

2021

TÄTIGKEITSBERICHT
ANNUAL REPORT



ZAE BAYERN

zae-bayern.de

Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e. V.
Bavarian Center for Applied Energy Research

DER VORSTAND EXECUTIVE BOARD

Dr. Andreas Hauer
Vorsitzender | Chairman of the Board

Dr. Hans-Peter Ebert
Stand: 31. Dezember 2021
Status: 31 December 2021



*Bitte sammeln Sie Altpapier
für das Recycling.*

HERAUSGEBER

ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e. V.

TEXTBEITRÄGE UND FOTOS

von den Mitarbeitenden des ZAE Bayern
Fotos, soweit nicht anders angegeben, © ZAE Bayern

REDAKTION UND BEARBEITUNG

Jan Kunkel

ZAE BAYERN

Magdalene-Schoch-Str. 3
97074 Würzburg
T +49 931 70564-0
F +49 931 70564-600
www.zae-bayern.de
info@zae-bayern.de

KONZEPT UND DESIGN

punktschmiede, visuelle kommunikation, München

COPYRIGHT

ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte
Energieforschung e. V., Würzburg, Juni 2022
Alle Rechte vorbehalten. Vervielfältigungen,
Kopie oder Weitergabe nur mit schriftlicher
Genehmigung.

PUBLISHER

ZAE Bayern – Bavarian Center for
Applied Energy Research

ARTICLES AND PHOTOS

by ZAE Bayern staff members
Photos, unless otherwise specified, © ZAE Bayern

COORDINATION AND EDITING

Jan Kunkel

ZAE BAYERN

Magdalene-Schoch-Str. 3
97074 Würzburg
T +49 931 70564-0
F +49 931 70564-600
www.zae-bayern.de
info@zae-bayern.de

CONCEPT AND DESIGN

punktschmiede, visuelle kommunikation, Munich

COPYRIGHT

ZAE Bayern – Bavarian Center for Applied Energy
Research, Würzburg, June 2022
All rights reserved. No reproduction, copy,
or transmission of this publication without
written permission.

| | | | |
|--|-----------|---|-----------|
| Vorwort | 6 | Foreword | 6 |
| 1.0 ALLGEMEINES | 10 | 1.0 GENERAL INFORMATION | 10 |
| 1.1 Überblick | 12 | 1.1 At a Glance | 12 |
| 1.2 Struktur | 17 | 1.2 Structure | 17 |
| 1.3 Die Organe des ZAE Bayern | 20 | 1.3 The Governing Bodies of ZAE Bayern | 20 |
| 1.4 Zahlen & Fakten | 22 | 1.4 Facts & Figures | 22 |
| 1.5 Rückblick | 24 | 1.5 Review | 24 |
| 1.6 Bei uns zu Gast | 42 | 1.6 Official Visitors | 42 |
| 2.0 FORSCHUNG | 46 | 2.0 RESEARCH | 46 |
| 2.1 Der nicht mehr allzu lange Weg zur Wasserstoffwirtschaft | 52 | 2.1 The Not-So-Long Way to the Hydrogen Economy | 52 |
| 2.2 Leben in einer grünen Umgebung – Fassaden- und Dachbegrünungen als klimafreundliche Gebäudekomponenten | 54 | 2.2 Living in a Green Environment – Green Façades and Green Roofs as Climate-Friendly Building Components | 54 |
| 2.3 Funktionale Oberflächen zur Erhöhung der Energieeffizienz | 56 | 2.3 Functional Surfaces for Increased Energy Efficiency | 56 |
| 2.4 Hydraulische Systemdichtheit von Erdwärmesonden unter thermischem Betrieb | 58 | 2.4 Hydraulic System Impermeability of Geothermal Probes under Thermal Operation | 58 |
| 2.5 Perowskit-Solarzellen und -Solarmodule mit Kohlenstoffelektroden | 60 | 2.5 Perovskite Solar Cells and Modules with Carbon Electrodes | 60 |
| 2.6 Neue Generation von Wärmedämmung für Temperaturen über 1.500 °C | 62 | 2.6 A New Generation of Thermal Insulation for Temperatures above 1,500 °C | 62 |
| 2.7 Nutzung industrieller Abwärme durch thermische Energiespeicherung bei bis zu 300 °C | 64 | 2.7 Utilisation of Industrial Waste Heat at up to 300 °C by Thermal Energy Storage | 64 |
| 2.8 Ökonomische Hochtemperatur-Superisolation für die Industrie | 66 | 2.8 Economic High-Temperature Super Insulation for Industrial Use | 66 |

| | | | | | |
|------------|---|-----------|------------|---|-----------|
| 2.9 | Thermische Optimierung veredelter Filzdämmstoffe | 68 | 2.9 | Thermal Optimisation of Refined Felt Insulation Materials | 68 |
| 2.10 | Impfstoffe ohne Trockeneis sicher und energieeffizient transportieren | 70 | 2.10 | Safe and Energy-Efficient Vaccine Transport without Dry Ice | 70 |
| 3.0 | VERÖFFENTLICHUNGEN | 72 | 3.0 | PUBLICATIONS | 72 |
| 3.1 | Vorträge und Poster | 74 | 3.1 | Presentations and Posters | 74 |
| 3.2 | Veröffentlichungen | 80 | 3.2 | Publications | 80 |
| 3.3 | Studienabschlussarbeiten und Dissertationen | 84 | 3.3 | Degree and Doctoral Theses | 84 |
| 3.4 | Schutzrechte | 85 | 3.4 | Intellectual Property | 85 |
| 3.5 | Mitarbeit in Gremien | 86 | 3.5 | Membership in Committees | 86 |
| 3.6 | Akademische Lehrveranstaltungen | 89 | 3.6 | Academic Courses | 89 |
| 3.7 | Auszeichnungen | 91 | 3.7 | Awards | 91 |
| 3.8 | Sonstiges | 92 | 3.8 | Miscellaneous | 92 |
| | Adressen | 94 | | Addresses | 94 |

VORWORT

FOREWORD

Dr. Andreas Hauer
Vorstandsvorsitzender
Chairman of the Board



Das ZAE Bayern feiert sein 30-jähriges Bestehen! Ge-gründet im Dezember 1991 hat es sich seitdem als in der nationalen und internationalen Energieforschung bekannter Akteur etabliert.

Das Jahr 2021 war für das ZAE allerdings stark von strukturellen Diskussionen über die Zukunft des Insti-tuts geprägt. Die Entscheidung der bayerischen Staats-regierung vom Mai 2020, die Energieforschungsland-schaft in Bayern neu zu gestalten, wurde mit der klaren Ansage verbunden, dem ZAE Bayern ab 2022 keine Grundfinanzierung mehr zur Verfügung zu stellen.

Aufgrund der unterschiedlichen thematischen Schwerpunkte und förder-technischen Ausrichtung der beiden Standorte in Würzburg und Garching ergaben sich daraus unterschiedliche Wege in die Zukunft für die Bereiche Energieeffizienz und Energiespeicherung.

Der Bereich Energiespeicherung wird das ZAE Bayern fortführen. Der Vereinssitz wird 2022 von Würzburg nach Garching verlegt. Dort wird, ohne Grundfinanzierung, weiter auf den Gebieten der Energiespeicherung, Sektorkopplung und Wärmeversorgung geforscht werden. Gerade das Thema Wärme wird von entschei-dender Bedeutung für das Gelingen der Energiewende sein.

Der Bereich Energieeffizienz in Würzburg wird in einen neuen Verein, das Center für angewandte Energiefor-schung e. V., kurz CAE, übergehen, das in einer engen Kooperation mit der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt an den ener-gierelevanten Themen Funktionsmaterialien, thermi-sches Management, Sensorik und Gebäude/Quartiere forscht. Die Querschnittsthemen Digitalisierung und Wasserstofftechnik werden zukünftig in einem Inno-vation-Hub koordiniert.

ZAE Bayern celebrates its 30th anniversary! Founded in December 1991, it has since built the reputation of a renowned player in national and international energy research.

2021, however, was strongly marked by structural discussions about the institute's future. The Bavarian state government's decision of May 2020 to reshape the energy research landscape in Bavaria was accom-panied by a clear announcement: ZAE Bayern would no longer receive any basic funding from 2022 onwards.

Due to their differing thematic focuses and funding approaches, this resulted in different paths into the future for the divisions Energy Efficiency in Würzburg and Energy Storage in Garching.

Division Energy Storage will continue as ZAE Bayern. The registered office will be moved from Würzburg to Garching in 2022. Research there will continue to cover the areas of energy storage, sector coupling, and heat supply, without basic funding. Particularly heat will play a decisive role in the success of the energy tran-sition.

Würzburg's Energy Efficiency Division will move on to become a new association, the Center for Ap-plied Energy Research, or CAE for short, which will conduct research in close cooperation with the Würzburg-Schweinfurt University of Applied Sciences on the energy-relevant topics of functional materials, thermal management, sensor technology, and build-ings/quarters. The cross-cutting topics of digitalisa-tion and hydrogen technology will be coordinated in an innovation hub.

Dr. Hans-Peter Ebert
Vorstand
Member of the Board



Wir, der Vorstand und unsere Mitarbeitenden, hoffen sehr, nach dieser Phase struktureller Veränderungen den Fokus wieder auf unsere inhaltliche Arbeit lenken zu können. Wir sind fest davon überzeugt, dass angewandte Energieforschung, wie sie am ZAE Bayern betrieben wird, noch nie so wichtig war wie heute!

Dafür spricht auch die sehr gute Auftragslage im Jahr 2021, die es uns erlaubte, zahlreiche öffentlich geförderte und industrielle Forschungsprojekte zu beginnen oder fortzuführen. Von einer Auswahl dieser Vorhaben können Sie sich in Kapitel 2 dieses Berichts ein Bild machen.

We, the Executive Board and our staff, very much hope that after this phase of structural change we will be able to return our focus to our substantive work. We are firmly convinced that applied energy research, as conducted at ZAE Bayern, has never been as important as it is today!

This notion is supported by our excellent order situation in 2021, which allowed us to begin or continue numerous publicly or industrially funded research projects. See chapter 2 of this report for a selection of these projects.



Ihre/Yours
Dr. Andreas Hauer

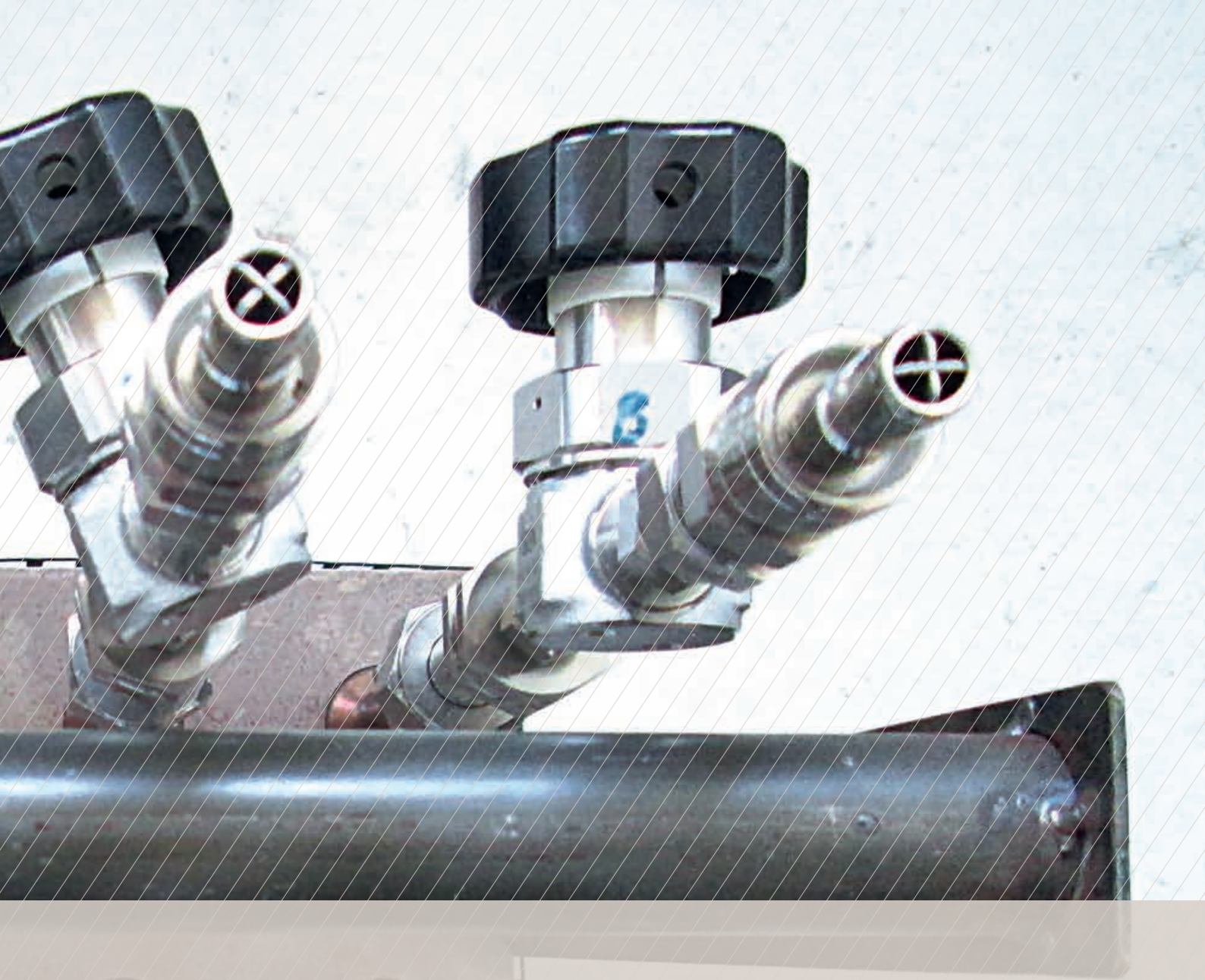


Dr. Hans-Peter Ebert



ALLGEMEINES
GENERAL INFORMATION

1.0



1.1

ÜBERBLICK AT A GLANCE



Dr. A. Hauer
Vorstandsvorsitzender
Leiter Bereich Energiespeicherung
Chairman of the Board
Head of Division Energy Storage



Dr. H.-P. Ebert
Vorstand
Leiter Bereich Energieeffizienz
Member of the Board
Head of Division Energy Efficiency

UNSER PROFIL

Das ZAE Bayern ist ein außeruniversitäres Forschungsinstitut für angewandte Energieforschung mit ca. 140 Mitarbeitenden, das vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie institutionell gefördert wird. Wir bieten unseren Kunden komplette Innovationspakete im Bereich effizienter und nachhaltiger Energiesysteme an und sind mit unseren zwei Hauptstandorten in Garching bei München und Würzburg sowie weiteren drei Außenstellen in Hof, Erlangen und Nürnberg bayernweit präsent. Seit 30 Jahren besteht das ZAE Bayern als eingetragener gemeinnütziger Verein. Im Dezember 1991 setzten sich die Gründungsmitglieder zum Ziel, die Energieforschung zu fördern sowie Aus-, Fort- und Weiterbildung, Beratung, Information und Dokumentation auf allen Gebieten zu betreiben, die für die Energietechnik sowie die sich mit ihr befassenden Wissenschaften bedeutsam sind. Bis heute hat sich das

OUR PROFILE

ZAE Bayern is a non-university institute for applied energy research with about 140 employees, institutionally funded by the Bavarian Ministry of Economic Affairs, Regional Development and Energy. We offer our customers complete innovation packages in the field of efficient and sustainable energy systems and are present in all of Bavaria with our two main locations in Garching near Munich and Würzburg as well as three more branch offices in Hof, Erlangen, and Nuremberg. For 30 years, ZAE Bayern has been a registered association. In December 1991, the founding members set out to promote energy research and engage in education, further training, consulting, information, and documentation in all fields relevant to energy technology and the associated scientific fields. To date, ZAE Bayern has developed into a research institute of national and international renown. A significant

ZAE Bayern zu einem national und international anerkannten Forschungsinstitut entwickelt. Hierzu leisten unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, unser technisches Personal, Verwaltungsangestellte und Studierende einen entscheidenden Beitrag.

UNSERE KOMPETENZEN

In seinen zentralen Kompetenzbereichen Erneuerbare Energie, Energiespeicherung und Energieeffizienz verbindet das ZAE Bayern in einem interdisziplinären Forschungsansatz Materialforschung, Komponentenentwicklung und Systemoptimierung zu einer lückenlosen Wertschöpfungskette. Die Forschenden am ZAE Bayern arbeiten dabei an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und angewandter Industrieforschung und befassen sich u. a. mit Nanomaterialien, thermischen und elektrochemischen Energiespeichern, energieeffizienten Prozessen, Photovoltaik, energieoptimierten Gebäuden und Stadtquartieren, Smart-Grids und sektorenübergreifenden Energiesystemen (Strom und Wärme/Kälte).

UNSER ZIEL

Ziel des ZAE Bayern ist es, eine möglichst CO₂-neutrale Energieversorgung durch den synergetischen Einsatz von Erneuerbaren Energien und Energieeffizienztechnologien zu realisieren. Unser Institut führt dazu eine große Zahl von Forschungsprojekten mit der Industrie, vom KMU bis zum Großkonzern, sowie mit universitären und außeruniversitären Forschungspartnern durch. Hierbei steht die praktische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse im Zentrum.

Als Bindeglied zwischen den Projektpartnern vernetzt das ZAE Bayern die thematischen Schwerpunkte innerhalb der Wertschöpfungskette, so dass wertvolle Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz und zum verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien entstehen. Dazu werden zahlreiche Projekte am Institut auch standortübergreifend bearbeitet und profitieren somit

share of this is owed to our employees, might they be scientists, technical and administrative personnel, or students.

OUR COMPETENCES

In its central fields of competence, renewable energies, energy storage, and energy efficiency, ZAE Bayern pursues an interdisciplinary approach to combine materials research, development of components, and system optimisation in one unbroken value chain. ZAE's researchers work at the intersection between fundamental and applied industrial research and focus, among other things, on nanomaterials, thermal and electrochemical energy storages, energy efficiency in processes, photovoltaics, energetically optimised buildings and quarters, smart grids, and cross-sector (electricity and heat/cold) energy systems.

OUR GOAL

The goal of ZAE Bayern is to realise an energy supply as CO₂-neutral as possible by means of the synergetic use of renewable energies and energy efficiency technology. Therefore, our institute is involved in a large number of research projects with industrial partners from SMEs to major corporations as well as with university and non-university research partners. In these, the focus is put on the practical application of scientific findings.

As a connecting link between project partners, ZAE Bayern interconnects the core topics within the value chain to create valuable solutions to increase energy efficiency and the implementation of renewable energies. Therefore, several of the institute's projects are being worked on at more than one location at a time, hence they benefit from the interlinking of the compe-

von der Verzahnung der Kompetenzen der einzelnen Arbeitsgruppen des ZAE Bayern. Aus Verbundprojekten, die gemeinsam mit Partnern aus der Industrie durchgeführt werden, profitiert das ZAE Bayern nicht nur durch die hieraus entstehenden Synergieeffekte, sondern auch durch die erfolgreiche Einwerbung von Drittmitteln. Diese werden für angewandte Forschungsprojekte in Kooperation mit der bayerischen Industrie eingesetzt. Damit können wir unsere Aktivitäten im Bereich der Energieforschung weiter stärken, in technische Geräte investieren sowie für unsere Forschungsarbeit neue Mitarbeiter gewinnen und so das ZAE Bayern auf nationaler und internationaler Ebene nachhaltig positionieren.

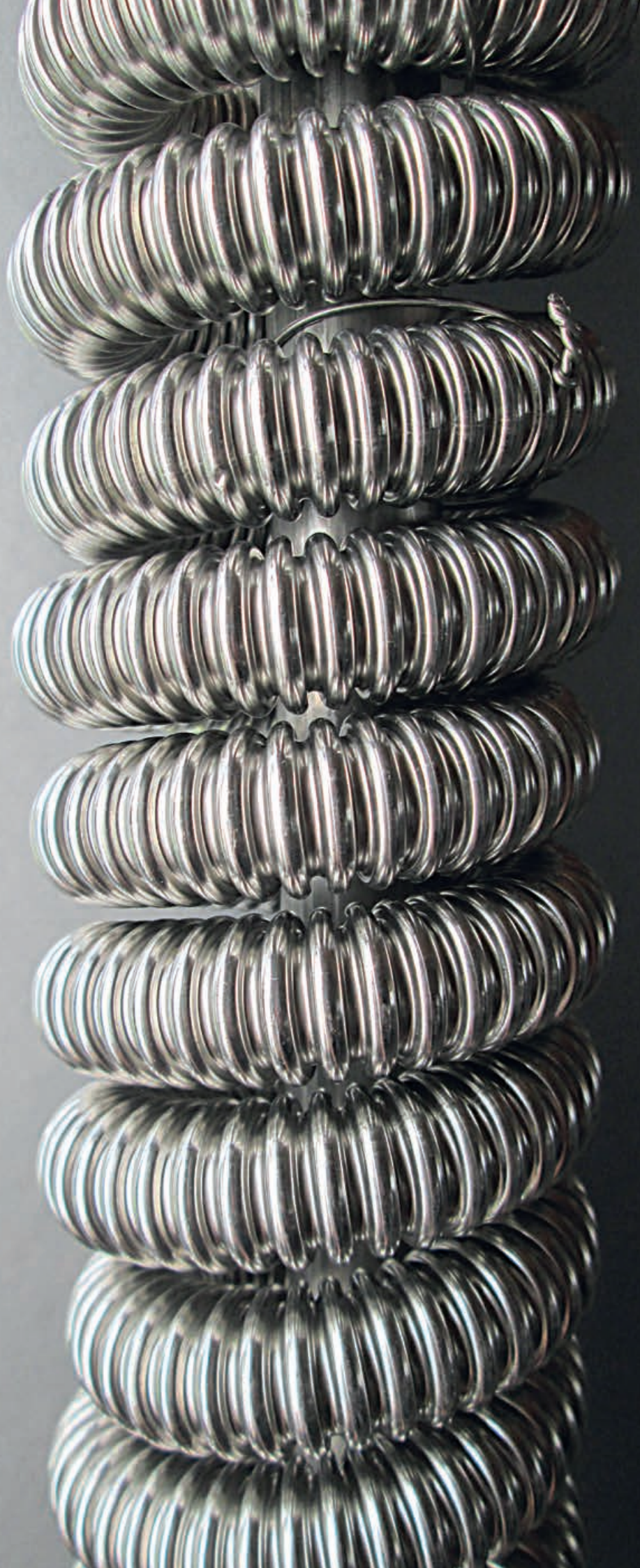
UNSERE KOOPERATIONEN

Entsprechend unserer Zielsetzung strebt das ZAE Bayern die Zusammenarbeit mit der Industrie und wissenschaftlichen Einrichtungen an. Wir kooperieren dazu in besonderer Weise mit der Technischen Universität München (TUM) und der Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Das ZAE Bayern ist darüber hinaus Mitglied im „ForschungsVerbund Erneuerbare Energien“ (FVEE), einer strategischen Partnerschaft außeruniversitärer Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Erneuerbaren Energien in Deutschland, sowie der „Deutschen Industrieforschungsgemeinschaft Konrad Zuse e. V.“, die die öffentlichen Interessen gemeinnütziger, privatwirtschaftlich organisierter Industrieforschungseinrichtungen in Deutschland vertritt. Ferner ist das ZAE Gründungsmitglied des Energie Campus Nürnberg (EnCN), der eine auf dem Gebiet der Energieforschung aktive Forschungsk Kooperation der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, der TH Nürnberg, der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung und des ZAE Bayern am Standort Nürnberg unterhält. Darüber hinaus ist das ZAE Bayern Partner in der interdisziplinären Forschungsinitiative TUM.Energy.

tences of ZAE Bayern's various groups. In joint projects with industry partners, ZAE Bayern does not only gain synergy effects but can also successfully raise external funds. These are then used for applied research projects in cooperation with the Bavarian industry. This helps us to further strengthen our activities in energy research, to invest in technical equipment, and to find new employees for our research work and sustainably position ZAE Bayern on a national and international level.

OUR COOPERATIONS

According to our goals, ZAE Bayern seeks cooperation with scientific institutions and the industry. For this purpose, we cooperate particularly closely with the Technical University of Munich (TUM) and the Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Furthermore, ZAE Bayern is a member of the German Renewable Energy Research Association (FVEE), a strategic partnership of non-university research institutes from the field of renewable energies in Germany, as well as of the Zuse Community, representing the public interests of private, non-profit industrial research facilities in Germany. Also, ZAE Bayern is a founding member of the Energy Campus Nuremberg (EnCN), which maintains an energy research cooperation between Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nuremberg, TH Nuremberg, the Fraunhofer Society for the Promotion of Applied Research, and ZAE Bayern, located in Nuremberg. Finally, ZAE Bayern is a partner in the interdisciplinary research initiative TUM.Energy.





STRUKTUR STRUCTURE

1.2



Stand | Status
31.12.2021
31/12/2021





1.3 DIE ORGANE DES ZAE BAYERN

THE GOVERNING BODIES OF ZAE BAYERN

MITGLIEDER MEMBERS

UNTERNEHMEN

ENTERPRISES

Allianz Risk Consulting GmbH – Allianz Zentrum für Technik, München

APROVIS Energy Systems GmbH, Weidenbach

Bayernwerk AG, Regensburg

Consolinno Energy GmbH, Pentling

ediundsepp Gestaltungsgesellschaft mbH, München

goodmen Energy GmbH, Gräfelting

GP JOULE Think GmbH & Co. KG, Reußenköge

Hightex GmbH, Rimsting

IBC Solar AG, Staffelstein

Innovations- und Gründerzentrum Würzburg

Betriebsgesellschaft BioMed/ZmK mbH (IGZ), Würzburg

Karl Endrich KG, Würzburg

Knauf Gips KG, Iphofen

Lang Hugger Rampp GmbH, München

NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb

Porextherm Dämmstoffe GmbH, Kempten

Rauschert Solar GmbH, Judenbach-Heinersdorf

Technologie- und Gründerzentrum Würzburg GmbH (TGZ), Würzburg

va-Q-tec AG, Würzburg

Würzburger Versorgungs- und Verkehrs GmbH, Würzburg

MITGLIEDER VON AMTS WEGEN

MEMBERS EX OFFICIO

Dr. H.-P. Ebert, Würzburg

Dr. A. Hauer, Garching

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, München

NATÜRLICHE PERSONEN/INGENIEURBÜROS

NATURAL PERSONS/CONSULTING ENGINEERS

M. Dietrich, Rüdenhausen

Dr. H. Mehling, Würzburg

Dr. B. Müller, Muggensturm

Dipl.-Ing. M. Portula, Berlin

Dr. B. Reeb, Ellwangen-Hochgreut

T. Speidel, Nürtingen

U. Windelen, Berlin

VERBÄNDE UND INSTITUTIONEN

FEDERATIONS AND INSTITUTIONS

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V., München

ENERGIEregion Nürnberg e. V., Nürnberg

Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e. V. (FSKZ), Würzburg

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München

IHK Würzburg-Schweinfurt, Würzburg

Stadt Würzburg, Würzburg

Verband der Bayerischen Energie-und

Wasserwirtschaft e. V. (VBEW), München



EHRENMITGLIEDER

HONORARY MEMBERS

Prof. Dr. J. Fricke, Gerbrunn

Prof. Dr.-Ing. D. Hein, Fürstenfeldbruck

Prof. Dr. R. Hezel, Pullach

VORSTAND BOARD OF DIRECTORS

Der Vorstand setzte sich Ende 2021 wie folgt zusammen:

Dr. A. Hauer, (*Vorsitzender | Chairman*)

Dr. H.-P. Ebert

KURATORIUM BOARD OF TRUSTEES

Dr. J. Kuhn (*Vorsitzender | Chairman*),

va-Q-tec AG, Würzburg

Prof. Dr. R. Hellinger, (*stellv. Vorsitzender | Deputy Chairman*), Siemens AG, Erlangen

Dr. H. Binder, BTC Technologies GmbH, Ludwigsburg

Prof. Dr. rer. nat. P. Denk, Institut für Systemische Energieberatung (ISE), Hochschule Landshut, Landshut

Dr.-Ing. R. Hofer, Bayernwerk AG, Regensburg

Dr.-Ing. J. Hollandt, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig und Berlin (PTB), Berlin

Univ.-Prof. Dr. N. Hüsing, Department Chemistry and Physics of Materials, Paris Lodron Universität Salzburg, Salzburg

Prof. Dr.-Ing. M. Kaltschmitt, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IuE), TU Hamburg, Hamburg-Harburg

Ministerialrat Dr. F. Leiner, Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, München

Ministerialrat B. Schütze, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Dipl.-Ing. (Univ.) K. Salhoff, Knauf Gips KG, Iphofen

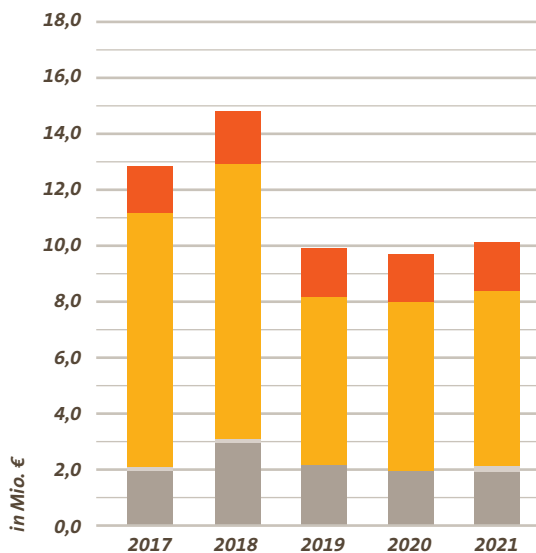
1.4

ZAHLEN & FAKTEN

FACTS & FIGURES

ENTWICKLUNG HAUSHALT 2017-2021

BUDGET



■ Grundfinanzierung Basic funding ■ Sonstige Miscellaneous
 ■ Öffentliche Mittel Public funding ■ Industrie Industry

HAUSHALT UND FINANZEN

Der Institutshaushalt belief sich im Jahr 2020 auf ca. 10,1 Mio. €. Die in der Abbildung dargestellte Entwicklung der Erträge in den Jahren 2017 bis 2021 weist für das Jahr 2021 eine Grundfinanzierung durch das Bayerische Wirtschaftsministerium (BayStMWi) in Höhe von 1,9 Mio. € aus. 8 Mio. € aus Drittmitteln konnten generiert werden. Die Drittmittel setzen sich aus 6,3 Mio. € öffentlichen Projektmitteln und 1,7 Mio. € Industriemitteln zusammen.

