



ZAE BAYERN

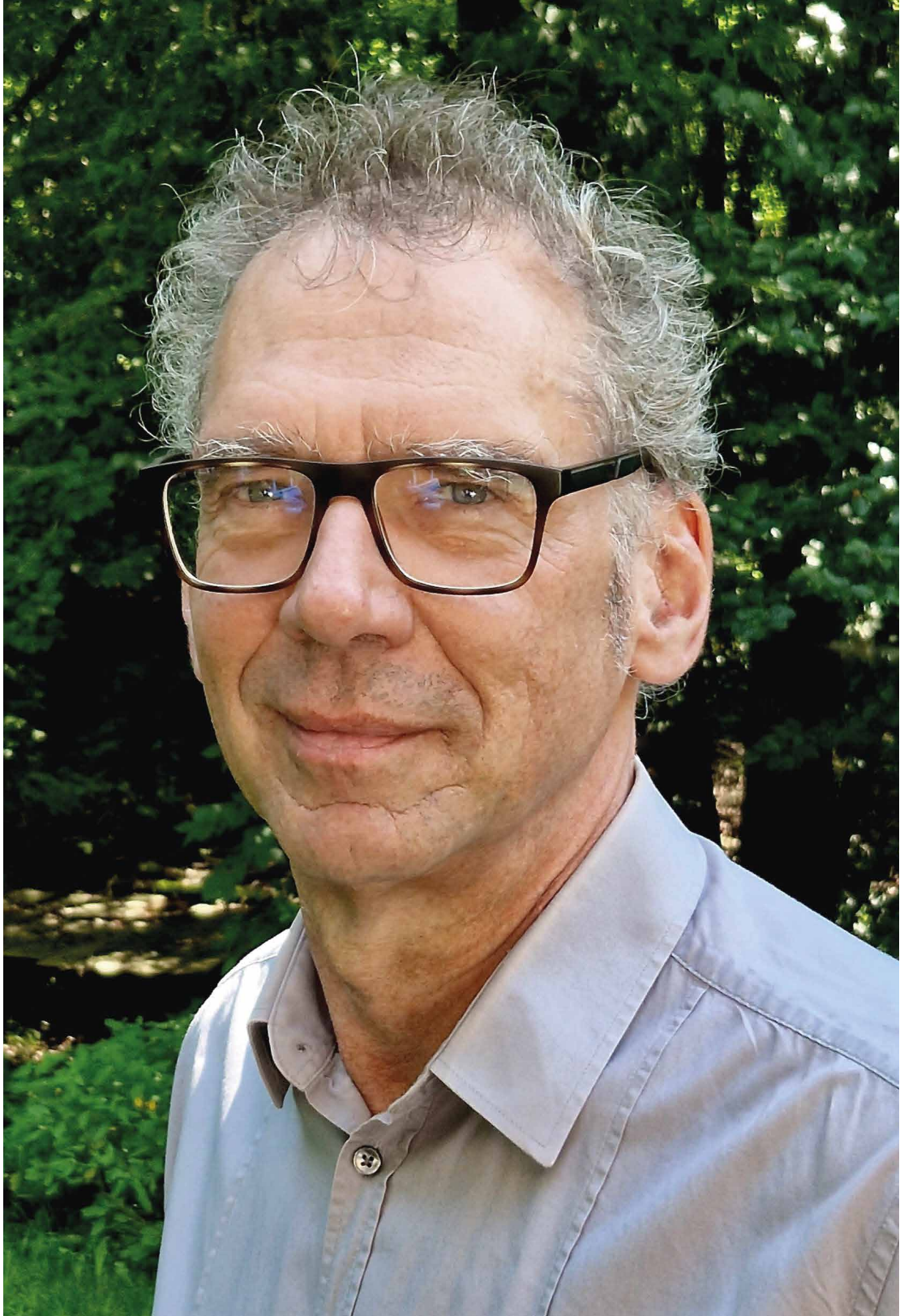
2022

TÄTIGKEITSBERICHT
ANNUAL REPORT

Vorwort	3	Foreword	3
1.0 FORSCHUNG	4	1.0 RESEARCH	4
1.1 Hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung für Industrie und Gewerbe	7	1.1 Highly Efficient Trigeneration for Industrial and Commercial Applications	7
1.2 Wärme aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen: Potenziale, Nachhaltigkeit und Instrumente	10	1.2 Heat from Thermal Waste Treatment Plants: Potentials, Sustainability, and Instruments	10
1.3 Der Kristallisation auf der Spur: Keimbildung in mikroverkapselten und emulgierten PCM	12	1.3 Hunting Crystals: Nucleation in Microencapsulated and Emulsified PCM	12
1.4 Ökonomische Hochtemperaturdämmung bis 1.000 °C auf Pulverbasis – Ergebnisse aus der Praxis	15	1.4 Economical, Powder-Based High-Temperature Insulation for up to 1,000 °C – Field Results	15
1.5 Modifizierte Monopolarplatten für metallfreie Stapelenden in Flussbatterien	17	1.5 Modified Monopolar Plates for Metal-Free Stack Ends in Flow Batteries	17
2.0 VERÖFFENTLICHUNGEN	20	2.0 PUBLICATIONS	20
2.1 Vorträge und Poster	22	2.1 Presentations and Posters	22
2.2 Veröffentlichungen	24	2.2 Publications	24
2.3 Studienabschlussarbeiten und Dissertationen	26	2.3 Degree and Doctoral Theses	26
2.4 Patente	26	2.4 Patents	26
2.5 Mitarbeit in Gremien	27	2.5 Membership in Committees	27
2.6 Akademische Lehrveranstaltungen	29	2.6 Academic Courses	29
2.7 Sonstiges	29	2.7 Miscellaneous	29
Adressen	30	Addresses	30

VORWORT FOREWORD

Dr. Andreas Hauer
Vorstandsvorsitzender
Chairman of the Board



Das ZAE Bayern hat sich im Jahr 2022 weiter verändert. Vielleicht waren es die größten Veränderungen seit seiner Gründung vor über 30 Jahren. Das Bayerische Wirtschaftsministerium stellte nach 31 Jahren seine institutionelle Förderung ein. Ende des Jahres spaltete sich der Würzburger Bereich vom ZAE ab und geht jetzt als Center for Applied Energy Research – CAE seinen eigenen Weg.

