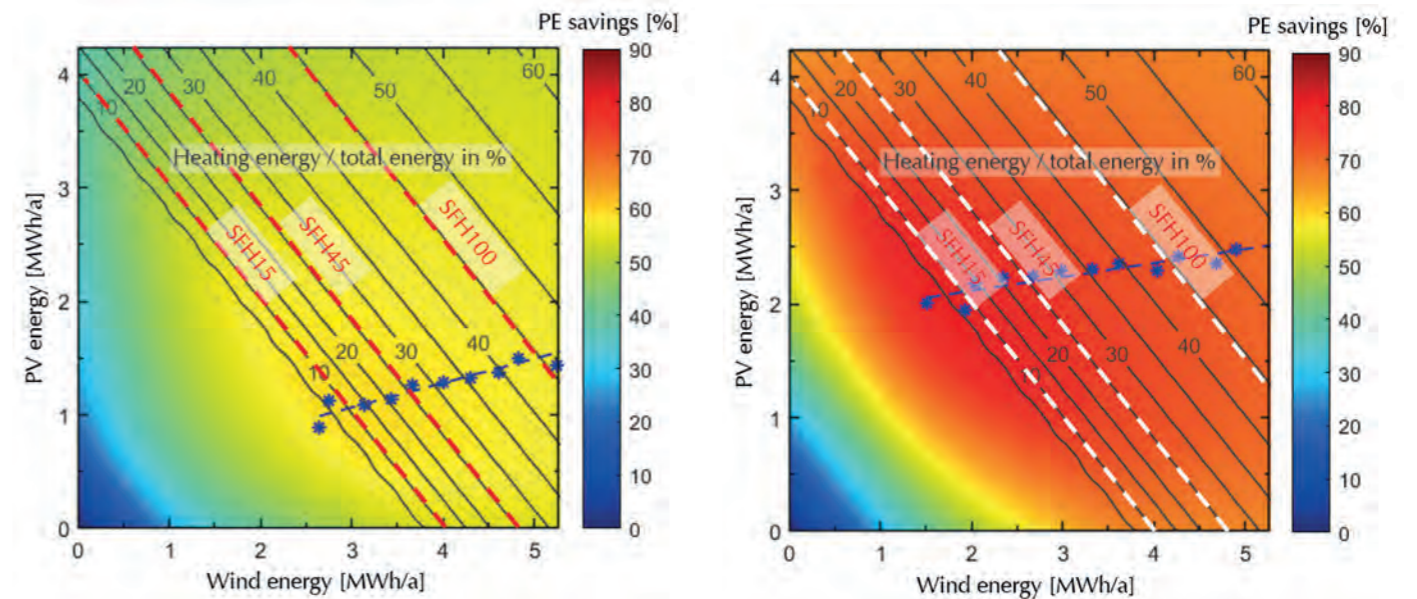
Die Ergebnisse zeigen, dass das optimale PV-Wind-Verhältnis bezogen auf die erzeugte Energiemenge ohne Nutzung von Lastverschiebungspotenzialen bei allen Gebäudetypen mit etwa 1:3 ähnlich ist. Bezogen auf die Anlagenleistung liegt das Optimum am Standort Ohr bei einem Verhältnis von etwa 1:1,3. Die Werte unterscheiden sich, da WEA und PV an unterschiedlich vielen Stunden im Jahr Energie liefern. Steht ein Lastverschiebungspotenzial auf Tagesebene zur Verfügung, ändern sich die PV-Wind-Verhältnisse stark in Abhängigkeit vom Dämmstandard: Je besser das Gebäude gedämmt ist und desto geringer der Heizenergiebedarf am Gesamtenergiebedarf ist, desto mehr Energie kann von lokalen PV-Anlagen genutzt werden.

In einem Quartier mit Gebäuden des Typs SFH 45 können bei einem PV-Wind-Verhältnis von 1:1 bezogen auf die Energiemenge bereits 55-60% des Primärenergiebedarfs eingespart werden. Unter Verwendung des Lastverschiebungspotenzials (durch bspw. einen haushaltsüblich dimensionierten Batteriespeicher

For the investigated neighbourhood at Ohrberg near Hamelin, the savings of non-renewable or externally provided primary energy depend on the locally generated wind and PV electricity as well as the load shifting potential and are shown in Figure 55. The solid diagonal lines indicate the savings achievable for a building with a certain share of heating energy in the total demand for different insulation standards, which is represented by the blue dashed line. The optimal PV-wind ratios for the three building types from Figure 52 are marked as red lines in Figure 55 and listed in Table 3.

The results show that the optimal PV-wind ratio in terms of the amount of energy generated without using load shifting potential is similar for all building types at about 1:3. In relation to the renewable output power, the optimum at the Ohr site is a ratio of about 1:1.3. The values differ because wind turbines and PV supply energy at different numbers of hours in the year. If a load shifting potential is available at day level, the PV-wind ratios change strongly depending on the insulation standard: the better the building is insulated and the lower the share of heating energy demand in the total energy demand, the more energy of local PV systems can be used.

In a neighbourhood with buildings of type SFH 45, a PV-wind ratio of 1:1 in relation to the amount of energy can already save 55-60% of the primary energy demand. Using the load shifting potential (e.g. through a battery storage system of normal household size and/or energy management system), a saving of 70-80% can be achieved.



Abbildung/Figure 55: Primärenergieeinsparung (ggü. WP-Referenzsystem ohne EE) in Abhängigkeit von der PV- und Windenergieerzeugung pro Gebäude sowie vom Dämmstandard (elektrischer Heizenergieanteil) des Gebäudes für verschiedene Bilanzierungsintervalle (links: Minutenbilanz, rechts: Tagesbilanz), DWD TRY 2015 Ohr/Emmerthal.

Primary energy savings (compared to HP reference system without RE) depending on PV and wind energy generation per building and on the insulation standard (electrical heating energy share) of the building for different balancing intervals (left: minute balance, right: daily balance), DWD TRY 2015 Ohr/Emmerthal.

	SFH 15	SFH 45	SFH 100
<b>Heizenergie/Gesamtenergie</b> <b>Heating energy/total energy</b>	ca. 10%	ca. 25%	ca. 45%
<b>Optimum Verhältnis PV-/Windenergie</b> <b>Optimum ratio PV to wind energy</b>	0,36:1	0,33:1	0,30:1
<b>Optimum Verhältnis PV-/Windenergie</b> <b>Optimum ratio PV to wind energy</b>	1,11:1	0,84:1	0,57:1
	Minuten-Bilanzierung per-minute balancing		
	Tages-Bilanzierung daily balancing		

Tabelle/Table 3: Optimales Verhältnis zwischen PV- und Windenergie für verschiedenen Gebäudetypen. Optimal ratio between PV and wind energy for different building types.

und/oder Energiemanagementsystem) kann eine Einsparung von 70-80% erreicht werden.

Eine ausführliche Darstellung von Maßnahmen zur Umsetzung von Quartieren mit minimalem Primärenergiebedarf ist im Leitfaden „Wind-Solar-Wärmepumpenquartiere - Praxiserfahrungen und Planungshilfen für den erneuerbaren Betrieb von Wärmepumpenquartieren mit minimiertem Primärenergiebedarf“ zusammengefasst, der auf der Projektwebseite<sup>[22]</sup> erhältlich ist.

A detailed description of measures for the implementation of neighbourhoods with minimal primary energy demand is summarized in the guideline "Wind-Solar-Heat Pump Quarters - Practical Experience and Planning Aids for the Renewable Operation of Heat Pump Quarters with Minimized Primary Energy Demand", which is available on the project website<sup>[22]</sup>.

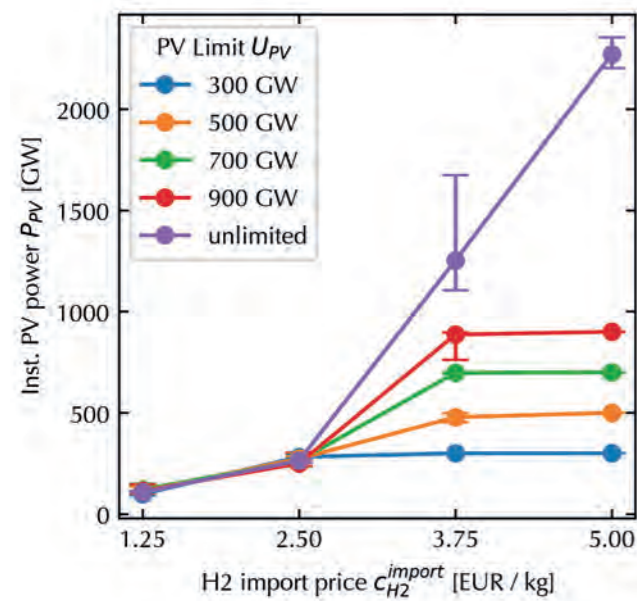
<sup>[22]</sup> <https://isfh.de/wind-solar-waermepumpen-quartier/>



## Wasserstoffversorgung für ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland

Ein klimaneutrales Energiesystem in Deutschland wird höchstwahrscheinlich grünen Wasserstoff nutzen<sup>[23], [24], [25], [26]</sup>. Im Augenblick zeichnen sich zwei Optionen ab, um die Nachfrage zu befriedigen: lokale Produktion aus erneuerbaren Energiequellen durch Elektrolyse sowie Wasserstoffimporte. Wegen der langen Vorlaufzeit bis zur Marktreife der benötigten Technologien müssen Entscheidungen hinsichtlich der Form der Wasserstofflieferkette in nächster Zeit getroffen werden. Beide Technologieoptionen sind jedoch immer noch Unsicherheiten unterworfen. Die lokale Produktion aus grünem Strom wird durch die Installationsobergrenzen für erneuerbare Energiequellen eingeschränkt. Die andere Hauptunsicherheit ist der zukünftige Importpreis des grünen Wasserstoffs. In dieser Arbeit untersuchen wir die Auswirkungen der Installationsobergrenze für Photovoltaik  $U_{PV}$  und des Wasserstoffimportpreises  $c_{H_2}^{import}$  auf die Entwicklung des Energiesystems.

Für unsere Arbeit benutzen wir das Systemmodell ESTRAM, das sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite berücksichtigt. Es simuliert das Energiesystem mit einer stündlichen Auflösung und



## Hydrogen supply for a climate neutral energy system in Germany

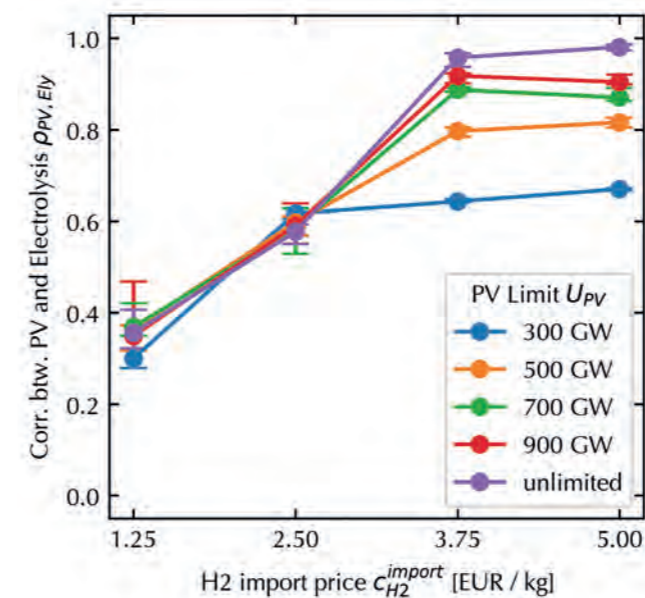
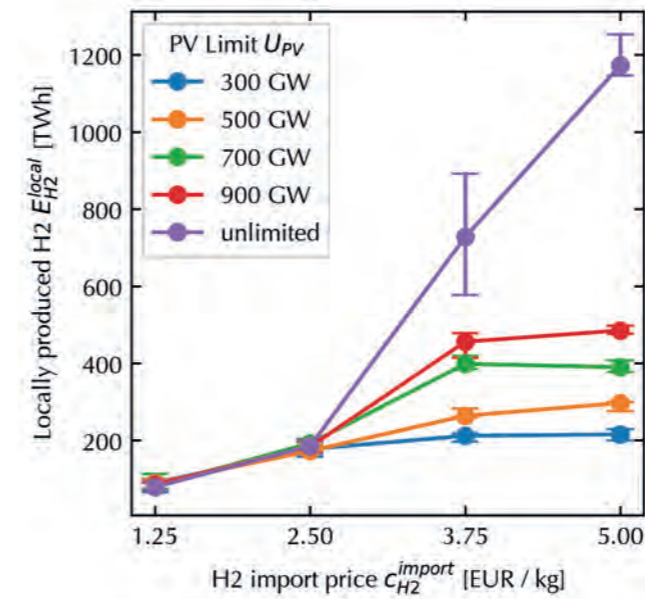
A climate neutral energy system in Germany will most likely require green hydrogen<sup>[23], [24], [25], [26]</sup>. At the moment, two options to meet the demand are discussed: local production from renewable energy sources (RES) via electrolysis as well as hydrogen imports. Due to the long lead time until the required technologies are ready for the market, a decision regarding the shape of the hydrogen supply chain has to be made in the near future. However, both technology options are still subject to uncertainties. Local production from green electricity is constrained by the upper installation limits of RES. The other major uncertainty is the future import price of green hydrogen. In this study, we investigate the effects of the upper installation limit for photovoltaics  $U_{PV}$  and the hydrogen import price  $c_{H_2}^{import}$  on the overall energy system design.

For our study we use the energy system model ESTRAM, which considers the supply as well as the demand side. It simulates the energy system with an hourly resolution, and with all components of the same type aggregated into a single cumulative component. In every hour, all demands in the sectors households, industry,

Abbildung/Figure 56: Installierte Photovoltaikleistung für verschiedene Wasserstoffimportpreise und Photovoltaik-Ausbaulimits. Bei Importpreisen über 3,75 €/kg wird das Ausbaulimit bedeutend. Installed photovoltaic power for different hydrogen import prices and photovoltaic installation limits. For import prices above 3.75 €/kg the installation limit becomes relevant.

<sup>[23]</sup> T. Bründlinger et al., "dena-Leitstudie Integrierte Energiewende," Study. Accessed: Aug. 23, 2021. [Online]. Available: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf)  
<sup>[24]</sup> M. Robinius et al., "WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050," Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, Study FZJ-2020-02537, 2020. Accessed: Aug. 23, 2021. [Online]. Available: <https://user.fz-juelich.de/record/877960>  
<sup>[25]</sup> P. Sterchele et al., "Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen," Fraunhofer ISE, Freiburg, Study, Feb. 2020.  
<sup>[26]</sup> D. P. Graichen et al., "Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität." Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, Jun. 2021.

mit allen artgleichen Komponenten in einer einzigen Gesamtkomponente zusammengefasst. Jede Stunde werden alle Anforderungen in den Sektoren Haushalt, Industrie, Dienstleistung und Mobilität sowie die petrochemische Rohstoffnachfrage in der Industrie erfüllt. Um diese Bedarfe zu erfüllen, kann der Optimierer wählen, ob Wasserstoff verwendet wird oder nicht, sofern Nicht-Wasserstoff-Alternativen existieren. Das Modell wird detailliert in<sup>[27]</sup> beschrieben.



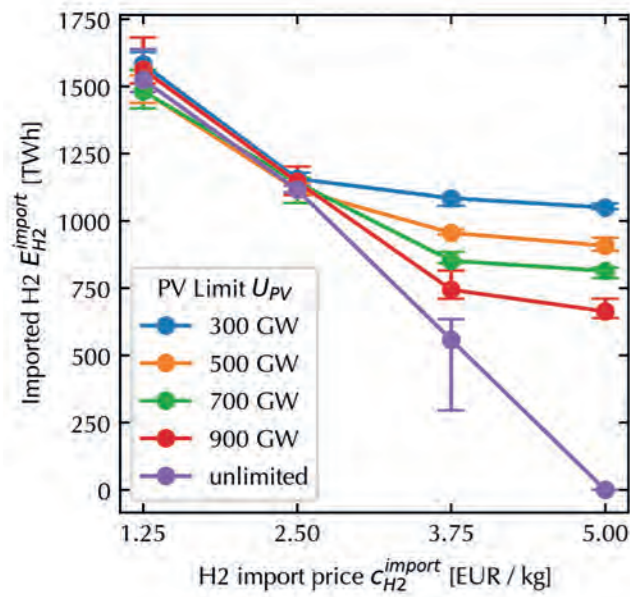
service and mobility as well as the petrochemical raw material demand in the industry are met by the energy system. For satisfying these demands, the optimizer can choose to use hydrogen or not, if non-hydrogen alternatives exist. The model is described in detail in<sup>[27]</sup>.

Abbildung/Figure 57: Menge des lokal produzierten Wasserstoffs für verschiedene Wasserstoffimportpreise und Photovoltaik-Ausbaulimits. Das Diagramm ist dem für die installierte Photovoltaikleistung sehr ähnlich. Das deutet darauf hin, dass ein beträchtlicher Anteil der PV-Produktion für die Wasserstoffgewinnung verwendet wird. Amount of locally produced hydrogen for different hydrogen import prices and photovoltaic installation limits. The graph is very similar to the installed photovoltaic power, suggesting that a significant portion of the PV production is used for electrolysis.