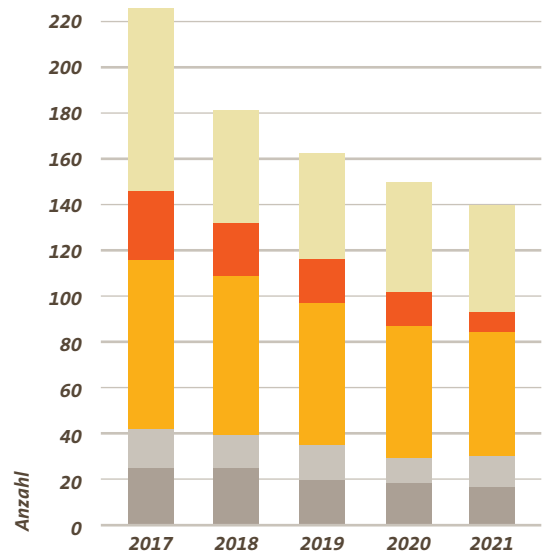
Insgesamt wurden im Jahr 2021 149 Projekte mit 262 Partnern bearbeitet.

PERSONAL

Zum Jahresende 2020 waren am ZAE Bayern 139 Mitarbeitende tätig. Überwiegend kamen diese aus den Fachbereichen Physik, Maschinenbau und Energietechnik. Der Anteil weiblicher Beschäftigter betrug 30,2 %. 9 DoktorandInnen, 5 MasterandInnen, 4 BachelorandInnen und 2 PraktikantInnen waren im Institut tätig. Somit befanden sich 14,4 % der Mitarbeitenden in Ausbildung.

PERSONALENTWICKLUNG 2017-2021

STAFF



■ Verwaltung Administration
 ■ Technische Mitarbeiter Technical personnel
 ■ Wissenschaftliche Mitarbeiter Scientific personnel
 ■ Doktoranden Doctorate students ■ Sonstige Miscellaneous

BUDGET AND FINANCES

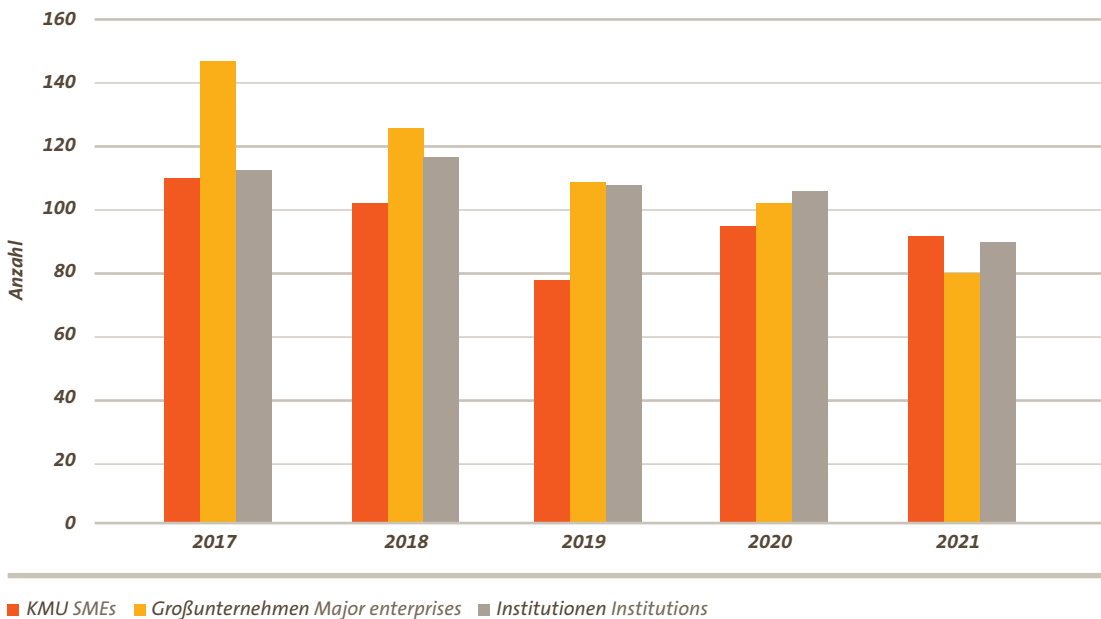
In 2021, the institute's budget came to € 10.1 m. The development of income from 2017 to 2021 depicted in the diagram shows that the Bavarian Ministry of Economic Affairs, Regional Development and Energy (BayStMWi) provided basic funding amounting to € 1.9 m in 2020. € 8 m third-party funds were raised. The third-party funds comprise € 6.3 m from public project funding and € 1.7 m from industrial sources.

Research was carried out in a total of 149 projects involving 262 partners.

STAFF AND PREMISES

At the end of 2021, ZAE Bayern had 139 staff members. The majority of the employees came from the fields of physics, mechanical engineering, and energy technology. Women made up 30.2 % of the staff. The institute had 9 doctorate-, 5 master- and 4 bachelor students, as well as 2 interns. Students and trainees constituted 14.4 % of the staff.

AUFTEILUNG DER ZAE-PROJEKTPARTNER NACH ART UND GRÖSSE DES UNTERNEHMENS DISTRIBUTION OF ZAE'S PROJECT PARTNERS ACCORDING TO TYPE AND SIZE



KOOPERATIONEN

Für eine erfolgreiche, anwendungsnahe Forschung und Entwicklung sind leistungsstarke Partner mit Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette und einer gemeinsamen Zielsetzung von besonderer Bedeutung. Aufgrund seiner über den Standard hinausgehenden Forschungs- und Entwicklungsressourcen in den zentralen Kompetenzbereichen Erneuerbare Energie, Energiespeicherung und Energieeffizienz, ist das ZAE Bayern ein gefragter Kooperationspartner für Industrie, Universitäten und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen in Bayern, auf nationaler und internationaler Ebene.

Bereits seit seiner Gründung arbeitet das ZAE Bayern mit kleinen und mittelständischen Unternehmen zusammen. Seit einigen Jahren gibt es auch intensive Kooperationen mit Großunternehmen und Institutionen wie Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Das ZAE übernimmt damit eine wichtige Brückenfunktion zwischen universitärer Forschung und industrieller Entwicklung.

COOPERATIONS

Application-oriented research and development become particularly efficient when highly competent partners strive for the same goals. Due to its above standard resources in its central areas of competence, renewable energies, energy storage, and energy efficiency, ZAE Bayern is a much sought-after partner for the industry, universities, and independent research centres in Bavaria, Germany, and worldwide.

Ever since its founding, ZAE Bayern has been cooperating with small and medium-sized enterprises. For several years now, ZAE Bayern has also been closely cooperating with major enterprises and institutions such as universities and independent research institutes. ZAE Bayern therefore serves as an important link between university research and industrial development.

1.5

RÜCKBLICK
REVIEWBAYERISCHER INGENIEURPREIS FÜR
DEN NEUBAU DER UMWELTSTATION
WÜRZBURGBAVARIAN ENGINEERING AWARD FOR
NEWLY BUILT ENVIRONMENTAL
STATION WÜRZBURG

Abb. 1: Die Umweltstation
Würzburg

© Michael Lauricella

Fig. 1: The Würzburg Environ-
mental Station

© Michael Lauricella

Am 15. Januar 2021 wurde das Planungsteam um das Ingenieurbüro Tragraum (Nürnberg) für den Neubau der Umweltstation mit dem zweiten Platz beim Bayerischen Ingenieurpreis ausgezeichnet. Der Bereich EF wirkte bei der Planungs- und Bauphase des DBU-geförderten Projekts „Mehraufwand für innovative Ansätze zum klima- und ressourcenschonenden Bauen bei der Umweltstation der Stadt Würzburg (KlimResBau)“ mit. Für die Jury standen bei der Beurteilung der eingereichten Projekte die Kriterien Innovation, Nachhaltigkeit, technische Kreativität, Wirtschaftlichkeit und interdisziplinäres, partnerschaftliches Arbeiten im Mittelpunkt.

Als erstes öffentliches Gebäude in Bayern wurde die Umweltstation der Stadt Würzburg aus Recycling-Be-

On 15 January 2021, the second place in the Bavarian Engineering Awards went to the planning team of Würzburg's newly built Environmental Station led by Nuremberg's Tragraum engineering office. Division EF took part in the planning and construction phases of the project on "additional expenditure for innovative approaches to climate and resource-friendly building at the Environmental Station of the city of Würzburg", funded by the German Federal Environment Foundation. The jury placed particular emphasis on innovation, sustainability, technical creativity, economic efficiency, and interdisciplinary cooperation when assessing the submitted projects.

The Würzburg Environmental Station was the first public building in Bavaria to be built from recycled

ton mit einem hinsichtlich seiner Klimawirkung optimierten Zement (CEM III) errichtet. Die 650 m³ verbauter Beton enthielten zu 74 Prozent Inhaltsstoffe, die aus einer in der Nähe rückgebauten Autobahnbrücke stammen. Das Eisspeicherheizungssystem des Gebäudes besteht aus einer Wärmepumpe, die einen Solarabsorber oder Wasser-/Eisspeicher als Wärmequelle nutzen kann. Das im Winter beim Heizen entstandene Eis im Eisspeichertank wird im Sommer zur Kühlung verwendet. Das System wird im Betrieb laufend überwacht und optimiert. Die Messdaten werden automatisch von der Umweltstation an das ZAE übertragen, dort ausgewertet und visualisiert.

concrete using a cement (CEM III) optimised towards its climatic impact. 74 percent of the 650 m³ of concrete used in the building were reclaimed from a motorway bridge dismantled nearby. The building's ice storage heating system consists of a heat pump able to use a solar absorber or water/ice storage tank as its heat source. The ice produced during heating in winter is stored for cooling in summer. The system is continuously monitored and optimised during operation. Readings are automatically transmitted to ZAE to be evaluated and visualised.

ERPROBUNG VON CO₂- ERDWÄRMESONDEN IN GARCHING

TRIALLING OF CO₂ BOREHOLE HEAT EXCHANGERS IN GARCHING



Abb. 2: Bohrarbeiten hinter dem Gebäude des Bereichs ES

Fig. 2: Drilling in the backyard of Division ES

Anfang Februar wurde die Forschungsausstattung des Bereichs ES um eine 99 m tiefe Bohrung erweitert. Mit ihrer Hilfe werden CO₂-Erdwärmesonden erprobt, die wartungsfrei und ohne Hilfsenergie arbeiten.

So sollen künftig Systeme zur Schnee- und Eisfreihaltung durch diese vollständig regenerative Technologie netzunabhängig und klimaneutral werden. Auf der gleichen Basis wurde bereits eine erdwärmebetriebene Weichenheizung konzipiert und zur Marktreife entwickelt. Darüber hinaus finden sich interessante Anwendungen in der Heizungstechnik.

ULTRASCHNELLER KURZZEITSPEICHER FÜR EFFIZIENTERE PHOTOVOLTAIK

Viel PV-Strom ist gut – aber wie lassen sich schnelle Leistungsfluktuationen nachhaltig in den Griff bekommen? Die vor allem durch Wolkenbewegung hervorgerufenen Schwankungen der solaren Einstrahlung sind unvermeidlich, stellen aber für die Photovoltaik ein Problem dar. Einerseits belasten sie Leistungselektronik und evtl. vorhandene Langzeitspeicher wie Batterien, andererseits reduzieren sie die Netzstabilität. Bei der Lösung dieses Problems können schnelle Kurzzeitspeicher, sogenannte Ultrakondensatoren, helfen.

Unter der Koordination des ZAE wird deshalb seit Anfang 2021 im Projekt „Entwicklung eines netzdienlichen Photovoltaik-Speicher-Systems unter Einsatz von Ultrakondensatoren (NetPVStore)“ an einer Wandler-Speicher-Einheit geforscht. Diese besteht aus Photovoltaikmodulen, Kurzzeitspeichern und Elektronik. Sie soll Leistungsschwankungen in der Stromproduktion im Bereich von Sekunden bis Minuten deutlich glätten und somit netzdienlich erneuerbare Energie bereitstellen.

Der Clou ist dabei die Kombination von Photovoltaik und speziell angepassten Ultrakondensatoren mit ausgeklügelter Regelelektronik. Nach drei Jahren Entwicklung und Optimierung auf Laborebene soll das neue System in einer Demonstrationsanlage im Netz installiert und in einer einjährigen Monitoringphase unter

In early February, a 99 m deep borehole was added to Division ES's research equipment. With its help, CO₂-filled geothermal probes, which work free of maintenance and auxiliary energy, can be put to the test.

In the future, this entirely regenerative technology is intended to render de-icing and de-snowing systems grid independent and climate neutral. A geothermal railway switch heater using the same principle was already designed and brought to market readiness. Other interesting applications can be found in heating technology.

ULTRA-FAST SHORT-TERM STORAGE FOR MORE EFFICIENT PHOTOVOLTAICS

Having a lot of PV electricity is good – but how do you sustainably cope with quick power fluctuations? These fluctuations in solar irradiation are mainly caused by cloud movement and unavoidable, but they pose a problem for photovoltaics. On the one hand, they put a strain on power electronics and any existing long-term storage devices, such as batteries, on the other hand, they decrease grid stability. Fast short-term electricity storages, so-called ultracapacitors, can help solve this problem.

Coordinated by ZAE, research on a converter-storage unit has therefore been conducted since early 2021 in the project "Development of a grid-serving photovoltaic storage system using ultracapacitors (NetPVStore)". This unit consists of photovoltaic modules, short-term storages, and electronics. It is designed to significantly smoothen output fluctuations of seconds to minutes and thus provide grid-serving renewable energy.

The secret here lies in combining photovoltaics and specially adapted ultracapacitors with sophisticated control electronics. After three years of development and optimisation in the laboratory, the new system is to be installed in the grid in a demonstration plant and evaluated under realistic conditions over a one-year monitoring phase. The interdisciplinary project team is composed of scientists and engineers from the partici-

Realbedingungen bewertet werden. Das interdisziplinäre Projektteam setzt sich aus Wissenschaftlern und Ingenieuren der beteiligten Forschungseinrichtungen, ZAE Bayern und Institut für Leistungselektronische Systeme ELSYS (TH Nürnberg), sowie Partnern aus der Industrie und Energiewirtschaft, wie SUNSET Energietechnik, DHG Engineering, Skeleton Technologies und ÜZ Mainfranken, zusammen.

parting research institutions, ZAE Bayern and the ELSYS Institute for Power Electronic Systems of TH Nuremberg, as well as partners from the industrial and energy sectors, such as SUNSET Energietechnik, DHG Engineering, Skeleton Technologies, and ÜZ Mainfranken.

PROJEKTABSCHLUSS C/SELLS

Wie im realen Stromnetz das ganz Große und das ganz Kleine ineinandergreifen, war Inhalt des Projekts C/sells. Am Testzentrum des ZAE in Arzberg wurden Fortschritte beim Verständnis elementarer Systembausteine wie Batteriezellen erzielt und erstmals demonstriert, wie mit ihrer Hilfe per Smart-Meter-Gateway-Infrastruktur das Übertragungsnetz stabilisiert werden kann.

COMPLETION OF PROJECT C/SELLS

How the very big and the very small interlock in real electricity grids was the subject of project C/sells. At ZAE's test centre in Arzberg, progress was made in the understanding of elementary system components, such as battery cells, and for the first time it was demonstrated how they can help stabilise the electricity grid in a smart meter gateway infrastructure.



Abb. 3: Vanadium-Redox-Flow-Speicher auf dem Testgelände in Arzberg

Fig. 3: Vanadium redox flow battery storage in the Arzberg testing centre

Wenn in Zukunft das Stromnetz nicht mehr nur durch wenige Großkraftwerke, sondern durch Millionen dezentraler Erzeuger versorgt wird, steigt die Zahl der Akteure darin drastisch an. Um deren reibungslose Zusammenarbeit zu ermöglichen, wurden in C/sells standardisierte Werkzeuge und Infrastruktur entwickelt und in Demonstratoren umgesetzt. Eine von 35 dieser Demonstrationszellen ist das Testzentrum des ZAE in Arzberg. Seit 2015 wird dort erforscht, wie Speicher die Integration von Photovoltaik in das Niederspannungsnetz unterstützen können.

Als nächster Schritt wurde im Dezember 2020 der Abruf flexibler Leistung auf höchster Ebene, in den Übertragungsnetzen, erprobt. Der Versuchsaufbau folgte dem Leitgedanken des Projekts: Autonome Zellen stabilisieren koordiniert ein Gesamtsystem. Über die neue Smart-Meter-Gateway-Infrastruktur und die Flexibilitätsplattform der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. wurde erfolgreich durch den Netzbetreiber TenneT Leistung abgerufen und durch das Testzentrum bereitgestellt.

Die notwendige Flexibilität lieferten Redox-Flow-Batterien, bei denen ein flüssiger Elektrolyt zur Speicherung elektrischer Energie dient. Bei der Erforschung der temperaturabhängigen Performance derselben kamen die klimatischen Bedingungen in Arzberg den Forschenden sehr entgegen: Die knackigen Winter im Fichtelgebirge bescherten ihnen ein breites Spektrum an Betriebstemperaturen. Ein Modell, das auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse solche Batteriezellen simuliert, wurde auf der Konferenz IRES 21 vorgestellt. Es soll künftig dabei helfen, Prognosen für den Batterieeinsatz zu verbessern. Denn obwohl die Wirkung einer einzelnen Zelle in Arzberg überschaubar ist, wird das zukünftige Gesamtsystem von einer riesigen Zahl solcher dezentralen Bausteine abhängen, seine Stabilität davon, wie planbar deren Einsatz ist.

Future power grids, which will no longer be supplied by just a few large power plants, but by millions of decentralised producers, will see a dramatic increase in the number of players. To facilitate their smooth interplay, standardised tools and infrastructure were developed in C/sells and implemented into demonstrators. One of 35 of these demonstration cells is ZAE's testing centre in Arzberg. Since 2015, researchers there have been exploring how energy storages can support the integration of photovoltaics into the low-voltage grid.

The next step, which followed in December 2020, was testing the retrieval of flexible power on the highest level: in the transmission grids. The experimental set-up was in line with the project's guiding principle of autonomous cells coordinately stabilising an overall system. Power was successfully called up by grid operator TenneT over the new smart meter gateway infrastructure and the flexibility platform of project partner FfE Munich, then supplied by the testing centre.

The required flexibility was provided by redox flow batteries, which store electrical energy in a liquid electrolyte. When researching the temperature-dependent performance of these batteries, the climatic conditions in Arzberg were quite convenient for the researchers: The region's crisp winters supplied them with a wide range of operating temperatures. A model for the simulation of such batteries, based on the findings, was presented at the IRES 21 conference. Its future purpose is to help improve forecasts for battery use. For even though the effect of a single cell in Arzberg is limited, the future overall system will depend on a vast number of such decentralised components, its stability on how predictable their operation is.

PROJEKTBEGINN QEWSPLUS

KICKOFF OF PROJECT QEWSPLUS



Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme

2021 begann das Verbundvorhaben „QEWSplus – Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme“, in dem insgesamt acht Partner wichtige Aspekte der Qualitätssicherung und -steigerung bei oberflächennahen geothermischen Anlagen untersuchen und, wo nötig, Problemlösungen entwickeln. Die Arbeiten berücksichtigen sowohl die Auslegung und Planung solcher Systeme als auch ihre praktische Ausführung und Inbetriebnahme.

So sollen Risiken abgebaut und Energiegestehungskosten gesenkt, Effizienz und Verfügbarkeit der Anlagen, Bekanntheit und öffentliche Akzeptanz der Technologie gesteigert werden. Die vier Teilprojekte behandeln thermische Testmethoden, TRT-Prüfgeräte, Verfüllbaustoffe und Modellierungsarbeiten, wobei jeweils mehrere Projektpartner ihre Expertise einbringen.

2021 saw the launch of joint project QEWSplus on quality enhancement in near-surface geothermal systems, in which eight partners are investigating key aspects of quality assurance and enhancement in near-surface geothermal systems and solving problems wherever necessary. The activities take into account both the design of such systems and their practical implementation and commissioning.

This is intended to eliminate risks, reduce the cost of energy production, increase the efficiency and availability of such systems, and raise awareness and public acceptance for the technology. The four sub-projects deal with thermal testing methods, TRT testing equipment, backfill construction materials, and modelling work, with several project partners contributing their expertise to each.

STUDIE ZUR ERNEUERBAREN ENERGIEVERSORGUNG BAYERNS

Unter dem Titel „100 % erneuerbare Energien für Bayern“ haben der Lehrstuhl für Energiesysteme der TU München und das ZAE im Auftrag des BUND Naturschutz in Bayern eine Studie über die Möglichkeiten einer vollständig erneuerbaren Versorgung Bayerns in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität erstellt.

Die Studie umfasst mehrere Szenarien für ein erneuerbares bayerisches Energiesystem im Jahr 2040 unter Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten. Sie zeigt insbesondere auf, dass für die Strombereitstellung aus Solarstrahlung und Wind die bestehenden Ausbaupotenziale nahezu vollständig genutzt werden müssen. Darüber hinaus wird auch ein starker Ausbau klimaneutraler Technologien zur Sektorenkopplung sowie zum zeitlichen Ausgleich von Bereitstellung und Nachfrage notwendig. Trotz all dieser Herausforderungen ist ein zu 100 % erneuerbares Energiesystem technisch umsetzbar, wodurch Bayern eine Vorreiterrolle bei der ganzheitlichen Energiewende einnehmen könnte.

Die Vorstellung der Studie fand am 11. Mai 2021 online statt. Das Dokument ist bei TU München und BUND online verfügbar.

STUDY ON A FULLY RENEWABLE ENERGY SUPPLY OF BAVARIA

Entitled "100 % Renewable Energies for Bavaria", TU Munich's Chair of Energy Systems and ZAE Bayern have, on behalf of Bavarian environmental organisation BUND, created a study on possibilities for a completely renewable supply of Bavaria in the sectors electricity, heat, and mobility.

The study covers a number of scenarios for a renewable Bavarian energy system in 2040, taking into account local particularities. It especially shows, how the existing potential for expansion must be almost completely exploited when it comes to solar and wind power. Moreover, a substantial expansion of technologies for climate-neutral sector coupling will be necessary, as well as for the temporal balancing of supply and demand. Despite all these challenges, a fully renewable energy system is technically feasible, which would put Bavaria in the forefront of the energy transition.

The study was first presented online on 11 May 2021. The document is available online from TU Munich and BUND Bavaria.

4



100 % erneuerbare Energien für Bayern

Potenziale und Strukturen
einer Vollversorgung in den Sektoren
Strom, Wärme und Mobilität



TUM



ZAE BAYERN



BUND
Naturschutz
in Bayern e.V.

Abb. 4: Titelblatt der Studie
zur vollständig erneuerbaren
Energieversorgung Bayerns

Fig. 4: Title of the study on a
fully renewable energy supply
for Bavaria

STARTSCHUSS FÜR DEN SUNBELTCHILLER

Die Sunbelt-Region, die sich auf der Nord- und Südhalbkugel jeweils zwischen dem 20. und 40. Breitengrad erstreckt, ist reich an solarer Einstrahlung und hat einen entsprechend hohen Kältebedarf. Bisher wird dieser hauptsächlich mittels fossiler Energieträger gedeckt, deren Nachteile weithin bekannt sind. Die Lösung: Kühlen mit Sonnenkraft. Eine vielversprechende Variante dieses Ansatzes ist die solarthermische Kühlung, bei der solarthermische Kollektoren mit einer thermisch angetriebenen Kältemaschine kombiniert werden. Allerdings benötigen diese Systeme bisher einen Nasskühlturm, dessen Wartung und Wasserverbrauch erhebliche Zusatzkosten verursachen und deren Betrieb in sehr trockenen Regionen ökologisch bedenklich und daher meist auch verboten ist.

Hier setzt das Forschungsprojekt „SunBeltChiller: Solarthermisches Energiesystem für Kälte und Prozesswärme im Sunbelt“ an, in dem seit Anfang 2021 ein solarthermisches Kühlsystem entwickelt wird, das ohne Nasskühlturm auskommt und dabei hocheffizient ist. Erreicht wird dies durch konzentrierende Fresnel-Solar Kollektoren, die eine zweistufige Absorptionskälteanlage mit großem Temperaturhub antreiben, in Kombination mit einer einstufigen Absorptionskälteanlage, Kalt- und Warmwasserspeichern. Neben den Vorteilen der Nutzung erneuerbarer Energien verspricht dieses System gegenüber konventionellen Lösungen auch wirtschaftliche Vorteile.

Neben der Erarbeitung von Steuerungs- und Auslegungsroutinen und der Bewertung von Standorten ist die Demonstration des Systems im kleinen Maßstab, zunächst im Labor des ZAE, später in einer realen Anwendung, geplant.

GREEN LIGHT FOR THE SUNBELTCHILLER

The Sunbelt region, which extends between latitudes 20 and 40 degrees of both the northern and southern hemispheres, is rich in solar radiation and has a correspondingly high demand for cooling. To date, this demand has mainly been met through fossil fuels, the downsides of which are widely known. The solution: cooling with solar power. A promising variant of this approach is solar thermal cooling, which combines solar thermal collectors and a thermally driven chiller. However, these systems have so far required a wet cooling tower, the maintenance and water consumption of which cause considerable additional costs and the operation of which is ecologically questionable and therefore usually prohibited in very dry regions.

This is where the research project SunBeltChiller comes into play, in which a solar thermal cooling system is being developed since early 2021 that operates without a wet cooling tower and is, at the same time, highly efficient. This is achieved by using concentrating Fresnel solar collectors, which drive a two-stage absorption chiller with a large temperature lift, combined with a single-stage absorption chiller as well as cold and hot water tanks. Besides the advantages of using renewable energy, this system also promises economic benefits over conventional solutions.

Apart from the development of control and design routines and the evaluation of locations, the system is planned to be demonstrated on a small scale, initially in a ZAE laboratory, later in real application.

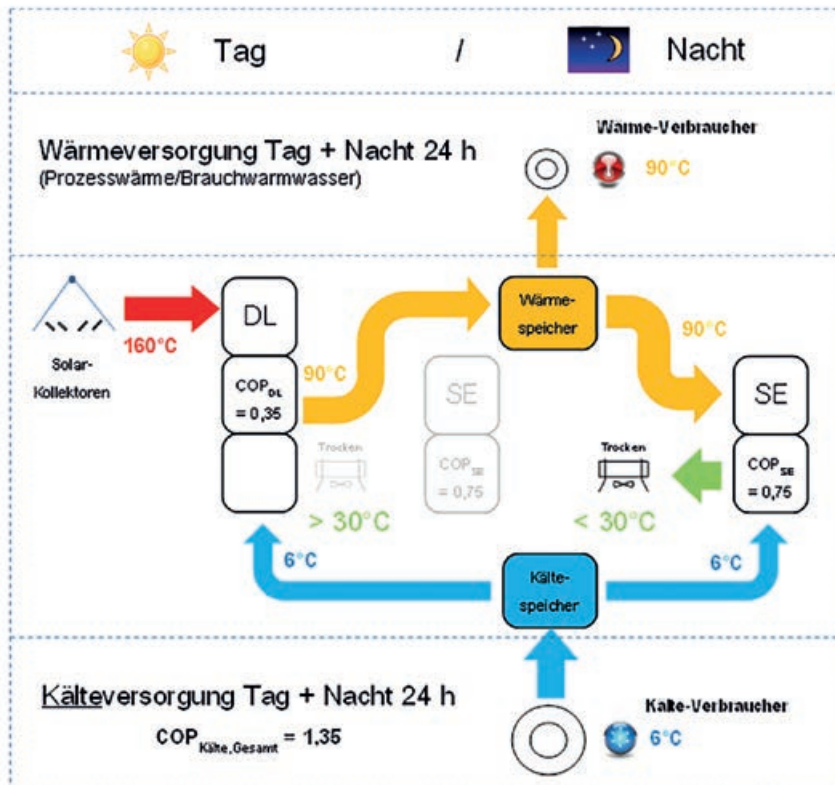


Abb. 5: Darstellung des SunBelt-Chiller-Funktionsprinzips

Fig. 5: Illustration of the SunBeltChiller system's working principle

NEUE ERKENNTNISSE ZUR DEGRADATION VON GRAPHITELEKTRODEN IN VANADIUM- REDOX-FLOW-BATTERIEN

Lange Zeit war unklar, warum die Performance von Graphitelektroden in Vanadium-Redox-Flow-Batterien sich im Lauf der ersten Betriebswochen merklich verschlechtert. Die ZAE-Forschenden Tobias Greese und Gudrun Reichenauer haben diese Wissenslücke geschlossen und die Ergebnisse im Journal of Power Sources veröffentlicht.