Die neue Unabhängigkeit erlaubt uns, unsere thematischen Schwerpunkte jetzt selbst zu setzen. Wir konnten unsere über Jahrzehnte aufgebaute Expertise in Bereichen wie der thermischen Energie für Gebäude und industrielle Prozesse oder der Speicherung aller Formen von Energie für die Umsetzung der Energiewende einsetzen. Wir haben uns entschieden, Themen wie Wasserstoff und Sektorenkopplung basierend auf unserem Knowhow weiter auszubauen.

Durch den Wegfall der Grundfinanzierung müssen wir noch angewandter und industrienäher forschen und unsere internen Abläufe effizienter gestalten. Wir mussten, oder besser: wir konnten für uns eigene und schlankere Verwaltungs- und Organisationsstrukturen in Garching aufbauen. Dies noch einmal mit Unterstützung des Bayerischen Wirtschaftsministeriums. Diese Veränderungen erforderten einen echten Neustart nach über 30 Jahren erfolgreicher Forschung und Entwicklung. Die resultierende Aufbruchsstimmung ist überall bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ZAE zu spüren.

Unser Plan ist es, in kontrolliertem Wachstum weiter Personal aufzubauen und den Standort Hof zu stärken. Viele neue Mitglieder und ein neu aufgestelltes Kuratorium unterstützen uns auf diesem Weg. Zahlreiche neue oder momentan in Akquisition befindliche F&E-Projekte, öffentlich gefördert oder bilateral mit Industriepartnern bearbeitet, sichern unsere Zukunft.

Ein unabhängiges und hochmotiviertes ZAE Bayern wartet nur darauf, die Energiezukunft weiter mitzugestalten!

ZAE Bayern has undergone further changes in 2022, perhaps the biggest ones since it was founded over 30 years ago. The Bavarian Ministry of Economic Affairs has terminated our institutional funding after 31 years. By the end of the year, our Würzburg division separated from ZAE to now go its own way as the Center for Applied Energy Research – CAE.

Our newly gained independence has given us the freedom to now set our own thematic priorities. Using the expertise we have built up over decades in areas like thermal energy for buildings and industrial processes or the storage of all forms of energy, we were able to make a practical contribution to the energy transition. Also, we decided to further expand upon topics like hydrogen and sector coupling based on our know-how.

Without basic funding, we need to become even more applied and industry-oriented in our research, more efficient in our internal processes. We had to, or rather: we were given the opportunity to set up new, customised, leaner administrative and organisational structures in Garching, for which we once more received support from the Bavarian Ministry of Economic Affairs. These changes demanded a real fresh start after more than 30 years of successful research and development. This sense of renewal can be felt throughout ZAE's staff.

Our plan is now to continue adding to our workforce in a process of controlled growth and to strengthen our branch office in Hof. A number of new members and a freshly appointed board of trustees support us on our way. Numerous R&D projects, recently launched or currently under acquisition, funded publicly or bilaterally with industry partners, secure our future.

An independent and highly motivated ZAE Bayern is eagerly waiting to continue shaping the future of energy!

Ihr/Yours
Dr. Andreas Hauer





FORSCHUNG RESEARCH

1.0

WÄRMETRANSFORMATION
HEAT CONVERSION

SYSTEMENTWICKLUNG
SYSTEMS ENGINEERING

THERMISCHE ENERGIESPEICHERUNG
THERMAL ENERGY STORAGE

SOLARENERGIE UND GEOTHERMIE
SOLAR AND GEOTHERMAL ENERGY

ELEKTROCHEMISCHE ENERGIESPEICHER
ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE

FORSCHUNG

RESEARCH

Unsere Forschung ist unser Beitrag zur Energiewende.

Für weniger CO₂-Emissionen und mehr Energieeffizienz bringen wir neue Technologien und Erkenntnisse aus dem Labor in die Praxis. Dazu betrachten wir Problemstellungen auf allen Ebenen und aus allen Blickwinkeln. Wir nutzen und entwickeln neue Technologien, bringen sie in bestehende Systeme ein oder gestalten auf ihrer Basis völlig neue Anwendungen. Wir sind ein interdisziplinäres Team aus Naturwissenschaftler*innen, die sich nicht nur auf ihre eigene Expertise verlassen können, sondern auch auf die ihrer Kolleg*innen.

Auf den folgenden Seiten können Sie sich selbst ein Bild davon machen, wie vielfältig diese Arbeit sein kann. Von der Materialentwicklung im mikroskopischen Bereich über Komponenten für Energiespeicher und Industrieanlagen bis zur Betrachtung der Rolle einzelner Akteure im gesamten Energiesystem: Bei den fünf vorgestellten Projekten ist alles dabei.

Our research is our contribution to the ongoing transformation of the energy system.

Aiming to reduce CO₂ emissions and increase energy efficiency, we take new technologies and insights from the laboratory and put them into practice. To this end, we examine problems at all levels and from all angles. We apply and develop new technologies, incorporate them into existing systems, or design entirely new applications around them. We are an interdisciplinary team of scientists who can rely not only on their own expertise, but also on that of their colleagues.

On the following pages, you can see for yourself just how diverse this work can be. From developing materials on a microscopic scale, to making components for energy storage systems and industrial plants, to examining the role of individual actors in the overall energy system: the five featured projects cover it all.