Abbildung/Figure 58: Der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen den Profilen von PV-Stromerzeugung und Elektrolyse für verschiedene Wasserstoffimportpreise und Photovoltaik-Ausbaulimits. Die hohe Korrelation bestätigt, dass ein erheblicher Anteil der PV-Produktion für die Elektrolyse verwendet wird. Pearson correlation coefficient between the profiles of the photovoltaic production and electrolysis for different hydrogen import prices and photovoltaic installation limits. The high correlation confirms that a significant portion of the PV production is used for electrolysis.

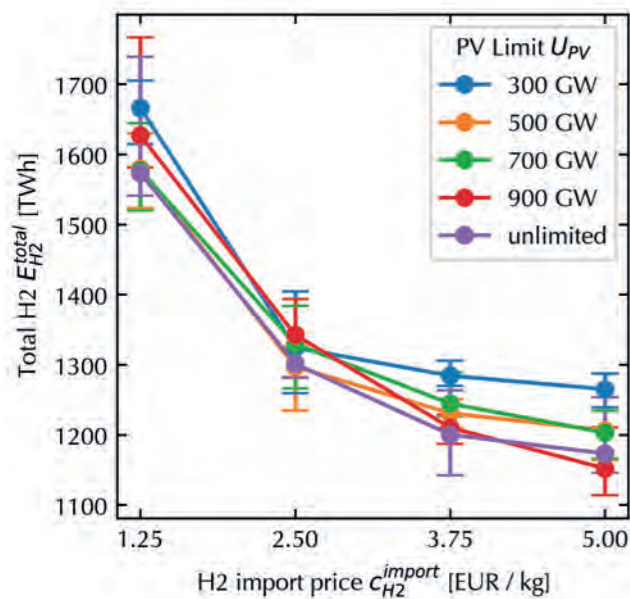
<sup>[27]</sup> F. Peterssen, M. Schlemminger, R. Niepelt, R. Hanke-Rauschenbach, and R. Brendel, "Simulative Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen," Institut für Solarenergieforschung Hameln, Hannover, Study, Jun. 2021.





Abbildung/Figure 59: Menge des importierten grünen Wasserstoffs für verschiedene Wasserstoffimportpreise und Photovoltaik-Ausbauimits. Bei einem zunehmenden Preis würden die Importe verschwinden, wenn es kein Ausbaulimit für PV gäbe.

Amount of imported green hydrogen for different hydrogen import prices and photovoltaic installation limits. With an increasing price the import would go down to zero, if not for the photovoltaic installation limit.



Abbildung/Figure 60: Der Gesamtumsatz von Wasserstoff im Energiesystem für verschiedene Wasserstoffimportpreise und Photovoltaik-Ausbauimits. Ungeachtet des Importpreises werden mindestens 1 150 TWh an Wasserstoff im Energiesystem verwendet.

The total hydrogen turnover in the energy system for different hydrogen import prices and photovoltaic installation limits. Regardless of the import price, at least 1 150 TWh of hydrogen are used in the energy system.

Für die Analyse variieren wir beide Parameter  $U_{PV}$  und  $c_{H_2}^{import}$  und berechnen ein kostenoptimiertes Energiesystem für jede Kombination. Wir untersuchen den Einfluss von  $U_{PV}$  und  $c_{H_2}^{import}$  auf das Systemdesign durch einen Vergleich der verschiedenen Systeme. Die verwendeten Bereiche sind 1,25, 2,5, 3,75 und 5,0 €/kg für  $c_{H_2}^{import}$  und 300, 500, 700, 900 GW sowie der unbegrenzte Fall für  $U_{PV}$ . Für den Windenergieausbau nehmen wir feste Werte an, die sich aus den in der politischen und gesellschaftlichen Diskussion entwickelten länen ergeben. Die Obergrenze für den Ausbau von Windenergieanlagen liegt in unserem Modell deshalb bei 210 GW für Windenergie an Land und bei 54 GW für Offshore-Windparks.

For the analysis, we vary both parameters  $U_{PV}$  and  $c_{H_2}^{import}$  and calculate a cost-optimized energy system for each combination. We examine the impact of  $U_{PV}$  and  $c_{H_2}^{import}$  by comparing the resulting energy systems. The considered ranges are 1.25, 2.5, 3.75 and 5.0 €/kg for  $c_{H_2}^{import}$  and 300, 500, 700, 900 GW as well as the unlimited case for  $U_{PV}$ . We do not vary the limit for wind turbines, since plans are already emerging from discussion in politics and society. With respect to those, we use 210 GW installations for onshore wind turbines and 54 GW for offshore wind turbines as an upper limit.

Abbildung 56 zeigt die installierte PV-Leistung für Szenarien mit verschiedenen Werten für  $U_{PV}$  als Funktion der Importpreise für grünen Wasserstoff. Für Werte von  $c_{H_2}^{import}$  von 1,25 bis 2,5 €/kg erreicht die PV-Installation nie die festgelegten Obergrenzen. Für höhere Preise wird die Ausbau-Obergrenze in allen Szenarien erreicht, in denen ein Grenzwert definiert ist. Im unbegrenzten Fall würde das Energiesystem bei 5 €/kg im Idealfall 2.2 TW installierte PV-Leistung benötigen. Die lokal produzierte Menge an Wasserstoff zeigt ähnliche Tendenzen (s. Abbildung 57). Das deutet darauf hin, dass ein beträchtlicher Anteil der PV-Energieproduktion für die Elektrolyse verwendet wird. Das wird auch durch die Pearson-Korrelation zwischen den Erzeugungsprofilen von PV und Elektrolyse bestätigt (s. Abbildung 58). Für PV-Installationen von über 500 GW Leistung ist diese Korrelation größer als 0,8. Das deutet darauf hin, dass die Wasserstoffproduktion in diesem Fall PV-dominiert ist. Dies führt außerdem zu geringen Volllaststunden des Elektrolyseurs zwischen 1 870 und 2 380.

Figure 56 shows the installed photovoltaic power for scenarios with different values for  $U_{PV}$  as a function of the hydrogen import price. For  $c_{H_2}^{import}$  values of 1.25 and 2.5 €/kg, the PV installation never reaches the set installation limits. For higher prices, the installed power equals  $U_{PV}$  for all scenarios where a PV installation limit is defined. The unlimited case shows, that for 5 €/kg the energy system would ideally require 2.2 TW of photovoltaic installation. The locally produced amount of hydrogen shows similar trends (see Figure 57). This suggests that a significant portion of the PV energy production is used for electrolysis. This is further confirmed by the Pearson correlation between the production profiles of PV and electrolysis as shown in Figure 58. For PV installations above 500 GW the correlation coefficient is greater than 0.8, indicating that at this point the hydrogen production is PV dominated. This also leads to low full load hours of the electrolyzer between 1 870 and 2 380.

Abbildung 59 zeigt die Menge des importierten Wasserstoffs. Wenn der Importpreis steigt, sinkt die Importmenge des Wasserstoffs. Ersetzt wird dies durch lokale Produktion. Bei einem unbegrenzten PV-Ausbaupotential werden die Importe bei einem Importpreis von 5 €/kg eingestellt. Bei vorhandenen PV-Ausbauimits können nicht alle Importe ersetzt werden. Abbildung 60 zeigt, dass der Gesamtumsatz von Wasserstoff im Energiesystem bei einem Importpreis von 1,25 €/kg zwischen 1 560 und 1 660 TWh und bei 2,5 €/kg und höher zwischen 1 150 und 1 340 TWh liegt.

Figure 59 shows the amount of imported hydrogen. As the import price increases the imported amount of hydrogen decreases. It is replaced by local production. With unlimited PV installation potential the import reaches zero at an import price of 5 €/kg. With PV installation limits in place however, it is not possible to replace all hydrogen imports with local production. The total hydrogen turnover in the energy system, shown in Figure 60, is between 1 560 and 1 660 TWh for an import price of 1.25 €/kg and between 1 150 and 1 340 TWh at 2.5 €/kg and higher.

Das optimale Verhältnis zwischen lokaler Produktion und Import für die Wasserstoffbereitstellung wird stark durch den Importpreis für Wasserstoff und das Ausbaulimit für Photovoltaik beeinflusst. Unsere Ergebnisse deuten auf zwei dominierende Funktionen von Wasserstoff im Energiesystem hin. In seiner Funktion als Primärenergieträger wird Wasserstoff überwiegend importiert. Wird er als Flexibilitätsoption genutzt, hängt der Importanteil von den Kosten ab, zu denen das Energiesystem an die jeweilige Wasserstoffversorgungsoption angepasst werden kann. Bei hoher installierter Photovoltaikleistung ( $\geq 500$  GW) sind die Volllaststunden der Elektrolyse gering, was Herausforderungen für mögliche Geschäftsmodelle darstellen wird. Wir stellen auch fest, dass bei Importpreisen ab 3,75 €/kg mehr Ausbau von erneuerbarer Energie die Systemkosten nur wenig, die Importabhängigkeit jedoch erheblich reduziert. Das bedeutet, dass die erneuerbaren Energien als eine Versicherung gegen eine von mangelnde Verfügbarkeit Wasserstoffimporten fungieren können.

The optimal ratio between local production and import for the hydrogen supply is heavily influenced by the upper installation limit for photovoltaics and the hydrogen import price. Our findings imply two possible main usages for hydrogen in the energy system. In its function as a source of primary energy, hydrogen is mainly imported. If it is used as a flexibility option, the import share depends on the costs for adapting the energy system to the respective supply option. When the installed photovoltaic power is high ( $\geq 500$  GW), electrolysis full load hours are low, which will pose challenges to their business models. We also find that at import prices for green hydrogen of 3.75 €/kg and above more renewable energy does not reduce system costs much but significantly reduces the dependence on imports. This means that renewable energy can act as an insurance against a lack of availability of hydrogen imports.



## Akademische Ausbildung

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

Im Jahr 2021 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<sup>[28]</sup>  
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.

### → Vorlesung „Charakterisierung von Halbleitern und 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.

## Academic education

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

In 2021, 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<sup>[29]</sup>.  
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.

### → 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.

<sup>[28]</sup> SWS – Semesterwochenstunden

<sup>[29]</sup> SCH – Semester credit hours

### → 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.

### → 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.

### → 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.

### → 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.



→ **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.

→ **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 Erlernte auf die Auswertung der Charakteristika von MOS-Kondensatoren und MOSFETs an.

→ **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”**

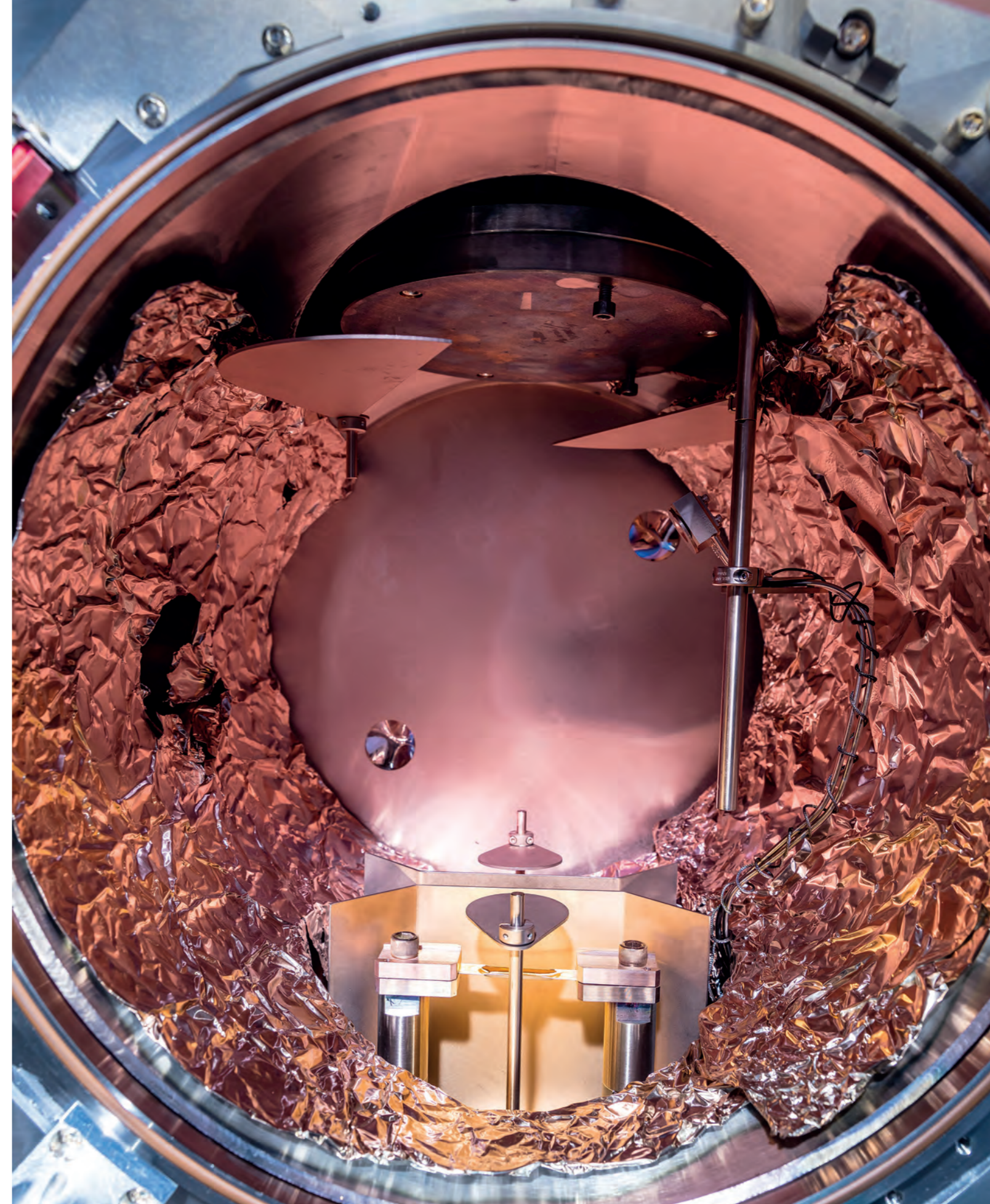
Lecturers: Prof. Dr.-Ing. Tobias Wietler,  
Dr.-Ing. Jan Krügener, 4 SCH.  
Faculty of Electrical Engineering and Computer Science,  
Leibniz Universität Hannover.

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.

→ **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.



Blick in die Aufdampfanlage zur Metallisierung von Perowskit-Solarzellen.  
View into the evaporation system for the metallization of perovskite solar cells.



## 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 – 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.

Abbildung/Figure 62: Im Foyer des ISFH erläutert Dr. Roland Goslich einer Schülergruppe die Forschungen am ISFH.  
In the foyer of the ISFH Dr. Roland Goslich is explaining research at the ISFH to a group of school students.

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 eine Bundesfreiwilligendienstlerin 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](http://www.nils-isfh.de) - können sich Interessierte über freie Termine informieren und Material zur Solarenergie erhalten.

### Personalveränderungen 2021

Wir verabschiedeten Dr. Roland Goslich, unser NILS-Gründungsmitglied und langjährigen Öffentlichkeitsbeauftragten des ISFH, in den Ruhestand. Wir danken ihm herzlich für seinen Einsatz für die

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](http://www.nils-isfh.de) – those interested can obtain information about available dates and material on solar energy.

### Staffing changes in 2021

Dr. Roland Goslich, our NILS founding member and the long-time public relations officer of the ISFH took his retirement. We

Schülerinnen und Schüler. Seine Vorträge und Führungen durchs ISFH gestaltete er stets engagiert, kompetent und anschaulich. Seine tatkräftige Unterstützung ermöglichte auch die regelmäßige Teilnahme an vielen externen Veranstaltungen, z. B. der IdeenExpo in Hannover mit einem größeren Stand mit mehreren Exponaten und Workshops.

### Besondere Aktivitäten in 2021

Im Jahr 2021 konnten Präsenzkurse im ISFH pandemiebedingt nur eingeschränkt stattfinden. Dafür führen wir online Lehrerfortbildungen und Solarprojekte an den Kooperationsschulen durch. Die Homepage wurde ausgebaut und mit Material zur Solarenergie versehen.

### Seminarfach, Facharbeiten und INSIDE-Bezug

Im Frühjahr 2021 haben wir mehrere Facharbeiten von Schüler\*innen des 12. Jahrgangs mit Themen der Nutzung von Solarenergie und Energiewende unterstützt. In den Facharbeiten ging es unter anderem über größere Freiflächensolaranlagen und die Möglichkeiten lokaler Umsetzbarkeit. Eine seit 2021 bestehende Anlage im Landkreis Hildesheim auf der Mülldeponie Heinde wurde näher betrachtet. Durch einen Online-Vortrag von Dr. Raphael Niepelt über das INSIDE-Projekt des ISFH (INtegration von Solarenergie in Die niedersächsische Energielandschaft) bekamen die Schüler\*innen Informationen aus erster Hand. Favorisiert werden aus Sicht der Schüler\*innen Anlagen, die mit der landwirtschaftlichen Nutzung kompatibel sind (Agro-Solar-Freiflächenanlagen).

Auch 2022 werden wieder solarbezogene Facharbeiten durch NILS motiviert. Oberstufenschüler\*innen von Seminarfächern aus Hildesheim und Hannover besuchten das ISFH zur Vorbereitung auf diese Arbeiten. Diese Besuche haben auch den Aspekt der Berufsorientierung. Durch die Einsicht in Labore und Gespräche mit Forscherinnen, z. B. beim Rasterelektronenmikroskop, bekommen die Schüler\*innen einen Einblick in den Forschungsalltag.

sincerely thank him for his commitment to the school students. He always conducted his lectures and guided tours of the ISFH in an enthusiastic, competent and clear fashion. His energetic support enabled even regular participation in many external events e.g. the Ideas Expo in Hannover with a large stand with several exhibits and workshops.