Der darin vorgeschlagene Mechanismus erklärt mehrere Aspekte des Elektrodenverhaltens, die bisher unstimmg erschienen, jetzt aber ein zusammenhängendes Bild ergeben: Teile der Elektrodenoberfläche werden durch die Adsorption von Vanadium inaktiv, die Reaktion wird gebremst. Dieser Effekt ist allerdings reversibel. Das adsorbierte Vanadium kann durch Oxidation wieder von der Oberfläche der Elektrode entfernt werden, die so ihre ursprüngliche Leistungsfähigkeit zurückerhält.

Neben der Klärung einer lange unbeantworteten Forschungsfrage bietet diese Erkenntnis auch die Möglichkeit, entsprechende Betriebsstrategien zu entwickeln. So können die Gesamtperformance von Vanadium-Redox-Flow-Batterien und somit auch ihre Wirtschaftlichkeit gesteigert werden.

NEW FINDINGS ON THE DEGRADATION OF GRAPHITE ELECTRODES IN VANADIUM REDOX FLOW BATTERIES

For a long time it was unclear, why the performance of graphite electrodes in vanadium redox flow batteries deteriorates noticeably during the first weeks of operation. ZAE researchers Tobias Greese and Gudrun Reichenauer have closed this knowledge gap and published the results in the Journal of Power Sources.

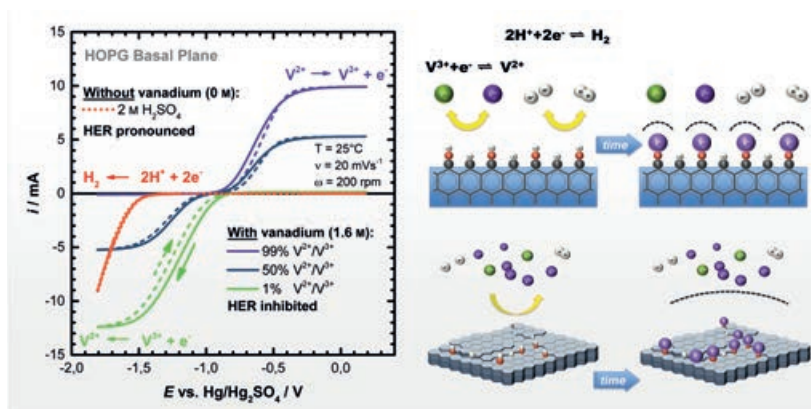
The mechanism proposed in the paper explains several aspects of the electrodes' behaviour, which previously appeared inconsistent but now provide a coherent picture: Parts of the electrode surface are rendered inactive by the adsorption of vanadium, the reaction slows down. However, this effect is reversible. Through oxidation, the adsorbed vanadium can be removed again from the electrode's surface, which thus regains its initial efficiency.

Apart from answering a long-standing question in research, this finding also provides the opportunity to develop appropriate operating strategies. This way, the overall performance of vanadium redox flow batteries and hence their economic efficiency can be increased.

Abb. 6: Grafik zur Veranschaulichung der Adsorption von Vanadium auf der Elektrodenoberfläche

Fig. 6: Illustration of the adsorption of vanadium on the electrode surface

6



ZAE ALS AUSSTELLER BEI DER WOCHE DER UMWELT

2021 wurde das ZAE durch die Fachjury der Woche der Umwelt ausgewählt, an der Veranstaltung in Schloss Bellevue als Aussteller teilzunehmen. Coronabedingt fand die Veranstaltung stattdessen online statt. Beitrag des ZAE war die Vorstellung einer geothermisch betriebenen Weichenheizung.

Der gesamte Energieverbrauch solcher Anlagen erreicht in Deutschland etwa 186 GWh pro Saison. Das entspricht ca. 88.000 t freigesetztem CO₂. Die autarke geothermische Weichenheizung nutzt Verdampfung und Kondensation ihres Arbeitsmediums CO₂ in einem Thermosiphon. Wärme wird so, unter Ausnutzung des Dichteunterschiedes zwischen flüssigem und gasförmigem CO₂, aus dem Untergrund an die Gleisbauteile transportiert. Dieser selbstregelnde Kreislauf kommt in Gang, sobald die Außentemperatur die Bodentemperatur von ca. 10 °C unterschreitet. Hilfsenergie wird für den Betrieb nicht benötigt.

ZAE ON DISPLAY AT WOCHE DER UMWELT

In 2021, the expert jury of Woche der Umwelt (Week of the Environment) selected ZAE Bayern to be an exhibitor at the event in Berlin's Bellevue Palace. Due to COVID-19, it was held online instead. ZAE contributed with the presentation of a geothermally operated railway switch heating system.

The cumulative energy consumption of such installations in Germany amounts to about 186 GWh per season. This corresponds to about 88,000 t of released CO₂. The self-sufficient geothermal switch heating system makes use of the evaporation and condensation of its working medium, CO₂, in a thermosiphon. Heat is thus transported from the subsoil to the tracks by exploiting the density gap between liquid and gaseous CO₂. This self-regulating cycle starts as soon as the outside temperature falls below the ground temperature of about 10 °C. No auxiliary energy is required for operation.

7

Abb. 7: Johannes Greß vor der Bühne der World Sustainable Energy Days

Fig. 7: Johannes Greß by the World Sustainable Energy Days' stage



YOUNG RESEARCHER DES ZAE BAYERN BEI DEN WORLD SUSTAINABLE ENERGY DAYS 2021

Die World Sustainable Energy Days in Wels (Österreich) sind eine der führenden Tagungen im Bereich Energieeffizienz und Nachhaltigkeit mit über 600 Teilnehmern aus über 60 Ländern. 2021 wurde ZAE-Nachwuchswissenschaftler Johannes Greß eingeladen, dort seine Ergebnisse auf der Young Researchers' Conference einem internationalen Fachpublikum zu präsentieren.

Der ausgezeichnete Beitrag trägt den Titel „Performance enhancement of building-integrated PV using phase change materials“. Darin zeigte Greß mit seinen Co-Autoren Andreas Stephan, Bastian Büttner und Stephan Weismann, wie man durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM) Temperaturspitzen in neu entwickelten ultraschlanken fassadenintegrier-

YOUNG RESEARCHER OF ZAE BAYERN AT THE WORLD SUSTAINABLE ENERGY DAYS 2021

The World Sustainable Energy Days in Wels, Austria, are one of the leading conferences on energy efficiency and sustainability with over 600 participants from more than 60 countries. In 2021, ZAE junior researcher Johannes Greß was invited to present his findings to an international audience of experts at the Young Researchers' Conference.

The award-winning paper is entitled "Performance enhancement of building-integrated PV using phase change materials". Greß and his co-authors, Andreas Stephan, Bastian Büttner, and Stephan Weismann, demonstrated how the use of phase change materials (PCM) can dampen temperature peaks in newly developed ultra-slim façade-integrated photovoltaic mod-

ten Photovoltaikmodulen dämpfen und so deren Wirkungsgrad steigern kann. Dazu wurde in dynamischen Simulationen das Optimum für Schmelztemperatur und Menge des PCM ermittelt, so dass einerseits eine maximale Reduktion der Übertemperaturstunden erzielt wird, andererseits die nächtliche Regeneration des PCMs durch passive Wärmeabgabe sichergestellt ist. Zwei seriennahe Prototypen dieser Module wurden auf dem Versuchsdach des ZAE in Würzburg unter Realbedingungen getestet und die Steigerung des Wirkungsgrades dabei bestätigt.

ules and thus increase their efficiency. Dynamic simulations were performed to determine the ideal melting temperature and quantity of PCM so that, on the one hand, the greatest possible reduction of overtemperature hours is achieved while, on the other hand, the nocturnal regeneration of the PCM through passive heat dissipation is guaranteed. Two close-to-production prototypes of these modules were tested under realistic conditions on ZAE Würzburg's testing roof, and the increase in efficiency was confirmed.

SIMULATIONSbibliothek FÜR ENERGIEEFFIZIENZ IN DER INDUSTRIE

Simulationen sind ein etabliertes Werkzeug für die Analyse, Planung und Auslegung technischer Systeme. Sie erlauben, durch Modellvariation die Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen, veränderter Eingangsgrößen sowie veränderter Komponenten auf ein System zu erproben. Der Aufwand bleibt dabei, im Vergleich zur tatsächlichen Veränderung des Systems, gering. Verbesserungspotenziale können ohne großen technischen oder finanziellen Aufwand geprüft werden.

Im Projekt „ETA im Bestand“ entwirft das ZAE seit Anfang 2021 eine standardisierte, benutzerfreundliche Simulationsbibliothek für bestehende Fabriken der Metall verarbeitenden Industrie. Partner im Teilprojekt „Anwenderorientierte Werkzeuge zur Planung von Energieeffizienzmaßnahmen im Bestand“ sind TU Darmstadt, LTX Simulation GmbH, ETA-Solutions GmbH, Fraunhofer ISE und IWT Bremen. Dazu werden Systemkomponenten wie Maschinen, technische Gebäudeausrüstung und das Gebäude selbst modelliert, um schließlich energetisch relevante Prozesse effizient abbilden zu können. So soll Anwendern eine energetische Analyse sowie die Erprobung und Bewertung technischer Potenziale zur Energieeffizienzsteigerung in Bestandsfabriken ermöglicht werden.

SIMULATION LIBRARY FOR ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY

Simulationen are a well-established tool in the analysis, planning, and design of technical systems. Through model variation, they allow for testing the effects of changing framework conditions, input variables, and components on a system. Compared to actually changing the system, the effort involved remains small. Improvement potentials may be tested without great technical or financial effort.

In the project “ETA im Bestand”, ZAE has been designing a standardised, user-friendly simulation library for existing factories in the metal processing industry since the beginning of 2021. Partners in the sub-project “User-oriented tools for planning energy efficiency measures in existing buildings” are TU Darmstadt, LTX Simulation GmbH, ETA-Solutions GmbH, Fraunhofer ISE, and IWT Bremen. To be able to efficiently model energy-relevant processes, system components, such as machines, technical building equipment, and the building itself, are being modelled. This should enable users to carry out energy analyses and test and evaluate technical potentials to increase the energy efficiency of existing factories.

8



Abb. 8: Luftaufnahme des Winterling-Areals
© Medienagentur Jahreiss GmbH

Fig. 8: Aerial view of the Winterling site
© Medienagentur Jahreiss GmbH

InEs: NEUES QUARTIERSANIERUNGSPROJEKT AN DER SAALE

Am 1. August begann die Planung für ein innovatives Energieversorgungssystem auf dem Winterling-Areal in Schwarzenbach an der Saale. Dabei handelt es sich um eine ehemalige Porzellanfabrik, die bereits teilweise saniert war und durch verschiedene Gewerbetreibende genutzt wurde. Der ressourcenschonende Erhalt des Gebäudekomplexes statt eines Neubaus war der Gemeinde ein Anliegen. Das geförderte Forschungsprojekt InEs klinkte sich in die laufende Sanierung ein, um eine klimaschonende Strom- und Wärmeversorgung des Areals sicherzustellen. 13 Partner, darunter Forschungsinstitute und Industrieunternehmen, nehmen daran teil, das BMWi unterstützt die Arbeiten mit Förderung in Höhe von 1,9 Millionen Euro.

Im Fokus der Arbeiten steht die Integration von erneuerbarer Energie und Abwärme in das bestehende Energieversorgungssystem. Das reicht von Solar- und Windstrom über die Erzeugung grünen Stroms mittels Biogas-BHKWs und ORC-Prozess bis hin zur Abwärme-

InEs: NEW DISTRICT REDEVELOPMENT PROJECT BY THE SAALE RIVER

On 1 August, the planning of an innovative energy supply system for the Winterling site in Schwarzenbach an der Saale took off. The building complex, a former porcelain factory, had already been partially renovated and was used by various commercial tenants at the time. The resource-saving preservation of the existing architecture instead of a new construction was a priority for the municipality. The state-funded research project InEs joined into the running renovation, to ensure a climate-friendly supply of electricity and heat to the complex. Thirteen partners, including research institutes and industrial enterprises, participate in the project; the Federal Ministry of Economics and Technology is funding the work with 1.9 million euros.

The work focuses on the integration of renewable energy and waste heat into the existing energy supply system. This ranges from solar and wind power to the generation of green electricity from biogas cogeneration plants and ORC processes to the on-site utilisation

nutzung auf dem Areal. Unterstützt werden soll dieses System durch die Einbindung eines großen thermischen Speichers sowie eines elektrischen Quartierspeichers. Auch weitere Aspekte wie Ladesäulen für Elektromobilität und Fahrradständer mit integrierter Photovoltaik-Überdachung wurden eingebracht. Solche neuen Technologien werden im Projekt getestet und teilweise völlig neu erdacht.

of waste heat. To support this system, a large thermal storage and an electrical district storage are to be integrated. Other considerations were also included, such as EV charging stations and bicycle shelters with photovoltaic roofing. Such new technologies are being tested in the project, some of them completely reimagined.

BESTES PRÜFUNGSERGEBNIS IN BAYERN FÜR ZAE-AUSZUBILDENDE LESLIE ULLERICH

BEST EXAM RESULT IN BAVARIA FOR ZAE APPRENTICE LESLIE ULLERICH



Abb. 9: Übergabe der Urkunde für die herausragende Leistung; v. l. n. r.: Stellvertretender IHK-Hauptgeschäftsführer Jürgen Bode, Leslie Ullerich, ZAE-Betreuer Dipl.-Phys. Stephan Braxmeier und IHK-Vizepräsidentin Caroline Trips © IHK Würzburg-Schweinfurt

Fig. 9: Awarding of the certificate of outstanding achievement; f. l. t. r.: the chamber's Deputy Managing Director Jürgen Bode, Leslie Ullerich, ZAE Supervisor Dipl.-Phys. Stephan Braxmeier, and Chamber Vice President Caroline Trips © IHK Würzburg-Schweinfurt

Am 12.10.2021 wurde Leslie Ullerich nicht nur für ihre hervorragende Prüfungsleistung in Mainfranken ausgezeichnet, sondern auch für das beste Prüfungsergebnis in Bayern in den Abschlussprüfungen des Jahres 2020/2021.

On 12 October 2021, Leslie Ullerich was not only honoured for her outstanding exam performance in the Main-Franconia region, but also for the best result in the Bavarian final exams of 2020/2021.

Insgesamt erzielten 221 Auszubildende im Kammerbereich Würzburg-Schweinfurt herausragende Leis-

A total of 221 apprentices of the Würzburg-Schweinfurt chamber area achieved outstanding results. Leslie Ullerich, however, did not only achieve first place in her

tungen. Leslie Ullerich erreichte aber nicht nur den ersten Platz in ihrem Ausbildungsberuf, sondern auch das beste Prüfungsergebnis in ganz Bayern. Ihre dreijährige Ausbildung zur Physikalaborantin im Bereich EF des ZAE fand damit einen sehr würdigen Abschluss. Diese hervorragende Leistung wurde im Rahmen einer Feierstunde der IHK Würzburg-Schweinfurt gewürdigt, bei der Leslie ihre Auszeichnung von IHK-Vizepräsidentin Caroline Trips und dem stellvertretenden IHK-Hauptgeschäftsführer Jürgen Bode entgegennahm.

Neben der Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses hat auch die Berufsausbildung am ZAE einen hohen Stellenwert. Seit 23 Jahren sind wir anerkannter Ausbildungsbetrieb. Die gelernten Physikalaborantinnen und -laboranten stärken unsere Forschungs- und Entwicklungsteams mit ihrer Expertise.

profession, but also the best exam result in all of Bavaria. Her three-year physics laboratory assistant training in Division EF thus came to a most worthy conclusion. This outstanding achievement was recognised at a festivity held by the Chamber of Industry and Commerce Würzburg-Schweinfurt, where Leslie received her award from the Chamber's Vice President, Caroline Trips, and Deputy Managing Director, Jürgen Bode.

Besides the education of junior scientists, ZAE also places a high value on apprenticeships. For 23 years, we have been recognised by the Chamber as a provider of vocational training. With their expertise, the physics laboratory assistants we train strengthen our research and development teams.

ENTWICKLUNG VON KÄLTESPEICHERMATERIALIEN FÜR DEN IMPFSTOFFTRANSPORT ALS TEIL DER IEA-INITIATIVE *TODAY IN THE LAB – TOMORROW IN ENERGY?*

Im Projekt coCO₂vac entwickelt das ZAE zusammen mit der Würzburger va-Q-tec AG Kältespeichermaterialien für Lagerung und Transport von COVID-19-Impfstoffen und anderen Arzneimitteln bei -70 bis -60 °C. 2021 wurde das Projekt von der Internationalen Energieagentur für die Initiative „Today in the Lab – Tomorrow in Energy?“ ausgewählt.

Der gekühlte Transport von COVID-19-Impfstoffen stellt für die Logistik eine große Herausforderung dar. Zur Kühlung auf dem Transportweg kommt hauptsächlich Trockeneis (CO₂) zum Einsatz. Nachhaltiger wären aber wiederverwendbare Transportbehälter mit Kühlelementen auf Basis von Phasenwechselmaterialien. Die eingesetzten wässrigen Salzlösungen neh-

DEVELOPMENT OF COLD STORAGE MATERIALS FOR VACCINE TRANSPORT AS PART OF THE IEA'S *TODAY IN THE LAB – TOMORROW IN ENERGY?* INITIATIVE

In the coCO₂vac project, ZAE Bayern collaborates with Würzburg-based va-Q-tec AG to develop cold storage materials for use in the storage and transport of COVID-19 vaccines and other medicinal products at -70 to -60 °C. In 2021, the International Energy Agency selected the project for its "Today in the Lab – Tomorrow in Energy?" initiative.

The refrigerated transport of COVID-19 vaccines is a major logistical challenge. Dry ice (CO₂) is the primarily used cooling medium for transportation. Reusable shipping containers using cooling elements based on phase change materials, however, would be much more sustainable. The aqueous salt solutions used in these elements absorb heat when they melt and re-



Abb. 10: Verladung von va-Q-tec-Kühlcontainern

© va-Q-tec AG

Fig. 10: Loading of cooled va-Q-tec shipping containers

© va-Q-tec AG

men beim Schmelzen Wärme auf, die sie beim Kristallisieren wieder abgeben. Zum Einfrieren der Elemente kommen spezielle Kältemaschinen zum Einsatz, die energieeffizienter arbeiten als Maschinen zur Produktion von Trockeneis. Außerdem darf in Flugzeugen aus Sicherheitsgründen nur eine begrenzte Menge Trockeneis transportiert werden, während PCM-Kühlelemente keinen derartigen Beschränkungen unterliegen.

lease it again on crystallisation. The special refrigeration machines used to freeze the elements are more energy-efficient than dry ice machines. Moreover, for safety reasons, only a limited amount of dry ice may be transported in aircraft, while PCM cooling elements are subject to no such restrictions.

1.6

BEI UNS ZU GAST OFFICIAL VISITORS

GÄSTE IN GARCHING

- StudentInnen der TU München zum Praktikum regenerative Energien (09./10.11.2021)
- StudentInnen des Masterstudiengangs Power Engineering der TU München zum solarthermischen Praktikum (08.11.2021)

VISITORS TO GARCHING

- Students of TU Munich for a practical course on regenerative energy (09–10/11/2021)
- Master students of TU Munich's Power Engineering programme for a solar thermal practical course (08/11/2021)

GÄSTE IN NÜRNBERG

- Team des Bayerischen Rundfunks (15.04.2021)
- Delegation der CDU (18.10.2021)
- Stadt(ver)führungen Nürnberg (18.10.2021)
- Prof. Dr. Serdar Sariciftci, Leiter des Linzer Instituts für Organische Solarzellen und des Instituts für Physikalische Chemie an der Johannes Kepler-Universität Linz (11.11.2021)
- Schüler des Hermann-Kesten-Kollegs Nürnberg (11.11.2021)
- Prof. Dr. Wolfgang Arlt, Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik an der FAU Erlangen-Nürnberg (17.11.2021)

VISITORS TO NUREMBERG

- Team of the Bavarian Broadcasting Company (15/04/2021)
- Delegation of the Christian Democrat Party (18/10/2021)
- Stadt(ver)führungen Nuremberg (18/10/2021)
- Prof. Dr. Serdar Sariciftci, head of the Linz Institute for Organic Solar Cells and the Institute for Physical Chemistry of Johannes Kepler University Linz (11/11/2021)
- Pupils of Hermann-Kesten-Kolleg Nuremberg (11/11/2021)
- Prof. Dr. Wolfgang Arlt of the Institute of Separation Science and Technology, FAU Erlangen-Nuremberg (17/11/2021)

GÄSTE IN WÜRZBURG

- Projektteilnehmende zum 1. Hi-TRACE-online-Workshop (21.01.2021)
- Auszubildende der Leo-von-Klenze-Berufsschule Ingolstadt beim Onlinevortrag zu den Themen Klima, Umwelt, Energie (03./05.05.2021)
- Presseinterview an der Klima-Forschungs-Station (25.05.2021)
- Filmteam des Bayerischen Rundfunks (21.06.2021)
- Delegation der SPD im Landkreis Würzburg (14.07.2021)
- Filmteam von TV Mainfranken an der Klima-Forschungs-Station (19.07.2021)
- BauingenieurInnen des Bundes Deutscher Baumeister, Architekten und Ingenieure e. V. (24.09.2021)
- Filmteam von TV-Mainfranken (06.10.2021)
- Teilnehmende des Projekts U-Green zum on- und offline veranstalteten Kick-Off-Meeting (15.10.2021)

VISITORS TO WÜRZBURG

- Participants of the project for the 1st Hi-TRACE online workshop (21/01/2021)
- Apprentices from Ingolstadt's Leo von Klenze vocational school for an online lecture on climate, environment, and energy (03, 05/05/2021)
- Press interview at the Climate Research Station (25/05/2021)
- Film team of the Bavarian Broadcasting Company (21/06/2021)
- Delegates of the Social Democrat Party of the district of Würzburg (14/07/2021)
- Film team of TV Mainfranken at the Climate Research Station (19.07.2021)
- Civil engineers of the German Association of Builders, Architects, and Engineers (09/24/2021)
- Film team of TV Mainfranken (06/10/2021)
- Participants of project U-Green for the kick-off meeting held on and offline (15/10/2021)

1

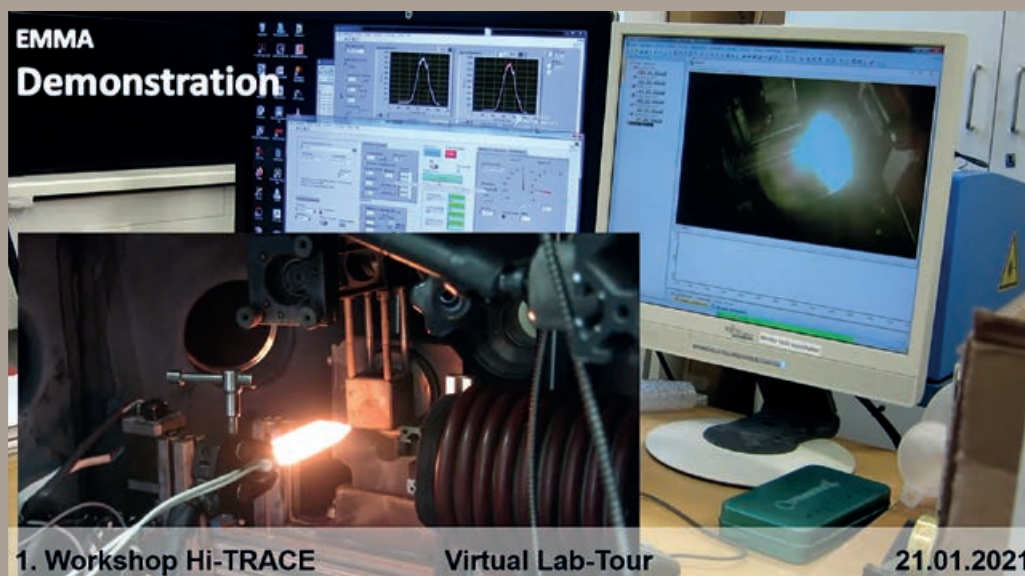


Abb. 1: Der Online-Workshop zum EU-Projekt Hi-TRACE wurde durch das ZAE und die Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt in Zusammenarbeit mit dem französischen metrologischen Staatsinstitut organisiert. In diesem Rahmen nahmen die TeilnehmerInnen an einem virtuellen Rundgang durch die ZAE-Labore teil.

Fig. 1: The online workshop on the EU project Hi-TRACE was organised by ZAE and the University of Applied Sciences Würzburg-Schweinfurt in cooperation with the French Metrological State Institute. In this context, the participants took a virtual tour of ZAE's laboratories.



Abb. 2: Dr. Michaela Reim, Projektleiterin der Klima-Forschungs-Station, im Pressegespräch über Wandbegrünungssysteme und Fassadenbauweisen

Fig. 2: Dr. Michaela Reim, project manager of the Climate Research Station, in a press briefing on wall greening systems and façade construction



Abb. 3: Ein Filmteam des Bayerischen Rundfunks dokumentiert die Arbeit an der Klima-Forschungs-Station mit ihren unterschiedlichen Fassadenbegrünungen und Messmethoden.

Fig. 3: A film team of the Bavarian Broadcasting Company documents the work at the climate research station with its different façade greening and measurement methods.

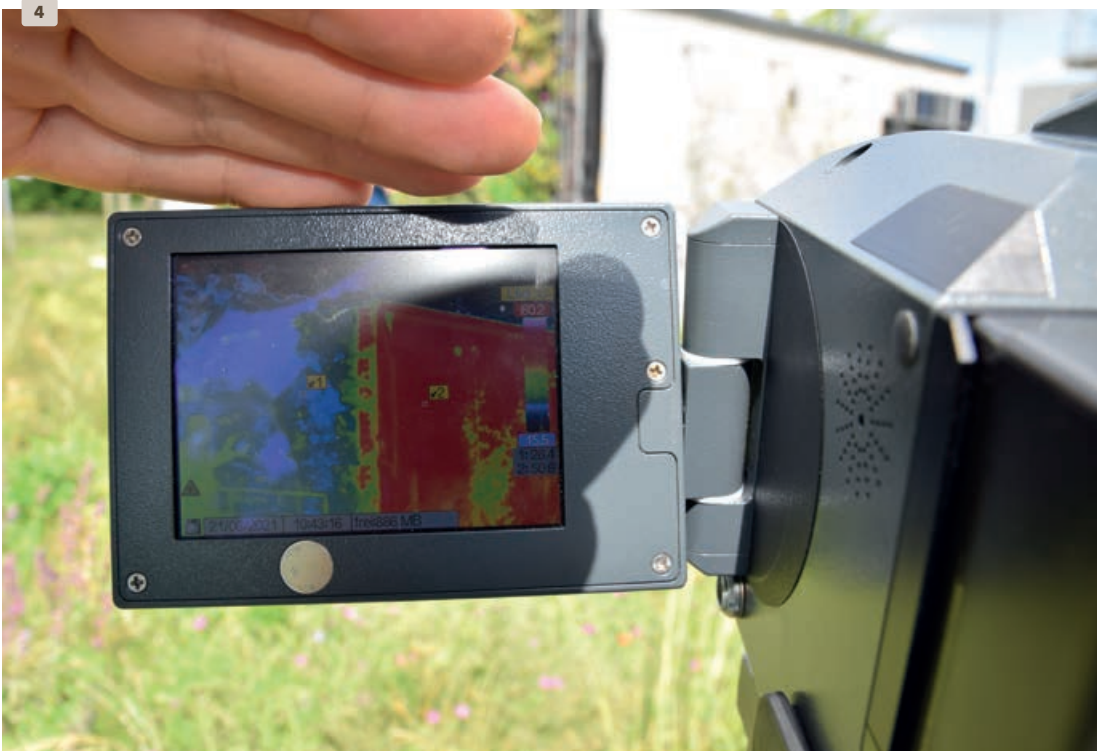


Abb. 4: Eine Thermografieaufnahme des Südhauses der Klima-Forschungs-Station macht den Kühleffekt sichtbar.

Fig. 4: A thermographic image of the Climate Research Station's south building visualises the cooling effect.



Abb. 5: Die Arbeitsgemeinschaft Nachhaltigkeit der SPD im Landkreis Würzburg informiert sich im Bereich EF über Aufgaben und regionale Lösungsansätze in der Energiepolitik. Freya Altenhöner, Gerhard Hartmann, SPD-Kreisvorsitzender Volkmar Halbleib und Dr. Hans-Peter Ebert (v. l. n. r.) besichtigen den Versuchsbalkon des ZAE in Würzburg.

© Thorsten Reppert

Fig. 5: The sustainability working group of the Würzburg district's social democrats inform themselves on challenges and regional approaches to energy policy at Division EF. Freya Altenhöner, Gerhard Hartmann, district party chairman Volkmar Halbleib, and Dr Hans-Peter Ebert (f.l.t.r.) visit the experimental balcony of ZAE in Würzburg.