1.1

HOCHEFFIZIENTE KRAFT-WÄRME-KÄLTE-KOPPLUNG FÜR INDUSTRIE UND GEWERBE

HIGHLY EFFICIENT TRIGENERATION FOR INDUSTRIAL AND COMMERCIAL APPLICATIONS

Autor | Author
C. Wuschig, A. Röll, M. Riepl

Ansprechpartner | Contact
Dr. Manuel Riepl

Gruppenleiter
 Wärmetransformation
 Head of Group
 Heat Conversion

+49 89 329442-43
 manuel.riepl@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bayerisches Staatsministerium
 für Wirtschaft,
 Landesentwicklung und Energie**
 (FKZ 44-6665a2/84/4)

Kooperationspartner | Partners
**Ostbayerische Technische
 Hochschule Amberg-Weiden**

Zusammen mit dem Kompetenzzentrum für Kraft-Wärme-Kopplung (KoKWK) der OTH Amberg-Weiden entwickelte und testete das ZAE seit 2017 ein neuartiges Gesamtsystem für hocheffiziente Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK).

Neben einem Blockheizkraftwerk (BHKW) besteht es aus einer für den Einsatz in KWKK-Systemen mit kleiner Leistung optimierten Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskältemaschine (AKM). Diese wird direkt mit dem etwa 500 °C heißen Rauchgas eines entsprechend modifizierten BHKW sowie dem Heißwasser aus dessen Kühlkreislauf angetrieben. Ihre Kälteleistung liegt bis zu 30 % über der vergleichbarer, marktüblicher Modelle. Diese Verbesserung der Gesamteffizienz wurde durch eine getrennte Auskoppelung der Hoch- und Niedertemperaturwärmeströme aus dem BHKW möglich (zwei-/einstufiges System). Ein Prototyp wurde im Amberger Technikum des KoKWK in Betrieb genommen. Das neue Konstruktionsprinzip für AKM wurde und wird auch in anderen Forschungsvorhaben eingesetzt.

Die Kombination aus BHKW und AKM ermöglicht ein System, das bei einer elektrischen Leistung von 20 kW eine Wärmeleistung von 40 kW (im Heizbetrieb) oder eine Kälteleistung von 36 kW (im Kühlbetrieb) erreicht und einen gleitenden Wechsel zwischen beiden Betriebsarten erlaubt. So kann die Abwärme des BHKW auch im Sommer genutzt werden, wenn kein direkter Wärmebedarf besteht. Die Anlage kann bereits ab 25 % ihrer Maximallast wirtschaftlich betrieben werden. Im Vergleich zu üblichen KWKK-Systemen verbraucht sie weniger Primärenergie, was ökologische und wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen kann.

In cooperation with OTH Amberg-Weiden's Center of Excellence for Cogeneration Technologies (KoKWK), ZAE Bayern has been developing and testing a novel system for highly efficient combined heat, power, and cooling (CHCP) since 2017.

Besides a combined heat and power unit (CHP), it includes a water and lithium bromide absorption chiller designed for use in small-scale CHP systems. The chiller is directly powered by the exhaust gas heat of the correspondingly modified CHP unit, which reaches about 500 °C, as well as by the hot water from the unit's cooling circuit. Its cooling capacity is up to 30 % above that of comparable, commercially available models. This improvement in overall efficiency was made possible by separately tapping the high and low temperature heat flows from the CHP (single/double-stage system). A prototype was put into operation at the KoKWK's technology centre in Amberg and the new chiller design has also already been used in other research projects.

The combination of CHP and chiller allows for a system with a 20 kW electrical output to achieve 40 kW of heat output (in heating mode) or 36 kW of cooling output (in cooling mode) while allowing for smooth switching between the two modes of operation. This renders the CHP unit's waste heat usable in the summer, when there is no direct demand for heat. The system can be operated economically from as low as 25 % of its maximum load upwards. It consumes less primary energy than conventional CHCP systems, which can result in ecological and economic advantages.

1

Abb. 1: Das entwickelte System im Technikum des KoKWK
 Fig. 1: The novel system in KoKWK's technology centre



Die Vermessung des Gesamtsystems belegte die erwarteten Effekte. Die mehrstufige Ausführung erhöhte den apparativen Aufwand zwar geringfügig, bewirkte aber eine im Vergleich dazu größere Effizienzsteigerung (Abb. 2). Bei einer Antriebsleistung von 38,3 kW erreichte die AKM eine Kälteleistung von 34,7 kW. Die Wandlungseffizienz von Antriebswärme in Kälte lag damit bei 91 %. Von einem konventionellen System wären etwa 28,7 kW Kälteleistung bei einer Effizienz von 73 % zu erwarten gewesen.

Measurements of the overall system proved the expected effects. Although the multi-stage design slightly increased the necessary technical expenditure, it brought about a comparatively greater increase in efficiency (Fig. 2). Driven with 38.3 kW of power, the chiller achieved 34.7 kW of cold output. This translates into a conversion efficiency of 91 % from heat input to cold output. For a conventional system, the expectation would have been about 28.7 kW of cooling capacity at an efficiency of 73 %.