### Special activities in 2021

In 2021 due to the pandemic live courses were only able to take place to a limited extent. Instead we organized online teacher training courses and solar projects at the cooperating schools. The homepage was expanded and provided with material on solar energy.

### Seminar subjects, term papers and INSIDE connection

In the spring of 2021 we assisted several Year 12 school students with term papers on subjects concerning the use of solar energy and energy transition. The papers discussed, inter alia, large solar farms and the possibilities for local implementation. An installation existing since 2021 in the Hildesheim District on the Heinde landfill site was studied in detail. School students received first-hand information about the ISFH INSIDE project (Integration of solar energy in the Lower Saxon energy landscape) through an online lecture from Dr. Raphael Niepelt. From the school students' point of view, installations which are compatible with agricultural use (Agro-Solar-Open land installations) are preferable.

Also in 2022 solar-related term papers will again be promoted by NILS. Upper secondary school students from seminar subjects from Hildesheim and Hanover visited the ISFH to prepare these papers. These visits also have the aspect of career orientation. Through seeing laboratories and discussions with researchers e.g. on the scanning electron microscope, the school students obtain an insight into everyday research work.



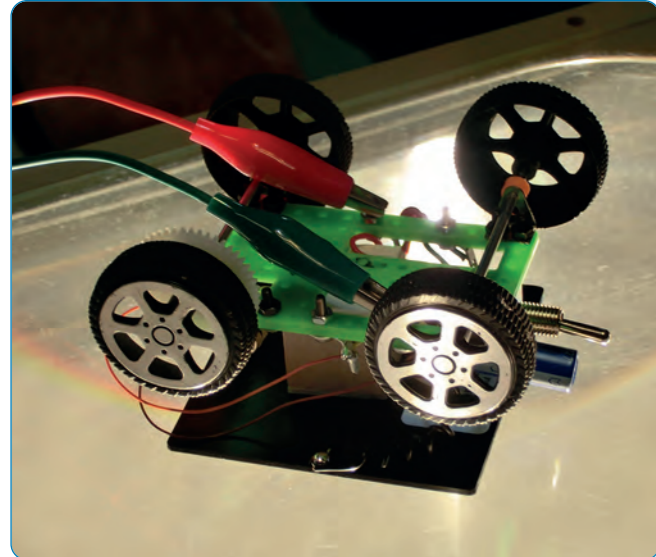
Abbildung/Figure 63: INSIDE-Projekt  
INSIDE project



### Online-Lehrkräftefortbildung im Rahmen der Tagungswoche des Deutschen Vereins zur Förderung Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU-Tag am 14.09.21) und Lehrgang für die 8. Klasse

Aus unseren vielfältigen Versuchen und Lernstationen entwickelten wir einen Lehrgang zur Elektrizitätslehre. Wir stellten ihn in einem niedersachsenweit beworbenen, sehr nachgefragten Online-Vortrag der MNU vor und erprobten ihn auch im 8. Jahrgang des Gymnasiums. Das Besondere dieses Lehrgangs ist, dass die Schüler\*innen mit Hilfe von Solarzellen und vielen Experimenten anschaulich und handlungsorientiert einen Zugang zu den Grundlagen von Spannung, Stromstärke und elektrischer Leistung erlangen. Die Solarzelle als Energiewandler gibt den roten Faden vor. Letztendlich sollten die Schüler\*innen verstehen, wie eine Photovoltaikanlage auf dem Hausdach funktioniert. Auch der Aspekt der Speicherung von elektrischer Energie ist im Lehrgang enthalten, der je nach Schulform vertieft werden kann.

Neben der Erprobung von Solarzellen im Physikunterricht konnten wir am Goethegymnasium Hildesheim und am Hölti-Gymnasium Wunstorf für Schüler\*innen der SEK I auch Solarprojekte mit dem Bau von PV-Modulen oder Solarautos durchführen. Weiterhin überarbeiteten wir unsere Sonnenfängerbox mit fünf Lernstationen für die Mittelstufe.



### Online teacher training as part of the MNU conference week (German association for the promotion of STEM teaching) and course for Year 8

From our various experiments and learning stations we developed a course on electrical science. We presented it in a very popular online MNU lecture advertised throughout Lower Saxony and also tested it in grammar school Year 8. What is special about this course is that the school students receive a clear and practical insight into the basics of voltage, current and electric power with the help of solar cells and numerous experiments. The solar cell provides a common thread as an energy converter. In the end the school students should understand how a photovoltaic system on the roof of a house works. In addition, the aspect of the storage of electrical energy is covered by the course, which can be expanded according to school type.

In addition to testing solar cells in physics lessons, we were also able to organize solar projects for school students in lower secondary school classes at the Goethegymnasium in Hildesheim and Hölti-Gymnasium in Wunstorf with the construction of PV modules or solar cars. We also revised our sun collector box with five learning stations for intermediate classes.

Abbildung/Figure 64: Experimente mit dem selbstgebauten Solarauto in der 8. Klasse.  
Experiments with the do-it-yourself solar car in Year 8.

### Primary schools and Year 5

Some primary schools took advantage of the possibility to organize solar research days offered by NILS at school themselves. In this way several primary school classes from Fischbeck, Adensen and Springe were able to get to know the ISFH from afar. In particular the practical activities involved in solar experiments were received with great enthusiasm. The local press in Springe and Bad Münden reported in detail about the project days at the Hinter der Burg primary school.

### Grundschulen und 5. Jahrgang

Einige Grundschulen nahmen die Möglichkeit wahr, von NILS angebotene Solarforschungstage an der Schule selbst durchzuführen. So konnten mehrere Klassen der Grundschulen aus Fischbeck, Adensen und Springe das ISFH aus der Ferne kennenlernen. Vor allem die praktischen Tätigkeiten im Rahmen von Solar-Experimenten wurden mit großer Begeisterung quittiert. Die lokale Presse in Springe und Bad Münden berichtete detailreich über die Projektstage an der Grundschule Hinter der Burg.



Abbildung/Figure 65: Projekttag der Fünftklässler an der KGS Bad Münden.  
Project Day for Year 5 students at the KGS Bad Münden.

Die im letzten Jahr zum ersten Mal durchgeführten Projektstage mit allen 5. Klassen der KGS Bad Münden haben sich gut bewährt. Deswegen wurden auch 2021 solare Experimentreihen mit dem 5. Jahrgang durchgeführt. In Kooperation mit dem Schülerforschungszentrum Hameln-Pyrmont (SFZ) fanden zwei Projekte mit gemischten Gruppen zum Thema Elektromobilität statt. Die Schüler\*innen hatten dabei auch die Gelegenheit Experimente mit flüssigem Stickstoff kennenzulernen. Weitere Kooperationen mit dem SFZ Hameln-Pyrmont sind geplant.

Eine weitere Kooperation besteht mit der Hochschule Weserbergland (HSW). Hier beteiligte sich NILS-ISFH am Digicamp-Projekt für Kinder und Jugendliche in den Sommerferien. In 2021 wurden Selbstbau und Experimente für ein digital anzeigendes Bestrahlungstärkemessgerät und ein Solarfahrzeug mit Kondensator-Energiespeicher angeboten.

The project days with all Year 5 classes at the KGS Bad Münden organized last year for the first time proved a success. For this reason also in 2021 series of solar experiments were organized for all Year 5 classes. Two projects took place with mixed groups in cooperation with the Hamelin-Pyrmont school student research center (SFZ) on the subject of electromobility. The school students also had the opportunity to learn about experiments with liquid nitrogen. Further cooperative projects with the Hamelin-Pyrmont SFZ are planned.

Cooperation also takes place with the Hochschule Weserbergland (HSW), a private University of Applied Sciences. Here NILS-ISFH participated in the Digicamp Project for children and young people in the summer holidays. In 2021 do-it-yourself and experiments for an irradiance-measuring device with a digital display and a solar vehicle with a capacity energy storage were on offer.



Abbildung/Figure 66: Experimente mit flüssigem Stickstoff.  
Experiments with liquid nitrogen.



## Lehrkräftefortbildungen am ISFH

Im Rahmen mehrerer Lehrkräftefortbildungen wurden PV-Module gebaut, Experimente durchgeführt und das ISFH vorgestellt. Auch Lehrkräfte im Referendariat des Studienseminars Hameln besuchten 2021 das ISFH und vertieften ihre didaktischen Kenntnisse zu Solarzellen im Physikunterricht.

## Überregionale Kooperationen

Viele Schulen, außerschulische Bildungsanbieter und Kommunen in ganz Deutschland beziehen die am NILS-ISFH entwickelten PV-Experimentiergeräte und ganze Klassensätze (Sonnenfängerboxen), um sie zur naturwissenschaftlichen Ausbildung an Schulen und Bildungsstätten einzusetzen. Nach der Lieferung der Geräte oder der Sonnenfängerboxen bieten wir Online-Fortbildungen und auch Präsenzfortbildungskurse für Lehrkräfte an.

## In Niedersachsen hatten wir derartige Kooperationen mit

- 4 Gymnasien aus Hannover, IGS aus Hannover
- IGS aus Braunschweig, IGS aus Göttingen
- BBS Landkreis Oldenburg
- Gymnasium in Meppen



## Teacher training courses at the ISFH

As part of several teacher training courses PV modules were constructed, experiments were carried out and the ISFH was presented. Teachers training at the Hamelin teacher training college also visited the ISFH in 2021 and expanded their teaching knowledge about solar cells in physics lessons.

## Supraregional cooperation

Many schools, extracurricular education providers and communities throughout Germany acquire the PV experimentation equipment and whole class sets (sun collector boxes) to use them in science teaching in schools and educational establishments. After supplying the equipment or sun collector boxes, we offer on-line training courses and also live training courses for teachers.

## In Lower Saxony we had such cooperation with

- 4 grammar schools in Hanover, integrated comprehensive school (ICS) in Hanover
- ICS in Brunswick, ICS in Göttingen
- Vocational training school Landkreis Oldenburg
- Grammar school in Meppen

Abbildung/Figure 67: Herstellung des Solarfahrzeugs SUSE-SolarflitzerSC mit 5F Kondensatorspeicher im NILS-Labor.

Construction of the solar vehicle SUSE-SolarflitzerSC with a 5F capacitor storage in the NILS laboratory.

## Kooperationen mit Bayern

- Mittelschule in Unterfranken
- Gymnasium in Nürnberg
- Technische Hochschule OTH in Regensburg

## Kooperationen in Hessen

- Grundschule in Darmstadt, Umweltbildungsverein aus Darmstadt

## Kooperationen in Berlin

- 2 Gymnasien in Pankow und Mitte

## Kooperationen in Baden-Württemberg

- Umweltbildungsverein in Freiburg

## Kooperationen in Nordrhein-Westfalen

- BBS in Coesfeld
- Stadt Ochtrup im Münsterland

Beispielhaft sind die Kooperationen mit der OTH in Regensburg und Ochtrup im Münsterland. An der OTH in Regensburg werden NILS-PV-Experimentiergeräte im PV-Praktikum für Studierende eingesetzt, verbunden mit einer intensiven Beratung des Personals zur Durchführung der Experimente.

In Ochtrup hat die Stadt als Schulträger 2 Sonnenfängerboxen für Grundschule und Sekundarstufe 1 beschafft, um sie an kommunalen Schulen zur PV-Ausbildung im naturwissenschaftlichen Unterricht einzusetzen. Im November fand hierzu eine Präsenzfortbildung am Schulzentrum in Ochtrup statt. Mit den solardidaktischen Konzepten und Versuchsanleitungen werden PV-Experimente durchgeführt und ausgewertet.

Abbildung/Figure 68: Wolf Rüdiger Schanz erklärt im Rahmen einer Lehrkräftefortbildung am ISFH das Solar-Prototyp-Fahrzeug.

Wolf Rüdiger Schanz explaining the prototype solar vehicle as part of a teacher training course at the ISFH.

## Cooperation with Bavaria

- Intermediate school in Lower Franconia
- Grammar school in Nuremberg
- Technical high school OTH in Regensburg

## Cooperation in Hesse

- Primary school in Darmstadt, environmental club in Darmstadt

## Cooperation in Berlin

- 2 grammar schools in Pankow and Mitte

## Cooperation in Baden-Württemberg

- Environmental club in Freiburg

## Cooperation in North-Rhine-Westphalia

- Vocational training school in Coesfeld
- Ochtrup Town Council in the Münsterland

Cooperation with the OTH in Regensburg and in Ochtrup in the Münsterland are exemplary. At the OTH in Regensburg NILS PV experimentation equipment is used in PV practicals for students combined with intensive guidance of the personnel on how to carry out the experiments.

In Ochtrup the town council as the education authority has acquired 2 sun collector boxes for primary and lower secondary schools to use them in their schools in PV instruction in science lessons. In November a live training event on the subject took place at the school center in Ochtrup. PV experiments are carried out and evaluated using solar-teaching concepts and experimental guides.



OSTR Volker Napp, OSTR Frank Tittel, StR Vivienne Wesebe-Wetzig, OSTR a.D. Wolf-Rüdiger Schanz



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

#### Inland/National

bifa Umweltinstitut GmbH; Augsburg	Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Eggenstein-Leopoldshafen
Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ); Leipzig	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG); Hannover
Fachhochschule Dortmund, Fachbereich Architektur; Dortmund	Leibniz Universität Hannover, Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL); Hannover
Fachhochschule Nordhausen; Nordhausen	Leibniz Universität Hannover, Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik (MBE); Hannover
Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-5); Jülich	Leibniz Universität Hannover, Institut für Mikroelektronische Systeme (IMS); Hannover
Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger Jülich (PTJ); Jülich	Leibniz Universität Hannover, Institut für Mineralogie; Hannover
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik (CSP); Halle	Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik (IfT); Garbsen
Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP); Stuttgart	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB); Braunschweig
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE); Kassel	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Institut für Baumanagement, Digitales Bauen und Robotik im Bauwesen (ICoM); Aachen
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE); Freiburg	Technische Universität Chemnitz, Institut für Physik Optik und Photonik kondensierter Materie (OPKM); Chemnitz
Georg-August-Universität Göttingen, IV. Physikalisches Institut; Göttingen	Technische Universität Clausthal, Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE); Clausthal-Zellerfeld
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH; Berlin	Technische Universität Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik (IWTT); Freiberg
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW); Hamburg	Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik; Kassel
Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS), Center für Angewandte Energieforschung (CAE); Würzburg	Universität Konstanz, Fachbereich Physik; Konstanz
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW); Berlin	Universität Postdam; Potsdam-Golm
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE); Stuttgart	Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA); Stuttgart
International Solar Energy Research Center Konstanz (ISC); Konstanz	
IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH; Mülheim an der Ruhr	

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

#### Ausland/International

Aalto University; Aalto, Finnland	Joint Research Centre (JRC), European Solar Test Installation (ESTI); Ispra, Italien
Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie (AEE); Gleisdorf, Österreich	L'Institut PhotoVoltaïque d'Ile-de-France (IPVF); Antony, Frankreich
Australian National University (ANU); Canberra, Australien	Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE); Paris, Frankreich
Austrian Institute of Technology (AIT); Wien, Österreich	Loughborough University; Loughborough, Großbritannien
Berner Fachhochschule (BHF); Burgdorf, Schweiz	National Physical Laboratory (NPL); Teddington, Großbritannien
Case Western Reserve University; Cleveland, USA	National Renewable Energy Laboratory (NREL); Golden, USA
CSEM SA – Recherche et Développement; Neuchâtel, Schweiz	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO); Den Haag, Niederlande
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL); Lausanne, Schweiz	Polymer Competence Center Leoben (PCCL) GmbH; Leoben, Österreich
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Institute of Microengineering (IMT); Neuchâtel, Schweiz	Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI); Canobbio, Schweiz
Fachhochschule Nordwestschweiz; Muttenz, Schweiz	SPF Institut für Solartechnik; Rapperswil, Schweiz
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering (IEFE); Winterthur, Schweiz	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK); Ankara, Türkei
Institut für Solartechnik Prüfung Forschung (SPF); Rapperswil, Schweiz	University of Warwick, School of Engineering; Coventry, Großbritannien
Institut National de l'Énergie Solaire (CEA INES); Le Bourget-du-Lac, Frankreich	Univerza V Ljubljana; Ljubljana, Slowenien
Institute for Energy Technology (IFE); Kjeller, Norwegen	Utrecht University; CS Utrecht, Niederlande
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas (INTA); Madrid, Spanien	
Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC); Leuven, Belgien	