© Thorsten Reppert



FORSCHUNG
RESEARCH

2.0



ELEKTROCHEMISCHE ENERGIESPEICHER
ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE

ENERGIEOPTIMIERTE GEBÄUDE
ENERGY OPTIMISED BUILDINGS

ANGEWANDTE IR-METROLOGIE
APPLIED IR METROLOGY

SYSTEMENTWICKLUNG
SYSTEMS ENGINEERING

SOLARFABRIK DER ZUKUNFT
SOLAR FACTORY OF THE FUTURE

NANOMATERIALIEN
NANOMATERIALS

WÄRMETRANSFORMATION
HEAT CONVERSION

SOLARENERGIE UND GEOTHERMIE
SOLAR AND GEOTHERMAL ENERGY

THERMISCHE ANALYSE
THERMAL ANALYSIS

THERMISCHE ENERGIESPEICHER
THERMAL ENERGY STORAGE

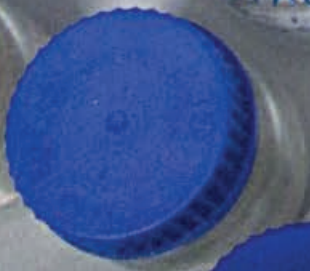
FORSCHUNG RESEARCH

Unser Energiesystem stellt in seiner Gesamtheit eine komplexe Struktur mit, bezüglich Energiebereitstellung, -speicherung, -transport und -verwendung, verschieden stark vernetzten Komponenten dar. Die Forschungsstärke des ZAE Bayern liegt insbesondere in den interdisziplinär und bereichsübergreifend vernetzten Arbeitsgruppen begründet, die konsequent Forschung von den Grundlagen bis zur Anwendung betreiben. Diese ungewöhnliche Breite resultiert einerseits aus der traditionellen Kooperation mit den benachbarten Hochschulen, andererseits aus der industrienahen Forschung. Grundlagenorientierte Forschungsprojekte (Förderung u. a. von DFG, EU und BMBF) werden ebenso wie konkrete Umsetzungsprojekte (Förderung u. a. von BMWi, EU, BayStMWi und Industriepartnern) durchgeführt. Die Kernthemen des ZAE Bayern tragen große gesellschaftliche Relevanz in sich, insbesondere im Hinblick auf die laufende Energiewende. Erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Energiespeicherung sind unabdingbar für eine erfolgreiche Umsetzung derselben, was sich in den Bereichen des ZAE Bayern widerspiegelt.

Das ZAE zählt in seinen Tätigkeitsfeldern zu den Innovationstreibern und erfährt seit Jahren große nationale und internationale Anerkennung. Dabei ergänzen sich Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen (z. B. Physik, Chemie, Maschinenbau, Informatik, Geologie) und von verschiedenen Standorten des ZAE. Die Stärke des ZAE Bayern liegt unter anderem darin, Wissen um die Funktionsweise neuer Materialien und Einzelkomponenten mit der Betrachtung auf Systemebene kombinieren zu können. Viele Synergien in Forschung und

Our energy system in its entirety is a complex structure of components which exhibit different levels of interlinkage in terms of production, storage, transport, and use of energy. The main reason for ZAE Bayern's strength in research lies in the interdisciplinary and cross-division interlinkage of its research groups who consistently cover all stages of research, from basal to applied. This unusually wide range results from long-running cooperations with adjacent universities on the one hand, joint research with industrial partners on the other. ZAE performs basic research projects (funding a.o. by DFG, EU, BMBF) as well as applied projects (funding a.o. by BMWi, EU, BayStMWi, and industry partners). Our core issues carry high social significance, especially with regard to the ongoing changes in the energy system. Renewable energies, energy efficiency, and energy storage are all crucial for making this change a successful one which reflects in ZAE Bayern's division names.

For years now, ZAE has been one of the prime innovators in its fields and enjoyed high national and international recognition. To achieve this, scientists from various fields (e.g. physics, chemistry, mechanical engineering, computer science, geology) and different divisions complement each other. ZAE Bayern's strength lies in, among other things, the ability to combine specific know-how of new materials and components with a system level view. Many synergies in research and development only open up when these two levels are interlinked.





Entwicklung können erst durch die Verknüpfung dieser beiden Ebenen erschlossen werden.

Forschungskreativität und -qualität äußern sich auf vielfältige Weise. Ein Landesinstitut wie das ZAE Bayern beweist seine Forschungsstärke durch einen traditionell hohen Anteil eingeworbener Drittmittel am Gesamtbudget. Anwendungsorientierte Forschung schlägt sich z. B. in Patentschriften nieder. Die internationale Sichtbarkeit eines Forschungsinstituts und seine wissenschaftliche Innovationskraft werden meist anhand wissenschaftlicher Publikationen in internationalen Fachzeitschriften bewertet. Statistische Analyse, z. B. durch Web of Science, zeigt, dass das ZAE Bayern in seiner Kategorie anwendungsorientierter Institute eine Spitzenstellung innehat. Eine Übersicht über Veröffentlichungen in begutachteten Fachzeitschriften, wissenschaftliche Vorträge und Poster, die auf nationalen und internationalen Konferenzen des letzten Jahres vorgestellt wurden, finden Sie in Kapitel 3. Die Mitarbeit in Expertengremien (z. B. Internationale Energieagentur IEA, DIN-Ausschüsse, nationale Experten-Arbeitskreise) rundet den wissenschaftlichen Austausch mit der weltweiten Forschungsgemeinschaft ab. In der breiten Öffentlichkeit werden Wissenschaft und Forschung oft als sehr abstrakt wahrgenommen. Um dem zu begegnen, finden Sie im folgenden Kapitel einen Überblick zu aktuellen Forschungsaktivitäten des ZAE Bayern.

Creativity and quality of research find diverse manifestations. A state institute like ZAE Bayern proves its strength in research through the acquisition of a traditionally large amount of third party funds. Patents are one indicator of application-oriented work. A research institute's international visibility and drive for scientific innovation are usually judged on the basis of publications in international scientific journals. Statistical analysis, conducted via e.g. Web of Science, proves ZAE Bayern's top position in the field of application-oriented research institutes. Chapter 3 lists the past year's publications in peer-reviewed scientific journals, scientific talks held and posters presented by our employees at national and international conferences. Our involvement in the international scientific community is completed by memberships in expert committees (e.g. International Energy Agency IEA, DIN, national expert committees). Still, the general public tends to consider science and research very abstract matters. As a counter measure, the following chapter gives an overview of ZAE Bayern's current research activity.

2.1

DER NICHT MEHR ALLZU LANGE WEG ZUR WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

THE NOT-SO-LONG WAY TO THE HYDROGEN ECONOMY

Autor | Author
M. Möckl

Ansprechpartner | Contact
Dipl.-Ing. Maximilian Möckl
Stellv. Gruppenleiter
Elektrochemische Energiespeicher
Deputy Head of Group
Electrochemical Energy Storage

Bereich | Division
Energiespeicherung
Energy Storage
+49 89 329442-77
maximilian.moeckl
@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für Bildung
und Forschung**
FKZ 03SFK211-2

Kooperationspartner | Partners
Helmholtz-Zentrum Berlin

Helmholtz-Institut Erlangen-

Nürnberg

**Ludwig-Maximilians-Universität
München, Lehrstuhl für
Physikalische Chemie**

**Forschungszentrum Jülich,
Department Electrochemical
storage, Institute of Energy and
Climate Research**

**Technische Universität
München, Lehrstuhl für
Technische Elektrochemie**

**Fritz-Haber-Institut, Theory
Department**

**Technische Universität
München, Lehrstuhl für
Erneuerbare und Nachhaltige
Energiesysteme**

Greenerity GmbH

**Heraeus Deutschland GmbH
& Co. KG**

H-TEC GmbH

Linde AG

Die Transformation zu einer klimaneutralen Zukunft ist ein oft geäußertes und doch selten ausreichend beherztes Mantra unserer Zeit. Wer sich mit dem Problem beschäftigt hat, weiß: Ohne baldige Abkehr von fossilen Energieträgern drohen massivste Probleme für Mensch und Umwelt. Einige davon sind bereits jetzt unumgänglich. Ein erneuerbares Energiesystem auf Basis von Technologien wie Windkraft und Solarenergie birgt aber ein ähnlich drängendes Problem: Phasen der Dunkelheit (Solarenergie) oder Flaute (Windkraft) müssen überbrückt werden. Dazu könnte man weiterhin geringe Mengen fossiler Energieträger nutzen, als langfristige Lösung bleibt aber nur die Speicherung erneuerbar produzierter Energie zum Lastausgleich. Darüber hinaus dienen fossile Energieträger aber auch der Herstellung unverzichtbarer Produkte wie Düngemittel oder Stahl. Auch dort muss ein erneuerbares Substitut für sie gefunden werden.

Hier bietet sich Wasserstoff an: ein chemischer Energieträger, der alle gestellten Anforderungen erfüllt und sich dabei noch mittels Elektrolyse aus Wasser herstellen lässt, dessen Vorkommen auf der Erde um ein vielfaches größer sind als zu diesem Zweck nötig. Angesichts einiger technischer Entwicklungen der letzten Jahre wird seine großvolumige Nutzung mittelfristig immer wahrscheinlicher:

- Die parallele Weiterentwicklung und Kommerzialisierung langlebiger Brennstoffzellensysteme für die Mobilität
- Die Weiterentwicklung von Membranelektrolyse-Verfahren: Lagen die Preise für moderne, hoch-effiziente und dynamische PEMWE-Elektrolyseure (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis) vor einigen Jahren noch bei 1.000 bis 2.000 €/kW [1], sinken sie derzeit durch den Übergang zur Massenproduktion deutlich. Für die nächsten Jahre werden Kosten von nur noch etwa 500 €/kW erwartet [1].
- Steigende Erdgaspreise: Bisher war grauer Wasser-

The transformation to a climate-neutral future is a mantra of our time, often voiced but seldom taken to heart sufficiently. Anyone who has given the problem serious thought knows, that without a swift abandonment of fossil fuels, massive problems loom over mankind and the environment. Some of them have already become unavoidable. A renewable energy system based on technologies like wind power and solar energy, however, poses a similarly pressing problem: periods of darkness (solar energy) or calm (wind power) need bridging. This could be achieved through the continued use of small quantities of fossil fuels, but the only viable long-term solution is the storage of renewably harvested energy for load balancing. Moreover, fossil fuels also serve in the production of indispensable goods such as fertilisers or steel. Here, too, a renewable substitute must be found.

This is where hydrogen comes into play: a chemical energy carrier that meets all requirements and can, through electrolysis, be produced from water, the natural reserves of which are many times greater than needed for the purpose. Its large-scale use in the medium term is becoming ever likelier, considering a number of technical developments of the recent past:

- The parallel refinement and commercialisation of long-life mobility fuel cell systems
- The further development of membrane electrolysis processes: While prices for modern, highly efficient and dynamic PEMWE electrolyzers (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis) ranged from 1,000 to 2,000 €/kW a few years ago [1], the current transition to mass production is causing a significant price drop. For the next several years, the cost is expected to fall to about 500 €/kW [1].
- Rising natural gas prices: So far, grey hydrogen has been so cheap that electrolytic green hydrogen only became competitive whenever electricity was priced below 4 ct/kWh. However, sharply rising prices for

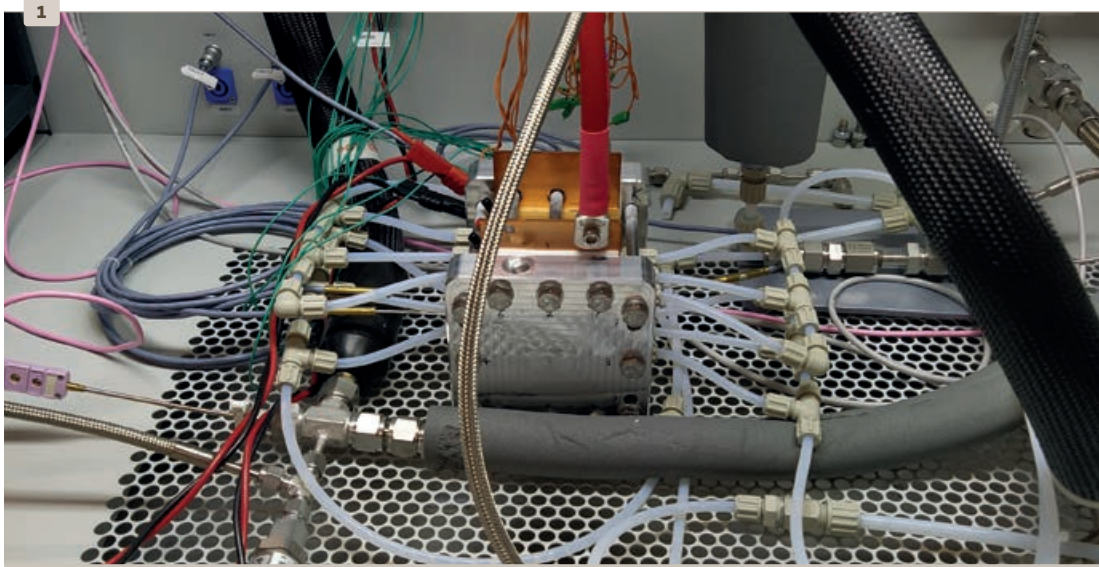


Abb. 1: Prototyp eines eigenentwickelten Zellstapels zur Testung von Membran-Elektroden-Einheiten für die PEM-Elektrolyse

Fig. 1: Prototype of a self-developed cell stack for testing membrane electrode units for PEM electrolysis

stoff so preisgünstig, dass elektrolytischer grüner Wasserstoff erst bei Strompreisen unter 4 ct/kWh konkurrenzfähig wurde. Stark ansteigende Preise für Erdgas beschleunigen derzeit aber die Transformation hin zur erneuerbaren Wasserstoffproduktion. Elektrolytischer Wasserstoff ist nun nicht mehr nur im Optimalfall ökonomisch, sondern wird zur günstigeren Option zur Versorgung der chemischen Industrie. An optimalen Standorten (Wüstengebiete der Subtropen, Küstenzonen der Westwindgürtel der gemäßigten Breiten) kann erneuerbarer Strom besonders kostengünstig produziert werden. Sie eignen sich entsprechend ideal für die erneuerbare Wasserstoffproduktion.

Mit seinem Wasserstofflabor zur Untersuchung von PEM-Elektrolyseuren und Komponenten für die Wasserstoffherzeugung verfügt das ZAE über ideale Voraussetzungen, um die Transformation hin zu einem großtechnischen Einsatz von grünem Wasserstoff in der Industrie wissenschaftlich und als Entwicklungspartner zu begleiten. Unsere Anlagen machen uns zum einzigen Anbieter für Zellstapeltests in Bayern [2] sowie zu einem verlässlichen Partner bei Spezialuntersuchungen für die Elektrolyse der Zukunft [3, 4, 5]. Unsere Entwicklungen umfassen darüber hinaus auch eigene Zell- und Stackhardware für maßgeschneiderte Tests. Ein weiterer Ausbau unserer Wasserstoffaktivitäten ist kurzfristig geplant und wir freuen uns darauf, die Zukunft der Wasserstoffwirtschaft mitzugestalten.

natural gas are currently speeding up the transformation towards renewable hydrogen production. Electrolytic hydrogen is no longer only economical under optimum conditions, it is becoming a money-saving supply option for the chemical industry. At ideal locations (desert areas of the subtropics, coastal zones of the west wind belts in temperate latitudes), renewable electricity can be produced particularly cheaply. Consequently, they are perfectly suited for the renewable production of hydrogen.

With a hydrogen laboratory for the evaluation of PEM electrolyzers and components for hydrogen production, ZAE Bayern is ideally suited to accompany the transformation towards a large-scale industrial use of green hydrogen, both scientifically and as a developing partner. Our facilities make us the only provider of cell stack tests in Bavaria [2] as well as a reliable partner in specialised research for the electrolysis of the future [3, 4, 5]. Our developments also include custom cell and stack hardware for tailored testing. Further expansion of our hydrogen activities is planned for the short term and we are looking forward to make our contribution to the future of the hydrogen economy.

Literatur | References

- [1] A. Buttler, H. Spliethoff, Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 82, Part 3, 2018, 2440-2454.
- [2] M. Möckl et al., submitted to the *Journal of The Electrochemical Society* JES-107211 (2022).
- [3] M. Bernt et al., Analysis of gas permeation phenomena in a PEM water electrolyzer operated at high pressure and high current density, *Journal of The Electrochemical Society* 167 (12) (2020) 124502.
- [4] M. Möckl et al., Proton exchange membrane water electrolysis at high current densities: Investigation of thermal limitations, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 1417–1428.
- [5] J. Knöppel et al., On the limitations in assessing stability of oxygen evolution catalysts using aqueous model electrochemical cells. *Nat Commun* 12, 2231 (2021).

2.2

LEBEN IN EINER GRÜNEN UMGEBUNG – FASSADEN- UND DACHBEGRÜNUNGEN ALS KLIMAFREUNDLICHE GEBÄUDEKOMPONENTEN

LIVING IN A GREEN ENVIRONMENT – GREEN FAÇADES AND ROOFS AS CLIMATE-FRIENDLY BUILDING COMPONENTS

Autor | Author
M. Reim, S. Weismann

Ansprechpartner | Contact
Stephan Weismann
Gruppenleiter
Energieoptimierte Gebäude
Head of Group
Energy-Optimised Buildings

Bereich | Division
Energieeffizienz
Energy Efficiency
+49 931 70564-338
stephan.weismann
@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für
Wirtschaft und Energie**
FKZ 03EN1045A

Kooperationspartner | Partners
**Hochschule für angewandte
Wissenschaften Würzburg-
Schweinfurt**
Technische Universität Berlin
Bayerische Landesanstalt für
Weinbau und Gartenbau
Bundesverband
GebäudeGrün e. V.
Beratungsstelle Energieeffizienz
und Nachhaltigkeit der
Bayerischen Architektenkammer

Negative klimatische Effekte, die aus einem hohen Bauungs- bzw. Versiegelungsgrad resultieren, treten in Städten besonders stark in Erscheinung. Für Menschen und Ökosystem in diesem Umfeld erwächst daraus eine besondere Belastung. Gebäudebegrünungen wirken dem entgegen und bringen dabei noch eine ganze Reihe anderer Vorteile mit sich: Sie verbessern den Dämmwert der Gebäudehülle, verringern sommerliche Überhitzung, verbessern das Mikroklima im Wohnumfeld, schützen vor Lärmimmissionen, steigern die lokale Biodiversität, bauen CO₂ ab und produzieren Sauerstoff. Zudem können Dachbegrünungen, je nach Aufbau, Niederschlag aufnehmen und speichern. So helfen sie, das Risiko von Überflutungsschäden bei Starkregenereignissen zu vermindern.

Das ZAE forscht bereits seit einiger Zeit an Begrünungssystemen in Verbindung mit innovativer Fassadentechnik. Aus diesen Vorarbeiten entstand das Projekt U-green. Darin werden handelsübliche Fassaden- und Dachbegrünungssysteme in Klassen systematisiert und anschließend bauphysikalisch und thermisch charakterisiert. So können Wärmedämmwirkung und Kühlung durch Verdunstungsleistung von Begrünungskomponenten und -systemen zuverlässig bestimmt werden. Ergänzend wird ein Softwaretool entwickelt, das FachplanerInnen künftig die bauphysikalische Bewertung von Fassadensystemen erleichtern soll. Zudem ist der Aufbau einer frei zugänglichen Datenbank mit den Projektergebnissen geplant.

Negative climatic effects caused by high building density and therefore impervious surfaces are particularly pronounced in cities. This places a special burden on the people and ecosystem within this environment. Greening systems for buildings counteract these effects while also having a number of other advantages: they improve the insulation value of the building envelope, reduce overheating in summer, improve the living environment's microclimate, help counter noise pollution, increase local biodiversity, reduce CO₂ and produce oxygen. In addition, depending on their setup, green roofs can absorb and store precipitation. In this way, they help to reduce the risk of flooding damage from heavy rainfall.

ZAE has been researching green façades and green roofs in conjunction with innovative façade technology for several years now. The U-green project is the result of this preceding research. Its objective is to classify commercially available roof and façade greening systems and characterise them according to their physical and thermal properties, meaning that both the efficiency of the thermal insulation and the cooling performance through evaporation of these greening components and systems can be reliably determined. Also, a software tool is being developed that will make it easier for planners to evaluate the building physics of façade systems in the future. A freely accessible database is to be developed to present the project results.

1

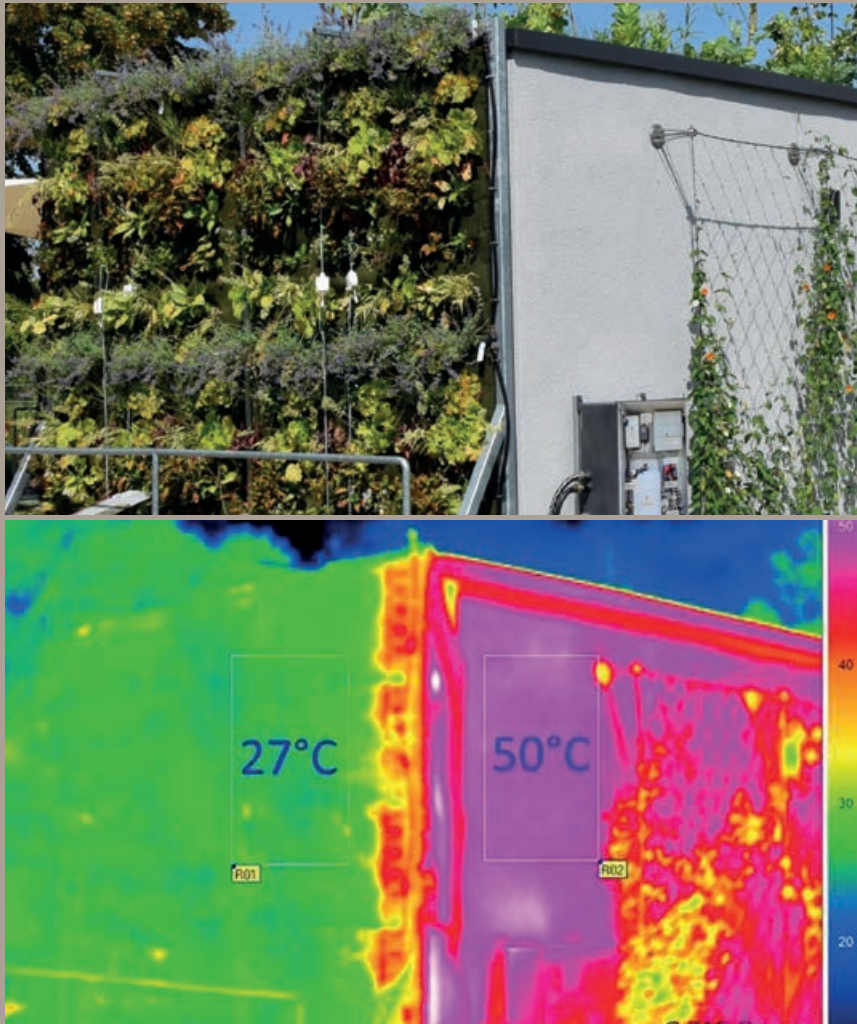


Abb. 1: Foto (oben) und Thermografische Aufnahme (unten) des Südhauses der Klimaforschungsstation in Würzburg.

Fig. 1: Photograph (top) and thermogram (bottom) of the climate research station's southern face in Würzburg

Das ZAE koordiniert das Projekt im Auftrag der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt. Das interdisziplinäre Projektteam setzt sich zusammen aus WissenschaftlerInnen, IngenieurInnen und (Landschafts-) ArchitektInnen der beteiligten Projektpartner ZAE Bayern, TU Berlin, Landesanstalt für Wein- und Gartenbau, BuGG Bundesverband GebäudeGrün e. V. und der Bayerischen Architektenkammer. Es ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einem klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050.

ZAE is coordinating this project on behalf of the University of Applied Sciences Würzburg-Schweinfurt. The interdisciplinary project team is composed of scientists, engineers and (landscape) architects from the participating project partners ZAE Bayern, TU Berlin, Landesanstalt für Wein- und Gartenbau, BuGG Bundesverband GebäudeGrün e. V., and the Bavarian Chamber of Architects. It is an important milestone on the way to a climate-neutral building stock by 2050.

Literatur | References
 [1] N. Pfoser, Überblick zur Forschungslandschaft und Wissensstand, Bundeskongress GebäudeGrün, Berlin, Germany, 23.-24.11.2021.

2.3

FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN ZUR ERHÖHUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ

FUNCTIONAL SURFACES FOR INCREASED ENERGY EFFICIENCY

Autor | Author
J. Manara, M. Arduini, T. Stark

Ansprechpartner | Contact
Dr. Jochen Manara
 Gruppenleiter
 Angewandte IR-Metrologie
 Head of Group
 Applied IR Metrology

Bereich | Division
Energieeffizienz
 Energy Efficiency
 +49 931 70564-346
 jochen.manara@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für
 Wirtschaft und Klimaschutz**
 FKZ KK5162501KS0

Kooperationspartner | Partners
**ETV EING TEXTIL-VEREDLUNG
 GmbH & Co. KG**

**Wolfgang Block Industrie- und
 Gartenbau GmbH & Co. KG**
 HeiQ RAS AG

Spektral-selektive Oberflächen zeichnen sich dadurch aus, dass sie Licht oder Infrarot-Strahlung verschiedener Wellenlängen unterschiedlich reflektieren. So können sie einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden leisten, sowohl im Wohngebäudebestand als auch im Gewächshaus- und Gartencenterbereich. Das ZAE hat z. B. Membranen entwickelt, die im sichtbaren Wellenlängenbereich farbig oder weiß erscheinen, während sie im Infrarotbereich nur wenig Strahlung und somit wenig Wärme in ihre Umgebung emittieren. Sie bewirken eine deutlich verbesserte Wärmedämmung, die im Winter den Wärmeverlust reduziert, im Sommer den Wärmeeintrag. Die resultierende Einsparung von Heiz- und Kühlenergie trägt zur bundesweiten CO₂-Reduktion und somit zur Umsetzung der deutschen Verpflichtungen zum Klimaschutz bei.

Eine solche Membran mit geringem Emissionsgrad (Low-E-Membran), entwickelt von der Verseidag-Indutex GmbH und dem ZAE, wurde in der Eissporthalle in Landsberg am Lech als Unterdecke verbaut (Abb. 1). Die so verminderte Wärmeabstrahlung in den Innenraum bewirkt eine erhebliche Einsparung von Kühlenergie. Die Wärmebildaufnahme in Abbildung 1 veranschaulicht den Effekt: die Oberflächentemperatur der Low-E-Membran liegt deutlich niedriger als die der Umgebung.

Aktuell werden Folien und Gewebe für Gewächshäuser und Gartencenter entwickelt, die weitgehend lichtdurchlässig sind, aber dennoch einen geringen Emissionsgrad aufweisen. Transparente Baumaterialien sind in diesem Bereich die Norm (Abb. 2), da Sonnenlicht ein unverzichtbarer Faktor für die Aufzucht von Pflanzen ist. Durch das einfallende Licht erwärmt sich der Innenraum im Sommer jedoch stark. Daher werden Beschattungssysteme eingesetzt, um einen Teil davon abzuhalten. Die in Folge reduzierte Ausleuchtung

Spectrally selective surfaces are characterised by how they reflect light or infrared radiation of different wavelengths differently. Thus, they can contribute significantly to increasing the energy efficiency of buildings, in the residential building stock as well as in greenhouses and garden centres. For example, ZAE has developed membranes which appear coloured or white in the visible wavelength range while emitting little radiation and thus little heat into their surroundings in the infrared range. They provide significantly improved thermal insulation, reducing heat loss in winter and heat gain in summer. The resulting savings in heating and cooling energy contribute to the nationwide reduction of CO₂ and thus the fulfilment of Germany's climate protection commitments.

Such a low-emissivity membrane (low-e membrane), developed by Verseidag-Indutex GmbH and ZAE, was installed as a suspended ceiling in the ice rink in Landsberg am Lech (Fig. 1). The resulting drop in heat emission into the interior saves a considerable amount of cooling energy. The thermogram in Figure 1 illustrates the effect: the low-e membrane's surface is significantly cooler than the surrounding area.

Currently, largely translucent yet lowly emissive films and fabrics are being developed for greenhouses and garden centres. In this domain, transparent building materials are the norm (Fig. 2), as sunlight is indispensable for plant cultivation. However, the incident light considerably heats up the interior in summer. Shading systems are therefore used to shut out a part of it. However, the resulting reduction in illumination must often be compensated for by artificial light, so as not to impair plant growth. Transparent or translucent low-e films or fabrics, on the other hand, provide optimal energy and light management. As they radiate less heat, the indoor temperature remains moderate in summer while the plants receive sufficient daylight.



muss dann aber häufig durch Kunstlicht kompensiert werden, um das Pflanzenwachstum nicht zu beeinträchtigen. Transparente oder transluzente Low-E-Folien oder -Gewebe ermöglichen dagegen ein optimales Energie- und Lichtmanagement. Da sie weniger Wärme abstrahlen, bleibt im Sommer die Innentemperatur im Rahmen, während ausreichend Tageslicht an die Pflanzen gelangt. Im Winter wird die Wärmeabstrahlung nach außen reduziert. Neben Heiz- und Kühlenergie spart die Technologie also auch Strom für künstliche Beleuchtung ein.

In einem laufenden, BMWK-geförderten Projekt werden spezielle Partikel auf Basis von Silbernanodrähten entwickelt, deren Durchmesser kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts, und in eine transparente Beschichtung eingebracht. Die elektrische Leitfähigkeit der vernetzten Drähte ermöglicht dabei einen geringen Emissionsgrad.

In winter, heat radiation to the outside is reduced. So, in addition to heating and cooling energy, the technology also saves electricity otherwise spent on artificial lighting.

In an ongoing project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, special particles based on silver nanowires with diameters smaller than the wavelength of light are being developed and incorporated into a transparent coating. The electrical conductivity of the cross-linked wires thereby allows for low emissivity.

Abb. 1: Eissporthalle in Landsberg am Lech mit der von Temme // Obermeier GmbH im Rahmen einer Sanierung angebrachten Low-E-Membran. Die untere Hälfte zeigt links eine Thermografieaufnahme der abgehängten Decke, rechts eine Fotografie des gleichen Deckenausschnitts.