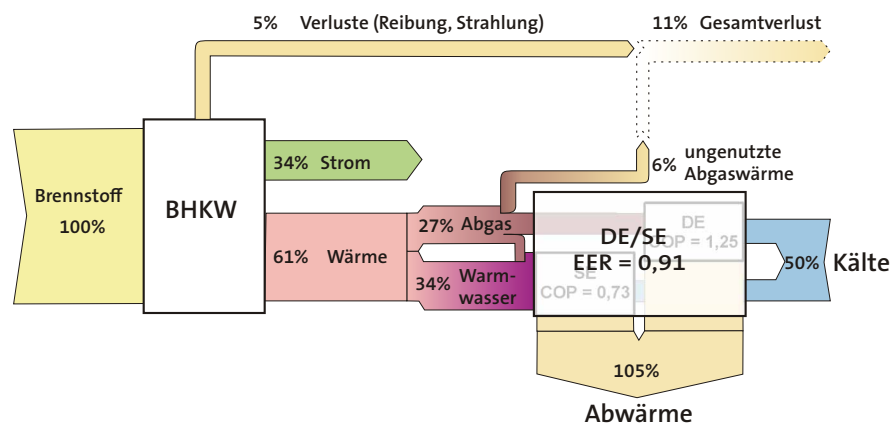
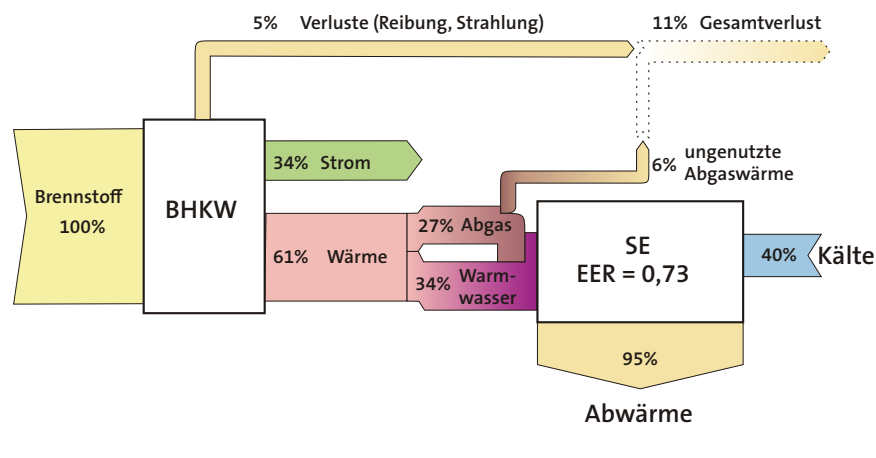
Das Projekt war technisch und wissenschaftlich erfolgreich. Effizienz und Zuverlässigkeit des neuen Konstruktionsprinzips konnten belegt werden. Im bereits angelaufenen Folgeprojekt *eQBooster*, in dem KoKWK und ZAE ihre Kooperation fortführen, wird es in einer leicht modifizierten Anwendung weiterentwickelt.

Technically as well as scientifically, the project was a success. The efficiency and reliability of the novel design were proven. In the ongoing follow-up project *eQBooster*, in which KoKWK and ZAE are continuing their cooperation, it is being further developed in a slightly modified application.

2

Abb. 2: Vergleich der Energieströme und Effizienzen einer herkömmlichen, einstufigen KWKK-Anlage (oben) mit denen der neu entwickelten zwei-/ einstufigen KWKK (unten)

Fig. 2: Comparison of the energy streams and efficiencies of a conventional, single-stage CHCP plant (top) with those of the newly developed two-/one-stage CHCP (bottom)



1.2

WÄRME AUS THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN: POTENZIALE, NACHHALTIGKEIT UND INSTRUMENTE

HEAT FROM THERMAL WASTE TREATMENT PLANTS: POTENTIALS, SUSTAINABILITY, AND INSTRUMENTS

Autor | Author
Y. Apfel, J. Schweiger, A. Hauer,
J. M. Kuckelkorn

Ansprechpartner | Contact
Yannick Apfel

Systementwicklung
Systems Engineering

+49 89 329442-63
yannick.apfel@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
Interessengemeinschaft der
thermischen Abfallbehandlungs-
anlagen in Deutschland e. V.

Kooperationspartner | Partners
Institut für Energie- und
Umweltforschung gGmbH

Thermische Abfallbehandlungsanlagen (TAB) stehen in einem politischen Spannungsfeld zwischen Kreislaufwirtschaft, Klimaschutz und einer stabilen Energieversorgung. In Deutschland sind derzeit etwa 100 TAB in Betrieb und verwerten jährlich bis zu 27 Millionen Tonnen Abfall [1]. So erreichen sie einen Anteil von 16 % an der Netto-Wärmeerzeugung im Fernwärmesektor. Das entspricht der Summe der Anteile aller erneuerbaren Energien und Abwärmequellen [2].

2022 erstellte das ZAE Bayern in Kooperation mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH eine Studie zur ganzheitlichen Betrachtung der Wärmenutzung aus TAB. Diese wurde, vor dem Hintergrund aktueller gesetzlicher Novellierungen zur kommunalen Wärmeplanung, durch die Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V. in Auftrag gegeben.

Die Studie analysiert die heutige Positionierung von TAB innerhalb der Kreislaufwirtschaft und des Wärmemarktes. Ausgehend von Szenarien für 2030 und 2045 bewertet sie deren Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit in einem weitgehend klimaneutralen Energiesystem. Der Fokus der Untersuchungen des ZAE Bayern lag auf technischen Optionen zur optimierten Wärmenutzung und Flexibilitätssteigerung. Außerdem wurden verschiedene Möglichkeiten der CO₂-Abscheidung geprüft, die für eine vollständig klimaneutrale Erzeugerstruktur bis 2045 erforderlich ist.

Zur Flexibilitätssteigerung kann bei TAB das Verhältnis von produziertem Strom zu Prozess- und Fernwärme variiert werden. Zeitliche Lastverschiebungen werden durch den Einsatz von Abfallzwischenlagern, Wärme- und Stromspeichern möglich. Außerdem wurde anhand von Modellrechnungen untersucht, wie sich die Integration von Wärmepumpen oder die Abscheidung von CO₂ auf den Jahresbrennstoffausnutzungsgrad auswirken.

Thermal waste treatment plants (WTPs) are caught between the conflicting political priorities of a circular economy, climate protection, and a stable energy supply. In Germany, about 100 WTPs are currently in operation, processing up to 27 million tonnes of waste per year [1]. Thus, they provide 16 % of the net heat generated in the district heating sector. This equals the sum of all renewable energy and waste heat shares [2].