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

**Inland/National**

3D-Micromac AG; Chemnitz	Energy Glas Glasbeschichtungsgesellschaft mbH & Co. KG; Wolfhagen
3M Deutschland GmbH; Neuss	EnPV GmbH; Karlsruhe
a2 – solar Advanced and Automotive Solar Systems GmbH; Erfurt	Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. (FVHF); Berlin
Aerial PV Inspection GmbH; Aachen	Flachglas Sachsen GmbH; Grimma
AkoTec Produktionsgesellschaft mbH; Angermünde	FlexxSys GmbH; Freudenberg
albert.ing GmbH; Frankfurt am Main	FOSTA-Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.; Düsseldorf
ArcelorMittal Construction Deutschland GmbH; Sanderdorf-Brehna	FRÄNKISCHE Rohrwerke Gebr. Kirchner GmbH & Co. KG; Königsberg/Bayern
Architektenkammer Niedersachsen; Hannover	Franz-Kühnemann Stiftung; Hannover
Architektur- und TGA-Planungsbüro Carsten Grobe Passivhaus; Hannover	Gebr. SCHMID GmbH; Freudenstadt
ATHE-Therm Heizungstechnik GmbH; Emmerthal	Gemeinnützige Wohnungsbaugenossenschaft Hannover-Ost eG; Hannover
blue energy systems GmbH; Rösrath	GeoClimaDesign AG; Fürstenwalde/Spree
Bosch Thermotechnik GmbH; Wetztingen	GeoEn Energy Technologies GmbH; Berlin
Bundesverband Flächenheizung u. -kühlung e.V.; Neuenkirchen-Vörden	GEWO – Gesellschaft für Wohnen und Bauen mbH; Nordhorn
Bundesverband Wärmepumpe; Berlin	Gundlach Bau und Immobilien GmbH & Co. KG; Hannover
centrotherm international AG; Blaubeuren	h.a.l.m. elektronik gmbh; Frankfurt am Main
Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH; Berlin	Heimkehr Wohnungsgenossenschaft eG; Hannover
Consolar Solare Energiesysteme GmbH; Lörrach	Henkel AG & Co. KGaA; Düsseldorf
Corona Solar GmbH; Hannover	Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG; Leverkusen
CreaPhys GmbH; Dresden	iNeG IngenieurNetzwerk Energie eG; Bad Iburg
DME consult GmbH; Rosenheim	Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer GmbH; Hameln
Eilenburger Fenstertechnik GmbH & Co. KG; Eilenburg	Innovative WärmeNetze GmbH; Berlin

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

janßen energieplanung; Hannover	RESOL – Elektronische Regelungen GmbH; Hattingen
juwi AG; Wörrstadt	Schlenk Metallfolien GmbH & Co. KG; Roth-Barnsdorf
Kälte-Klima GmbH; Hameln	Schmöle GmbH; Menden
Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH (KEAN); Hannover	Sika Deutschland GmbH; Bad Urach
Klimaschutzagentur Weserbergland; Hameln	SINGULUS TECHNOLOGIES AG; Kahl am Main
Konvortec GmbH; Schermbeck	SMA Solar Technology AG; Niestetal
Lang Hugger Rampp GmbH; München	Solvis GmbH; Braunschweig
LPKF Laser & Electronics AG ; Garbsen	SpaceTech GmbH; Immenstaad
Meyer Burger Technology AG; Hohenstein-Ernstthal	Stiebel Eltron GmbH & Co. KG; Holzminden
meravis Wohnungsbau & Immobilien GmbH; Hannover	SUNOVATION Produktion GmbH; Elsenfeld
Narva Lichtquellen GmbH & Co. KG; Brand-Erbisdorf	Systea Pohl GmbH; Henstedt-Ulzburg
nD-Enerserve GmbH; Hannover	TÜV Rheinland AG; Köln
NexWafe GmbH; Freiburg im Breisgau	UNIWELL Rohrsysteme GmbH & Co. KG; Ebern
Optimel Schmelzgußtechnik GmbH; Iserlohn	Uponor GmbH; Haßfurt
Oventrop GmbH & Co. KG; Olsberg	Vaillant GmbH; Remscheid
Oxford PV Germany GmbH; Brandenburg a.d. Havel	VDE Renewables GmbH; Alzenau
PAW GmbH & Co. KG; Hameln	Viega GmbH & Co. KG; Attendorn
Pforzheimer Bau und Grund GmbH; Pforzheim	Viessmann Werke GmbH & Co. KG; Allendorf
Phönix SonnenWärme AG; Berlin	Vitesco Technologies Group AG; Regensburg
PI Photovoltaik-Institut Berlin AG; Berlin	Wacker Chemie AG; Burghausen
PLASUS GmbH; Mering	WärmePlan; Hainewalde
pro Klima GbR bei der Stadtwerke Hannover AG; Hannover	Wavelabs Solar Metrology Systems GmbH; Leipzig
RENA Technologies GmbH; Gütenbach	who Ingenieurgesellschaft mbH; Lübeck



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

### Ausland/International

Apollon Solar; Saint-Priest, Frankreich	SoliTek Cells JSC; Vilnius, Litauen
Applied Materials Italia, Srl.; San Biagio di Callalta, Italien	Taconova Group AG; Zürich, Schweiz
ion beam services S.A.; Peynier, Frankreich	TECNAN – NANOMAT; Los Arcos, Spanien
Meyer Burger AG; Thun, Schweiz	Valoe Oyj; Mikkeli, Finnland
Sinton Instruments; Boulder, USA	VOLTEC solar; Dinsheim-sur-Bruche, Frankreich

## 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 ( <a href="https://gscn.solar/members/members.html">https://gscn.solar/members/members.html</a> )	Leibniz Forschungszentrum Energie 2050 (LiFE 2050); Hannover
Informationsdienst Wissenschaft (idw); Bochum	Weserbergland AG; Hameln

## Institutskolloquien/Institute colloquia

Pandemiebedingt fanden am ISFH keinerlei Präsenz-Kolloquien statt.

Due to the pandemic, no face-to-face colloquia were held at the ISFH.

## 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

Bredemeier D.: 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 | Erfahrungsaustauschkreis 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 &amp; Fachtagungen/Fairs &amp; congresses

FVEE Jahrestagung 2021, Mitorganisator

PV-Workshop, Online-Konferenz, 19.-23.4.2021, Veranstalter

SiliconPV 2021 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online-Konferenz, 19.-23.4.2021, Veranstalter

Zukunftsfähige Gebäudeheizzentralen – effizient und CO<sub>2</sub>-minimiert, Online Event, 28.11.2021, Veranstalter und Mitorganisator

## Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften/Peer-reviewed publications

Bayerl P., Folchert N., Bayer J., Dzinnik M., Hollemann C., Brendel R., Peibst R., Haug R.J.: „Contacting a single nanometer-sized pinhole in the interfacial oxide of a poly-silicon on oxide (POLO) solar cell junction”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 29 (8), 936–942. <https://doi.org/10.1002/pip.3417> (2021)

Eismann R., Hummel S., Giovannetti F.: „A Thermal-Hydraulic Model for the Stagnation of Solar Thermal Systems with Flat-Plate Collector Arrays”, *Energies* 14 (3), 733. <https://doi.org/10.3390/en14030733> (2021)

Geisz J.F., McMahon W.E., Buencuerpo J., Young M.S., Rienäcker M., Tamboli A.C., Warren E.L.: „Characterization of multiterminal tandem photovoltaic devices and their subcell coupling”, *Cell Reports Physical Science* 2 (12), 100677. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100677> (2021)

Gewohn T., Schinke C., Lim B., Brendel R.: „Predicting color and short-circuit current of colored BIPV modules”, *AIP Advances* 11 (9), 95104. <https://doi.org/10.1063/5.0063140> (2021)

Gewohn T., Vogt M.R., Lim B., Schinke C., Brendel R.: „Postproduction Coloring of Photovoltaic Modules With Imprinted Textiles”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (1), 138–143. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3034001> (2021)

Haase F., Min B., Hollemann C., Krügener J., Brendel R., Peibst R.: „Fully screen-printed silicon solar cells with local Al-p+ and n-type POLO interdigitated back contacts with a  $V_{oc}$  of 716 mV and an efficiency of 23%”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 29 (5), 516–523. <https://doi.org/10.1002/pip.3399> (2021)

Hachul H., Ridder D., Tekinbas Y., Giovannetti F., Weiland F., Kirchner M.: „Solar thermal component activation”, *Journal of Physics: Conference Series* 2042, 12100. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012100> (2021)

Halbich M.-U., Schmidt J.: „Extraction of PEDOT:PSS/c-Si Junction Properties by Modeling of Injection-Dependent Lifetime Measurements Including Depletion Region Modulation”, *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* 15 (4), 2100008. <https://doi.org/10.1002/pssr.202100008> (2021)

Helmich L., Walter D.C., Falster R., Voronkov V.V., Schmidt J.: „Impact of hydrogen on the boron-oxygen-related lifetime degradation and regeneration kinetics in crystalline silicon”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 232, 111340. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111340> (2021)

Hollemann C., Folchert N., Harvey S.P., Stradins P., Young D.L., Souza C.L.S., Rienäcker M., Haase F., Brendel R., Peibst R.: „Changes in hydrogen concentration and defect state density at the poly-Si/SiO<sub>x</sub>/c-Si interface due to firing”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 231, 111297. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111297> (2021)

Jäger P., Mertens V., Baumann U., Dullweber T.: „A Detailed Chemical Model for the Diffusion of Phosphorus Into the Silicon Wafer During POCl<sub>3</sub> Diffusion”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (1), 50–57. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3038331> (2021)

Krügener J., Rienäcker M., Schäfer S., Sanchez M., Wolter S., Brendel R., John S., Osten H.J., Peibst R.: „Photonic crystals for highly efficient silicon single junction solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 233, 111337. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111337> (2021)

Kruse C.N., Schäfer S., Haase F., Mertens V., Schulte-Huxel H., Lim B., Min B., Dullweber T., Peibst R., Brendel R.: „Simulation-based roadmap for the integration of poly-silicon on oxide contacts into screen-printed crystalline silicon solar cells”, *Scientific Reports* 11, 996. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79591-6> (2021)

## Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften/Peer-reviewed publications

McMahon W.E., Schulte-Huxel H., Buencuerpo J., Geisz J.F., Young M.S., Klein T.R., Tamboli A.C., Warren E.L.: „Homogenous Voltage-Matched Strings Using Three-Terminal Tandem Solar Cells: Fundamentals and End Losses”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (4), 1078–1086. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3068325> (2021)

Min B., Müller M., Wolpensinger B., Fischer G., Palinginis P., Neuhaus D.H., Brendel R.: „Impact of Local Back-Surface-Field Thickness Variation on Performance of PERC Solar Cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (4), 908–913. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3068603> (2021)

Min B., Wehmeier N., Brendemuehl T., Haase F., Larionova Y., Nasebandt L., Schulte-Huxel H., Peibst R., Brendel R.: „716 mV Open-Circuit Voltage with Fully Screen-Printed p-Type Back Junction Solar Cells Featuring an Aluminum Front Grid and a Passivating Polysilicon on Oxide Contact at the Rear Side”, *Solar RRL* 5 (1), 2000703. <https://doi.org/10.1002/solr.202000703> (2021)

Rienäcker M., Larionova Y., Krügener J., Wolter S., Brendel R., Peibst R.: „Rear side dielectrics on interdigitating p<sup>+</sup>-(i)-n<sup>+</sup> back-contact solar cells - hydrogenation vs. charge effects”, *EPJ Photovoltaics* 12, 6. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2021007> (2021)

Schäfer S., Mercker A., Köhler A., Neubert T., Mettner L., Wolpensinger B., Mertens V., Peibst R.: „Role of oxygen in the UV-ps laser triggered amorphization of poly-Si for Si solar cells with local passivated contacts”, *Journal of Applied Physics* 129 (13), 133103. <https://doi.org/10.1063/5.0045829> (2021)

Schlemminger M., Niepelt R., Brendel R.: „A Cross-Country Model for End-Use Specific Aggregated Household Load Profiles”, *Energies* 14 (8), 2167. <https://doi.org/10.3390/en14082167> (2021)

Schumann J., Schiebler B., Giovannetti F.: „Performance Evaluation of an Evacuated Tube Collector with a Low-Cost Diffuse Reflector”, *Energies* 14 (24), 8209. <https://doi.org/10.3390/en14248209> (2021)

Sporleder K., Turek M., Schüler N., Naumann V., Hevisov D., Pöblau C., Großer S., Schulte-Huxel H., Bauer J., Hagendorf C.: „Quick test for reversible and irreversible PID of bifacial PERC solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 219, 110755. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110755> (2021)

Stöhr M., Aprojanz J., Brendel R., Dullweber T.: „Firing-Stable PECVD SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/n-Poly-Si Surface Passivation for Silicon Solar Cells”, *ACS Applied Energy Materials* 4 (5), 4646–4653. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00265> (2021)

Titova V., Schmidt J.: „Selectivity of TiO<sub>x</sub>-Based Electron-Selective Contacts on n-Type Crystalline Silicon and Solar Cell Efficiency Potential”, *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* 15 (9), 2100246. <https://doi.org/10.1002/pssr.202100246> (2021)

Wehmeier N., Fischer G., Herlufsen S., Wolny F., Wagner M., Bothe K., Müller M.: „Kinetics of the Light and Elevated Temperature Induced Degradation and Regeneration of Quasi-Monocrystalline Silicon Solar Cells”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (4), 890–896. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3066239> (2021)

Wehmeier N., Kiefer F., Brendemühl T., Mettner L., Wolter S.J., Haase F., Peibst R., Holthausen M., Mispelkamp D., Mader C., Daeschlein C., Wunnicke O., Kajari-Schröder S.: „Inkjet-Printed In Situ Structured and Doped Polysilicon on Oxide Junctions”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (5), 1149–1157. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3094131> (2021)

Whitehead R.C., VanSant K.T., Warren E.L., Buencuerpo J., Rienäcker M., Peibst R., Geisz J.F., Tamboli A.C.: „Optimization of four terminal rear heterojunction GaAs on Si interdigitated back contact tandem solar cells”, *Applied Physics Letters* 118 (18), 183902. <https://doi.org/10.1063/5.0049097> (2021)

Winter M., Walter D.C., Schmidt J.: „Carrier Lifetime Degradation and Regeneration in Gallium- and Boron-Doped Monocrystalline Silicon Materials”, *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (4), 866–872. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3070474> (2021)

Witteck R., Blankemeyer S., Siebert M., Köntges M., Schulte-Huxel H.: „Partial shading of one solar cell in a photovoltaic module with 3-terminal cell interconnection”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 219, 110811. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110811> (2021)

Xu C., Heinemeyer F., Dittrich A., Bäumer C., Reineke-Koch R.: „In situ spectroscopic ellipsometry as a pathway toward achieving VO<sub>2</sub> stoichiometry for amorphous vanadium oxide with magnetron sputtering”, *AIP Advances* 11 (3), 35126. <https://doi.org/10.1063/5.0041116> (2021)



## 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 an Encapsulation Process with Conventional Temperatures on MAPbI<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells“, in: Proceedings of 13<sup>th</sup> Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV21) (2021)

Bett A., Krugel G., Brödner R., Gils H.C., O'Sullivan M., Wenske J., Hauch J., Robinius M., Schlatmann R., Lim B., Püttner A., „Erneuerbare Energie – Chancen einer industriellen Wertschöpfung in Europa“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 21–25 (2021)

Bredemeier D., Schinke C., Gewohn T., Wagner-Mohnsen H., Niepelt R., Brendel R., „Fast Evaluation of Rooftop and Façade PV Potentials Using Backward Ray Tracing and Machine Learning“, in: 2021 IEEE 48<sup>th</sup> Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 294–299 (2021)

Büttner C., Weiland F., Pärish P., Giovannetti F., „Solarthermische Aktivierung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden: Konzepte additiver Wärmepumpenquellen im Geschosswohnungsbau“, in: Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 369–380 (2021)

Diederich M., Kajari-Schröder S., Wolter S.J., Wietler T., Winter D., „Modelling Perovskites with Reduced Absorption from Reflection Measurements of Perovskite Solar Cells“, in: Proceedings of 13<sup>th</sup> Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV21) (2021)

Ding K., Kanz O., Grube T., Rau U., Heinrich M., Schlatmann R., Peibst R., Colsmann A., Binder J., „Photovoltaik für den Straßenverkehr im Energiesystem der Zukunft“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 61–65 (2021)

Fellmeth T., Feldmann F., Steinhauser B., Nagel H., Mack S., Hermle M., Torregrosa F., Ingenito A., Haug F.-J., Morisset A., Buchholz F., Chaudhary A., Desrues T., Haase F., Min B., Peibst R., Tous L., „A Round Robin - HighLighting on the Passivating Contact Technology“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 181–185 (2021)

Frick E., Kirchner M., Palm J., Giovannetti F., „Solarthermische Aktivierung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden: Konzepte, numerische Modellierung und experimentelle Untersuchungen von Fassadenpaneelen“, in: Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 460–476 (2021)

Giovannetti F., Hüsing F., Büchner D., Gebhardt H., Schmidt D., Bongs C., Schnabel L., Schmidt C., Schill E., Schmidt F., Schüwer D., Büttner B., Hauer A., „Solar- und Umweltennergie für effiziente Wärme- und Kälteerzeugung“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 71–77 (2021)

Govaerts J., Moliya K., Luo B., Borgers T., van Dyck R., Heide A.S.H., Tous L., Morlier A., Lisco F., Cerasti L., Galiazzo M., Poortmans J., „The Potential of Glass-Fibre-Reinforcement: (Thermo-)Mechanical Testing of Light-Weight PV Modules“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 24–27 (2021)

Helmling S., Chhugani B., Fischer S., Epp B., Scholl-Haaf C., Kramer K., Pärish P., Drück H., „Initiative zur Marktetablierung und Verbreitung von Anlagen zur thermisch-elektrischen Energieversorgung mittels PVT-Kollektoren und Wärmepumpen im Gebäudesektor – integraTE“, in: Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 138–156 (2021)

Kirchner M., Wehmeier T., Schiebler B., Giovannetti F., „Profilbauglas mit integriertem Wärmerohrabsorber - Experimentelle Bewertung von Prototypen“, in: Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 477–489 (2021)

Kornatz P., Dotzauer M., Schindler H., Schmieder U., Szarka N., Mercker O., Matschoss P., Laub K., Wern B., Fleck S., Rösch C., Thrän D., „Bioenergie in der europäischen Zeitenwende“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 48–52 (2021)