Fig. 1: Ice rink in Landsberg am Lech with the low-e membrane installed by Temme // Obermeier GmbH in a renovation project. The lower half shows a thermal image of the suspended ceiling on the left and a photograph of the same section of the ceiling on the right.

Abb. 2: Gewächshaus mit Schattierungsgewebe zur Gewährleistung eines diffuseren Lichteintrags. Eine zusätzliche Low-E-Ausrüstung kann den unerwünschten Wärmeeintrag erheblich reduzieren.
© Wolfgang Block Industrie- und Gartenbau GmbH & Co. KG

Fig. 2: Greenhouse with shading fabric used to maintain a more diffuse light input. The addition of low-e material can significantly reduce unwanted heat input.

© Wolfgang Block Industrie- und Gartenbau GmbH & Co. KG

Literatur | References

- [1] J. Hameury et al., *J. Sens. Sens. Sys.*, 10 (2021) 135-152.
- [2] M. Arduini et al., *Sensors*, 21 (2021) 6252.
- [3] J. Manara, Funktionale und innovative Fassaden: Forschungstrends zur Erhöhung der Energieeffizienz, *Energy Efficient Technologies for Building Envelopes*, Online-Konferenz, 25.-27.11.2020.

2.4

HYDRAULISCHE SYSTEMDICHTHEIT VON ERDWÄRMESONDEN UNTER THERMISCHEM BETRIEB

HYDRAULIC SYSTEM IMPERMEABILITY OF GEOTHERMAL PROBES UNDER THERMAL OPERATION

Autor | Author
M. Pinnekamp, J. M. Kuckelkorn,
L. Pendzich

Ansprechpartner | Contact
Dr. Jens M. Kuckelkorn
 Gruppenleiter
 Systementwicklung
 Head of Group
 Systems Engineering

Bereich | Division
Energiespeicherung
 Energy Storage
 +49 89 329442-17
 jens.kuckelkorn@zae-bayern.de

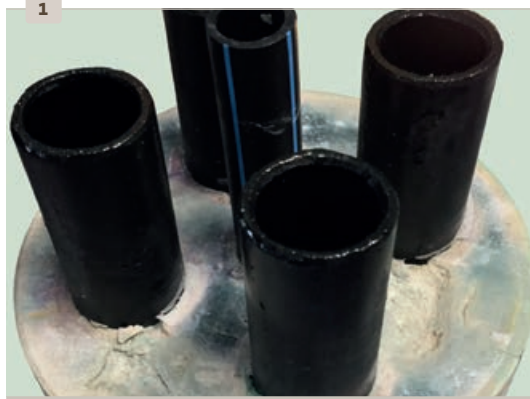
Fördermittelgeber | Funding
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
 FKZ 03ET1386A-G
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
 FKZ 03EE4020B

Kooperationspartner | Partners
Solites (Steinbeis Transfer GmbH)
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Hochschule Biberach
European Institute for Energy Research (EIFER)
Burkhardt GmbH
enOware GmbH
Hans G. Hauri KG
H.S.W. GmbH

Abb. 1: Systemprobe mit vier Sondenrohren und zentralem Hinterfüllschlauch: Nach den Untersuchungen an der 1 m langen Systemprobe sind entlang der Sondenrohrwände Ablösungseffekte erkennbar.

Fig. 1: System sample with four probe pipes and central backfill hose: After testing on the 1 m long system sample, detachment effects can be seen along the probe pipe walls.

In Deutschland sind zur Wärme- und teilweise Kälteversorgung derzeit rund 440.000 erdgekoppelte Wärmepumpensysteme im Betrieb [1, 2]. Der weitere Ausbau der Technologie spielt eine wichtige Rolle für die Energiewende. Gleichzeitig hat die vertikale hydraulische Systemdichtheit eine hohe Priorität für die Genehmigung oberflächennaher Geothermieanlagen. Sie verhindert Schadstoffeinträge von der Geländeoberkante sowie die Migration von Schadstoffen zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken. Die genauen Anforderungen an das System sind dabei abhängig von den Bedingungen des jeweiligen Standorts. Das Verbundprojekt „Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II (QEWS II)“ [3] umfasste daher die Entwicklung von Versuchsständen und Durchführung von Untersuchungen, um solche Systeme unter Laborbedingungen möglichst realitätsnah abzubilden. So konnten die wichtigsten Einflüsse auf die hydraulische Systemdichtheit ermittelt werden.



Aus Polyethylenrohren und Hinterfüllmaterial wurden zu diesem Zweck mehrere Systemproben hergestellt (Abb. 1), deren Aufbau dem einer Bohrung mit 15 cm Durchmesser entsprach, in der eine Doppel-U-Erdwärmesonde mittels eines zentralen Rohres hinterfüllt wird. Die Hinterfüllung soll einerseits die Sonde thermisch an ihre Umgebung anbinden, andererseits das Bohrloch hydraulisch abdichten und so vertikale

Currently, around 440,000 geothermal heat pump systems are operating in Germany, supplying heat and, in some cases, cooling [1, 2]. The technology's further expansion is an important factor in the energy transition. Simultaneously, vertical hydraulic system impermeability is an important factor in the approval of near-surface geothermal systems. It prevents pollutants from entering from the surface as well as from migrating between different groundwater levels. The exact requirements for a system vary with site conditions. The joint project "Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II (QEWS II)" [3] therefore included test rig development and investigations, aiming to recreate such systems as realistically as possible under laboratory conditions. Thus, the main influences on hydraulic system impermeability could be determined.

Several system samples were made for this purpose from polyethylene pipes and backfill material (Fig. 1), corresponding to the design of a borehole, 15 cm in diameter with a double U-type geothermal probe and a central pipe for backfilling. The backfill is intended, on the one hand, to thermally couple the probe to its surroundings, and, on the other hand, to hydraulically seal the borehole and thereby minimise vertical flow. Different ready-mixed materials, usually containing cement, bentonite, quartz sand, and other additives, were tried out for this purpose.

Due to their differing surface properties, such backfill materials adhere poorly to the probe pipes. The connection can be damaged by mechanical stress resulting from temperature and pressure variations. Particularly temperature drops cause the sample to contract radially and axially. Since polyethylene's temperature expansion coefficient is about tenfold that of cementitious construction materials, temperature drops result in a proportionally greater contraction of the pipe. A gap develops between backfill and pipe.

Strömungen minimieren. Dazu dienten verschiedene Fertigmischungen, die gewöhnlich Zement, Bentonit, Quarzsand und andere Zusätze enthalten.

Aufgrund unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten haftet solches Hinterfüllmaterial schlecht an den Sondenrohren. Durch mechanische Spannungen, die aus Veränderungen von Temperatur und Druck resultieren, kann die Verbindung geschädigt werden. Besonders Temperaturabsenkungen bewirken eine radiale und axiale Kontraktion der Systemprobe. Da Polyethylen etwa den zehnfachen Temperaturendeckungskoeffizienten zementhaltiger Baustoffe aufweist, führen Temperaturabsenkungen zu einer im Verhältnis stärkeren Kontraktion des Sondenrohres. Ein Ringspalt entsteht zwischen Baustoff und Sondenrohr.

In einem am ZAE entwickelten Versuchsstand wurden mehrere solcher Systemproben unterschiedlichen Einflussfaktoren ausgesetzt. Die Untersuchungen zeigten, dass die Systemdurchlässigkeit, die mit dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f nach Darcy quantifiziert wird, von ungestörten Proben in etwa der von Proben ohne Sondenrohre, nur aus Hinterfüllmaterial, entspricht. Durch die Temperaturabsenkungen, die beim Betrieb von Wärmepumpen auftreten, steigt die Durchlässigkeit um mehrere Dekaden. Eine zusätzliche Schädigung durch Frost-Tau-Wechsel im Bereich von -6 bis -10 °C war bei den frostresistenten Hinterfüllmaterialien nur in geringem Umfang festzustellen (Abb. 2). Diese wichtigen Erkenntnisse fließen nun, unter anderem, in die VDI-Richtlinie 4640-6 ein. Im laufenden Folgeprojekt „Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme (QEWsplus)“ werden weitergehende Untersuchungen zu diesen Effekten durchgeführt.

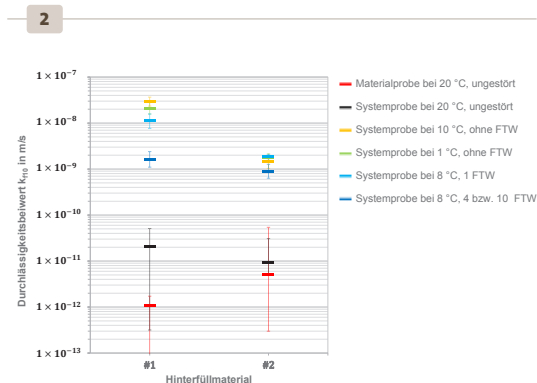


Abb. 2: Systemdurchlässigkeit von Systemproben und Materialproben von zwei Hinterfüllmaterialien: Die ungestörte Systemdurchlässigkeit liegt im Bereich der Materialproben ohne Sondenrohre. Während der Abkühlung der Proben mit Sondenrohren von 20 auf 10 und herunter bis 1 °C steigt die hydraulische Leitfähigkeit um mehrere Dekaden. Nach den Frost-Tau-Wechseln sind hier, aufgrund von Regenerationseffekten, sogar geringere Durchlässigkeitsbeiwerte als davor zu sehen [4].

Fig. 2: System permeability of system and material samples using two backfill materials: Undisturbed system permeability is found in the range of material samples with no probe pipes. Cooling the samples containing pipes from 20 to 10 and then down to 1 °C increases hydraulic conductivity by several decades. After the freeze-thaw cycles, even lower permeability coefficients than before occur due to regeneration effects [4].

Several such system samples were exposed to different influencing factors in a test rig developed at ZAE. The investigations showed that the system permeability, as quantified by the permeability coefficient k_f according to Darcy, is about the same for undisturbed samples as for samples with no probe pipes, made only of backfill material. The temperature reductions that occur during heat pump operation increase permeability by several decades. Additional damage due to freeze-thaw cycles in the range of -6 to -10 °C occurred only to a small extent in the frost-resistant backfill materials (Fig. 2). These important findings are now being incorporated into VDI Guideline 4640-6, among other uses. The ongoing follow-up project QEWsplus on the quality enhancement of shallow geothermal systems includes further investigation of these effects.

Literatur | References

- [1] K.-H. Backhaus et al., Branchenstudie 2021: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen, Hrsg.: Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Berlin, 2021.
- [2] Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt, Pressemitteilung BWP, Berlin, 19.01.2022.
- [3] H. Karrer et al., Qualitätssicherung bei Erdwärmesonden II mit Beteiligung am IEA ECES ANNEX 27, FKZ 03ET1386A, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020.
- [4] J. M. Kuckelkorn et al., Untersuchungen der Einflüsse auf die Qualität von Ringraumverfüllungen von Erdwärmesonden – Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben QEWs II, GeoTHERM digital 2021, Offenburg, Germany, 24.–25.06.2021.

2.5

PEROWSKIT-SOLARZELLEN UND -SOLARMODULE
MIT KOHLENSTOFFELEKTRODENPEROVSKITE SOLAR CELLS AND MODULES WITH
CARBON ELECTRODES

Autor | Author
T. Du, H.-J. Egelhaaf

Ansprechpartner | Contact
Dr. H.-J. Egelhaaf
Gruppenleiter
Solarfabrik der Zukunft
Head of Group
Solar Factory of the Future

Bereich | Division
Energieeffizienz
Energy Efficiency
+49 172 74778-56
hans-joachim.egelhaaf@fau.de

Fördermittelgeber | Funding
Armor Solar Power Films GmbH
Bayerische Staatsregierung
FKZ 20.2-3410.5-4-5
Deutsche Forschungsgemeinschaft
FKZ 182849149

In den letzten zehn Jahren hat die Photovoltaik auf Grundlage organisch-anorganischer Perowskit-Hybridmaterialien beispiellose Fortschritte gemacht. Zellen im Labormaßstab konnten Wirkungsgrade von über 25 % erreichen, weshalb die Technologie als entscheidend für die Photovoltaik der nächsten Generation gilt. Entsprechend hat sich der Forschungsschwerpunkt von der Herstellung im Labormaßstab auf die zur Kommerzialisierung nötige skalierbare Produktion von Perowskit-Solarzellen und -Solarmodulen verlagert.

In der Solarfabrik der Zukunft wurden in den vergangenen zwei Jahren entscheidende Fortschritte bei dieser Skalierung gemacht. Die dort durchgeführte Forschung zeigte, dass bei der Herstellung hochwertiger Perowskitfilme die chemischen Zusätze in der Perowskit-Tinte und die Geschwindigkeit der Lösungsmittelverdampfung eine entscheidende Rolle spielen. Mit einem Rakelverfahren konnten Filme hergestellt werden, die für kleinflächige Zellen (0,1 cm²) mit Metallelektroden einen Wirkungsgrad von über 19 % erreichen [1, 2]. Darüber hinaus wurde die übliche Goldelektrode erfolgreich durch eine Kohlenstoffelektrode ersetzt. Diese ist kostengünstiger und kann leicht unter Umgebungsbedingungen aufgebracht werden. Kleinflächige Zellen (0,1 cm²) erreichten damit einen beeindruckenden Wirkungsgrad von über 18 %, Mini-Module (10 x 10 cm) immer noch über 15 %.

2021 konzentrierte sich das Team hauptsächlich auf die Verbesserung des ohmschen Kontakts zwischen der Kohlenstoffelektrode und den Lochtransport-Schichten der Zelle. Im kommenden Jahr soll, darauf aufbauend, ein neuer Rekordwirkungsgrad für Perowskit-Solarzellen auf Kohlenstoffbasis erreicht werden.

Gleichzeitig widmete sich das Team der Optimierung der Zusammensetzung des Perowskitfilms durch Do-

Over the past decade, photovoltaics based on organic-inorganic perovskite hybrid materials have made unprecedented progress. The efficiency of laboratory-scale cells has exceeded 25 %, making the technology deemed crucial for next-generation photovoltaics. Accordingly, the research focus has shifted from laboratory-scale manufacturing to the scalable production of perovskite solar cells and solar modules required for commercialisation.

Over the past two years, decisive progress towards this scaling has been made at the Solar Factory of the Future. The conducted research showed, how chemical additives in the perovskite ink and the speed of solvent evaporation play crucial parts in the production of high-quality perovskite films. A doctor blade process was found, that allowed for the production of films exceeding an efficiency of 19 % in small-area cells (0.1 cm²) with metal electrodes [1, 2]. Moreover, the commonly used gold electrode was successfully replaced with a carbon one. These are less expensive and easy to apply under ambient conditions. Small-area cells (0.1 cm²) thus achieved impressive efficiencies of over 18 %, mini-modules (10 x 10 cm) still exceeded 15 %.

In 2021, the team focused mainly on improving the ohmic contact between the carbon electrode and the cell's hole transport layers. Building on this, a new record efficiency for carbon-based perovskite solar cells is set to be achieved in the coming year.

Simultaneously, the team dedicated itself to optimising the perovskite film's composition by doping the methylammonium iodide-based perovskite with formamidinium and caesium ions. This aimed to increase the intrinsic stability of the photoactive layer, and thus the lifetime of the solar cell, through chemical modification of the perovskite thin films.

1

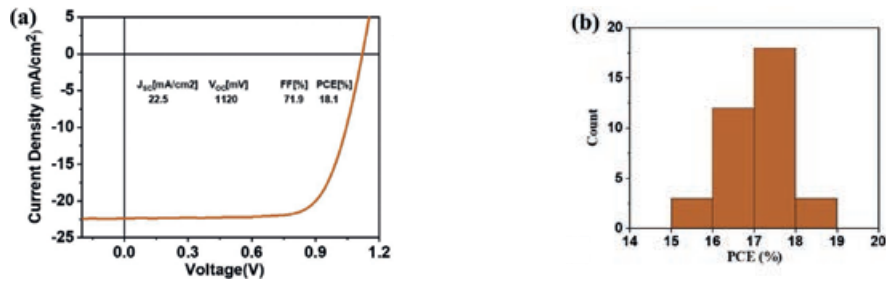


Abb. 1: a) Stromdichte-Spannungs-Kennlinie und b) Histogramm der Wirkungsgrade (PCE) einer Serie von 36 Perovskit-Solarzellen mit Kohlenstoffelektroden (aus [1])

Fig. 1: a) Current density–voltage characteristics and b) histogram of efficiencies (PCE) of a series of 36 perovskite solar cells with carbon electrodes (from [1])

2

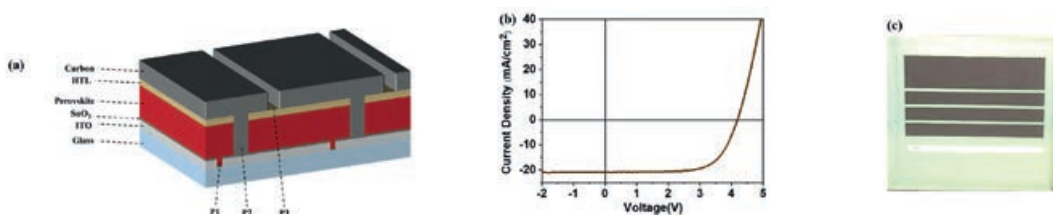


Abb. 2: Schematische Darstellung von Perovskit-Solarmodulen mit Kohlenstoffelektrode (a), Stromdichte-Spannungs-Kennlinien (b) und Foto der Perovskit-Solarmodule (c) (aus [1])

Fig. 2: Schematic representation of perovskite solar modules with carbon electrode (a), current density-voltage characteristics (b), and photo of the perovskite solar modules (c) (from [1])

tierung des auf Methylammoniumiodid basierenden Perovskits mit Formamidium- und Cäsiumionen. Ziel war dabei, durch chemische Modifikation der Perovskit-Dünnschichten die intrinsische Stabilität der photoaktiven Schicht und damit die Lebensdauer der Solarzelle zu erhöhen.

Neben der Steigerung des Wirkungsgrads wurden auch In-situ-Messtechniken, namentlich UV/Vis-Absorptions- und Photolumineszenz-Spektroskopie, zur Beobachtung der Kinetik der Perovskit-Filmbildung entwickelt. Mit ihrer Hilfe wurden die Keimbildung von Perovskit, also die Bildung von Perovskit-Nanokristallen, und das anschließende Wachstum dieser Keime überwacht. So konnten, durch eine Kombination aus Experiment und numerischen Simulationen, Erkenntnisse gewonnen werden, die das Verständnis der Perovskit-Filmbildung vertiefen.

Besides increasing the efficiency, in-situ measurement methods, namely UV/Vis absorption and photoluminescence spectroscopy, were also devised to observe the kinetics of perovskite film formation. These were used to monitor the nucleation of perovskite, i.e. the formation of nanocrystals and subsequent growth of these nuclei. Thus, through a combination of experiment and numerical simulations, insights were gained that deepen the understanding of perovskite film formation.

Literatur | References

- [1] F. Yang, L. R. Dong, D. J. Jang, B. Saparov, K. C. Tam, K. C. Zhang, N. Li, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, *Adv. Energy Mater.* **11** (2021) 2101219.
 [2] F. Yang, D. J. Jang, L. R. Dong, S. Qiu, A. Distler, N. Li, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, *Adv. Energy Mater.* **11** (2021) 2101973.

2.6

NEUE GENERATION VON WÄRMEDÄMMUNG FÜR TEMPERATUREN ÜBER 1.500 °C

A NEW GENERATION OF THERMAL INSULATION FOR TEMPERATURES ABOVE 1,500 °C

Autor | Author
**G. Reichenauer, M. Wiener,
H.-P. Ebert**

Ansprechpartner | Contact
Dr. Gudrun Reichenauer
Gruppenleiterin
Nanomaterialien
Head of Group
Nanomaterials

Bereich | Division
Energieeffizienz
Energy Efficiency
+49 931 70564-328
gudrun.reichenauer
@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
FKZ 03ET1503

Kooperationspartner | Partners
SGL Carbon AG
FCT Systeme GmbH

Wärmedämmung ist ein adäquates Mittel zur Steigerung von Energieeffizienz und damit Einsparung von CO₂. Meist verbindet man mit der Technologie ihren Einsatz in Gebäuden, obwohl sie auch in anderen Anwendungen große Einsparungen ermöglicht. Da mit steigender Temperaturdifferenz auch thermische Energieverluste wachsen, bieten Hochtemperaturprozesse, in die etwa 50 % der industriell verbrauchten Prozesswärme fließen, ein großes Sparpotenzial.

Für Prozesstemperaturen über 1.500 °C, wie sie z. B. in Graphitierungsöfen vorherrschen, sind nur Kohlenstoff- oder Carbidbasierte Dämmungen thermisch ausreichend stabil. Kommerziell eingesetzt werden meist harte und weiche Filze aus graphitierten Kohlenstofffasern. Ein möglichst geringer Anteil an Fasern und Kontaktstellen dazwischen reduziert dabei den unter 500 °C vorherrschenden Wärmetransport über den Festkörper.

Bei Temperaturen über 1.000 °C dominiert allerdings die Wärmestrahlung den Wärmetransport. Um den Beitrag über infraroptische Strahlung zu reduzieren, muss der vorhandene Kohlenstoff möglichst fein über das Dämmmaterial verteilt werden. In typischen Filzdämmungen beträgt der Faserabstand etwa 100 bis 500 µm. Aufgrund des dominanten Strahlungstransports führt das bei über 1.000 °C zu einem deutlichen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit (Abb. 1). Der Wärmetransport über Gasphase und Fasern ist dabei fast vernachlässigbar. Durch geschicktes Materialdesign sind bei der Faserisolation weitere Verbesserungen im einstelligen Prozentbereich möglich, bevor die physikalischen Grenzen der Optimierung erreicht sind.

Besonders bei hohen Temperaturen lässt sich die Wärmeleitfähigkeit mit nanoporösen Kohlenstoff-Kompositen deutlich reduzieren. Diese verbinden die vorteilhaften mechanischen Eigenschaften von Fa-

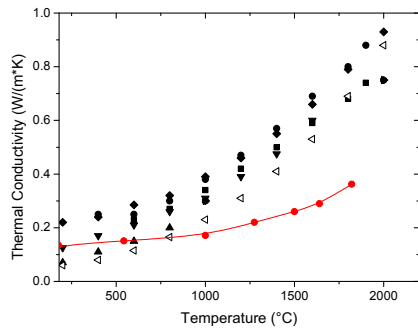
Thermal insulation is an adequate instrument to increase energy efficiency and thus save CO₂. The technology is usually associated with its application in buildings, although it also allows for great savings in other areas. Since thermal energy losses increase along with the temperature difference, high-temperature processes, which account for about 50 % of all industrially consumed process heat, offer great savings potential.

For process temperatures above 1,500 °C, as they prevail for instance in graphitising furnaces, only carbon- or carbide-based insulations are thermally stable enough. Hard and soft felts made of graphitised carbon fibres are most commonly used in commercial applications. Keeping the volume fraction of fibres and number of contact points between them as low as possible minimises heat transfer via the solid body, which is predominant below 500 °C.

At temperatures surpassing 1,000 °C, however, thermal radiation is the dominant form of heat transport. To reduce the share of infrared radiation, the carbon must be distributed as thinly as possible across the insulation material. In typical insulation felts, fibre spacing is about 100 to 500 µm. Due to the dominance of radiative transfer, this significantly increases thermal conductivity above 1,000 °C (Fig. 1). The heat transport via gas phase and fibres is, at the same time, almost negligible. Through clever material design, further improvements in the single-digit percentage range may be achieved for fibre insulation before reaching the physical limits of optimisation.

Especially at high temperatures, nanoporous carbon composites can significantly reduce thermal conductivity. These combine the advantageous mechanical properties of fibrous insulations with a very fine distribution of carbon. As part of the AeroFurnace research

1



2

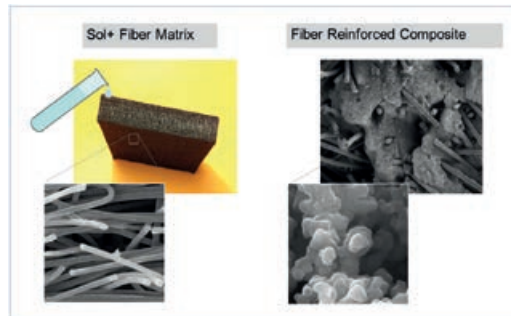


Abb. 1: Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher kommerzieller Graphitfilze (schwarze Symbole) und eines Sol-Gel-basierten Komposits, das bei 2.000 °C gegläht wurde (rote Linie mit Punkten)

Fig. 1: Thermal conductivity of different commercial graphite felts (black symbols) and a sol-gel based composite annealed at 2,000 °C (dotted red line)

Abb. 2: Struktur eines kommerziellen Kohlenstofffilzes (links) im Vergleich zu einem Sol-Gel-basierten C/C-Komposit (rechts)

Fig. 2: Structure of a commercial carbon felt (left) compared to a sol-gel based C/C composite (right)

serdämmungen mit einer sehr feinen Verteilung des Kohlenstoffs. Im Rahmen des Forschungsprojekts AeroFurnace wurden solche C/C-Komposite in einem Sol-Gel-Verfahren entwickelt und mittels eines Kammerofen-Demonstrators praxisnah evaluiert [1].

Abb. 2 zeigt die Mikrostruktur des Komposits (Abstände in der Kohlenstoffphase 100 bis 500 nm) und eines kommerziellen Kohlenstofffilzes. Abb. 1 zeigt einen Vergleich seiner Wärmeleitfähigkeit mit der des Kohlenstoff-Hartfilzes MFA des Herstellers SGL Carbon. Die Kurve zeigt deutlich die Überlegenheit des neuen Hochtemperaturdämmstoffs im Bereich über 1.000 °C. Praktische Tests mit 40 mm dicken C/C-Kompositkacheln und begleitende Simulationen belegen ein Einsparungspotenzial von bis zu 30 %. Das entwickelte Material ist selbsttragend, thermoschockbeständig, zyklensfest und kann mit gängigen Methoden (Sägen, Bohren, Fräsen etc.) bearbeitet werden. Bei Bedarf ist auch eine Kaschierung möglich. Die Skalierbarkeit der Prozessschritte wurde bereits positiv geprüft. Aktuell laufen Gespräche zur Weiterführung der Arbeiten, um in den nächsten 2–3 Jahren erste industriell gefertigte C/C-Kompositplatten bereitstellen zu können. Anfragen zahlreicher Unternehmen zeigen bereits jetzt großen Bedarf in der Industrie.

project, such C/C composites were developed in a sol-gel process and practically evaluated using a chamber furnace demonstrator [1].

Fig. 2 shows the microstructure of the composite (fibre spacing of 100 to 500 nm) and a commercial carbon felt. Fig. 1 compares its thermal conductivity to that of manufacturer SGL Carbon's hard carbon felt MFA. The curve clearly shows the new high-temperature insulation material's superiority in the range above 1,000 °C. Practical tests with 40 mm thick C/C composite tiles and accompanying simulations proved a savings potential of up to 30 %. The developed material is self-supporting, resistant to thermal shock, stable to cycling, and can be processed using common methods (sawing, drilling, milling, etc.). If required, lamination is also possible. The scalability of the process steps was already evaluated positively. Currently, discussions are underway on continuing the work to be able to provide the first industrially manufactured C/C composite panels within the next 2-3 years. Enquiries from numerous companies already indicate great demand in the industry.

Literatur | References
 [1] H.-P. Ebert et al., Optimization, Upscaling and Evaluation of Nanoporous Carbon Composites for Thermal Insulation of Process Chambers Suitable for Application Temperatures above 1500 °C (Aerofurnace), TIB Hannover 25.05.2021.

2.7

NUTZUNG INDUSTRIELLER ABWÄRME DURCH THERMISCHE ENERGIESPEICHERUNG BEI BIS ZU 300 °C

UTILISATION OF INDUSTRIAL WASTE HEAT AT UP TO 300 °C BY THERMAL ENERGY STORAGE

Autor | Author
R. Gurtner

Ansprechpartner | Contact
Dipl.-Ing. Richard Gurtner
Projektleiter
Wärmetransformation
Project Manager
Heat Conversion

Bereich | Division
Energiespeicherung
Energy Storage
+49 89 329442-14
richard.gurtner@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
FKZ 03ESP370B

Kooperationspartner | Partners
Gießerei Heunisch GmbH
Küttner GmbH & Co. KG

Im Verbundvorhaben „Industrielle Abwärmenutzung einer Gießerei durch thermische Energiespeicherung in Kombination mit einem Absorptionsprozess (iAST)“ wurde ein Konzept zur Speicherung von Abwärme bis zu einer Temperatur von ca. 300 °C entwickelt. Zum Einsatz kam ein so genannter Zweistoffspeicher: ein druckloses System, das als Speicher material eine Gesteinsschüttung nutzt, die in direktem Kontakt mit Thermoöl steht, das als Wärmeträger agiert. Gegenüber konventionellen Ölspeichern ohne Gestein senkt dieser Aufbau die Kosten für das Speicher material um fast 50 %, die Gesamtkosten (inklusive Speicherhülle) um etwa 34 %. Die Speicherkapazität ist um etwa 20 % größer, das Schüttvolumen um 20 % kleiner. Durch die um etwa 60 % reduzierte Menge an Thermoöl können außerdem Ausdehnungs- und Auffangbehälter verkleinert werden. Zu guter Letzt schrumpft mit der Ölmenge auch die Brandlast, was die Betriebssicherheit erhöht.