In 2022, ZAE Bayern cooperated with the Institute for Energy and Environmental Research in Heidelberg to prepare a comprehensive assessment of the utilisation of heat from WTPs. The study was commissioned by the German Association of Thermal Waste Treatment Plants against the backdrop of current statutory amendments regarding municipal heat planning.

The study analyses the current positioning of WTPs within the circular economy and heating market. Based on scenarios for 2030 and 2045, it evaluates their sustainability and future viability in a largely climate-neutral energy system. ZAE's investigations focused on technological options for heat use optimisation and flexibility enhancement. Moreover, options for carbon capture were assessed, which is required to achieve a fully climate-neutral energy generation structure by 2045.

To increase flexibility, the proportion of produced electricity to process and district heat may be adjusted in WTPs. Temporal load shifts are possible through temporary waste, heat, and electricity storages. Also, model calculations were employed to examine how the integration of heat pumps or carbon capture affect the annual rate of fuel utilisation.

Während TAB im auf die Stromerzeugung ausgerichteten Betrieb Brennstoffausnutzungsgrade unter 50 % erreichen, können diese bei Ausrichtung auf die Bereitstellung von Wärme zur Deckung der Grundlast 80 % übersteigen. Durch Integration von Wärmepumpen sind sogar über 90 % möglich, sofern ein ausreichend großes Wärmenetz als Abnehmer zur Verfügung steht. Durch Senkung der Temperaturniveaus im Wärmenetz steigt der Brennstoffausnutzungsgrad weiter an.

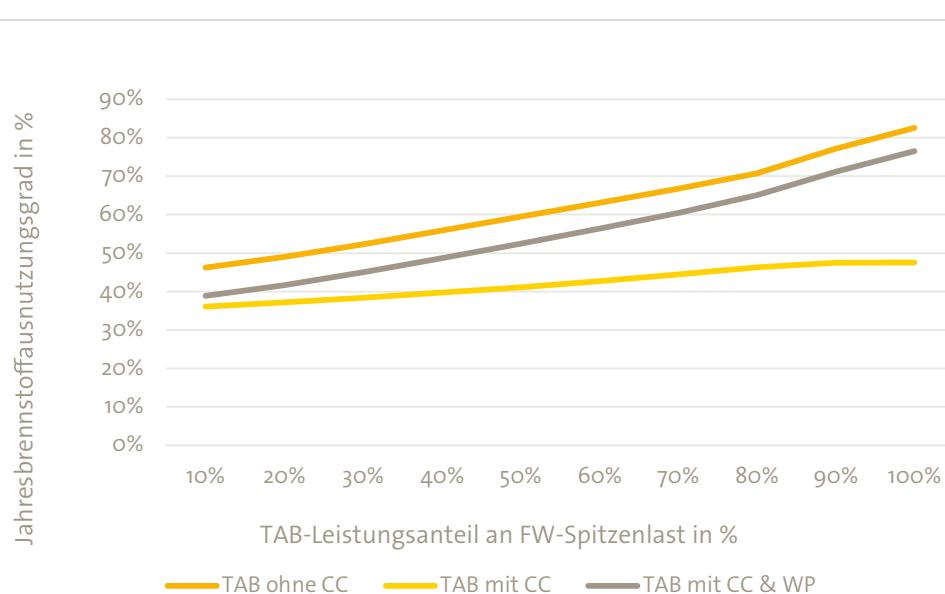
Die Studie geht außerdem von einer Reduktion des anfallenden Abfallvolumens um 33 % bis 2030 aus, was größeres Flexibilitätspotenzial im Verbrennungsprozess eröffnet. Saisonale Wärmespeicher und Abfallzwischenlager bieten aktuell das Potenzial, den Jahresbrennstoffausnutzungsgrad um bis zu 7 % zu verbessern, bei sinkenden Abfallmengen sind bis zu 11 % möglich.

While WTPs achieve less than 50 % fuel utilisation when operating primarily for electricity generation, they can exceed 80 % when operating primarily to cover basic heat demand. The integration of heat pumps can further raise this figure to over 90 %, provided a sufficiently large heat network is available as a consumer. Lowering the heating network's temperature levels increases the fuel utilisation rate even more.

The study further assumes a 33 % reduction in the total volume of waste produced for 2030, which raises the potential for flexibility in the incineration process. Seasonal heat storage and temporary waste storage currently allow for a 7 % improvement in annual fuel utilisation, with up to 11 % possible if the waste volume decreases.

Abb. 1: Entwicklung des Jahresbrennstoffausnutzungsgrades von TAB, TAB mit 95-prozentiger CO₂-Abscheidung (CC: Carbon Capture) mittels Aminwäsche und mit zusätzlicher Wärmepumpe (WP)

Fig. 1: Development of the annual fuel utilisation rate of WTP, WTP with 95 % carbon capture (CC) via amine scrubbing, and with additional heat pump (WP)



Literatur | References

[1] D. J. Hoffmeister et al., Perspektiven der thermischen Abfallbehandlung – Roadmap 2040, 2020,
https://www.itad.de/service/downloads/tab_roadmap-2040.pdf/view

[2] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Die Energieversorgung 2021 – Jahresbericht, Berlin,
https://www.bdew.de/media/documents/Jahresbericht_2021_UPDATE_Juni_2022.pdf

An Möglichkeiten zur CO₂-Abscheidung wird aktuell intensiv geforscht. Die Methode der Aminwäsche wurde bereits in diversen Pilotanlagen umgesetzt. Aufgrund des hohen Energiebedarfs sinkt bei ihrem Einsatz der Brennstoffausnutzungsgrad deutlich (Abb. 1). Bei der Nutzung von TAB zur Deckung von Grund- und Mittellast können Wärmepumpen diese Reduktion aber größtenteils kompensieren.

Carbon capture technologies are currently the subject of extensive research. The amine scrubbing method has already been implemented in various pilot plants. Due to its high energy demand, this method causes a significant drop in fuel utilisation (Fig. 1). Heat pumps can, however, largely compensate for this when WTPs are used to cover the base and medium load.