Leipprand A., Samadi S., Holtz G., Schneider C., Lenz V., Jordan M., Lorenz T., Pitz-Paal R., Dahmen M., Robinius M., Pesch T., Röben F., Markewitz P., Nitz P., Niepelt R., Dittmeyer R., Stapf D., „Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie – Herausforderungen und Strategien“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 15–20 (2021)

Manara J., Büttner B., Pflug T., Auerswald S., Rau B., Chhugani B., Hoffmann P., Schmidt F., Carbonare N., „Energieeffizienz – Europäische Erfolgsmodelle“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 78–82 (2021)

Min B., Wehmeier N., Schulte-Huxel H., Witteck R., Brendemühl T., Daschinger T., Haase F., Larionova Y., Nasebandt L., Tsuji K., Dhamrin M., Peibst R., Brendel R., „Approaching 23 % with p-Type Back Junction Solar Cells Featuring Screen-Printed Al Front Grid and Passivating Rear Contacts“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 158–161 (2021)

## Andere Veröffentlichungen/Other publications

Moldovan A., Ding K., Rau U., Peibst R., Korte L., Stannowski B., „Hocheffiziente Solarzellen durch selektive Kontakte“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 66–70 (2021)

Monokroussos C., Yoshita M., Yamagoe K., Müllejans H., Pavanello D., Ramspeck K., Hinken D., Bothe K., Fujita Y., Arnoux G., Pinto F., Ambigapathy R., Shi Q., Wilterdink H., Chen Y., Ping Y., Gao J.Q., „Interlaboratory Comparison of Voltage Sweep Methods Used for the Electrical Characterization of Encapsulated High-Efficiency c-Si Solar Cells“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 594–601 (2021)

Nasebandt L., Min B., Hübner S., Dippell T., Wohlfart P., Peibst R., Brendel R., „Controlling Doping Density in DC-Sputtered In-Situ Phosphorous-Doped Polysilicon Layers for Passivating Contacts“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 147–149 (2021)

Pärish P., „Status quo Solarthermie – Ertragskontrolle und neueste Entwicklungen“, in: Tagungsband zum Projektworkshop Eversol 27./28.08.2020 in Cottbus: Klimaneutraler Gebäudebestand durch Pauschaliete? Erfahrungen bei solarer Eigenversorgung inklusive Speicher, 52–58 (2021)

Rienäcker M., Larionova Y., Krügener J., Wolter S., Brendel R., Peibst R., „Rear Side Dielectrics on Interdigitating p<sup>+</sup>-(i)-n<sup>+</sup> Back-Contact Solar Cells – Hydrogenation vs. Charge Effects“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 154–157 (2021)

Schiebler B., Walentin D., Tan S., Schumann J., Giovannetti F., „Bewertung einer Solarthermieanlage mit stagnationssicheren Wärmerohrkollektoren in einem innovativen Systemkonzept“, in: Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 381–400 (2021)

Schinke C., Hinken D., Wolf M., Bothe K., Kröger I., Bagusch M., Nevas S., Winter S., „Analysis and Correction of Systematic Deviations in Measurements of the Spectral Irradiance of Solar Simulators“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 172–176 (2021)

Schmidt M., Müller-Langer F., Kretschmar J., Agert C., Bard J., Hebling C., Heinrichs H., Robinius M., Niepelt R., Dittmeyer R., Graf F., „Grüner Wasserstoff als Schlüsseltechnologie für die europäische Energiewende“, in: Forschung für den European Green Deal (Themen 2020), 10–14 (2021)

Stöhr M., Aprojanz J., Brendel R., Dullweber T., „Firing-Stable PECVD SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/n-Poly-Si Passivating Contacts for High-Efficiency Silicon Solar Cells“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 306–310 (2021)

Tous L., Govaerts J., Harrison S., Carrière C., Buchholz F., Halm A., Faes A., Nogay G., Ingenito A., Haug F.-J., Feldmann F., Raine D., Fellmeth T., Heinrich M., Mittag M., Reinwand D., Haase F., Morlier A., Bokalič M., Brecl K., Topic M., Kester J.C.P., Wendlandt S., Galiazzo M., Voltan A., Galbiati G., Theunissen L., Torregrosa F., Grimm M., Denafas J., Radavičius T., Lukinskas P., Kaakkunen J., Savişalo T., Regrettier T., „Overview of the Latest Results Achieved in the H2020 Funded Project HighLite - Aiming for High-Performance, Low-Cost and Sustainable c-Si PV Modules Tailored for Different Applications“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 533–537 (2021)

Wagner-Mohnsen H., Esefelder S., Klöter B., Mitchell B., Schinke C., Bredemeier D., Jäger P., Brendel R., „Combining Numerical Simulations, Machine Learning and Genetic Algorithms for Optimizing a POCl<sub>3</sub> Diffusion Process“, in: 2021 IEEE 48<sup>th</sup> Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 528–531 (2021)

Wendlandt S., Heller S., Govaerts J., Heide A.S.H., Kaakkunen J., Savişalo T., Morlier A., Raine D., Röder D., „Angle of Incidence Study at Photovoltaic Modules with Polymer Front Sheet“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 814–819 (2021)

Witteck R., Siebert M., Kunze I., Köntges M., „Hot Cells in High-Power Photovoltaic Modules with Solar Cells from Larger Silicon Wafer Formats“, in: Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 757–760 (2021)



## Vorträge &amp; Poster/Oral and visual presentations

Barretta C., Oreski G., Macher A., Ascencio-Vásquez J., Topic M., Köntges M., Resch-Fauster K.: „Effects of Climate and Microclimate on EVA Degradation from Field Aged PV Modules“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (8.9.2021)

Baumann S.: „Influence of an Encapsulation Process with Conventional Temperatures on MAPb<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells“. HOPV21 - 13<sup>th</sup> International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics, Online Event (26.5.2021)

Baumann S.: „Influence of Encapsulation Process Temperature on the Performance of Perovskite Mini Modules“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (20.4.2021)

Bothe K., Hinken D.: „Contacting and Precise IV Measurements of MBB and BBO SHJ solar cells“. 4<sup>th</sup> International Workshop on Silicon Heterojunction Solar Cells 2021, Online Event (9.11.2021)

Bredemeier D.: „Fast Calculation of Large-Scale Photovoltaic Roof-Top Potentials Using Backwards-Raytracing and Machine Learning“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (21.4.2021)

Bredemeier D.: „Fast Evaluation of Roof-top and Façade PV Potentials Using Backwards-raytracing and Machine Learning“. 48<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Online Event (22.6.2021)

Bredemeier D., Rott E., Schinke C., Gewohn T., Wagner-Mohnsen H., Niepelt R., Brendel R.: „Fast and High-Resolution Calculation of Roof-Top and Façade PV Potentials Using Graphics Processor Accelerated Monte-Carlo Raytracing“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (8.9.2021)

Brendel R.: „Photovoltaik in der Transformation des niedersächsischen Energiesystems“. 4. Niedersächsisches Forum Solarenergie - Energiewende? Geht nur mit Solar!, Online Event (15.6.2021)

Brendel R.: „Was ändert importierter grüner Wasserstoff am erforderlichen PV-Ausbau?“. 36. PV-Symposium, Online Event (18.5.2021)

Büttner C.: „Solarthermische Aktivierung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden: Konzepte additiver Wärmepumpenquellen im Geschosswohnungsbau“. 31. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme, Online Event (28.4.2021)

Chhugani B.: „Comparison of PVT - Heat Pump Systems with Reference Systems for the Energy Supply of a Single-Family House“. ISES Solar World Congress 2021, Online Event (25.10.2021)

Diederich M.: „Modelling Perovskites with Reduced Absorption from Reflection Measurements of Perovskite Solar Cells“. HOPV21 - 13<sup>th</sup> International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics, Online Event (26.5.2021)

Dittrich A., Heinemeyer F., Xu C., Reineke-Koch R.: „Realization of a cost-effective thermochromic solar absorber with a high emissivity change based on VO<sub>2</sub> and an infrared transparent intermediate layer“. 11<sup>th</sup> Workshop Ellipsometrie (WSE 11), Steyr, Austria (7.9.2021)

Eggert D.: „Verbundvorhaben FeBOp-MFH“. 10. Projektleitungstreffen ENERGIEWENDEBAUEN „Gemeinsam auf dem Weg zur Klimaneutralität - Lösungen für eine zügige Transformation“, Online Event (23.11.2021)

Fellmeth T., Feldmann F., Steinhauser B., Nagel H., Mack S., Hermle M., Torregrosa F., Ingenito A., Haug F.-J., Morisset A., Buchholz F., Chaudhary A., Desrues T., Haase F., Min B., Peibst R., Tous L.: „A Round Robin - HighLighting on the Passivating Contact Technology“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (8.9.2021)

Fischer H., Peibst R.: „Test drives with an electrically driven VIPV LCV demonstrator vehicle: Range extension and energy flow analysis from low to high voltage level“. PVinMotion 2021, Online Event, (8.12.2021)

Fischer H., Peibst R.: „VIPV demonstration for light commercial vehicles: Test drives and energy flow analysis“. 31<sup>st</sup> International PV Science and Engineering Conference (PVSEC-31), Online Event, (15.12.2021)

Folchert N.: „Easy-to-Apply Contact Resistance Measurements of the Interfacial Oxide in Poly-Si/SiO<sub>x</sub>/c-Si Junctions – Revisiting the Cox & Strack Formula“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (20.4.2021)

Folchert N.: „Modelling the Annealing of Poly-Si/SiO<sub>x</sub>/c-Si Junctions“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (22.4.2021)

Frick E.: „Solar thermal, rear-ventilated façades as heat pump sources in multi-storey buildings“. ISES Solar World Congress 2021, Online Event (25.10.2021)

## Vorträge &amp; Poster/Oral and visual presentations

Frick E.: „Solarthermische Aktivierung vorgehängter, hinterlüfteter Fassaden: Konzepte, numerische Modellierung und experimentelle Untersuchungen von Fassadenpaneelen“. 31. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme, Online Event (28.4.2021)

Giovanetti F.: „Photovoltaisch-thermische (PVT) Systeme: Endlich reif für die Marktetablierung?“. Expert\*innen-Workshop „Solarenergie – Innovative Lösungen für Gebäude“, SolarZentrum Berlin / DGS Berlin, Online Event (9.6.2021)

Giovanetti F.: „Profiled glass solar facade with integrated heat pipe absorber – Experimental evaluation of prototypes“. ISES Solar World Congress 2021, Online Event (25.10.2021)

Govaerts J., Moliya K., Luo B., Borgers T., van Dyck R., Heide A.S.H., Tous L., Morlier A., Lisco F., Cerasti L., Galiazzo M., Poortmans J.: „The Potential of Glass-Fibre-Reinforcement: (Thermo-)Mechanical Testing of Light-Weight PV Modules“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (6.9.2021)

Haase F.: „23 %-Efficient Screen-Printed IBC Cells on Cz-Grown Silicon with n-Type Poly-Si Passivating Contact and Al-alloyed p-Type Contact“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (19.4.2021)

Hansen-Röbbel U., Eggert D.: „Warm ja, aber auch effizient? - Anlagenanalyse für den Handwerker“. Zukunftsfähige Gebäudeheizzentralen – Effiziente und CO<sub>2</sub>-minimierte Heizzentralen, Online Event, (25.11.2021)

Helmich L.: „Impact of Hydrogen on the Boron-oxygen Degradation and Regeneration Kinetics“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (21.4.2021)

Holleman C.: „Influence of Firing on the Interface State Density of n-Type Poly-Si Passivating Contacts“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (22.4.2021)

Hüsing F.: „Einrohrzirkulation in Wärmepumpensystemen“. Sachverständigen-Forum des VSHK (Verein der Vereidigten Sachverständigen der SHK-Handwerke Niedersachsen e.V.), Holzminden, (17.12.2021)

Hüsing F.: „Erdwärmekollektoren und Sonnenkollektoren als optimierte bivalente Quelle für hocheffiziente Wärmepumpensysteme“. BMWi Exportinitiative Energie, Online Informationsreise Argentinien/ Uruguay/ Paraguay „Eigenversorgung durch Geothermie und Solarenergie“, Online Event (5.10.2021)

Hüsing F.: „Solare Regeneration von Erdwärmequellen“. Online-Workshopreihe „Geothermie und Wärmepumpe“, Online Event (18.5.2021)

Hüsing F.: „WPP-SYS – Wärmepumpenprüfung im System“. Online-Workshopreihe „Geothermie und Wärmepumpe“, Online Event (4.5.2021)

Keuler J.: „Energetic Comparison of Different Instantaneous Water Heater Concepts in a Solar Combi-System for a Multi-Family House with TRNSYS“. ISES Solar World Congress 2021, Online Event (27.10.2021)

Kirchner M.: „Profilbauglas mit integriertem Wärmerohrabsorber - Experimentelle Bewertung von Prototypen“. 31. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme, Online Event (28.4.2021)

Lim B.: „Hausaufgaben der Photovoltaik-Technologieentwicklung – Optimale Flächennutzung, nahtlose Integration, weiter sinkende Kosten“. Photovoltaiktechnologien - aktueller Stand und Ausblick (Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH), Online Event (23.4.2021)

Lim B.: „Research and Innovation for expanding solar power generation without expanding land use“. ‘Solar PV Big & Beyond’ – Delivering the 2030 Climate Targets (ETIP PV Annual Conference), Online Event (20.5.2021)

Lim B.: „Solarenergienutzung an Gebäuden“. Alles wird Kraftwerk - Webinar-Reihe „innovativ jetzt - Forschen für Nachhaltigkeit“, Online Event (25.3.2021)

Mertens V., Schäfer S., Stöhr M., Mercker A., Köhler A., Mettner L., Brendel R., Ambrosius N., Pernau T., Haverkamp H., Dullweber T.: „Local PECVD SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/n-Poly-Si Deposition through a Shadow Mask for POLO IBC Solar Cells“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (7.9.2021)

Min B.: „Impact of Dielectric Capping Layer Thickness on the Contact Formation between n<sup>+</sup>-type Passivating Contacts and Screen-printed Fire-through Silver Pastes“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (20.4.2021)

Min B., Wehmeier N., Schulte-Huxel H., Witteck R., Brendemühl T., Daschinger T., Haase F., Larionova Y., Nasebandt L., Tsuji K., Dhamrin M., Peibst R., Brendel R.: „Approaching 23 % with p-Type Back Junction Solar Cells Featuring Screen-Printed Al Front Grid and Passivating Rear Contacts“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (7.9.2021)



## Vorträge &amp; Poster/Oral and visual presentations

Monokroussos C., Yoshita M., Yamagoe K., Müllejans H., Pavanello D., Ramspeck K., Hinken D., Bothe K., Fujita Y., Arnoux G., Pinto F., Ambigapathy R., Shi Q., Wilterdink H., Chen Y., Ping Y., Gao J.Q.: „Interlaboratory Comparison of Voltage Sweep Methods Used for the Electrical Characterization of Encapsulated High-Efficiency c-Si Solar Cells“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (7.9.2021)

Morlier A.: „Photovoltaikmodule mit Naturmaterialien für die Bauwerkintegration“. 36. PV-Symposium, Online Event (26.5.2021)

Morlier A., Blankemeyer S., Witteck R., Schulte-Huxel H., Däschinger T., Bräunig S., Köntges M., Brendel R.: „Photovoltaic Modules with Natural Materials for a Seamless Building Integration“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (9.9.2021)

Nasebandt L., Min B., Hübner S., Dippell T., Wohlfart P., Peibst R., Brendel R.: „Controlling Doping Density in DC-Sputtered In-Situ Phosphorous-Doped Polysilicon Layers for Passivating Contacts“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (7.9.2021)

Niepert R.: „Grüner Wasserstoff aus Solar-Wind-Hybridkraftwerken in Norddeutschland“. 36. PV-Symposium, Online Event (19.5.2021)

Niepert R.: „Wärmepumpeninitiative Niedersachsen – Das Wissensnetzwerk“. Wärmepumpen für Niedersachsen, Hannover (9.9.2021)

Niepert R., Engel B., Giovannetti F., Gräfer N., Henke M., Holler S., Holstenkamp L., Hüsing F., Langmaack N., Lemke N., Lippold F., Köhler J., Kühl L., Mallwitz R., Meyer L., Schönfeldt P., Tegethoff W., Hingst J.z., Kabelac S.: „Wärmepumpenforschung als Motor der Energiewende“. 7. Dialogplattform Power-to-Heat, Berlin, (30.11.2021)

Niepert R., Pitz-Paal R., Holst M., Heinrichs H., Horst J., Klann U., Jordan T., Poganietz W.-R., Merten F., Terrapon-Pfaiff J., Schmidt M.: „Woher kommt der grüne Wasserstoff?“. FVEE-Jahrestagung 2021: Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung, Berlin (10.11.2021)

Peibst R.: „Beyond Single Junction Efficiencies“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (6.9.2021)

Peibst R.: „Towards 28 %-Efficient Si Single Junction Solar Cells with Better Passivating POLO Junctions“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (22.4.2021)

Peibst R., Steib R., Semmelmann A., Lutz S., Brunner M., Schiessl A., Wöhe S., Wecker R., Haase F., Schulte-Huxel H., Blankemeyer S., Köntges M., Hollemann C., Brendel R., Wetzel G., Krügener J., Nonnenmacher H.-J., Mehlich H., Salavei A., Ding K., Lambert A., Pieters B.E., Janke S., Stannowski B., Korte L.: „Demonstration of Feeding VIPV-Converted Energy into the High-Voltage On-Board Network of Practical Light Commercial Vehicles for Range Extension“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (9.9.2021)