Ein Versuchsstand zur experimentellen Untersuchung des Speicherkonzepts wurde in Garching aufgebaut und betrieben. Unter realen Betriebsbedingungen erreichte er eine sehr hohe Effizienz bei gleichzeitig sehr geringem Druckverlust beim Durchströmen der Feststoffschüttung. Im Normalbetrieb erfolgte kein Austrag von Speicher material, Langzeitbetrieb hatte keinen negativen Einfluss auf die thermische Beständigkeit von Feststoff und Thermoöl. Es wurden wichtige Erkenntnisse zur Betriebscharakteristik des Speichers gewonnen, ein Simulationsmodell erstellt und mit Hilfe von Messdaten validiert.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Pilotanlage konstruiert: ein Speichermodul mit einem Volumen von 50 Kubikmetern und einer Vakuum-Superisolation. Bei einer voraussichtlichen Schüttdichte von über 60 Prozent fasst es etwa 78 Tonnen Gesteinsschüttung und 20 Kubikmeter Thermoöl. Daraus er-

In the joint project "Industrial Waste Heat Utilisation of a Foundry by Thermal Energy Storage in Combination with an Absorption Process (iAST)", a concept was developed for the storage of waste heat at up to approximately 300 °C. This was achieved through a dual-media storage: a pressureless system using a rock bed as a solid filler in direct contact with heat transfer oil. Compared to conventional oil storages without rocks, this design almost cuts in half the cost of the storage material while reducing overall cost (including storage hull) by about 34 %. The storage capacity is about 20 % higher, the volume of the storage medium 20 % smaller. Also, reducing the amount of heat transfer oil by about 60 % allows for a size reduction of the expansion and collection tanks. And, finally, less oil means less fire load, meaning increased operational safety.

A test rig was set up and operated in Garching to experimentally investigate the concept. Under realistic operating conditions, the system achieved a very high efficiency at very little pressure loss during flow through the solid bed. In normal operation, there was no discharge of storage material whatsoever and long-term operation had no negative influence on the thermal stability of the solids or heat transfer oil. Important insights into the storage's operating characteristics were gained, a simulation model was created and then validated based on measured data.

Based on these findings, a pilot plant was designed: a storage module of 50 cubic metres with a vacuum super-insulation. At an expected bulk density of over 60 per cent, it holds about 78 tonnes of rock fill and 20 cubic metres of heat transfer oil. In theory, this translates to a storage capacity of around 3.6 MWh for operation between 100 and 215 °C. Conventionally providing this amount of energy, e.g. from natural gas, would release around 720 kg of CO₂, which could now be saved per



Abb. 1: Der Speicherversuchsstand in Garching

Fig. 1: The experimental storage module in Garching

gibt sich für den Betrieb zwischen 100 und 215 °C eine theoretische Speicherkapazität von rund 3,6 MWh. Bei einer konventionellen Bereitstellung dieser Energiemenge, z. B. mittels Erdgas, würden rund 720 kg CO₂ freigesetzt, die nun pro Speicherzyklus eingespart werden können. Die Kosten für die Speicherung belaufen sich, unter den genannten Betriebsbedingungen, auf ca. 20 €/kWh.

Der Piloteinsatz des Zweistoffspeichers sollte ursprünglich an einem Schmelzofen der Gießerei Heunisch in Bad Windsheim erfolgen. Aufgrund während der Projektlaufzeit veränderter Randbedingungen konnte dieser Plan leider nicht umgesetzt werden. Aktuell wird daher nach einer Demonstrationmöglichkeit im Bereich der Abwärmenutzung und/oder Sektorkopplung gesucht.

storage cycle. Under the mentioned operating conditions, the cost of storage amounts to about 20 €/kWh. The dual-media storage system was originally intended to be piloted on a smelting furnace at the Heunisch foundry in Bad Windsheim. Unfortunately, owing to boundary conditions changing during the project, this plan could not be implemented. We are therefore currently looking for a demonstration opportunity in the area of waste heat utilisation and/or sector coupling.

2.8

ÖKONOMISCHE HOCHTEMPERATURDÄMMUNG FÜR DIE INDUSTRIE

ECONOMIC HIGH-TEMPERATURE SUPER INSULATION FOR INDUSTRIAL USE

Autor | Author
T. Beikircher

Ansprechpartner | Contact
Dipl.-Ing. Peter Osgyan M.Sc.
Stellv. Gruppenleiter
Solarenergie und Geothermie
Deputy Head of Group
Solar and Geothermal Energy

Bereich | Division
Energiespeicherung
Energy Storage
+49 89 329442-46
peter.osgyan@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
FKZ 03ET1639A

Kooperationspartner | Partners
va-Q-tec AG

Kraftblock GmbH

Verallia Deutschland AG

Chemikalien-Gesellschaft Hans Lungmuß mbH & Co. KG

Die Energiewende erfordert, neben der Umstellung auf CO₂-neutrale Energieerzeugung, besonders in der Industrie auch weitreichende Effizienzmaßnahmen. Superisolierende Wärmedämmungen und Zwischenspeicher zur Abwärmenutzung spielen dabei eine Schlüsselrolle. Beides wurde nun erfolgreich am ZAE entwickelt [1, 2, 3, 4] und europaweit patentiert [5].

Basis der neuen Isolation sind natürliche, mikroporöse Dämmpulver wie Perlit oder pyrogene Kieselsäure (pKs), die den Wärmetransport über Festkörper- und Gasphase stark reduzieren. Es verbleibt der Strahlungstransport, der bei hohen Temperaturen den größten Verlustanteil bedingt. Zu seiner Reduktion wurden Infrarotstrahlung blockende Trübungsmittel beigemischt. Siliziumkarbid erwies sich bei einem Massenanteil von 40 % als optimale Lösung.

Bei der Dämmung eines 1.000 °C heißen Bauteils wurden so Wärmeleitfähigkeiten von 0,1 W/mK (Perlit) bzw. 0,04 W/mK (pKs) erreicht. Für eine Dämmung von 1 m Dicke bedeutet das einen Wärmeverlust von nur 40–100 W/m². Die genutzte Perlitmischung kostet etwa 300–600 €/m³, pKs etwa 1.000 €/m³. Kommerzielle Hochtemperaturdämmungen erreichen 0,1–0,15 W/mK bei etwa 1.000 €/m³, sind also weniger effizient.

Weiter wurde untersucht, wie die Dämmung an heiße Bauteile angebracht werden kann. Eine Option ist die Verfüllung in evakuierbare, selbststabile doppelwandige Geometrien wie Rohrleitungen oder konzentrisch-zylindrische Speicher. Sie verbinden höchste Dämmwirkung und Ökonomie. Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung in VIPs (Vakuum-Isolationspaneelen), bei denen – ähnlich einer Packung Kaffee – ein gepresster Kern von einer dünnen Folie vakuumdicht umhüllt wird.

Apart from switching to CO₂-neutral energy generation, the energy transition also requires large-scale efficiency measures, especially in industrial operations. Thermal superinsulations and buffer storages for waste heat utilisation play key roles in this. Both were now successfully developed at ZAE Bayern [1,2,3,4] and are pending for a European patent [5].

The new insulation is based on natural, microporous insulation powders, such as perlite or pyrogenic silica (ps), which dramatically reduce heat conduction via the solid and gas phases. The remaining radiative transfer is responsible for the majority of losses at high application temperatures. As a countermeasure, several infrared-blocking opacifiers were evaluated as additives. Silicon carbide at a mass fraction of 40 % proved itself the best choice.

For the insulation of a component operating at 1,000 °C, thermal conductivities of 0.1 W/mK (perlite) and 0.04 W/mK (ps) were achieved. For an insulation thickness of 1 m, this translates to a heat loss of only 40-100 W/m². The perlite mixture used costs about 300-600 €/m³, ps about 1,000 €/m³. Today's commercial high-temperature insulations achieve 0.1-0.15 W/mK at about 1,000 €/m³, thus are less efficient.

Further research went into ways of applying the insulating powders to hot parts. One option is filling them into evacuable, self-stable double-walled geometries, such as pipelines or concentric-cylindrical storage vessels. This way, the highest possible degree of insulation is combined with cost efficiency. Another possibility is the use in VIPs (vacuum insulation panels), which – much like a pack of coffee – consist of a compressed core enveloped in a vacuum-tight film.



Abb. 1: Neuartige Dämmung mit getrübbtem Perlitpulver im Ringspalt eines Glasfeeders

Fig. 1: Novel insulation with opacified perlite powder in the annular gap of a glass feeder

Der Projektpartner va-Q-tec produziert bereits erfolgreich VIPs, allerdings mit einer nur bis 100 °C stabilen Kunststoffhülle. Dieser Anwendungsbereich wurde nun bis 600 °C erweitert. Dazu diente eine 25–50 µm dicke Edelstahlfolie, die mittels einer neuartigen Technik im Vakuum verschweißt wurde. Mit getrübbter pKs als Kern wurden, dank vollständiger Unterdrückung der Gaswärmeleitung, bei 600 °C Wärmeleitfähigkeiten von 0,015 W/mK erzielt. Dank der Nanostruktur des Pulvers genügt dazu ein leicht erzeug- und lange haltbares Grobvakuum (5 mbar).

Beim Projektpartner Verallia wurde der Trog eines Feeders – einer Anlage, die geschmolzenes Glas vortemperiert und portioniert – mit einer Betriebstemperatur von 1.000 °C mit getrübbtem Perlit isoliert (Abb. 1). Die Wärmeverluste sanken deutlich. Außerdem wird so ein punktuelleres Erstarren der Glasschmelze vermieden, das Ausschuss in der Produktion verursacht.

Schließlich dienen Hochtemperatur-VIPs auch dem Bau effizienter Zwischenspeicher für industrielle Abwärme. Das ZAE plant, einen keramischen Hochtemperaturspeicher des Partners Kraftblock mit den neuartigen VIPs von va-Q-tec auszustatten, um Prozesswärme über mehrere Stunden annähernd verlustfrei speicherbar zu machen. Auf diesem Weg kann beispielsweise heiße Abluft aus dem Ofen einer Ziegelbrennerei oder Schmelze nutzbar gemacht werden, um zeitversetzt rohe Tonziegel oder Altglas zu trocknen.

Project partner va-Q-tec is already successfully producing VIPs, albeit with a plastic shell only stable up to 100 °C. This range of application was now extended to 600 °C by using a 25–50 µm thick stainless steel foil, which was welded in a vacuum in a novel technique. With an opacified ps core, thermal conductivities of 0.015 W/mK were achieved at 600 °C, owing to the complete suppression of gas heat conduction. Thanks to the powder's nanostructure, an easy-to-generate and -sustain rough vacuum (5 mbar) will suffice for this effect.

Project partner Verallia used opacified perlite powder to insulate the trough of a feeder—a machine for the pre-tempering and portioning of molten glass—with an operating temperature of 1,000 °C (Fig. 1). Heat losses dropped significantly. Also, this prevents selective solidification of the molten glass, which would result in reject production.

Finally, high-temperature VIPs also serve in the building of efficient buffer storages for industrial waste heat. To this end, ZAE is planning to equip a ceramic high-temperature storage tank of project partner Kraftblock with va-Q-tec's innovative VIPs to make process heat storable over several hours at virtually no loss. This could, for example, make hot exhaust air from a kiln in a brickworks or a glass smelter available for drying raw clay bricks or waste glass at a later time.

Literatur | References

- [1] Rottmann, M. (2021). Untersuchung des Wärmetransports in expandiertem Perlit zur Entwicklung einer Vakuumpulverisolation für Hochtemperatur-Anwendungen bis 800 °C. (Dissertation). Technische Universität München.
- [2] Rottmann, M., Beikircher, T., & Ebert, H.-P. (2020). Thermal conductivity of evacuated expanded perlite measured with guarded-hot-plate and transient-hot-wire method at temperatures between 295 K and 1073 K. *International Journal of Thermal Sciences*, 152, 106338.
- [3] Rottmann, M., Beikircher, T., Ebert, H.-P., Hemberger, F., & Manara, J. (2021). Thermal conductivity and extinction coefficient of opacified expanded perlite for vacuum super insulation up to 1073 K. *International Journal of Thermal Sciences*, 163, 106813.
- [4] Rottmann, M., Beikircher, T. (2022). Pressure dependent effective thermal conductivity of pure and SiC opacified expanded perlite between 293 K and 1073 K, to be published in *International Journal of Thermal Sciences*, 2022.
- [5] Europäische Patentanmeldung EP 3772494 A1.

2.9

THERMISCHE OPTIMIERUNG VEREDELTER
FILZDÄMMSTOFFETHERMAL OPTIMISATION OF REFINED FELT
INSULATION MATERIALS

Autor | Author
S. Vidi

Ansprechpartner | Contact
Dipl.-Phys. Stephan Vidi
Gruppenleiter
Thermische Analyse
Head of Group
Thermal Analysis

Bereich | Division
Energieeffizienz
Energy Efficiency
+49 931 70564-350
stephan.vidi@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für Bildung
und Forschung**
FKZ 031B1102B

Kooperationspartner | Partners
Fraunhofer IGB
**Oberbadische Filzfabrik
Hilzingen GmbH**
**Sobernheimer Bio-Compounds
GmbH**
Trevira GmbH

Im Projekt „SmartFelt-M“ wird, mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, eine Materialtechnologie gesucht, die zwei bekannte Probleme von Wollfaserdämmstoffen lösen kann: mangelnde Festigkeit und das Fehlen eines langzeitstabilen Mottenschutzes. Um das Material nach Gebrauch in den biologischen Kreislauf zurückführen zu können, soll die Lösung biobasiert sein.

Vier Eigenschaften sind dabei besonders wichtig:

- Ausreichende Materialfestigkeit
- Eine gut verputzbare Oberfläche
- Schutz vor Mottenbefall
- Sehr gute thermische Dämmeigenschaften

Die Filze werden mit abbaubaren Materialien wie PLA, Chitosan etc. veredelt, um ihnen die gewünschten Eigenschaften zu geben. Dabei sind einige Kombinationen von Eigenschaften, z. B. eine niedrige thermische Leitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit, antagonistisch. Diese müssen eingehend untersucht werden, um schließlich das Optimum für das angestrebte Material zu finden.

Das ZAE untersucht im Projekt den Einfluss unterschiedlicher Veredelungen auf die Wärmeleitfähigkeit. Dazu wurde zunächst der Wärmetransport im unveränderten Filz überprüft. Die einzelnen Beiträge zum Gesamtwärmetransport (Gas, Festkörper, Strahlung) wurden untersucht, Messungen in Abhängigkeit der Probendichte durchgeführt. Es folgten ähnliche Untersuchungen an vorher veredelten Filzen. Im Vergleich wurde der Einfluss der Veredelung auf die Wärmeleitfähigkeit quantifizierbar. Auf Basis dieser Ergebnisse entwickelt das ZAE Empfehlungen und gibt sie an die Projektpartner weiter. Diese passen dann die Art der verwendeten Veredelung an, um die gewünschten Materialeigenschaften zu erhalten.

Project “SmartFelt-M”, funded by the Federal Ministry of Education and Research, aims to find a material technology capable of solving two common problems of wool-fibre insulation materials: lack of strength and missing long-term moth protection. To allow for the material to be returned to the biological cycle after use, the solution is to be bio-based.

Four properties are particularly important:

- Sufficient material strength
- An easy-to-plaster surface
- Protection against moth infestation
- Very good thermal insulation properties

Degradable materials, such as PLA, chitosan, etc., are used to refine the felts and give them the desired properties. Some combinations of properties, for instance low thermal conductivity at high strength, are antagonistic. These need to be investigated in detail to eventually determine the optimum for the desired material.

ZAE Bayern examines the influence of different refinements on the thermal conductivity in the project. To this end, the heat transport in the unmodified felt was first examined. The separate contributions to the overall heat transport (gas, solid, radiation) were investigated, and measurements were carried out in relation to the sample density. Similar investigations followed on previously refined felts. By comparison, the refinements' influence on the thermal conductivity became quantifiable. Based on these results, ZAE is developing recommendations and sharing them with the project partners. They can then adapt the type of finishing they use to obtain the desired material properties.

1

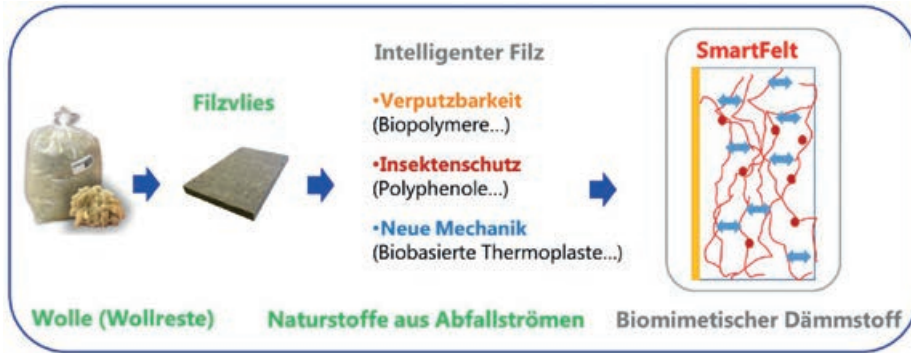


Abb. 1: Vom Wollrest zum veredelten biobasierten Dämmstoff

Fig. 1: From wool residue to refined bio-based insulation material

2

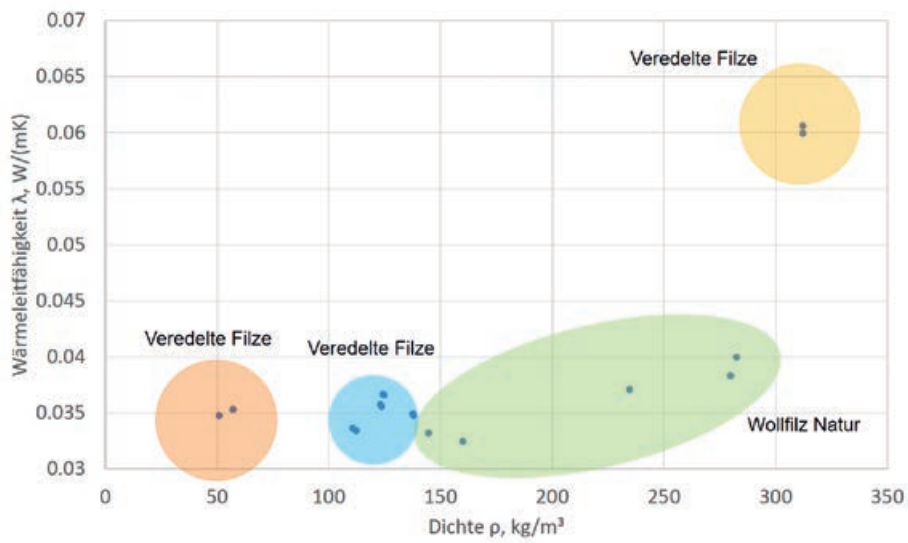


Abb. 2: Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Dichte von reinen und veredelten Wollfilzen

Fig. 2: Thermal conductivity as a function of density of pure and refined wool felts

2.10

IMPfstoffe OHNE TROCKENEIS SICHER UND ENERGIEEFFIZIENT TRANSPORTIEREN

SAFE AND ENERGY-EFFICIENT VACCINE TRANSPORT WITHOUT DRY ICE

Autor | Author
S. Pöllinger, S. Hiebler

Ansprechpartner | Contact
Dr. Stefan Hiebler
 Gruppenleiter
Thermische Energiespeicher
 Head of Group
Thermal Energy Storage

Bereich | Division
Energiespeicherung
 Energy Storage
 +49 89 329442-35
 stefan.hiebler@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für
 Wirtschaft und Energie**
 FKZ 03EN4012

Kooperationspartner | Partners
va-Q-tec AG

Um nicht unbrauchbar zu werden, müssen einige Impfstoffe gegen SARS-CoV-2 beim Transport zuverlässig auf etwa -70 °C gekühlt werden. Derzeit nutzt man dazu isolierte Transportbehälter, die mittels Trockeneis (CO₂ im festen Aggregatzustand) über mehrere Tage hinweg kalt gehalten werden können. Diese Methode birgt allerdings einige Herausforderungen. Nach seiner energieintensiven Herstellung verbraucht Trockeneis sich beim Kühlen. Während es Umgebungswärme aufnimmt, geht es bei -78,5 °C direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über und entweicht aus dem Transportbehälter. Eine nachhaltige Mehrfachnutzung ist unmöglich. Außerdem dürfen aus Sicherheitsgründen nur begrenzte Mengen davon gleichzeitig transportiert werden. Frachtplätze können entsprechend nicht komplett ausgenutzt werden, der benötigte logistische und zeitliche Aufwand für die weltweite Impfstoffverteilung wächst.

Im Projekt „Entwicklung von Kältespeichermaterialien für den trockenisfreien Impfstofftransport (coCO₂vac)“ entwickelt das ZAE deshalb zusammen mit der Würzburger va-Q-tec AG wiederverwendbare Kühlakkus auf Basis von Phasenwechselmaterialien (PCM von engl. phase change material), die zuverlässig auf etwa -70 °C kühlen. Solche Akkus wurden bisher nur bis etwa -50 °C angewendet. Es mussten also zunächst für den gewünschten Temperaturbereich geeignete Materialien identifiziert werden. Dazu bieten sich Mischungen verschiedener Salze mit Wasser an, die jeweils sehr eng definierte Schmelzbereiche und hohe Schmelzenthalpien aufweisen. Einige dieser Materialien müssen allerdings bis weit unter ihren Gefrierpunkt gekühlt werden, um die Kristallisation auszulösen. Zur Verbesserung des Kristallisationsverhaltens werden deshalb geringe Mengen keimbildender Materialien beigemischt, die für jede Salzmischung individuell entwickelt werden.

To avoid being rendered unusable, some SARS-CoV-2 vaccines must be reliably cooled to about -70 °C during transport. Currently, this is achieved through the use of insulated shipping containers which can be kept cold over several days with dry ice (solid state CO₂). However, this method poses a number of challenges. After its energy-intensive production, dry ice consumes itself in the cooling process. While absorbing ambient heat, it transitions directly from the solid to the gaseous state at -78.5 °C and escapes the transport container. Sustainable repeated use is impossible. Moreover, for safety reasons, only limited quantities of it may be transported at a time. Consequently, freight spaces cannot be fully utilised, and the logistical and time effort required for worldwide vaccine distribution increases.

In the project "Development of Cold Storage Materials for Dry-Ice-Free Vaccine Transport (coCO₂vac)", ZAE Bayern is therefore collaborating with Würzburg-based va-Q-tec AG to develop reusable cooling packs based on phase change materials (PCM) which reliably provide cooling down to about -70 °C. So far, such products have only been in use down to about -50 °C. So, as a first step, appropriate materials for the desired temperature range had to be identified. Suitable for this purpose are mixtures of various salts and water, each of which has a narrowly defined melting range and high melting enthalpy. However, some of these materials must be cooled well below their freezing point to trigger crystallisation. To improve the crystallisation behaviour, small amounts of nucleating agents are therefore added, which are developed individually for each salt mixture.

Using theoretical considerations and practical testing, several such mixtures were identified to be fit for the relevant temperature range. For a number of them, well-functioning nucleating agents were also

1



Abb. 1: Kühlakkus mit PCM-Füllung und Kühlcontainer für den Luftfrachtverkehr
© va-Q-tec AG

Fig. 1: PCM-filled cooling packs and refrigerated containers for air freight transport
© va-Q-tec AG

2

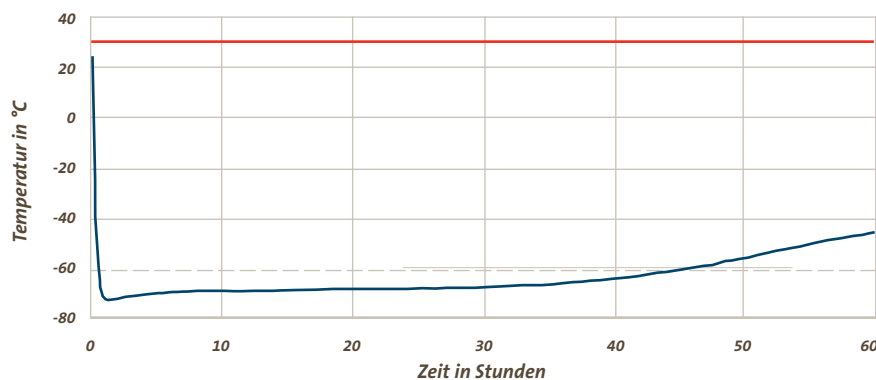


Abb. 2: Temperaturverlauf inner- und außerhalb einer Testbox mit PCM-Kühlakkus

Fig. 2: Temperature curve in- and outside of a test box with PCM cooling packs

■ Außentemperatur ■ Innentemperatur

Mittels theoretischer Betrachtungen und praktischer Messreihen wurden mehrere solche Mischungen identifiziert, die sich für den fraglichen Temperaturbereich eignen. Für einige davon fanden sich auch gut funktionierende Keimbildner. Nach ausgiebigen Labortests dieser Materialien wurde, in mehreren Iterationsschritten, eine finale Rezeptur entwickelt. Diese ist bezüglich Speicherkapazität und Kosten optimiert, kristallisiert zuverlässig und kann ohne Funktionseinbußen über fünfzigmal wiederverwendet werden.

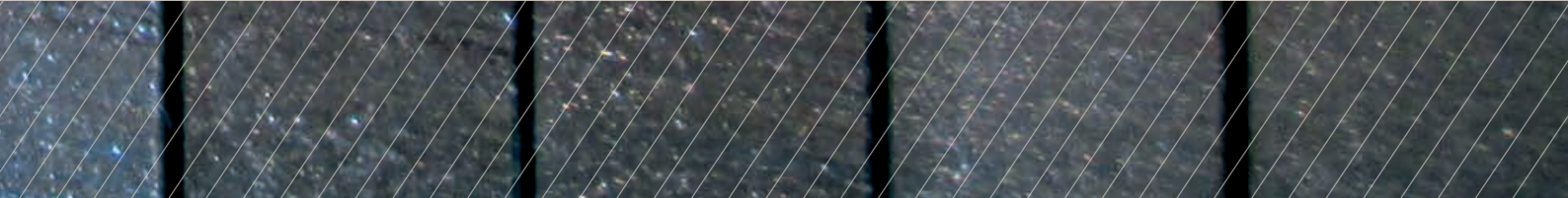
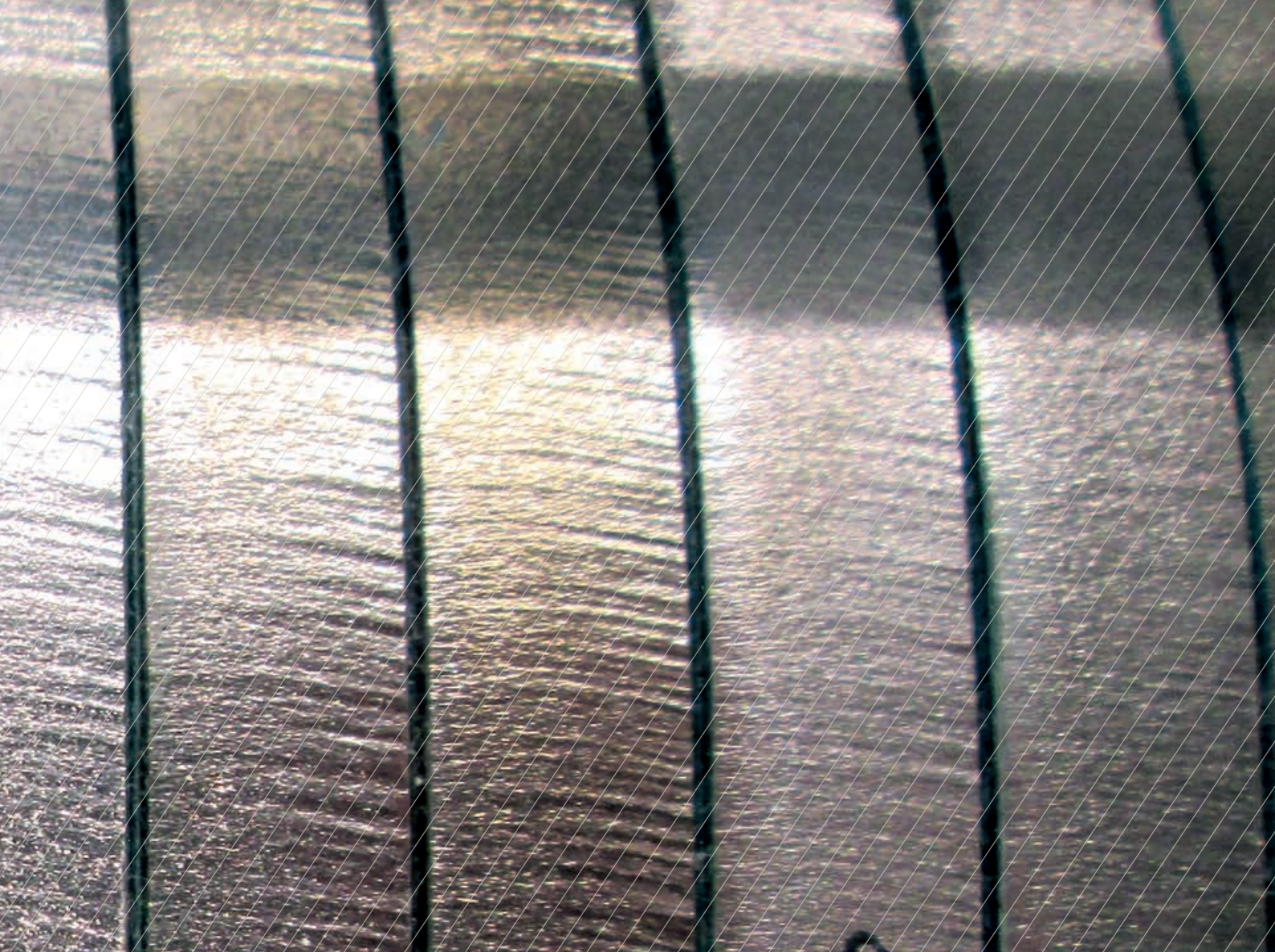
An kleinen Testsystemen auf Basis dieses PCM wurden schließlich praxisnahe Funktionstests durchgeführt. Speziell konstruierte Boxen wurden mit gefrorenen PCM-Kühlakkus bestückt, einer konstant warmen Umgebung ausgesetzt und der Temperaturverlauf in ihrem Inneren aufgezeichnet. Bei 30 °C Außentemperatur blieb die Innentemperatur 45 Stunden lang unter -60 °C (Abb. 2). Va-Q-tec testet nun auch den Einsatz in unterschiedlichen Transportboxen und großen Transportcontainern (Abb. 1).

identified. After extensive laboratory testing of these materials, several development iterations led to a final formulation, which is optimised in terms of capacity and cost, crystallises reliably, and can be reused over fifty times at full functionality.