1.3

DER KRISTALLISATION AUF DER SPUR: KEIMBILDUNG IN MIKROVERKAPSELTEN UND EMULGIERTEN PCM

HUNTING CRYSTALS: NUCLEATION IN MICROENCAPSULATED AND EMULSIFIED PCM

Autor | Author
S. Tafelmeier, S. Hiebler

Ansprechpartner | Contact
Dr. Stefan Hiebler

Gruppenleiter
Thermische Energiespeicher
Head of Group
Thermal Energy Storage

+49 89 329442-35
stefan.hiebler@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für
Wirtschaft und Klimaschutz**
(FKZ 03ET1596B)

Kooperationspartner | Partners
**Fraunhofer-Institut
für Solare Energiesysteme**

Abb. 1: Paraffinbasierte PCM mit unterschiedlichen Schmelzpunkten bei Raumtemperatur (l.) und wiederverwendbare Handwärmer auf Basis von Salzhydrat-PCM im flüssigen und festen Zustand (r.)

Fig. 1: Paraffin-based PCMs of different melting points at room temperature (l.) and reusable hand warmers based on salt hydrate PCMs in liquid and solid state (r.)



Mit Phasenwechselmaterialien (PCM, Abb. 1) lassen sich große Energiemengen in vergleichsweise kleinen Volumina speichern. Der Grund dafür liegt in der großen Änderung der Enthalpie, die bei einem Zustandswechsel, zum Beispiel von flüssig auf fest, auftritt. Ein gängiges Problem dabei: Viele PCM gefrieren erst deutlich unter ihrem Schmelzpunkt. Dieser als Unterkühlung bezeichnete Effekt tritt auf, da im flüssigen Material zunächst ein fester Kristallisationskeim einer gewissen Größe entstehen muss, bevor der Rest der Flüssigkeit daran kristallisieren kann. Die Entstehung eines solchen Keims ist ein statistisches Phänomen. Die Wahrscheinlichkeit dafür steigt also mit der Materialmenge.

Phase change materials (PCM, Fig. 1) allow for the storage of large amounts of energy in comparatively small volumes. This is due to the large change in enthalpy that occurs during a phase change, for example from liquid to solid. A commonly encountered issue with this is that many PCMs do not freeze until well below their melting point. This effect, known as supercooling, occurs because it takes a solid nucleus of a certain size to trigger the crystallisation of the rest of the liquid. The development of such a nucleus is a statistical phenomenon, so its likelihood increases with the available amount of material.

Probleme bereitet dieses Phänomen bei der Mikroverkapselung von PCM, also ihrer Abfüllung in sehr kleine Gebinde, oder bei ihrer Emulgierung in Trägerflüssigkeiten. Diese Formen von PCM haben viele spezifische Vorteile, neigen aber aufgrund ihrer geringen Volumina zur Unterkühlung [1]. Dem wirken sogenannte Keimbildner entgegen: heterogene Kristallisationskeime, die dem Material zugesetzt werden.

This phenomenon causes problems whenever PCMs are microencapsulated – i.e. sealed in very small containers – or emulsified in carrier fluids. These forms of PCM have many specific advantages, but they are prone to supercooling due to their small volumes [1]. The effect, however, may be counteracted with so-called nucleating agents: heterogeneous crystallisation nuclei to be added to the material.

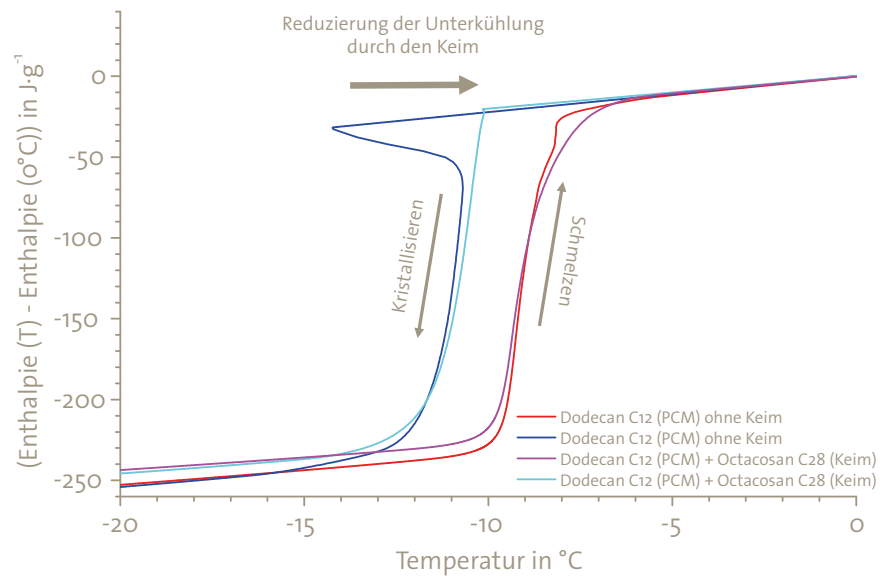
Durch ihren Einsatz kann eine Unterkühlung praktisch vollständig verhindert werden (Abb. 2). Doch ihre Funktionsweise ist komplex und die Auswahl auf das jeweilige PCM angepasster Keimbildner erfolgt bisher hauptsächlich empirisch.

Their presence can prevent supercooling almost completely (Fig. 2). However, their working principle is complex and selecting the right nucleating agent for a particular PCM has so far been a mainly empirical process.