Puknat R.: „Woraus besteht das FeBOp-System?“. FeBOp-MFH Workshop, Online Event (28.4.2021)

Rienäcker M.: „Measuring Selectivity and Extraction Efficiency: the Three-Terminal Suns- $V_{oc}$  Method Applied to an n-c-Si/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/Al Junction“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (20.4.2021)

Rienäcker M., Larionova Y., Krügener J., Wolter S., Brendel R., Peibst R.: „Rear side dielectrics on interdigitating p<sup>+</sup>(-i)-n<sup>+</sup> back-contact solar cells – hydrogenation vs. charge effects“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (7.9.2021)

Rienäcker M., Titova V., Schmidt J., Peibst R., Brendel R.: „Selectivity and extraction efficiency of solar cell contacts: Comparing Different Definitions and Their Experimental Quantification“. MRS Fall Meeting 2021, Online Event, (7.12.2021)

Rosenstiel A., Vehse M., Peterssen F., Kost C., Voglstätter C., Kolb T., Jordan T., Musonda F., Thrän D.: „Wasserstoff als zentraler Baustein der Sektorenkopplung“. FVEE-Jahrestagung 2021: Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung, Berlin (10.11.2021)

Schiebler B.: „Bewertung einer Solarthermieanlage mit stagnationssicheren Wärmerohrkollektoren in einem innovativen Systemkonzept“. 31. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme, Online Event (28.4.2021)

Schinke C.: „Measuring the Spectral Irradiance of Solar Simulators“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (19.4.2021)

Schinke C.: „Uncertainty analysis for spectroradiometer measurements of direct solar irradiation“. 9<sup>th</sup> PV-Outdoor-Spectral Measurement Mini Workshop, Online Event (16.3.2021)

## Vorträge &amp; Poster/Oral and visual presentations

Schinke C., Hinken D., Wolf M., Bothe K., Kröger I., Nevas S., Winter S.: „Analysis and Correction of Systematic Deviations in Measurements of the Spectral Irradiance of Solar Simulators“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (8.9.2021)

Schlemminger M.: „A cross-country model for end-use specific aggregated household load profiles“. Jahrestreffen Forschungsnetzwerk Energie – Systemanalyse, Online Event (20.5.2021)

Shviro M., Fang Q., Metz S., Calnan S., Walter D., Krewer U., Weber A., Harnisch F., Möckl M.: „Wasser- und Dampfelektrolyse: Stand, Herausforderungen und Perspektiven“. FVEE-Jahrestagung 2021: Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung, Berlin (11.11.2021)

Stöhr M., Aprojanz J., Brendel R., Dullweber T.: „Firing-Stable PECVD SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/n-Poly-Si Passivating Contacts for High-Efficiency Silicon Solar Cells“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (9.9.2021)

Tous L., Govaerts J., Harrison S., Carrière C., Buchholz F., Halm A., Faes A., Nogay G., Ingenito A., Haug F.-J., Feldmann F., Raine D., Mittag M., Haase F., Morlier A., Bokali M., Brecl K., Topic M., Kester J.C.P., Wendlandt S., Gializzo M., Voltan A., Galbiati G., Theunissen L., Torregrosa F., Grimm M., Denafas J., Radavicius T., Lukinskas P., Kaakkunen J., Savişalo T., Regrettier T.: „Overview of the Latest Results Achieved in the H2020 Funded Project HighLite Aiming for High-Performance, Low-Cost and Sustainable c-Si PV Modules Tailored for Different Applications“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (7.9.2021)

Wagner-Mohnsen H.: „Combining Numerical Simulations, Machine Learning and Genetic Algorithms for Optimizing a POCL3 Diffusion Process“. 48<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Online Event (25.6.2021)

Wagner-Mohnsen H.: „Machine Learning for Optimizing Mass-Produced Industrial PERC Solar Cells“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (22.4.2021)

Weiland F.: „Einfluss von Wärmeversorgungskonzepten mit Wohnungsstationen auf die Effizienz von erdgekoppelten Wärmepumpen-Systemen in Mehrfamilienhäusern“. Effizienztagung Hannover, Hannover (6.11.2021)

Wendlandt S., Govaerts J., Heide A.S.H., Kaakkunen J., Savişalo T., Morlier A., Raine D., Röder D.: „Angle of Incidence Study at Photovoltaic Modules with Polymer Front Sheet“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (6.9.2021)

Wietler T.: „Perspectives on x-terminal silicon tandem solar cells“. Tandem PV Workshop 2021, Online Event (14.4.2021)

Winter M.: „Understanding Light-Induced Degradation Effects in Ga-doped Cz-Si and B-doped FZ-Si Materials“. SiliconPV 2021 - 11<sup>th</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Online Event (20.4.2021)

Witteck R., Siebert M., Kunze I., Köntges M.: „Hot Cells in High-Power PV Modules with Solar Cells from Larger Silicon Wafer Formats“. 38<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online Event (6.9.2021)

Yasin M.: „Permanente und automatisierte Betriebsanalyse von Wärmeeinheiten in Mehrfamilienhäusern“. Eversol Workshop „Regenerative Energieversorgung von Mehrfamilienhäusern – Umsetzung und Hürden“, Online Event (16.11.2021)

Yasin M., Eggert D.: „Analysen mit Monats-, Jahresbericht und Vergleichswerten“. FeBOp-MFH Workshop, Online Event (28.4.2021)



## Studien- & Bachelorarbeiten/Student research projects & bachelor theses

Harms, H.: „Kalibrierung von Clamp-On Ultraschallsensoren zur Ermittlung von Summenlinien zur Auslegung von zentralen Durchfluss-Trinkwassererwärmern“, (Bachelorarbeit), Institut für Thermodynamik / Energietechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Mai 2021)

Kühne P.: „Berechnung der Bestrahlungsstärken gebäudeintegrierter Photovoltaik mit dem Raytracer Radiance“, (Bachelorarbeit), Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (März 2021)

Mielich N.: „Einfluss der Metallisierung auf Effizienz und Stabilität von Perowskit-Solarzellen“, (Bachelorarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Januar 2021)

Papenfuß N.: „Modellierung von jährlichen Einstrahlungssummen an Gebäudeflächen mit dem CityPV-Raytracer unter Verwendung einer Jahreslichtquelle“, (Bachelorarbeit), Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Dezember 2021)

Rakow T. N.: „Charakterisierung der Bor-Wasserstoff-Interaktion in kristallinem Silizium“, (Bachelorarbeit), Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (März 2021)

Rott E.: „Lichtstreuung in einem parallelisierten Raytracer zur Vorhersage von Solarpotentialen an Gebäuden“, (Bachelorarbeit), Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Juni 2021)

Wagner J. K.: „Anwendungsgrundlagen des lichtinduzierten Elektrolumineszenzverfahrens für Halbzellen-Photovoltaikmodule mit Serien- / Parallelerschaltung“, (Bachelorarbeit), Physik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (September 2021)

## Diplom- und Masterarbeiten/Diploma & master theses

Grimm B.: „Lebensdauermessungen an Perowskiten“, (Masterarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Mai 2021)

Engl M.: „Quanteneffizienzmessung von Perowskit-Solarzellen“, (Masterarbeit), Elektrotechnik und Informationstechnik, Leibniz Universität Hannover, Hannover (April 2021)

Farouk M.: „Automated Measurement Data Analysis of Photovoltaics Thermal System using R Programming“, (Masterarbeit), Renewable Energy and E-Mobility, Hochschule Stralsund, Stralsund (Juni 2021)

Pathak S.: „Evaluation of energy management strategy for heat pump in residential building“, (Masterarbeit), Faculty of Environment and Natural Resource in Zusammenarbeit mit Faculty of Engineering, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg (Februar 2021)

Richter M.: „Strom- und Spannungsverhalten von Perowskit-Solarzellen beim Anlegen von Spannung in Rückwärtsrichtung“, (Masterarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Dezember 2021)

Sánchez Jordan C. M.: „Optimierung von Oberflächenpassivierung auf Solarzellen und ihre optische und elektrische Charakterisierung“, (Masterarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Mai 2021)

Timilsina K. P.: „Development of a collector parameter identification tool based on quasi-dynamic test method to analyse the thermal performance of Photovoltaic-Thermal collectors“, (Masterarbeit), Renewable Energy Engineering and Management, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg (September 2021)

Wagner L.: „Wärmerohr-Kollektoren in stagnationssicheren Solarthermieanlagen: Auslegung der Druckhaltung und experimentelle Bewertung an Versuchsanlagen“, (Masterarbeit), Energietechnik, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen (Dezember 2021)

Winter D.: „Untersuchung der Schichtstruktur von Perowskitabsorbieren anhand von Quanteneffizienzanalysen“, (Masterarbeit), Nanotechnologie, Leibniz Universität Hannover, Hannover (Januar 2021)

Witt C.: „Ermittlung praxisrelevanter Modellparameter von neuartigen Sonnenkollektoren mittels Systemsimulation“, (Masterarbeit), Regenerative Energien, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin (November 2021)

## Doktorarbeiten/Ph.D. theses

Dittrich A.: „Entwicklung thermochromer Absorberbeschichtungen und -konzepte für den Einsatz in Solarkollektoren“, Physik, Leibniz Universität Hannover (18.02.2021)

Folchert N.: „Modeling Poly-Si/SiO<sub>x</sub>/c-Si Junctions for Solar Cells“, Physik, Leibniz Universität Hannover (14.09.2021)

Halbich M.-U.: „Organic selective contacts for crystalline silicon solar cells“, Physik, Leibniz Universität Hannover (11.02.2021)

Rienäcker M.: „Three-terminal tandem solar cells enabled by back-contacted bottom cells featuring passivating, carrier-selective polysilicon based junctions“, Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover (16.11.2021)

Titova, V.: „Titanium-oxide-based electron-selective contacts to crystalline silicon: Characterization and application to solar cells“, Physik, Leibniz Universität Hannover (15.01.2021)

## Lehrveranstaltungen/Lectures

Brendel R.: „Physik der Solarzelle“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (04/2021-07/2021)

Brendel R.: „Physik präsentieren“, Proseminar, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (10/2020-01/2021)

Brendel R.: „Physik präsentieren“, Proseminar, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (10/2021-01/2022)

Ohrdes T.: „Erneuerbare Energien für Maschinenbau und Energietechnik - Modul Photovoltaik“, Wahlpflichtfach für die Bachelor-Studiengänge Maschinenbau, Energietechnik, Fakultät für Maschinenbau, Leibniz Universität Hannover (04/2021-09/2021)

Peibst R.: „Wirkungsweise und Technologie von Solarzellen“, Vorlesung und Übungen, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Leibniz Universität Hannover, (10/2020-01/2021)

Peibst R.: „Wirkungsweise und Technologie von Solarzellen“, Vorlesung und Übungen, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Leibniz Universität Hannover, 10/2021-01/2022)

Schinke C.: „Einführung in die elektronische Messdatenerfassung und -verarbeitung mit LabView“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, 10/2020-01/2021)

Schinke C.: „Einführung in die elektronische Messdatenerfassung und -verarbeitung mit LabView“, Vorlesung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover, (10/2021-01/2022)

Schinke C.: „Labor- und Simulationspraxis Solarenergie“, Blockpraktikum, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover und ISFH (09/2021)

Schinke C.: „Physik der Solarzelle“, Übung, Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (04/2021-07/2021)

Schmidt J.: „Grundlagen der Halbleiterphysik“, Vorlesung (Online), Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (0/2020-01/2021)

Schmidt J.: „Grundlagen der Halbleiterphysik“, Vorlesung (Online), Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (10/2021-01/2022)

Schmidt J.: „Charakterisierung von Halbleitern und Solarzellen“, Vorlesung (Online), Fakultät für Mathematik und Physik, Leibniz Universität Hannover (04/2021-07/2021)

Wietler T.: „Bipolarbauelemente“, Vorlesung, Fakultät für Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover (10/2020-01/2021)

Wietler T.: „Bipolarbauelemente“, Vorlesung, Fakultät für Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover (10/2021-01/2022)

Wietler T.: „MOS-Transistoren und Speicher“, Vorlesung, Fakultät für Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover (04/2021-07/2021)



## Preise & Auszeichnungen/Awards

Bredemeier D., Poster Award, 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, für „Fast and high-resolution calculation of roof-top and facade PV potentials using GPU-accelerated ray tracing“, Online-Konferenz, 6.-10.9.2021

Folchert N., SiliconPV Award, SiliconPV 2021 11th International Conference on Silicon Photovoltaics, für „Easy-to-Apply Contact Resistance Measurements of the Interfacial Oxide in Poly-Si/SiO<sub>x</sub>/c-Si Junctions – Revisiting the Cox & Strack Formula“, Online-Konferenz, 19.-23.4.2021

Hollemann C., SiliconPV Award, SiliconPV 2021 11th International Conference on Silicon Photovoltaics, für „Influence of Firing on the Interface State Density of n-Type Poly-Si Passivating Contacts“, Online-Konferenz, 19.-23.4.2021

Schiebler B., Poster Award, Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme, für „Bewertung einer Solarthermieanlage mit stagnations sicheren Wärmerohrkollektoren in einem innovativen Systemkonzept“, Online-Konferenz, 27.-30.4.2021

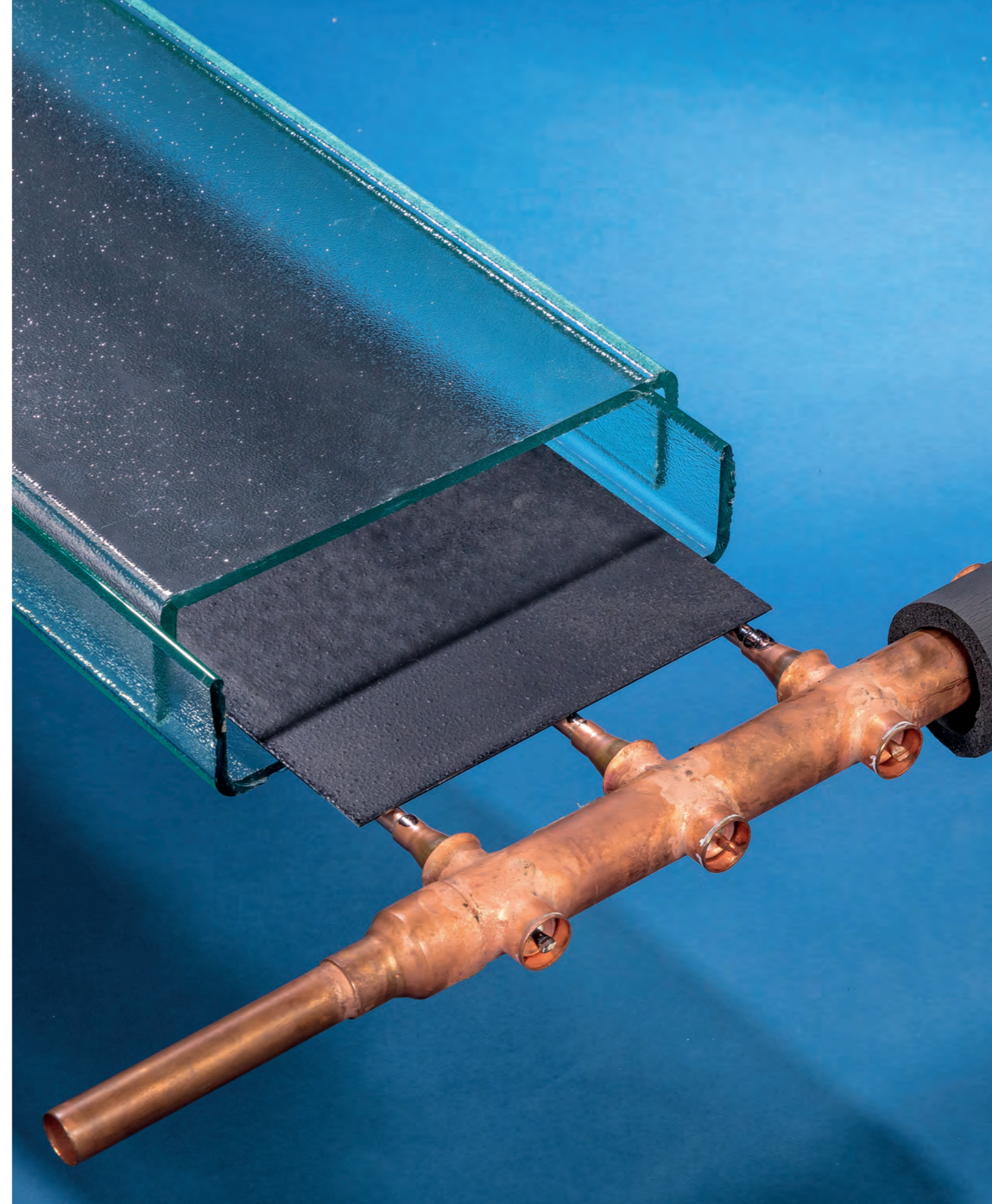
Stöhr M., Poster Award, 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, für „Firing-stable PECVD SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/n-poly-Si passivating contacts for high-efficiency silicon solar cells“, Online-Konferenz, 6.-10.9.2021

Winter M., SiliconPV Award, SiliconPV 2021 11th International Conference on Silicon Photovoltaics, für „Understanding Light-Induced Degradation Effects in Ga-doped Cz-Si and B-doped FZ-Si Materials“, Online-Konferenz, 19.-23.4.2021



Ausgezeichnet für ihre diesjährigen Konferenzbeiträge (v.l.n.r.): Maximilian Stöhr, Christina Hollemann, Bert Schiebler, Michael Winter und Dennis Bredemeier

Honored for their conference contributions this year (from left to right): Maximilian Stöhr, Christina Hollemann, Bert Schiebler, Michael Winter and Dennis Bredemeier.