Practical functional tests were then performed on small test systems based on this PCM. Custom-designed boxes were equipped with frozen PCM cooling packs and exposed to a constantly warm environment, while the internal temperature curve was recorded. At an ambient temperature of 30 °C, the interior remained below -60 °C for 45 hours (Fig. 2). Va-Q-tec is now also testing for application in a variety of transport boxes and large transport containers (Fig. 1).

VERÖFFENTLICHUNGEN
PUBLICATIONS

3.0



3.1 VORTRÄGE UND POSTER

PRESENTATIONS AND POSTERS

3.1.1 EINGELADENE PLENARVORTRÄGE PLENARY INVITED LECTURES

- C. J. Brabec, **Accelerating Halide (and Halide Ferroelectric) Perovskite Materials for Next Generation Solar Energy Concepts**, ISAF ISF 2021 Annual Conference, Online, 16.–17.05.2021
- A. Hauer, **Industrielle Abwärmenutzung durch thermische Energiespeicher**, 12. Symposium Energieeffizienz der Deutschen Handelskammer Österreich, Online, 15.06.21
- C. J. Brabec, **Discovering hidden relations in organic semiconductor composites – a concept to accelerate the development of organic PV**, 13th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics, Online, 26.05.21
- C. J. Brabec, **Accelerating Solar Energy with Big Data Strategies**, Kaust Solar Center Seminar, Thuwal, Saudi Arabia, 10.10.21
- A. Hauer, **Thesentisch – Sektorkopplung**, 31. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Online, 27.–30.04.2021
- C. J. Brabec, **Accelerating Perovskites: Towards Stable Composites and Devices**, 3rd Materials Chain International Conference, Online, 22.11.21
- C. J. Brabec, **On the transition from automated to autonomous material optimization**, Symposium DN01, MRS Fall Meeting, Online/Boston, USA, 06.12.21
- A. Hauer, **Decentralized Energy Supply by Renewable Energy through Energy Storage Solution**, Dezentrale Energieversorgung mit erneuerbaren Energien in Guatemala, El Salvador und Honduras, Online, 21.–25.06.2021
- C. J. Brabec, **Accelerating Solar Semiconductors with Autonomous Research Lines**, 5th Forum of Materials Genome Engineering, Online/ Zhengzhou, China, 15.–17.12.2021
- C. J. Brabec, **Engineering Long Lived Perovskite Solar Cells—The Role of Cation Induced Temperature Destabilization**, Symposium EN05, MRS Fall Meeting, Online/Boston, USA, 06.12.21
- A. Hauer, **Future Vision of Thermal Energy Storage**, DOE Thermal Energy Storage Systems for Buildings Workshop – Priorities and Pathways to Widespread Deployment of Thermal Energy Storage in Buildings, Online, 11.–12.05.2021
- C. J. Brabec, **Photovoltaik – von der Milli-Watt-Optimierung im Labor zu einer TeraWatt-Technologie auf der Freifläche: Was können wir für die Zukunft erwarten?**, Annual Symposium of the Technical Faculty, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany, 19.11.21
- H.-P. Ebert, **Cutting-Edge Technologies for Energy-Efficient Buildings**, Bayern – Fit for Partnership, Online, 10.06.21
- A. Hauer, **“Flexible Sector Coupling” – Concept**, Energy Storage Academy – Energy Storage Partnership of the World Bank, Online, 19.04.21
- C. J. Brabec, **Accelerating Solar Materials by autonomous research lines**, CityU Croucher Advanced Study Institute 2021, Online/Hong Kong, China, 07.–09.12.2021
- H.-P. Ebert, **Intelligente Sektorkopplung – die Rolle von Gebäuden im Energiesystem der Zukunft**, Energetische Quartiersentwicklung im Neubau – flexibel, wirtschaftlich, zukunftssicher, nachhaltig, Online, 24.03.21
- A. Hauer, **What is the Value of Energy Storage?**, EnerStock 2021 – 15th International Conference on Energy Storage, Online, 9.–11.06.2021
- C. J. Brabec, **How to Accelerate the Development of Printed Photovoltaic Technologies**, Forum on Clean Energy and Nuclear Safety—10 Years after Fukushima, Online/Hong Kong, China, 10.03.21
- H.-P. Ebert, **Wie schnell schaffen wir die Energiewende?**, Highlights der Physik, Würzburg, Germany, 01.10.21
- A. Hauer, **Der Wert der Energiespeicherung in einem zukünftigen Energiesystem**, Forschung Industrienah, Wels, Austria, 20.09.21
- H.-J. Egelhaaf, **High Throughput Production of Printed Photovoltaics**, 3rd International School on Hybrid, Organic and Perovskite Photovoltaics, Online/ Chernogolovka, Russia, 22.–25.11.2021
- A. Hauer, **Flexible Sector Coupling**, Highlights of Energy Research 2021: Energy storage – key element to energy transition, Online, 23.11.21

A. Hauer, **Industrial Waste Heat Utilization by Thermal Energy Storage Systems**, ICOEST 2021 – International Conference on Energy Efficiency and Energy Storage Technologies, Online, 9.–10.04.2021

A. Hauer, **What is the Value of Energy Storage?**, NEIS 2021 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Online, 13.–14.09.2021

A. Hauer, **Industrial Waste Heat Utilization by Thermal Energy Storage Systems**, Symposium: Heat Utilization in Industrial Sector, Tokyo Zero-Emission Innovation Bay, Online, 24.03.21

A. Hauer, **Intelligente Energienutzung aus TAB vor dem Hintergrund nationaler und internationaler Entwicklungen**, VDI/ITAD-Spezialtag Transformation der TAB zur Multioutputanlage, Würzburg, Germany, 14.09.21

A. Hauer, **Die Rolle thermischer Energiespeicher in unserem zukünftigen Energiesystem**, WärmeNeuDenken – KlimaThemenTage des Landkreises Landsberg, Landsberg a. Lech, Germany, 21.–22.10.2021

A. Hauer, **Techno-Economic Assessment of Thermal Energy Storage Systems**, Webinar on the Activities of the Energy Storage TCP/IEA for French Industry, Online, 20.05.21

A. Hauer, **What is the Value of Energy Storage?**, WRETC 2021 – 12th World Renewable Energy Technology Congress, Online, 21.–22.08.2021

L. Staudacher, **Solare Nahwärmenetze am Beispiel eines Modellprojekts**, Solare Wärmenetze in Deutschland und in Polen, digitale Informationsreise, Online, 23.–25.03.2021

W. van Helden, M. Moser, C. Muser, G. Wallner, F. Ochs, I. Leusbrock, **Thermal Energy Storage: Developments and Results for Large Scale Technologies and for Compact Technologies**, EnerStock 2021 – 15th International Conference on Energy Storage, Online, 9.–11.06.2021

3.1.2 FACHVORTRÄGE CONTRIBUTED TALKS

C. J. Brabec, **Accelerating material science with robot based and AI enabled autonomous research lines**, Molecular Foundry, Berkeley, USA, 09.03.2021

C. J. Brabec, **Accelerating the OPV technology roadmap**, nanoGe Fall Meeting 2021, Online, 18.–22.10.2021

C. J. Brabec, **AMANDA Line 1: A Prototype Line for Automated Materials Innovation**, Department Seminar at Ruhr University Bochum, ICAMS (Interdisciplinary Center for Advanced Materials Simulation), Online/Bochum, Germany, 28.01.21

C. J. Brabec, **Big Data Strategies & Solar Energy – A Concept to Accelerate**, FAIR-DI Workshop: FAIR Data Infrastructure for Materials Genomics, Online/Louvain-la-Neuve, Belgium, 28.09.–01.10.2021

C. J. Brabec, **Exploring Complex Microstructure Relations in Functional Materials by Basic Optical Methods**, AMOLF Symposium on Light Management in Photovoltaic Materials, Online, 22.06.21

C. J. Brabec, **Next generation solar energy: Accelerating Materials Innovation**, Seminar der Gesellschaft Deutscher Chemiker, Würzburg, Germany, 21.10.21

C. J. Brabec, **Translating lessons from OPV to perovskites PV: how to accelerate the development of a market ready technology**, tandemPV 2021, Online, 13.–16.04.2021

T. Du, **Towards fully printable metal halide perovskite solar cells and modules**, EnCN-Jahreskonferenz 2021, Online, 02.12.2021

H.-P. Ebert, F. Hemberger, J. Manara, G. Reichenauer, **Approaches to reliable measurement of thermal conductivities of aerogels**, Aerogel Industry – Academia Forum, Online, 13.–15.07.2021

H.-J. Egelhaaf, **Photovoltaik aus dem Drucker: Städte unter Strom**, EnCN Jahreskonferenz 2021, Online, 02.12.2021

Q. Fang, M. Shviro, S. Metz, S. Calnan, D. Walter, M. Möckl et al., **Wasser- und Dampfelektrolyse: Stand, Herausforderungen und Perspektiven**, FVEE-Jahrestagung 2021, Berlin, Germany, 10.–11.11.2021

J. Greß, A. Stephan, B. Büttner, S. Weismann, **Performance enhancement of building-integrated PV using phase change materials**, World Sustainable Energy Days 2021, Online/Wels, Austria, 21.–25.06.2021

E. N. Güler, **Fully Solution-Processed, Light-Weight, and Ultraflexible Organic Solar Cells**, EnCN Jahreskonferenz 2021, Online, 02.12.21

E. N. Güler, **Fully Solution-Processed, Light-Weight, and Ultraflexible Organic Solar Cells**, 14th International Symposium on Flexible Organic Electronics, Online/Thessaloniki, Greece, 05.–08.07.2021

H. Karrer, I. Kötting, P. Osgyan, G. Streib, T. Beikircher, **Emulated Borehole Heat Exchanger for Comparison of Different TRT Units**, World Geothermal Congress 2020+1, Online/Reykjavik, Iceland, 30.03.–31.10.2021

M. Reuß, H. Karrer, **IEA ECES ANNEX 27 – Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems**, World Geothermal Congress 2020+1, Online/Reykjavik, Iceland, 30.03.–31.10.2021

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Biomassewärmepumpe**, 21. Fachkongress für Holzenergie, Online/Berlin, Germany, 20.–23.09.2021

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Directly Biomass-fired Absorption Heat Pump – Concept and Test Results**, International Sorption Heat Pump Conference 2021, Online/Berlin, Germany, 22.–24.08.2021

A. König-Haagen, S. Höhlein, A. Lázaro, M. Delgado, G. Diarce, D. Groulx et al., **Investigation of latent thermal energy storage units by means of performance parameters**, EnerStock 2021 – 15th International Conference on Energy Storage, Online, 09.–11.06.2021

- J. M. Kuckelkorn, T. Lutz, L. Pendzich, M. Pinnekamp, K. Hagel, A. Kirschbaum, **Untersuchungen der Einflüsse auf die Qualität von Ringraumverfüllungen von Erdwärmesonden – Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben QEWS II**, GeoTHERM digital 2021, Online/Offenburg, Germany, 24.–25.06.2021
- D. Preßl, E. Lävemann, **Compact and cost-efficient cold storage based on an absorption process with H₂O/LiBr**, 11th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering, Online, 28.–29.07.2021
- D. Preßl, E. Lävemann, **Compact cold storage by means of a closed absorption process with H₂O/LiBr and crystallization of the strong absorbent**, International Sorption Heat Pump Conference 2021, Online/Berlin, Germany, 22.–24.08.2021
- C. Rathgeber, A. Hauer, F. Fischer, **The 4-temperatures-approach – a method to evaluate thermochemical heat storage materials under application conditions**, EnerStock 2021 – 15th International Conference on Energy Storage, Online, 09.–11.06.2021
- G. Reichenauer, C. Scherdel, P. Kotnik, A. Keilbach, C. Schlumberger, M. Thommes, **A New and Fast Approach for Determining the Specific Surface Area of (Nano-) Materials**, Salzburg Conference for Smart Materials, Kuchl, Austria, 16.–17.09.2021
- G. Reichenauer, **Methods and pitfalls in mechanical and thermal characterization of aerogels**, COST action event – Advanced technologies for the processing and characterization of nanostructured materials, Online/ Kraków, Poland, 05.–07.07.2021
- M. Riepl, **Heat Transfer and Flow Characteristics in Thermosiphon Regenerators of Multi-Stage LiBr/Water-Absorption Heat Pumps**, International Sorption Heat Pump Conference 2021, Online/Berlin, Germany, 22.–24.08.2021
- H. Schmit, D. Rudaleviciene, C. Rathgeber, S. Hiebler, **How to measure the melting enthalpy of semicongruently melting salt hydrate PCM**, 8th Global Conference on Polymer and Composite Materials, Online, 16.–19.08.2021
- H. Schmit, C. Rathgeber, P. Hoock, S. Hiebler, **Reviewing the solid-liquid phase transition enthalpies of popular salt hydrate PCM**, 8th Global Conference on Polymer and Composite Materials, Online, 16.–19.08.2021
- K. Senguttuvan, **Investigations into the energy recovery potential of glass facade and window-integrated PV**, EnCN Jahreskonferenz 2021, Online, 02.12.21
- S. Miehl, B. Schweiger, W. Wedel, A. Hanel, J. Schweiger, R. Schwermer et al., **100 % erneuerbare Energien für Bayern – Potenziale und Strukturen einer Vollversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität**, Studienvorstellung: 100 % erneuerbare Energien für Bayern, Online, 11.05.21
- H. Spliethoff, B. Schweiger, A. Vandersickel, **CleanTechCampus Garching – Transformationspfade der Energieversorgung**, Wege zur nachhaltigen Energieversorgung des TUM Campus in Garching, 25.05.21
- L. Staudacher, P. Osgyan, M. Fuchs, **Eisfreihaltung von Verkehrsflächen mit CO₂-Erdwärmesonden**, Der Geothermiekongress 2021, Online, 30.11.–02.12.2021
- M. Steinberger, **Improved Air Processability of Organic Photovoltaics by Using a Stabilizing Antioxidant to Prevent Thermal Oxidation**, Materials Research Society Fall Meeting and Exhibit 2021, Online/Boston, USA, 29.11.–02.12.2021
- M. Steinberger, **Inkjet printing of OLEDs on 3D surfaces**, Large-area, Organic & Printed Electronics Convention, Online/ München, Germany, 23.–25.03.2021
- M. Steinberger, **Inkjet printing of Organic Electronics on 3D Objects**, Materials Research Society Fall Meeting and Exhibit 2021, Online/Boston, USA, 29.11.–02.12.2021
- S. Tafelmeier, P. Hoock, S. Hiebler, **Nucleation behaviour in organic PCM investigated by microscopy and molecular dynamic simulation**, EnerStock 2021 – 15th International Conference on Energy Storage, Online, 09.–11.06.2021

A. Van de Ven, R. Koenigsdorff,
F. Neth, F. Burkhardt, R. Zorn, L.
Schindler et al., **Das Verbundvorhaben
QEWSplus – Qualitätssteigerung
oberflächennaher Geothermiesysteme**,
Der Geothermiekongress 2021, Online,
30.11.–02.12.2021

M. Wagner, **High Throughput Material
Screening of Organic Solar Cells
on a Roll-to-Roll Machine**, EnCN
Jahreskonferenz 2021, Online, 02.12.21

3.1.3 POSTER POSTERS

D. Preßl, E. Lävemann, **Absorption cold
storage based on partially crystallized
aqueous LiBr-solution**, EnerStock 2021 –
15th International Conference on Energy
Storage, Online, 09.–11.06.2021

C. Rathgeber, H. Schmit, P. Hoock, S.
Hiebler, **Possibilities and limitations of
PCM development using phase diagrams**,
EnerStock 2021 – 15th International
Conference on Energy Storage, Online,
09.–11.06.2021

G. Reichenauer, M. Wiener, H.-P. Ebert,
T. Kirschbaum, M. Kucher, J. Hennicke,
**Novel high performance thermal
insulation panels for temperatures up
to 2200 °C based on carbon xerogel
composites**, Aerogel Industry – Academia
Forum, Online, 13.–15.07.2021

G. Reichenauer, C. Scherdel, F. Klinker,
S. Braxmeier, **Adsorption Induced
Optical Switching from Transparent to
Translucent**, Salzburg Conference for
Smart Materials, Kuchl, Austria, 16.–
17.09.2021

M. Reim, A. Bucher, S. Weismann,
E. Lampertsdörfer, F. Kohlrausch,
**Energieeffiziente Raumklimatisierung
mit Pflanzen: Ressourcenschonende
Konditionierung der Innenraumluft
durch dezentrale Vertikalbegrünungen
– Green4indoor**, Bundeskongress
Gebäudegrün, Berlin, Germany, 23.–
24.11.2021

S. Tafelmeier, P. Hoock, S. Pöllinger, S.
Hiebler, **Measuring crystallisation rates
of phase change materials as a function
of supercooling**, EnerStock 2021 – 15th
International Conference on Energy
Storage, Online, 09.–11.06.2021

3.1.4

KOLLOQUIEN, SEMINARE, FOREN... COLLOQUIA, SEMINARS, FORUMS...

A. Distler, **Scaling Efficiencies from mm² to m²**, HI-ERN Emerging Topics Workshop, Erlangen, Germany, 11.11.21

T. Du, **Towards efficient, fully printable perovskite solar cells and modules**, HI-ERN Emerging Topics Workshop, Erlangen, Germany, 11.11.21

H.-P. Ebert, **Das ZAE – Forschung für die Praxis**, Innovationstage Mainfranken 2021, Online, 13.–14.10.2021

H.-P. Ebert, **Cutting-Edge Technologies for Energy-Efficient Buildings**, Exportförderprojekt Energetische Sanierung und Energieeffizienz, Zielland Polen, Online, 09.-10.06.2021

H.-J. Egelhaaf, **Recent Advances in High-Throughput Process Development**, iMEET/FAU High Throughput PV Summer Seminar, Online, 01.07.21

R. Kastner, S. Weismann, **Umweltstation Würzburg – Hybride Energieversorgung mit PV-Anlage und innovativer Speicherung**, Seminar der Umweltstation, Würzburg, Germany, 21.09.21

M. Reim, S. Weismann, **Positive Wirkungen von Dach- und Fassadenbegrünungen**, BuGG-Online-Seminar, Berlin, Germany, 20.10.21

M. Riepl, **Solar Cooling – A Brief Introduction**, Workshop der Energiepartnerschaft CHN/D: Innovative solutions for coupling renewable energy and cooling in commercial applications, Online, 22.10.21

M. Wagner, **High-Throughput Material Screening of Organic Solar Cells on a Roll-to-Roll Machine**, SCUT-FAU Joint Workshop 2021, Online, 16.12.21

3.2 VERÖFFENTLICHUNGEN PUBLICATIONS

3.2.1 REFERIERTE VERÖFFENTLICHUNGEN PEER-REVIEWED PUBLICATIONS

- R. Abdusalamov, C. Scherdel, M. Itskov, B. Milow, G. Reichenauer, A. Rege, **Modeling and simulation of the aggregation as well as structural and mechanical properties of silica aerogels**, *J. Phys. Chem. B*, 125, 2021, 1944–1950
- M. Arduini, J. Manara, T. Stark, H.-P. Ebert, J. Hartmann, **Development and Evaluation of an Improved Apparatus for Measuring the Emissivity at High Temperatures**, *Sensors*, 21 (18), 2021, 6252
- Y. Bonnassieux, C. J. Brabec, Y. Cao, T. Breen Carmichael, M. L. Chabynec, K.-T. Cheng et al., **The 2021 Flexible and Printed Electronics Roadmap**, *Flex. Print. Electron.*, 6 (2), 2021, 023001
- I. C. Channa, A. Distler, B. Scharfe, S. Feroze, K. Forberich et al., **Solution processed oxygen and moisture barrier based on glass flakes for encapsulation of Organic (Opto-) Electronic Devices**, *Flex. Print. Electron.*, 6 (2), 2021, 025006
- F. Dawo, S. Eyerer, R. Pili, C. Wieland, H. Spliethoff, **Experimental investigation, model validation and application of twin-screw expanders with different built-in volume ratios**, *Appl. Energy*, 282 (A), 2021, 116139
- A. Distler, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, **Organic Photovoltaic Modules with New World Record Efficiencies**, *Progr. Photovoltaics*, 29 (1), 2021, 24–31
- B. Doll, J. Hepp, M. Hoffmann, R. Schüler, C. Buerhop-Lutz, I. M. Peters et al., **Photoluminescence for Defect Detection on Full-Sized Photovoltaic Modules**, *IEEE J. Photovoltaics*, 11 (6), 2021, 1419–1429
- H.-P. Ebert, S. Braxmeier, G. Reichenauer, F. Hemberger, F. Lied, D. Weinrich et al., **Intercomparison of Thermal Conductivity Measurements on a Nanoporous Organic Aerogel**, *Int. J. Thermophys.*, 42, 2021, 21
- N. Gasparini, F. V. A. Camargo, S. Frühwald, T. Nagahara, A. Classen, S. Roland et al., **Adjusting the energy of interfacial states in organic photovoltaics for maximum efficiency**, *Nat. Commun.*, 12, 2021, 1772
- T. Greese, P. A. Loichet Torres, D. Menga, P. Dotzauer, M. Wiener, G. Reichenauer, **Impact of Plasma and Thermal Treatment on the Long-Term Performance of Vanadium Redox Flow Electrodes – Significance of Surface Structure vs Oxygen Functionalities**, *J. Electrochem. Soc.*, 168, 2021, 070554
- T. Greese, G. Reichenauer, **Anode kinetics degradation in vanadium redox flow batteries – Reversible inhibition of the V²⁺/V³⁺-reaction due to V (II)-adsorption**, *J. Power Sources*, 500, 2021, 229958
- S. N. Gunasekara, C. Barreneche, A. I. Fernández, A. Calderón, R. Ravotti, A. Ristić et al., **Thermal Energy Storage Materials (TESMs)—What Does It Take to Make Them Fly?**, *Crystals*, 11, 2021, 1276
- J. Hameury, G. Failleau, M. Arduini, J. Manara, E. Kononogova, A. Adibekyan et al., **Assessment of uncertainties for measurements of total near-normal emissivity of low-emissivity foils with an industrial emissometer**, *J. Sens. Sens. Sys.*, 10 (1), 2021, 135–152
- A. Hauer, F. Fischer, C. Rathgeber, **4-Temperatures Approach: Testing Thermochemical Heat Storage Materials Under Application Conditions**, *Chem. Ing. Tech.*, 93 (4), 2021, 618–623
- L. Katzenmeier, S. Helmer, S. Braxmeier, E. Knobbe, A. S. Bandarenka, **Properties of the Space Charge Layers Formed in Li-Ion Conducting Glass Ceramics**, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 2021, 5853–5860
- F. Kerscher, H. Spliethoff, **Alkali removal with mineral sorbents – Part I: Sorption capacity and reaction kinetics**, *Powder Technol.*, 390, 2021, 190–196
- D. Kiermasch, M. Fischer, L. Gil-Escrig, A. Baumann, H. J. Bolink, V. Dyakonov et al., **Reduced Recombination Losses in Evaporated Perovskite Solar Cells by Postfabrication Treatment**, *Sol. RRL*, 5 (11), 2021, 2100400
- K. Knopp, A. Shandy, A. Winterstein, M. Arduini, F. Hemberger, S. Vidi et al., **Thermophysical characterization of thermal barrier layers**, *Tech. Mess.*, 88 (12), 2021, 795–805

J. Knöppel, M. Möckl, D. Escalera-Lopez, K. Stojanovski, M. Bierling, T. Böhm et al., **On the limitations in assessing stability of oxygen evolution catalysts using aqueous model**, *Nat. Commun.*, 12 (1), 2021, 2231

L. Ludescher, R. Morak, S. Braxmeier, C. Balzer, F. Putz, S. Busch et al., **Adsorption-induced deformation of hierarchical organised carbon materials with ordered, non-convex mesoporosity**, *Mol. Phys.*, 119, 2021, 15–16

S. Miehl, S. Fendt, H. Spliethoff, **Optimal integration of Power-to-X plants in a future European energy system and the resulting dynamic requirements**, *Energy Convers. Manage.*, 251, 2021, 115020

C. Rathgeber, H. Schmit, P. Hock, S. Hiebler, **Development of Phase Change Materials Based on Mixtures of Salt Hydrates Through Theoretical Prediction and Experimental Investigation**, *Atlantis Highlights in Engineering*, 6, 2021, 14–18

O. J. J. Ronsin, D. J. Jang, H.-J. Egelhaaf, C. J. Brabec, J. Harting, **Phase-field simulation of liquid-vapor equilibrium and evaporation of fluid mixtures**, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13 (47), 2021, 55988–56003

M. Rottmann, T. Beikircher, H.-P. Ebert, F. Hemberger, J. Manara, **Thermal conductivity and extinction coefficient of opacified expanded perlite for vacuum super insulation up to 1073 K**, *Int. J. Therm. Sci.*, 163, 2021, 106813

C. Scherdel, E. Miller, G. Reichenauer, J. Schmitt, **Advances in the Development of Sol-Gel Materials combining Small Angle X-ray Scattering (SAXS) and Machine Learning (ML)**, *Processes*, 9, 2021, 672

C. Schlumberger, C. Scherdel, M. Kriesten, P. Leicht, A. Keilbach, H. Ehmann et al., **Reliable Surface Area Determination of Powders and Meso/Macroporous Materials: Small-Angle X-ray Scattering and Gas Physisorption**, *Microporous Mesoporous Mater.*, 329, 2022, 111554

H. Schritt, S. Vidi, D. Pleissner, **Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites**, *J. Cleaner Prod.*, 313, 2021, 127910

M. Steinberger, A. Distler, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, **Improved Air Processability of Organic Photovoltaics by Using a Stabilizing Antioxidant to Prevent Thermal Oxidation**, *J. Phys. Chem. C*, 126 (1), 2021, 22–29

K. C. Tam, P. Kubis, P. Maisch, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, **Fully printed organic solar modules with bottom and top silver nanowire electrodes**, *Progr. Photovoltaics*, 30 (5), 2021, 528–542

K. C. Tam, H. Saito, P. Maisch, K. Forberich, Y. Hisaeda, C. J. Brabec et al., **Highly reflective and low resistive top electrode for organic solar cells and modules by low temperature silver nanoparticle ink**, *Sol. RRL*, 5, 2021, 2100887

F. Yang, L. R. Dong, D. J. Jang, B. Saparov, K. C. Tam, K. C. Zhang et al., **Low Temperature Processed Fully Printed Planar Structure Perovskite Solar Cells with Carbon Electrode and Efficiency over 18 %**, *Adv. En. Mater.*, 11 (28), 2021, 2101219

F. Yang, D. J. Jang, L. R. Dong, S. Qiu, A. Distler, N. Li et al., **Upscaling Solution-Processed Perovskite Photovoltaics**, *Adv. En. Mater.*, 11 (42), 2021, 2101973

3.2.2

BÜCHER, MANUSKRIPTE BOOKS, MANUSCRIPTS

D. J. Jang, F. Yang, L. R. Dong, C. J. Brabec, H.-J. Egelhaaf, **Upscaling of Perovskite Photovoltaics**, in: *Perovskite Solar Cells: Materials, Processes, and Devices*, eds: S. Ahmad, S. Kazim, M. Grätzel, Wiley-VCH GmbH, Weinheim, 2021, 453–496, ISBN 978-3-5278-2579-0

3.2.3

REFERIERTE TAGUNGSBANDBEITRÄGE CONFERENCE PAPERS

J. Greß, A. Stephan, B. Büttner, S. Weismann, **Performance enhancement of building-integrated PV using phase change materials**, *World Sustainable Energy Days 2021*, Wels, Austria, 21.–25.06.2021

H. Karrer, I. Kötting, P. Osgyan, G. Streib, T. Beikircher, **Emulated Borehole Heat Exchanger for Comparison of Different TRT Units**, *World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, 4–10/2021, Paper 29055, p. 1–8

M. Reuß, H. Karrer, **IEA ECES ANNEX 27 – Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems**, *World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, 4–10/2021, Paper 29043, p. 1–12

C. Stegner, **An open circuit voltage and overpotential model for an all vanadium redox flow battery derived from several years of operating data**, 15th *International Renewable Energy Storage Conference 2021*, Düsseldorf, Germany, 16.–18.03.2021, p. 118–125

A. Van de Ven, R. Koenigsdorff, F. Neth, F. Burkhardt, R. Zorn, L. Schindler et al., **Das Verbundvorhaben QEWSplus – Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme**, *Der Geothermiekongress 2021*, Online, 30.11.–02.12.2021