2

Abb. 2: Enthalpieverlauf beim Schmelzen und Kristallisieren von Dodecan mit und ohne Octacosan als Keimbildner

Fig. 2: Enthalpy profile for melting and crystallisation of dodecane with and without octacosane as a nucleating agent



Daher wurde im Projekt „Keimbildung und Kristallisation bei mikroverkapselten und nanoemulgierten PCM – Minakrip“ die Wirkweise solcher Keimbildner an organischen PCM untersucht. Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts *Mikopuk* [2] sollte so die Auswahl geeigneter Kombinationen erleichtert werden. Beim Projektpartner, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, wurden dazu Mikrokapselfen und Emulsionen hergestellt und potenzielle Keimbildner darin untersucht. Die Forschenden am ZAE beschäftigten sich dagegen mit großvolumigeren PCM-Proben. Sie untersuchten 120 Kombinationen aus PCM und Keimbildner auf Korrelationen, die Hinweise auf die Qualität der Keimbildung geben.

Besonders in großen Volumina schien dabei ein Zusammenpassen der Gitterparameter und Endgruppen organischer Moleküle von PCM und Keim die Wirkung signifikant zu beeinflussen.

Therefore, the project "Nucleation and Crystallisation in Microencapsulated and Nanoemulsified PCM" looked into the functional principle of such nucleating agents in organic PCMs. Building on the results of previous project *Mikopuk* [2], the aim was to facilitate the selection of suitable combinations. ZAE's project partner, the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, therefore prepared microcapsules and emulsions and tested potential nucleating agents on them. The researchers at ZAE, on the other hand, dealt with larger-volume PCM samples. They examined 120 combinations of PCM and nucleating agent for correlations which indicate the quality of nucleation.

Especially for the larger samples, matching lattice parameters and end groups of organic molecules in PCM and nucleus seemed to significantly influence the effect.

Es zeigte sich aber auch, dass diese Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf PCM-Emulsionen übertragbar sind. Einige Keimbildner, die in großen Volumina keine Wirkung zeigten, reduzierten in Emulsionen die Unterkühlung stark. Gründe dafür könnten Einflüsse durch Tenside oder die geringeren Probenvolumina sein.

Neben der systematisierten Analyse der Unterkühlungsergebnisse wurde die Kristallisation an Keimen auch mit Hilfe molekuldynamischer (MD-) Simulation untersucht, die Materialdarstellungen auf Atomebene erlaubt. Die so gewonnenen Ergebnisse stützen die aufgestellten Hypothesen zur präferierten Oberflächenanlagerung bei der Kristallisation (Abb. 3) und erlauben ein tieferes Verständnis der entstehenden Kristallstrukturen.

Eine global gültige Formel für die optimale Keimbildnerwahl konnte im Projekt nicht gefunden werden, jedoch wurde die Vorhersagbarkeit der Eignung von Keimbildnern verbessert. Außerdem wurden neue Erkenntnisse zur Kristallisation von PCM in großen Volumina, Mikrokapiteln und Emulsionen gewonnen und die MD-Simulation als geeignetes Mittel identifiziert, Keimoberflächen schnell hinsichtlich ihrer Attraktivität für spezifische PCM zu bewerten.

However, it also became apparent that these results cannot simply be transferred to PCM emulsions. Some nucleating agents that showed no effect in large volumes strongly reduced supercooling in emulsions. This could be due to the influence of surfactants or the smaller sample volumes.

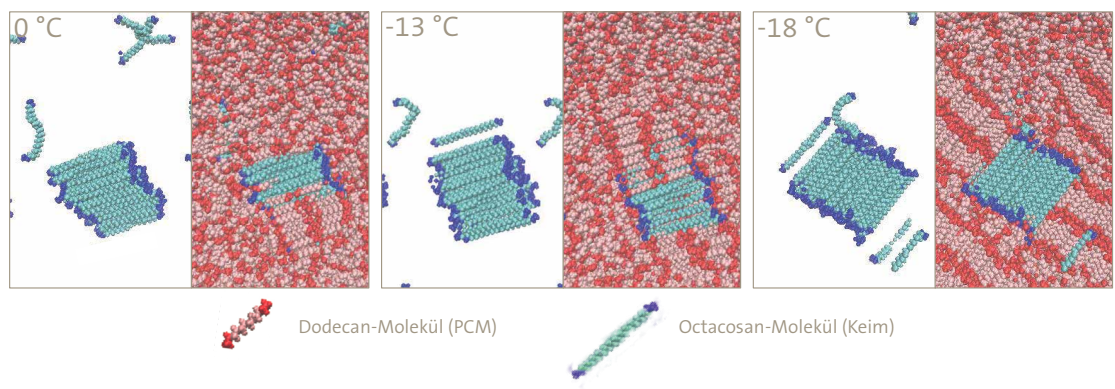
Besides the systematic analysis of the supercooling data, crystallisation on nuclei was also investigated via molecular dynamics (MD) simulation, which allows for an atomic-level visualisation of materials. The obtained results support the stated hypotheses on preferential surface attachment during crystallisation (Fig. 3) and provide a deeper understanding of the emerging crystal structures.

The project did not bring forth a globally valid formula for the optimised selection of nucleating agents, but their suitability was made more easily predictable. Also, new insights were gained into the crystallisation of PCMs in large volumes, microcapsules, and emulsions, while MD simulation was identified as a suitable means of quickly finding attractive nucleation surfaces for specific PCMs.

3

Abb. 3: MD-Simulation einer Dodecan-Octacosan-Mischung bei unterschiedlichen Temperaturen, jeweils nur Keim (l.) und Keim-PCM-Mischung (r.)

Fig. 3: MD simulation of a dodecane-octacosane mixture at different temperatures, each depicting nucleus only (l.) and nucleus-PCM mixture (r.)



Literatur | References

- [1] E. Günther et al.,
Thermochimica Acta, 522 (2011)
199–204.
[2] S. Hiebler et al.,
Unterkühlung in mikrokompartierten
organischen PCM, MIKOPUK,
Schlussbericht, Bayerisches Zentrum
für Angewandte Energieforschung,
2017.