Solarthermisch aktivierte Profilbaugläser mit Heatpipe-Technologie.  
Solar-thermally activated profiled glass with heatpipe technology.



# Das Auto der Zukunft?

Angetrieben von der Sonne: ISFH stellt Nutzfahrzeug mit Solaranlage vor

VON JENS SPICKERMANN

**EMMERTHAL.** Elektroantriebe gelten zwar gemeinhin als wichtigste Zukunftstechnologie in der Automobilbranche, doch die verglichen mit Verbrenner-Fahrzeugen geringen Reichweiten und langen Ladezeiten sorgen bei vielen Kunden noch für Skepsis. Naheliegender wirkt da die Lösung, einfach Solarzellen auf die Fahrzeuge zu montieren, sodass sie ihren Strom unterwegs selbst erzeugen. Diese simple Idee technisch umzusetzen ist komplizierter als es scheint. Dennoch ist es dem Solarforschungsinstitut (ISFH) in Ohringen, einen Prototypen zu entwickeln, der zumindest einen Teil seiner Antriebsenergie aus Sonnenstrahlen bezieht.

Ein Auto, das keine Ladestationen mehr benötigt und zu 100 Prozent mit kostenlosem, solarem „Ökostrom“ fährt, bleibt zwar nach wie vor eine Utopie. Doch zumindest eine deutliche Reichweitenverlängerung konnten die Wissenschaftler des ISFH durch eine integrierte Photovoltaikanlage erreichen. Als Basis des Prototypen diente ein „Streetscooter“ – jenes elektrische Nutzfahrzeug, das seit einiger Zeit im Dienst der Deutschen Post steht. Auf dem Dach und an den Seiten des quaderförmigen Laderaumes vertriehen hocheffiziente Solarmodule ihre Arbeit.

Im nicht gerade sonnenverwöhnten Weserbergland sei eine Reichweite von 5200 Kilometer pro Jahr, die der Streetscooter ausschließlich mit Sonnenenergie fährt, realistisch, erklärt Projektleiter Professor Robby Peibst. Da insbesondere Nutzfahrzeuge jährlich weit mehr Kilometer zurücklegen, müsste der Großteil der Energie also weiterhin „getankt“ werden. Im Sommer sei die Leistung der Solarzellen jedoch deutlich größer. „Da können Sie die Hälfte der Ladestopps einsparen“, sagt Peibst. Wenn das Fahrzeug in sonnigeren Gefilden – beispielsweise Südeuropa – eingesetzt würde, könnte es sein Potenzial noch deutlich besser entfalten. Doch je nach Nutzertypus wäre auch in Norddeutschland ein reiner Solarbetrieb möglich – wenn nämlich die täglich zurückgelegte Strecke unterhalb von 20 Kilometer liegt. Was genau möglich ist und inwieweit das ökonomisch und ökologisch alles sinnvoll ist, testet das Solarinstitut seit Februar durch tägliche Ausfahrten und Messungen.

Vom Planungsstadium bis zum funktionstüchtigen Prototypen hat das Streetscooter-



Auf dem Dach und an den Seiten des Streetscooters produzieren Solarzellen Strom für eine Reichweitenverlängerung. FOTO: ISP

Projekt schon eine längere Entwicklungsphase hinter sich. Ende 2018 erfolgte der Auftakt in Zusammenarbeit mit den Firmen Viteco Technologies, A2-Solar, Meyer Burger, dem Forschungszentrum Jülich, dem Helmholtz-Zentrum Berlin, dem MBE-Institut der Uni Hannover und den Continental Engineering Services. Eine Herausforderung sei es gewesen, den erzeugten Solarstrom von einer Spannung von 12 Volt auf 400 Volt zu transformieren und so als Antriebsenergie nutzen zu können, erklärt Peibst. Diese Aufgabe sei technisch anspruchsvoll, mit Sicherheitsaspekten verbunden und müsse zudem effizient umgesetzt werden, da auch der Konverter Strom verbräuche.

Die Lösung sei eine zusätzliche Puffer-Batterie, deren Ladung erst „rübergeschauft“ werde, sobald sie durch die Solaranlage voll aufgeladen wurde. „Diese Technik ist jetzt neu“, sagt Peibst. Bei den Solarmodulen sei wiederum nicht nur eine möglichst hohe Effizienz, sondern auch eine Erschütterungsbeständigkeit und Hitzetoleranz notwendig. Der Einsatz an einem Fahrzeug erfordere in dieser Hinsicht deutlich mehr Widerstandsfähigkeit als bei Photovoltaikanlagen, die auf Hausdächern montiert werden. Bei optimalen Bedingungen könnten die Solarzellen insgesamt 2200 Watt leisten, berichtet Peibst. In der Praxis könne dieser Wert aber wohl nicht erreicht werden, da die an

verschiedenen Seiten des Fahrzeugs montierten Module nie gleichzeitig der vollen Sonneneinstrahlung ausgesetzt seien.

Ein Grund für die Auswahl des Streetscooters als Fahrzeug-Basis seien die großen, geraden Flächen gewesen, sagt Peibst. Theoretisch sei es aber auch möglich, Solarzellen auf den gebogenen Flächen eines Pkw zu verbauen. Durchsetzen könne sich die Technologie aber wohl eher bei bestimmten Anforderungen im gewerblichen Bereich. „Die Massenproduktion von Nutzfahrzeugen zu erreichen“, meint Peibst. Aufgrund der hohen Kosten würden sich für die Anwendung der Solartechnik bei Pkw wohl höchstens einige „Enthusiasten“ gewinnen lassen. Grund für das Interesse wäre dann anstatt wirt-

schaftlicher Erwägungen eher der Klimaschutzgedanke. Im Gegensatz zum derzeitigen Strommix aus der Steckdose ist der Solarstrom nämlich klimaneutral.

Der Masseneinsatz von „Solarautos“ die zugleich das Reichweiten-, Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Problem im Straßenverkehr lösen würden, bleibt also vorerst eine Utopie. Doch einen wichtigen Schritt hat das Projektteam um Robby Peibst mit dem Solar-Streetscooter bereits geleistet. Um bei großen Autobauern Gehör zu finden, müsse man erst einmal zeigen, dass die Technik funktioniert und ökonomisch sinnvoll sein kann, meint Peibst. Den Nutzen auch zu kommunizieren, sei ein Ziel für die nächste Zeit.

In den kommenden Wochen und Monaten wird der Solar-Streetscooter nun öfter auf den

Straßen des Weserberglandes zu sehen sein. Um die notwendigen Messungen durchführen zu können, werde das Auto jeden Tag 75 Kilometer gefahren, sagt Peibst. Testweise sollen die schweren, durch Glas geschützten Solarmodule des Fahrzeugs durch leichtere ersetzt werden, die allerdings weniger stabil konstruiert sind. Auf diese Weise wollen die Wissenschaftler herausfinden, ob und inwieweit sich bei dem Solarcooter noch Gewicht einsparen lässt. Die derzeitigen Solar-Bauteile würden nämlich rund 100 Kilogramm wiegen, die die mögliche Nutzlast des Fahrzeugs natürlich reduzieren würden, erklärt Peibst.

Das Ziel sei schließlich, ein Solarfahrzeug zu entwickeln, das Unternehmen auch wirtschaftliche Vorteile bieten könne.



Professor Robby Peibst zeigt das technische Innenleben des Fahrzeugs. Der Solarstrom muss von 12 auf 400 Volt hochtransformiert werden. FOTO: ISP

Benennung zu erhalten, präzisierter das Unternehmen auf Nachfrage unserer Zeitung: Das entspreche rund 24 000 Solarmodulen.

Wie Angelique Fröhlich als Assistenz des Vorstands der „secureenergy solutions AG“ mitteilt, geht es derzeit vorrangig darum, die Bewohner der Gemeinde vorab über das geplante Vorhaben zu informieren. Das entspreche dem Wunsch der Politik, Bürgermeister Andreas Grossmann und Ortsbürgermeister Rolf Keller bestätigen, zuvor in Kenntnis gesetzt worden zu sein. Der Ortsrat Börry habe sich bei einer Videokonferenz mit dem Thema befasst. Es sei übereinstimmende Meinung gewesen, dass der Projektbetreiber zunächst die Öffentlichkeit informieren solle, bevor sich die politischen Gremien mit dem Thema befassen würden, erklärt Keller. Wegen der Einschränkungen durch

dem Projektleiter Felix Kandorra die Kerndaten um zahlreiche Details. Seit 2015 vor allem auf Dachanlagen spezialisiert, sollten nun verstärkt Freiflächen-Solarparks das Angebot ergänzen. Die Fläche etwa 1,5 Kilometer nördlich von Esperde stehe bereits zur

**3100**  
Haushalte  
könnten im Schnitt mit  
Strom versorgt werden.



Verfügung. Die Eigentümerfamilie sei mit dem Wunsch der Planung eines Solarparks auf das Unternehmen zugekommen, das selbst als Investor auftrete. „Die secureenergy solutions AG vereint alle Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette dieses Projektes im eigenen Haus – von

der Projektentwicklung, Projektplanung, dem Anlagenbau bis hin zur Betriebsführung des Solarparks“, heißt es dazu vom Vorstand Karsten Becker. „Somit bleiben wir während jeder Projektphase Ansprechpartner für die Gemeinde und treten ebenfalls als Investor auf.“ Die Investitionssumme

liege voraussichtlich im knapp zweistelligen Millionenbereich.

Der Solarpark Esperde werde mit einer Leistung von ungefähr 12 MW in der Lage sein, im Schnitt die elektrische Energieversorgung von vorwiegend 3100 Drei- bis Vier-Personen-Haushalten zu sichern, rechnet das Berliner Team vor. Ein Vergleich: Laut jüngstem Energiebericht der Stadtwerke Hameln für das Jahr 2019 bestehen in der Gemeinde Emmerthal 278 einzelne Anlagen mit einer Leistung von insgesamt 3,65 MW.

Nach Jahren einer Flaute erlebt die Solarenergie wieder einen Boom. Nach Angaben des Bundesverbandes Solarwirtschaft stieg 2020 die neu installierte Photovoltaikleistung gegenüber dem Vorjahr um 27,6 Prozent. Die aktuellen Zahlen würden eine überwältigende solartechnische Akzeptanz und Investitionsbereitschaft bei privaten Verbrauchern und in der Wirtschaft belegen, erklärte dazu der Branchendienst.

„Die Stromerzeugung durch Photovoltaik ist mittlerweile die günstigste Form der Energieumwandlung“, erklären



dazu die Berliner die selbst die E-Mobilität. Weiterentwicklung der Photovoltaik sind wir nun an einem bestimmten G

## Emmerthaler Solarforscher Gastgeber für internationale Tagung

**300 Teilnehmende aus der ganzen Welt** befassen sich bis Donnerstag bei der viertägigen internationalen Fachkonferenz SiliconPV 2021 mit neuesten Trends und Ergebnissen zu Technologien, Materialien und Konzepten für kristalline Si-Solarzellen und -Module, um die Photovoltaik weiter voranzubringen.

staltung ist das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) in Emmerthal. Dessen Leiter Prof. Dr. Rolf Brendel eröffnete am Montag die Fachkonferenz. Im Vorfeld betonte er in einer Botschaft die wichtige Bedeutung, nicht nur das Coronavirus, sondern auch die sehr gefährliche Krise der globalen Erwärmung weiter zu bekämpfen.

auch in Verbindung mit anderen Photovoltaik-Materialien, bietet noch viele in der Entwicklung befindliche und weitgehend unerforschte Lösungen für künftige Leistungssteigerungen, Qualitätsverbesserungen und damit Kostenreduktionen, wie ein ISFH-Sprecher erklärte. Das beherrschende Thema seien Hocheffizienz-Silizium-Solarzellen und deren Skalierung in den Industriemaßstab (26 bis 28 Prozent Wirkungsgrad seien möglich, aber bisher nur auf wenigen Quadratzentimetern und nicht auf Zellen mit 16 Zentimeter Kantenlänge). Weitere Themenschwerpunkte seien die Verfeinerung von Messmethoden und die Charakterisierung von Hocheffizienz-Solarzellen. cb

Gastgeber der Online-Veranstaltung

Kristallines Silizium, vor allem



ISFH-Leiter Prof. Dr. Rolf Brendel eröffnete am Montag die internationale Online-Veranstaltung.

FOTO: CB



Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 02. Juni 2021

## Vorrang für grünen Wasserstoff

Institut für Solarenergieforschung: Stärkerer Ausbau für Niedersachsen

VON CHRISTIAN BRANAHL

**EMMERTHAL/HANNOVER.** Niedersachsens Umweltminister Olaf Lies (SPD) sieht im „grünen Wasserstoff“ eine zentrale Bedeutung, um schneller mehr klimaschädliche CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen. Das jüngste Klimaschutz-Urteil des Bundesverfassungsgerichtes mache deutlich, dass „wir die Verantwortung zum Handeln haben“, sagte der Minister am Dienstag bei der Vorstellung einer Studie durch Prof. Dr. Rolf Brendel, Leiter des Instituts für Solarenergieforschung in Emmerthal (ISFH), in Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover. Danach benötigt Niedersachsen bereits 2030 deutlich mehr grünen Wasserstoff, für den ein massiver Ausbau der Photovoltaik und Windkraft im Land erforderlich sei. „Niedersachsen kommt eine entscheidende Rolle als Motor der Energiewende Deutschlands zu“, erklärte Brendel.

Auch die Bundesregierung will die Wasserstofftechnologie durch Milliardeninvestitionen forcieren, wobei mehrere Projekte in Niedersachsen vorgeschlagen wurden. Dabei geht es vor allem um „grünen“ Wasserstoff, für dessen Herstellung Ökostrom verwendet wird. Er soll beim kli-



Für die Wasserstofftechnologie gilt ein massiver Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen als notwendig. FOTO: DPA

mafreundlichen Umbau von Produktionsprozessen in der Wirtschaft eine große Rolle spielen – also bei der Energiewende weg von den fossilen Brennstoffen Kohle und Gas.

Eingesetzt werden sollte der grüne Wasserstoff laut Studie vor allem für die Grundstoff- und Chemieindustrie sowie in Wasserstoffkraftwerken. Konkret kommt die „Simulative Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen“ zu dem Ergebnis, dass in dem Bundesland mindestens 13 Gigawatt Elektrolyseleistung für die Eigenproduktion von Wasserstoff benötigt wird. Dieser Schluss stehe im starken Kontrast zu den fünf Gigawatt, die in der Nationalen Wasserstoffstrategie für Gesamtdeutschland im

Jahr 2030 prognostiziert werden sei. Die zukünftige Elektrolyseleistung innerhalb Deutschlands habe enorme Konsequenzen auf die Versorgungssicherheit und Kostenreduzierung von grünem Wasserstoff, heißt es im Gutachten weiter.

Der Minister für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz bezeichnete den Umbau der gesamten Energieversorgung und Wirtschaft auf klimaneutrale, erneuerbare Energiequellen und innovative Technologien als „notwendig und machbar“. Während Berlin jährliche Vorgaben mache, gebe die Studie die Zielmarke des Jahres 2050 vor, um daraus die Erfordernisse abzuleiten. Lies: „Abwarten wäre fatal.“

Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 25. Juni 2021

## Wie die Energiewende den Wirtschaftsstandort stärken kann

CDU-Kandidatin Wulf und der parteilose Benze setzen Schwerpunkte

VON CHRISTIAN BRANAHL

**EMMERTHAL.** Mit klaren Positionen zur Energiewende wollen die CDU-Bundestagskandidatin Mareike Lotte Wulf und der Emmerthaler Bürgermeisterkandidat Nils Benze nicht nur die Forschung vorantreiben, sondern auch neue Arbeitsplätze ermöglichen. Beide Politiker setzen dabei neben anderen erneuerbaren Energien besondere Hoffnung auf Wasserstoff-Projekte. „Eine Schlüsseltechnologie“, sagt

die bisherige Landtagsabgeordnete Wulf.

Das berichteten die Kandidaten im Anschluss an die Besuche am Donnerstag im Kernkraftwerk Grohnde und Institut für Solarenergieforschung (ISFH), die nach ihren Angaben wegen der Corona-Vorkehrungen keine weitere Begleitung wie durch die Medien erleben hatten.

Zunächst hatten sich Wulf und der parteilose Benze, der sich für CDU und FWE um das Bürgermeistamt bewirbt, im

AKW durch Anlagenleiter Michael Bongartz über den geplanten Rückbau des Kraftwerkes informiert. Es geht bis Ende des Jahres endgültig vom Netz. Selbst wenn für den Rückbau knapp zwei Jahrzehnte kalkuliert sind, so sehen beide Politiker die Aufgabe, frühzeitig die Weichen für eine künftige Nutzung des Areals zu stellen. Jeder wisse, dass Planungs- und Genehmigungsverfahren viele Jahre dauern könnten, meinte die Abgeordnete. Vorstellbar sei



Vor dem endgültigen Aus: Bis Ende des Jahres geht das AKW Grohnde endgültig vom Netz. FOTO: CE

das Kraftwerksareal. „Als Bürgermeister will ich eingebunden sein, was dort passiert – auf Augenhöhe“, erklärt er. Dass die Solarforscher in Emmerthal weit mehr leisten als nur die Entwicklung innovativer Photovoltaiktechnologien mit höheren Wirkungsgraden und immer geringeren Kosten, das erläuterte ISFH-Leiter Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel den Gästen. Bekanntlich hatte das Institut jüngst für das



Über aktuelle Entwicklungen informierten sich Nils Benze und Mareike Lotte Wulf im Institut für Solarenergieforschung. FOTO: CE

Land eine Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen erstellt. Klar sei, dass dafür die erneuerbaren Energien massiv ausgebaut werden müssten, zitiert daraus Benze. Umso mehr gehe es für ihn darum, sich weiter für die Förderung von Photovoltaik einzusetzen.