3.2.4 TECHNISCHE BERICHTE TECHNICAL REPORTS

H.-P. Ebert, S. Braxmeier, G. Reichenauer, C. Scherdel, M. Wiener, **Optimierung, Upscaling und Evaluierung von nanoporösen Kohlenstoffkompositen als Wärmedämmung in Prozessöfen für Anwendungstemperaturen über 1500 °C**, FKZ 03ET1503A-C, BMWi, AeroFurnace, 02/2021

W. Aich, R. Gurtner, M. Helm, J. Kange, F. Menhart, M. Riepl, M. Weinzierl, **Biomassebetriebenes Wärmepumpen- und Kälteanlagen-System**, FKZ 03KB12A, BMWi, BioWap, 02/2021

C. Stegner, **C/sells – das Energiesystem der Zukunft im Solarbogen Süddeutschlands: Verteilte Speicher zur Erbringung systemdienlicher Leistungen in einer autonomen Zelle**, FKZ 03SIN130, BMWi, C-Sells/SINTEG, 01/2021

A. Stephan, H. Scheuerpflug, C. Römer, H. Weinländer, S. Weismann, T. Stark, J. Wachtel, S. Braxmeier, H.-P. Ebert, R. Caps, M. Arntzen, C. Bidi, H. Beyrichen, Ö. Dündükcü, F. Almeida, U. Passon, W. Gröner, R. Dorn, **Schaltbares Vakuum-Isolations-Paneel für energieeffiziente Fassaden (VIDI)**, FKZ 03EGB0005A-C, BMWi, VIDI, 07/2021

G. Streib, **Energieberatung für fünf kommunale Nichtwohngebäude in der Gemeinde Scheyern**, FKZ 11379–11383, BAFA, 04/2021

3.2.5 SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN MISCELLANEOUS PUBLICATIONS

G. Gärtner, C. Geier, H.-P. Ebert, H. Singh, **Silica as Part of the Cold Chain**, Pharmaceutical Manufacturing and Packing Sourcer, 10/2021, p. 27–30

H.-J. Egelhaaf, S. Feroze, A. Distler, M. Wagner, S. Bordin, M. Braun et al., **Fassadenelemente mit organischer Photovoltaik**, BWK Energie, Düsseldorf, 07–08/2021, p. 16–21

M. K. Hamjah, M. Steinberger, K. C. Tam, H.-J. Egelhaaf, C. J. Brabec, J. Franke, **Aerosol jet printed AgNW electrode and PEDOT: PSS layers for organic light-emitting diode devices fabrication**, 2021 14th International Congress Molded Interconnect Devices (MID), Amberg, 25.02.2021, p. 1–4

A. Hermes, B. Schweiger, J. M. Kuckelkorn, W. Wedel, C. Matschi, M. Landerer et al., **Leitfaden für die Energiesystemoptimierung zur Transformation komplexer Bestandsquartiere**, München, 14.04.2021

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Holzpelletbetriebene Absorptionskälteanlage**, Deutsche Kälte- und Klimatagung 2021, Dresden, 17.–19.11.2021

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Double Effect - Projekt „BioWap“ kombinierte Erneuerbare-Energien- und Effizienztechnik**, Forstmaschinen-Profi, Scheeßel, 12/2021, p. 59–61

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Klimakälte aus Holz**, GEG Baupraxis, Merching, 07–08/2021, p. 48–53

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Pelletbetriebene Absorptionswärmepumpe**, IKZ-Fachplaner, Arnsberg, 12/2021

K. Knopp, A. Shandy, J. Manara, S. Vidi, J. Hartmann, **Metrologische Apparaturen zur Messung thermophysikalischer Materialeigenschaften bei sehr hohen Temperaturen im EU-Projekt Hi-TRACE**, FHWS Science Journal, Schweinfurt, 02/2021, p. 83–91

S. Miehl, B. Schweiger, W. Wedel, A. Hanel, J. Schweiger, R. Schwermer et al., **100 % erneuerbare Energien für Bayern: Potenziale und Strukturen einer Vollversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität**, Studie im Auftrag des BUND Naturschutz Bayern, Online, 11.05.2021

3.3 STUDIENABSCHLUSSARBEITEN UND DISSERTATIONEN DEGREE AND DOCTORAL THESES

3.3.1 STUDIENABSCHLUSSARBEITEN DEGREE THESES

B. Baydar, **Hochdurchsatzoptimierung gedruckter Solarzellen mittels Rolle-zu-Rolle-Verfahren**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, 07/2021, Bachelor

A. Bilican, **MnO₂-functionalized Resorcinol-Formaldehyde derived Carbon Xerogels and Carbon-Nano-Onion Nanohybrids for Supercapacitor Applications**, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Fakultät für Chemie und Pharmazie, 09/2021, Master

P. Danzer, **Untersuchung von durch Kälte angetriebene Wärmetransformation mithilfe von Absorptionsprozessen**, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, 08/2021, Master

M. Fuchs, **Entwicklung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung und Bewertung geothermisch beheizter Oberflächenelemente**, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 04/2021, Master

E. N. Güler, **Development of solution processable bottom electrodes for OPV modules**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, 03/2021, Master

F. Hellert, **Präparation von delignifiziertem Holz mit optimierten infrarotoptischen Eigenschaften**, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Fakultät für Chemie und Pharmazie, 01/2022, Bachelor

L. Kefer, **From Organic Photovoltaic Cells to Modules – Evaluation and Simulation of the Different Loss Mechanisms**, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Technische Fakultät, 02/2021, Bachelor

V. Kiewewetter, **Thermische und elektrische Charakterisierung von PVT-Kollektoren als Bestandteil eines Gesamtsystems zur Energieversorgung von Gebäuden in einem Hardware-in-the-Loop-Ansatz**, Universität Kassel, Fachbereich 15 - Maschinenbau, 06/2021, Master

M. Klüpfel, **Modifizierung und Validierung eines Hardware-in-the-Loop-Messaufbaus für die Gebäudesimulation einer latent gekühlten PV-Warmfassade**, Hochschule Ansbach/Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Technik, 12/2021, Master

M. Mayer, **Evaluierung der Heizbeschichtung für Autoscheiben mit ECOS-Nanowire-Technologie im Labormaßstab**, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Physikalisches Institut, 08/2021, Bachelor

L. Merz, **Manufacturing dielectric mirrors from the liquid phase – transfer from spin-coating to roll-to-roll slot die coating**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, 02/2021, Master

J. Rausch, **Erstellung und Validierung eines Hardware-in-the-Loop-Systems sowie eines TRNSYS-Modells zur Charakterisierung von multifunktionalen Wandaufbauten mit integriertem PCM**, Hochschule Ansbach/Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Technik, 02/2021, Master

J. Rohrmüller, **Planung und Auslegung einer mobilen Versuchsanlage für einen sensiblen Hochtemperatur-Wärmespeicher**, Hochschule Augsburg, Maschinenbau, 03/2021, Master

K. Senguttuvan, **Investigations into the energy recovery potential of glass facade and window-integrated PV**, Technische Hochschule Ingolstadt, Technische Fakultät, 11/2021, Master

PATENTE 3.4

PATENTS

3.3.2

DISSERTATIONEN DOCTORAL THESES

M. Riepl, **Naturumlaufaustreiber für mehrstufige Absorptionswärmepumpen – Untersuchung von Wärmeübertragung und Strömungsverhalten im Siederohr**, Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, 11/2021

M. Rottmann, **Untersuchung des Wärmetransports in expandiertem Perlit zur Entwicklung einer Vakuumpulverisolation für Hochtemperatur-Anwendungen bis 800 °C**, Technische Universität München, Fakultät für Physik, 01/2021

A. Teuffel, **Flexible Sektorenkopplung mit Energiespeichern**, Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, 08/2021

M. Zipf, **Berührungslose Temperaturmessung an Gasen und keramisch beschichteten Oberflächen bei hohen Temperaturen**, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Fakultät für Physik und Astronomie, 03/2021

R. Gurtner, M. Helm, M. Riepl, C. Wuschig, **Wärmetauschvorrichtung mit Sorptionseinrichtung**, EP3901535A4, offengelegt, 27.10.21

3.5 MITARBEIT IN GREMIEN

MEMBERSHIP IN COMMITTEES

PROF. DR. C. J. BRABEC

Principal Investigator, **Solar Technologies Go Hybrid**, Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, München

Netzwerkkoordinator, **Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien**, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin

Member of the Board of Directors, **Energie Campus Nürnberg e. V.**, Nürnberg

Organizer, **NGSE Conference 2021: 6th International Conference on Next Generation Solar Energy**, Online, 06.–08.12.2021

Co-Chair, **Advanced Energy Materials**, Wiley VCH, Weinheim

Member of the Editorial Board, **Progress in Photovoltaics**, Wiley VCH, Weinheim

M. BRÜTTING

Vertreter des ZAE Bayern, **RAL Gütegemeinschaft PCM e. V.**, Balingen

Vertreter des ZAE Bayern, **NA 062-08-14 AA „Thermische Analyse“**, Deutsches Institut für Normung, Berlin

Expert, **Task 40 "Compact Thermal Energy Storage: Materials within Components within Systems"**, International Energy Agency Energy Storage Technology Collaboration Programme

Expert, **Task 67 "Compact Thermal Energy Storage Materials"**, International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme

DR. H.-P. EBERT

Jurymitglied, **Bürgerenergiepreis Unterfranken**, Bayernwerk AG, Regensburg

Mitglied, **Direktorium des Forschungsverbands Erneuerbare Energien**, Berlin

Mitglied im Programmkomitee, **FVEE-Jahrestagung 2021**, Berlin, 10.–11.11.2021

Vorsitz, **Lenkungsausschuss Arbeitskreis Thermophysik**, Gesellschaft für thermische Analyse e. V., Darmstadt

Mitglied, **Energie- und Umweltausschuss**, IHK Würzburg-Schweinfurt, Würzburg

Mitglied, **Industrie-, Technologie- und Forschungsausschuss**, IHK Würzburg-Schweinfurt, Würzburg

Mitglied, **Prüfungsausschuss Physiklaboranten**, IHK Würzburg-Schweinfurt, Würzburg

Mitglied im Scientific Committee, **World Sustainable Energy Days**, Wels, Austria, 21.–25.06.2021

Vorschlagsberechtigte Stelle, **Bayerischer Energiepreis**

Mitglied, **Beirat des Technologie- und Gründerzentrums Würzburg**

Mitglied im International Organizing Committee, **European Conference on Thermophysical Properties**

O. GLASS

Secretary, **International Energy Agency Energy Storage Technology Collaboration Programme**

R. GURTNER

Expert, **Task 65 "Solar Cooling for The Sunbelt Regions"**, International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme

PROF. DR. JÜRGEN HARTMANN

Beirat, **Normenausschuss Feinmechanik und Optik**, Deutsches Institut für Normung, Berlin

Mitglied, **Arbeitskreis Thermophysik**, Gesellschaft für thermische Analyse e. V., Darmstadt

DR. A. HAUER

Mitglied des Präsidiums, **Bundesverband Energiespeicher e. V.**, Berlin

Mitglied, **Energiewende-Plattform Forschung und Innovation**, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin

Member of the Editorial Board, **Journal of Energy Storage**, Elsevier, Frankfurt

Board of Directors, **International Solar Energy Society**, Freiburg

Member of the Scientific Committee,
**International Sustainable Energy
Conference 2021**, Graz, Austria, 13.–
15.10.2021

Task-Manager, **Task 35 "Flexible Sector
Coupling by Implementation of Energy
Storage"**, International Energy Agency
Energy Storage Technology Collaboration
Programme

Task-Manager, **Task 40 "Compact
Thermal Energy Storage: Materials
within Components within Systems"**,
International Energy Agency Energy
Storage Technology Collaboration
Programme

Editor in Chief, **Advances in Energy
Storage**, John Wiley & Sons Limited,
Chichester, United Kingdom

Theme-Chair "Thermal Energy Storage",
EuroSun Conference, Kassel

Member of the Scientific Committee,
EnerStock Conference, Online, 09.–
11.06.2021

Conference Chair, **Energy Storage
Systems 2021**, Online, 16.–17.03.2021

Tagungsbeirat, **International Renewable
Energy Storage Conference 2021**, Online,
16.–18.03.2021

Member, **Energy Storage Partnership**,
World Bank Group, Washington, D.C.,
USA

Member of the Executive Committee,
**International Energy Agency Energy
Storage Technology Collaboration
Programme**

DR. U. HEINEMANN

Member of the Advisory Board,
**International Vacuum Insulation
Symposium**

Member of the Scientific Committee,
**International Vacuum Insulation
Symposium**

S. HIEBLER

Mitglied, Dechema Arbeitsausschuss
Thermische Energiespeicher ProcessNet,
Frankfurt

H. KARRER

Secretary, **International Energy Agency
Energy Storage Technology Collaboration
Programme**

DR. J. M. KUCKELKORN

Mitglied, Forschungsnetzwerk
Energie – Energiewendebauen,
Bundesministerium für Wirtschaft und
Klimaschutz, Berlin

Mitglied, Richtlinienausschuss VDI
**4640 „Thermische Nutzung des
Untergrundes"**, Blatt 6, Düsseldorf

Mitglied, Kommission
Klimaschutzstrategie Ismaning,
Gemeinde Ismaning

J. KUNKEL

Secretary, **International Energy Agency
Energy Storage Technology Collaboration
Programme**

DR. J. MANARA

Mitglied, **European Virtual Institute for
Gas Turbine Instrumentation**, Berlin

Mitglied, **Fachausschuss „Werkstoffe der
Energietechnik"**, Deutsche Gesellschaft
für Materialkunde e. V., Sankt Augustin

Mitglied, **Fachausschuss VDI/
VDE-GMA FA 8.14 „Angewandte
Strahlungsthermometrie"**, Verein
Deutscher Ingenieure e. V./Verband
der Elektrotechnik Elektronik
Informationstechnik e. V., Düsseldorf/
Frankfurt

Mitglied, **Fachausschuss VDI/VDE-
GMA FA 8.16 „Temperaturmessung
mit Wärmebildkameras"**, Verein
Deutscher Ingenieure e. V./Verband
der Elektrotechnik Elektronik
Informationstechnik e. V., Düsseldorf/
Frankfurt

A. MAUSSNER

Expert, **Task 65 "Solar Cooling for The
Sunbelt Regions"**, International Energy
Agency Solar Heating and Cooling
Programme

C. RATHGEBER

Teilnehmer, **Arbeitsgemeinschaft 2:
Speichertechnologien**, Bundesverband
Energiespeicher e. V., Berlin

Teilnehmer, **Fachgruppe Thermische
Energiespeicher**, Bundesverband
Energiespeicher e. V./Deutsches
Industrienetzwerk Concentrated Solar
Power e. V., Berlin

Mitglied, Richtlinienausschuss
VDI 4657 Blatt 2 „Planung und
Integration von Energiespeichern in
Gebäudeenergiesysteme Thermische
Energiespeicher (TES)“, Düsseldorf

Mitglied, VDI-Fachausschuss
Energiespeicher, Düsseldorf

Expert, Task 35 "Flexible Sector Coupling
by Implementation of Energy Storage",
International Energy Agency Energy
Storage Technology Collaboration
Programme

Expert, Task 40 "Compact Thermal
Energy Storage: Materials within
Components within Systems",
International Energy Agency Energy
Storage Technology Collaboration
Programme

Guest Editor, Special Issue "Crystals for
Thermal Energy Storage", MDPI Crystals,
Multidisciplinary Digital Publishing
Institute, Basel, Switzerland

Secretary, International Energy Agency
Energy Storage Technology Collaboration
Programme

DR. G. REICHENAUER

Mitglied, Arbeitskreis Kohlenstoff,
Deutsche Keramische Gesellschaft e. V.,
Köln

Mitglied, Ausschuss „Partikel- und
Oberflächenmesstechnik“, Deutsches
Institut für Normung, Berlin

DR.-ING. M. RIEPL

Mitglied, Arbeitskreis
Gaswärmepumpen, Arbeitsgemeinschaft
für sparsamen und umweltfreundlichen
Energieverbrauch e. V., Berlin

Vorstand, Schatzmeister, Green Chiller
Verband für Sorptionskälte e. V., Berlin

Expert, Task 65 "Solar Cooling for The
Sunbelt Regions", International Energy
Agency Solar Heating and Cooling
Programme

PROF. DR.-ING. H. SPLIETHOFF

Mitglied, Verein zur Förderung der
Energie- und Umwelttechnik, Duisburg

Vorstand und vorsitzender
Beirat, Deutsche Vereinigung für
Verbrennungsforschung e. V., Essen

Member, The Combustion Institute,
deutsche Sektion, Göttingen

Mitglied, Fachausschuss
Energieverfahrenstechnik, VDI-
Gesellschaft Verfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Düsseldorf

Member of the Scientific Board,
Wissenschaftlicher Beirat, Vereinigung
der Großkraftwerksbetreiber, Essen

L. STAUDACHER

Mitglied, Richtlinienausschuss VDI
4640 „Thermische Nutzung des
Untergrundes“, Blatt 4, Düsseldorf

S. TAFELMEIER

Secretary, International Energy Agency
Energy Storage Technology Collaboration
Programme

DR. H. WEINLÄDER

Mitglied, Fachverband Transparente
Wärmedämmung, Gundelfingen

S. WEISMANN, Vertreter des ZAE
Bayern, IBPSA Germany and Austria

AKADEMISCHE LEHRVERANSTALTUNGEN 3.6

ACADEMIC COURSES

C. J. BRABEC

Elektrische, magnetische, optische Eigenschaften, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Seminar How to Start a Company, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Materialien und Bauelemente für die Optoelektronik und Energietechnologie: Anwendung (WET II), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Devices, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Solar Energy Seminar, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Advanced Semiconductor Technologies – Processing, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Advanced Semiconductor Technologies – Solution Processed Devices, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

Materialien und Bauelemente für die Optoelektronik und Energietechnologie: Grundlagen (OpEt-G), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Seminar Neuere Fragen zu Werkstoffen der Elektronik und Elektrotechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Advanced Semiconductor Technologies – Photovoltaic Systems for Power Generation – Design, Implementation and Characterization, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Advanced Semiconductor Materials – Excited States and Charge Transport in Organic Semiconductors, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Advanced Semiconductors Introduction: Devices & Applications, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Advanced Semiconductor Technologies – Characterization and Advanced Defect Imaging of PV Modules and Systems, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Seminar Anleitung zur wissenschaftlichen Arbeit – High Throughput Characterization and Modelling, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Electronic Materials – Tutorium, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Seminar and Conference Participation on Solar Energy, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21

Seminar Neuere Fragen zu Werkstoffen der Elektrotechnik und der Energietechnologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21, SS 2021

Projektarbeit – Arbeitsgemeinschaft Organische Photovoltaik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21, SS 2021

Seminar Anleitung zur wissenschaftlichen Arbeit – High Throughput Material and device research for photovoltaics, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21, SS 2021

Seminar Anleitung zur wissenschaftlichen Arbeit – Accelerated lifetime testing of materials and devices, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21, SS 2021

Seminar Anleitung zur wissenschaftlichen Arbeit – Devices, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21, SS 2021

Seminar Anleitung zur wissenschaftlichen Arbeit – Materials and Optoelectronics, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, WS 2020/21, SS 2021

V. DYAKONOV

H.-P. EBERT

J. MANARA

G. REICHENAUER

**Nanotechnologie in der
Energieforschung**, Julius-Maximilians-
Universität Würzburg, SS 2021

H.-J. EGELHAAF

**Advanced Semiconductor Technologies
– Processing**, Friedrich-Alexander-
Universität Erlangen-Nürnberg, SS 2021

**Advanced Semiconductor Materials –
Excited States and Charge Transport
in Organic Semiconductors**, Friedrich-
Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg, WS 2020/21, WS 2021/2022

H. KARRER

**Praktikum Regenerative Energien
(Solarthermie)**, Technische Universität
München, SS 2021, WS 2021/22

**Lab Course Energy Systems for MSPE
(Solar Thermal)**, Technische Universität
München, SS 2021, WS 2021/22

J. MANARA

Messtechnik, Hochschule für
angewandte Wissenschaften Würzburg-
Schweinfurt, WS 2020/21

H. SPLIETHOFF

Regenerative Energiesysteme II,
Technische Universität München, SS
2021

**Prozesstechnik und Umweltschutz in
modernen Kraftwerken**, Technische
Universität München, SS 2021

Thermal Power Plants, Technische
Universität München, SS 2021

Energiesysteme und Energiewandlung,
Technische Universität München, SS
2021

Regenerative Energiesysteme I,
Technische Universität München, WS
2020/21

**Strom- und Wärmespeicher im
Energiesektor**, Technische Universität
München, WS 2020/21

Thermische Kraftwerke, Technische
Universität München, WS 2020/21

AUSZEICHNUNGEN 3.7

AWARDS

C. J. BRABEC

Auszeichnung

Highly Cited Researcher, Category Cross Field, Highly Cited Researchers List 2021, Clarivate Analytics/Web of Science

E. N. GÜLER

Auszeichnung

EnCN Energy Award, Energie Campus Nürnberg, Nürnberg, Germany, 02.12.2021

L. ULLERICH

Auszeichnung

Jahrgangsbeste im Ausbildungsberuf Physiklaborant, IHK Würzburg-Schweinfurt, Würzburg, Germany, 12.10.2021

3.8 SONSTIGES MISCELLANEOUS

BEREICH RE

Aussteller

Stadt(ver)führungen: Solarmodule aus dem Drucker – die Solarfabrik der Zukunft

Nürnberg, Germany, 18.10.2021

C. J. BRABEC

Vortrag

Was kann die PV in Deutschland leisten

G'scheid schlau – Lange Nacht der

Wissenschaften, Online, 22.–24.10.2021

A. DISTLER

A. CLASSEN

Interview

BR Frankenschau: Frankens Solarfabrik der Zukunft

Nürnberg, Germany, 15.04.2021

H.-P. EBERT

Online-Workshop

Connective Cities Virtual Projects

Workshop – Municipal energy efficiency projects in the MENA region

13.–15.09.2021

H.-J. EGELHAAF

Vortrag

Solarmodule aus dem Drucker –

Organische Photovoltaik

Hermann-Kesten-Kolleg Nürnberg, Germany, 11.11.2021

Vortrag

Solarmodule aus dem Drucker –

Die Solarfabrik der Zukunft

G'scheid schlau – Lange Nacht der

Wissenschaften, Online, 22.–24.10.2021

C. RATHGEBER

Artikel

High-performance transport materials for thermally sensitive vaccines

IEA-Initiative "Today in the Lab, Tomorrow in Energy", 21.10.2021

Stellungnahme

Energiewende braucht Wärmewende

| Wärmewende braucht Speicher

Stellungnahme des BVES 10/2021,

Artikel

Neuartige Kühlakkus für einen sicheren

Impfstofftransport, BMWi-Newsletter

Energiewende, 29.04.2021

S. TAFELMEIER

Vortrag

Phase, wechsle dich... PCM und andere Wärmespeicher

Soapbox Science Munich 2021, Online, 06.11.2021



ADRESSEN ADDRESSES

WÜRZBURG

Magdalene-Schoch-Str. 3
97074 Würzburg
Germany

Sitz des Vereins (VR 1386) | Registered Office

BEREICH DIVISION

Energieeffizienz | Energy Efficiency
T + 49 931 70564-0
F + 49 931 70564-600
ef@zae-bayern.de



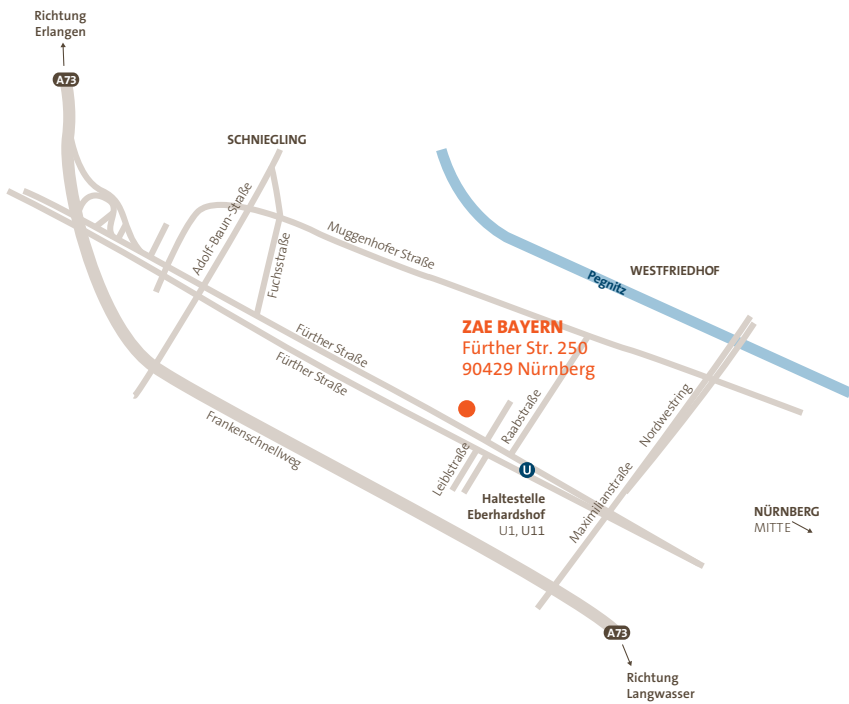
GARCHING

Walther-Meißner-Str. 6
85748 Garching
Germany

BEREICH DIVISION

Energiespeicherung | Energy Storage
T + 49 89 329442-0
F + 49 89 329442-12
es@zae-bayern.de





NÜRNBERG

Fürther Str. 250
 Auf AEG, Bau 16
 90429 Nürnberg
 Germany

BEREICHE DIVISIONS

Erneuerbare Energien | Renewable Energies
 T + 49 911 56854-9350
 F + 49 911 56854-9351
 re@zae-bayern.de

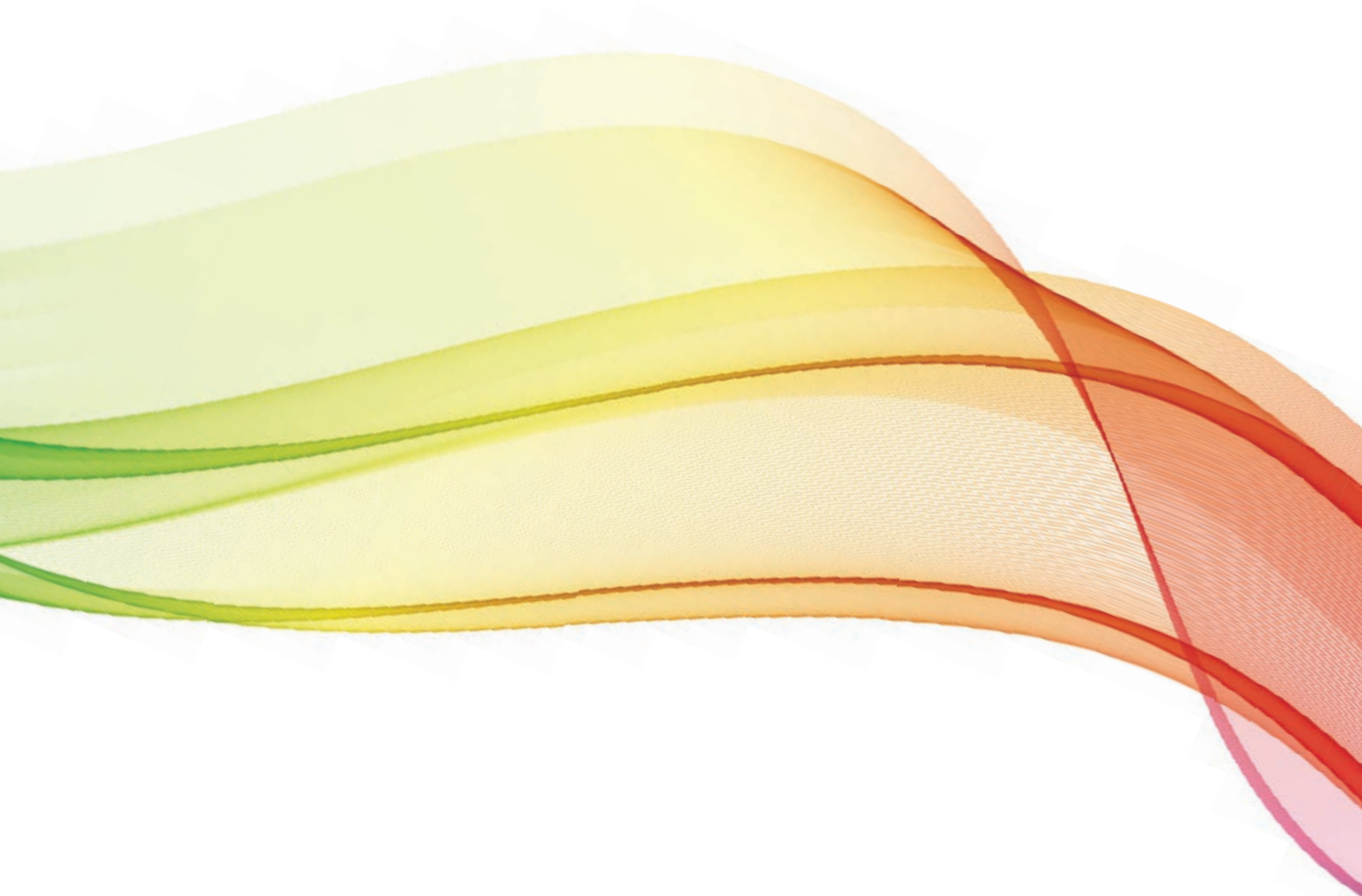


HOF

Bismarckstr. 28
 95028 Hof
 Germany

BEREICHE DIVISIONS

Energiespeicherung | Energy Storage
 T + 49 89 329442-0
 F + 49 89 329442-12
 es@zae-bayern.de



Gefördert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