Gleichzeitig müssten die Einwohner motiviert werden, diese Anlagen auf ihren Hausdächern zu installieren, bevor

der Gesetzgeber den Druck auf die Besitzer erhöhe. Grundsätzlich gelte es, beim Klimaschutz alle Maßnahmen und auch den Energiemix im Blick zu behalten, erklärt Benze. Dass dem ISFH bei der Energiewende eine besondere Rolle zukomme, hebt die in- zwischen in Ohr wohnende Kandidatin Wulf hervor – durch die angewandte Forschung und durch hochqualifizierte Beschäftigte.



Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 30. Juli 2021



Ein Schwerpunkt der heimischen Forscher für die internationale Entwicklung liegt in der Photovoltaik, um umweltfreundlich Strom zu produzieren. Ziel: höhere Wirkungsgrade, geringere Kosten. FOTO: DPA

## Solarforscher mahnen zu mehr Eile

Institutsleiter fordert von der Politik größeren Einsatz gegen die Klimakrise / „Es geht zu langsam voran“

VON CHRISTIAN BRANAHL

**EMMERTHAL.** Ein höheres Tempo für die Energiewende fordert das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) in Emmerthal. Immer mehr Firmen sowie Politikerinnen und Politiker „sehen die Chancen, die in der Energiewende stecken“, schreibt Institutsleiter Prof. Dr. Rolf Brendel im soeben veröffentlichten Jahresbericht. Ein Haltungswandel, der in den 1980er Jahren begonnen habe, kondensiere sich in immer mehr Gesetzen auf föderaler, nationaler und auch auf internationaler Ebene. Brendel: „Wir sind mittlerweile gemeinsam auf dem Weg und müssen schneller werden.“



FOTO: CB

„Schnelle Technologieentwicklung kann die Energiewende deutlich erleichtern.“

Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel  
Institutsleiter

meinnützige Gesellschaft, deren alleiniger Gesellschafter das Land Niedersachsen ist, zählte zum Ende des Jahres 158 Beschäftigte, in der Mehrzahl wissenschaftliches und technisches Personal sowie im Rahmen von Forschungsprojekten Promovierende. Wie das Institut weiter erläutert,

standen im Vorjahr knapp 13,8 Millionen Euro im Gesamtetat (2019: 10,4 Millionen Euro). Die institutionelle Förderung aus dem Haushalt des Ministeriums für Wissenschaft und Kultur betrug dabei 27 Prozent. Die Drittmittelinnahmen aus öffentlicher Forschungsförderung des Bundes, des Landes Niedersachsen und der Europäischen Union beliefen sich auf 8,9 Millionen Euro, davon der größte Teil Verbundforschung mit der Industrie. Hinzu kommen direkte industrielle Drittmittelinnahmen aus Dienstleistungen und Auftragsforschung in Höhe von 1,2 Millionen Euro.

„Schnelle Technologieentwicklung kann die Energiewende deutlich erleichtern“, erklärt Brendel unter Hinweis auf verschiedene beispielhafte Projekte aus dem vergangenen Jahr. Neue Solarzellen-Technologien mit einfachen Herstellungsprozessen erlaubten Wirkungsgrade von 24

Prozent. Poly-Silizium auf Oxid, wie es am ISFH entwickelt worden sei, „ist eine wichtige Zutat zu diesem internationalen Fortschritt“, meint der Geschäftsführer und Leiter. Mit Schattensmasken aus Glas eines niedersächsischen Technologieunternehmens seien neue Strukturierungstechniken möglich. Mit dem Mineral Perowskit gebe es ganz neue Solarzellenmaterialien, die zusammen mit Silizium Wirkungsgrade sogar über 30 Prozent erlauben würden.

Als wichtiges praktisches Thema bezeichnet er ein Projekt für den Verkehrssektor. Dabei untersucht das Institut E-Lieferfahrzeuge, in die Photovoltaik integriert ist und deren Reichweite verlängert werden soll. Über Wärmepumpen lässt sich Solarstrom zum Heizen nutzen, wie das Institut bei einem weiteren Projekt die Praxistauglichkeit verbessern will. Brendel erinnert dar-

an, dass die Bundesrepublik seit 1990 bewusst ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziere. „Ordentliche Erfolge sind da“, erklärt er. „Aber es geht in der Welt und auch in Deutschland zu langsam voran.“ Er verweist auf das jüngste Urteil des Bundesverfassungsgerichts nach der Klage junger Menschen, dass die Energiewende beschleunigt werden müsse. Andernfalls könnte die Freiheit der Kläger und zukünftiger Generationen durch eine verschärfte Klimakrise zu einem knappen Gut werden. „Wie wunderbar, dass unsere Jugend sich um die Zukunft kümmert und dabei mit klarem Blick auf die Wissenschaft eine starke meinungsbildende Kraft wurde“, nennt Brendel als einen von fünf Punkten, die er mit dem Urteil verbinde. Und es sei eine Ermutigung: „Ja, unsere Forschung und Entwicklung ist gewollt, gewünscht und wird gebraucht – möglichst rasch.“

Deister Weser Zeitung (DeWeZet) vom 26. November 2021

## Solarpark gilt als regionales Projekt

Pläne für Freiflächen-Photovoltaikanlage in Emmern / Initiatoren sind Jochen Windel und Rudolf Welzhofer

VON CHRISTIAN BRANAHL

**EMMERTHAL.** Erste Informationen zu diesem ehrgeizigen Klima-Projekt in Emmerthal sickerten zwar nach und nach durch, aber nun machen es die Initiatoren nach monatelangen akribischen Planungen offiziell: In Emmern soll ein großer Solarpark entstehen – und zwar unter heimischer Regie. Ideengeber sind Jochen Windel aus Kirchhohns und der Emmerthaler Ortsbürgermeister Rudolf Welzhofer, die auf einem etwa sieben Hektar großen Areal – die ehemalige Kiesgrube und Mülldeponie zwischen Emmern und Ohr direkt an der Bundesstraße 83 – eine Freiflächen-Photovoltaikanlage projektieren. Damit wollen sie auf kommunaler Ebene einen Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten, wie sie begründen.

So könnte innerhalb kurzer Zeit ein zweiter Solarpark in Emmerthal entstehen. Wie im April berichtet, plant ein Berliner Unternehmen nahe dem Dorf Esperde auf einer Fläche von etwa elf Hektar einen Solarpark mit rund 24 000 Modulen. Was das Projekt von Welzhofer und Windel auszeichnet: Statt auswärtiger Investoren sollen in Emmern als ausdrücklich regionales Vorhaben die Bürgerschaft, die kommunalen Körperschaften sowie die heimischen Wirtschaftsbetriebe und Energieversorger einbezogen werden. „Ein Herzenswunsch“ sei es



Gemeinsames Engagement für einen Solarpark in Emmern (v. li.): Rudolf Welzhofer, Jochen Windel, Hartmut Hahn und Bürgermeister Dominik Petters mit einem Solarmodul. Auf dieser ehemaligen Mülldeponie ist die Freiflächenanlage mit rund 12 000 Modulen geplant. FOTO: CB

für ihn, den Solarpark voranzutreiben, meint Windel. Als früherer Gutsverwalter im Rittergut Ohr habe er die Grundstücksvergabe an das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) begleitet. „Alle reden über die Energiewende – damit ist es aber nicht getan“, sagt Welzhofer. „Wir müssen selbst aktiv werden.“

Die Initiatoren verwiesen am Donnerstag darauf, schon frühzeitig die Gemeindeverwaltung und das ISFH einbe-

zogen zu haben. Schnell bezundete auch die Bürger-Energie Hummetal eG Interesse, die bereits mehrere Photovoltaikanlagen auch auf Dächern von Gebäuden der Gemeinde Emmerthal betreibt. Inzwischen sei die Energieerzeugung mit Freiflächen-Photovoltaikanlagen die günstigste Stromgewinnung, bestätigt Hartmut Hahn als Mitglied des Vorstandes, der nun mit Welzhofer die Koordination für den Solarpark weiter vorantreibt.

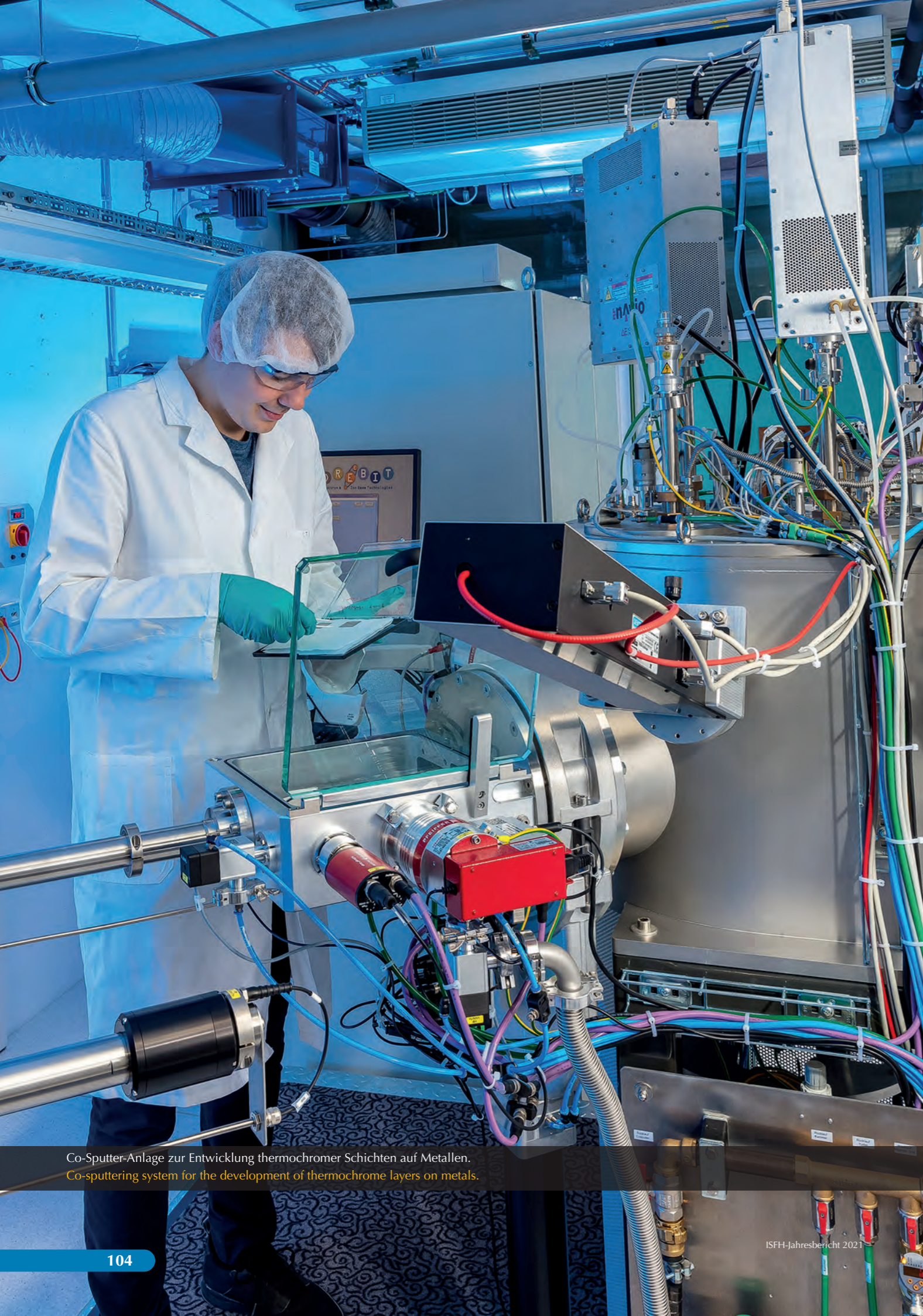
Nach Angaben der Verantwortlichen beteiligt sich daran das Emmerthaler Unternehmen Neudorff. Der mit dem

Deutschen Nachhaltigkeitspreis ausgezeichnete Spezialist für naturgemäßes Gärtnern produziert bereits klimaneutral. Weitere Beteiligte sind drei heimische Energieversorger: Energieservice Westfalen Weser sowie die beiden Stadtwerke Hameln und Bad Pyrmont treten mit als Investoren auf. Wie sich die Einwohner über eine Bürgerbeteiligung engagieren können, das soll voraussichtlich im Frühjahr bekanntgegeben werden.

Die Leistung des Solarparks soll etwa 4500 kWp betragen. Vorgesehen sind rund 12 000 Solarmodule. Die Investitionssumme beziffert Welzhofer auf

knapp drei Millionen Euro. Das Areal in Emmerthal gilt als sogenannte Konversionsfläche, die keine besondere Bedeutung für die Landwirtschaft hat. Nachdem dort bis in die 1970er Jahre Kies abgebaut worden war, diente die ausgekofferte Grube als Abfall- und Mülldeponie. Von daher sei die Fläche gut geeignet, findet Bürgermeister Dominik Petters. Er sprach von einem wichtigen Projekt, um die Energiewende auch in Emmerthal voranzubringen. Und das wisse er aus vielen Gesprächen, so Petters: Photovoltaik habe eine größere Akzeptanz als Windkraftanlagen.





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

## Autoren

**Baumann, Ulrike**, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-637, baumann@isfh.de

**Bordihn, Stefan, Dr.**, Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-403, bordihn@isfh.de

**Bredemeier, Dennis, Dr.**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 0511-762-19758, bredemeier@solar.uni-hannover.de

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

**Büttner, Christoph**, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 05151-999-647, buettner@isfh.de

**Dittrich, Arne, Dr.**, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 05151-999-635, dittrich@isfh.de

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

**Frick, Edward**, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 05151-999-523, e.frick@isfh.de

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

**Gewohn, Timo**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,

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

**Keuler, Jonas**, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 05151-999-647, j.keuler@isfh.de

**Kirchner, Maik**, Diplom-Ingenieur, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 05151-999-523, kirchner@isfh.de

**Köhler, Adrian**, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-415, koehler@isfh.de

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

**Langlois, Jonathan**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-215, j.langlois@isfh.de

**Mercker, Anja**, Diplom-Ingenieurin (FH), Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-325, a.mercker@isfh.de

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

**Mettner, Larissa**, Abteilung Photovoltaik, ☎ 05151-999-426,  
larissa.mettner@isfh.de

**Morlier, Arnaud, Dr.**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-303, morlier@isfh.de

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

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

**Ohrdes, Tobias, Dr.**, Diplom-Physiker,

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

**Peterssen, Florian**, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 0511-762-19758, peterssen@isfh.de

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

**Schäfer, Sören, Dr.**, Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,

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

**Schinke, Carsten, Dr.**, Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-632, c.schinke@isfh.de

**Schneider, Elisabeth**, Master of Science, Abteilung Solare Systeme,  
☎ 05151-999-646, e.schneider@isfh.de

**Schmidt, Jan, Prof. Dr.**, Diplom-Physiker, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-425, j.schmidt@isfh.de

**Schulte-Huxel, Henning, Dr.**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-414, h.schulte-huxel@isfh.de

**Stöhr, Maximilian**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-314, stoehr@isfh.de

**Tittel, Frank**, Oberstudienrat, Lehrkräftefortbildung,  
☎ 05151-999-100, nils@isfh.de

**Wersebe-Wetzig, Vivienne**, Studienrätin, Lehrkräftefortbildung,  
☎ 05151-999-100, nils@isfh.de

**Winter, Michael**, Master of Science, Abteilung Photovoltaik,  
☎ 05151-999-314, m.winter@isfh.de



### Gestaltung/Design

Dipl. Grafik-Designerin Catharina Zeropa-Stangenberg, caze • werbung & kommunikation, Hameln, [www.caze.de](http://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](mailto:info@isfh.de)  
Internet <https://www.isfh.de>

### Publikationskennung/International Standard Serial Number

ISSN 1613-5970

Redaktionsschluss/Editorial deadline  
30.4.2022

### Druck/Print

Wanderer Werbedruck GmbH, Ronnenberg, [www.wanderer-druck.de](http://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, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 21, 22, 23, 61, 70, 71, 73: Salzmann PhotoDesign, Hameln.  
Bild 7: BlueHouse. Bilder 49, 50: Überarbeitung durch caze • werbung & kommunikation, Hameln. Bild: 63 ©Dr. Raphael Niepelt.  
Alle übrigen Bilder: ISFH.  
Images A, B, C, D, E, 1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 21, 22, 23, 61, 70, 71, 73: Salzmann PhotoDesign, Hameln.  
Image 7: BlueHouse. Images 49, 50: revision by caze • werbung & kommunikation, Hameln. Bild: 63 ©Dr. Raphael Niepelt.  
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 Hamelin for his professional and kind support.





Einbau von (Proben mit je vier) Perovskitsolarzellen für die Metallisierung mittels Aufdampfen.  
Installation of (samples with four each) perovskite solar cells for metallization by evaporation.





**Institut für  
Solarenergieforschung  
Hameln**

**2021**

Am Ohrberg 1  
D-31860 Emmerthal

Telefon +049 (0) 5151-999-100

Telefax +049 (0) 5151-999-400

eMail [info@isfh.de](mailto:info@isfh.de)

Internet [www.isfh.de](http://www.isfh.de)



ISSN 1613-5970