1.4 ÖKONOMISCHE HOCHTEMPERATURDÄMMUNG BIS 1.000 °C AUF PULVERBASIS – ERGEBNISSE AUS DER PRAXIS

ECONOMICAL, POWDER-BASED HIGH-TEMPERATURE INSULATION FOR UP TO 1,000 °C – FIELD RESULTS

Autor | Author
P. Osgyan

Ansprechpartner | Contact
Dipl.-Ing. Peter Osgyan M.Sc.
Solarenergie und Geothermie
Solar and Geothermal Energy
+49 89 329442-46
peter.osgyan@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
**Bundesministerium für
Wirtschaft und Klimaschutz**
(FKZ 03ET1639A)

Kooperationspartner | Partners
Va-Q-tec AG
Verallia Deutschland AG
Kraftblock GmbH
Lungmuß Feuerfest

Abb. 1: Mikroskopische Aufnahmen des verwendeten Perlits: Übersichtsaufnahme mit mehreren Körnern (a), Nahaufnahme eines runden Kornes (b), Nahaufnahme eines unregelmäßig geformten Kornes (c), Ausschnitt mit zerbrochenen Körnern (d)

Fig. 1: Microscopic images of the used perlite: overview image with multiple grains (a), close-up image of a rounded grain (b), close-up image of an irregularly shaped grain (c), section with broken grains (d)

Abb. 2: Einbringung der perlit-basierten Dämmung am Feeder-trog

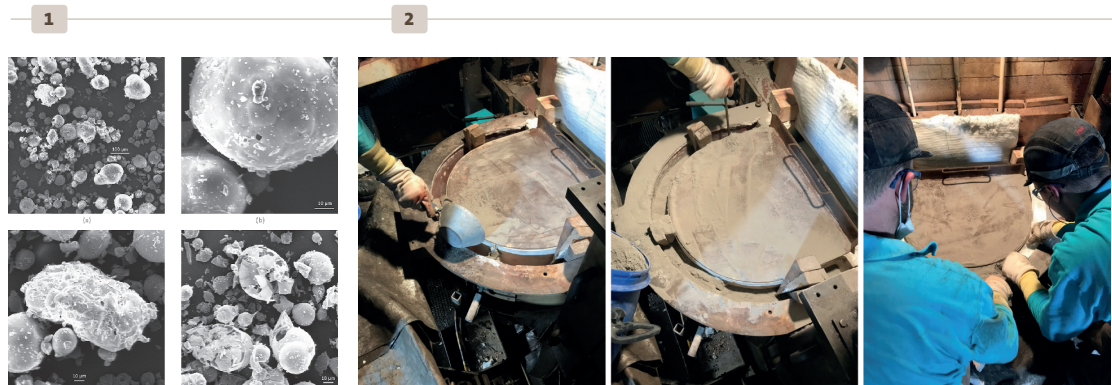
Fig. 2: Application of the perlite-based insulation at the feeder trough

Die Wärmewende gerät immer mehr in Fahrt, sowohl im Privaten, wo der Heizmarkt sich derzeit drastisch wandelt, als auch in der Industrie. Neben neuen Energieträgern und Wärmequellen ist dort auch die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen ein großer Faktor, besonders bei energieintensiven Anlagen, die im Hochtemperaturbereich bis 1.500 °C arbeiten. Durch Verminderung des Wärmeverlusts können hier oft große Energiemengen eingespart werden. Daher forscht das ZAE seit vielen Jahren erfolgreich an Hochtemperaturdämmungen.

Im Verbundvorhaben „HT-VSI: Entwicklung einer Vakuumsuperisolation als hocheffiziente Wärmedämmung für industrielle Hochtemperatur-Anwendungen“ wurde eine Pulverschüttung auf Basis von Perlit (Abb. 1) entwickelt und direkt in die praktische Anwendung überführt. Dazu wurde in einer Glasfabrik bei einem Feedertrough – einer offenen Wanne, über die flüssiges Glas einer Formungsmaschine zugeführt wird – die bestehende Isolation durch die neuartige Schüttung ersetzt (Abb. 2). Ein Jahr später hat sich die Dämmung nun in der Praxis bewährt und ihre Wirtschaftlichkeit bewiesen.

The transformation of the heating sector keeps picking up momentum in both the private sector, where the market is currently undergoing drastic changes, and in industry. There, alongside finding new energy carriers and heat sources, the implementation of efficiency measures is a major factor, especially for energy-intensive plants which operate in the high-temperature range up to 1,500 °C. These can often save significant amounts of energy by reducing heat loss. Consequently, ZAE Bayern has been successfully researching high-temperature insulation systems for many years.

In the joint project "HT-VSI" on the development of a highly efficient vacuum super insulation for industrial high-temperature applications, a powder fill based on perlite (Fig. 1) was developed and put right into practical use. To this end, the insulation of a feeder trough – an open vat through which molten glass is fed to a forming machine – was replaced with the novel powder fill in a glass factory (Fig. 2). One year later, the insulation has been tried and tested in the field and proven its cost-effectiveness.



Die Reduktion des Wärmeverlusts am Feeder war zwar groß, ins Verhältnis zum Gesamtenergieverbrauch einer Glasfabrik gesetzt fällt sie aber wenig ins Gewicht. Viel mehr Energie wurde eingespart, weil durch die heißere Schmelze weniger Fehlstellen im Glas auftraten. Die Ausschussrate der Anlage mit dem neu gedämmten Trog sank auf null. Außerdem machte die bessere Isolierung längere Aufheizphasen und ein Wiederanfahren bzw. Temperieren der weiteren Produktionsstätten unnötig.

Eine weitere Anwendung, für die die Pulverschüttung sich als geeignet erwies, ist ihr Einsatz in evakuierten Umhüllungen an thermisch hoch belasteten Versuchsanlagen. Eine Messstrecke des ZAE zur Charakterisierung von Zeolithschüttungen wurde ebenfalls damit ausgestattet (Abb. 3). Hier liegen die Vorteile hauptsächlich in der durch das Vakuum bedingten weiteren Reduktion der Wärmeverluste und der vergleichsweise geringen Wärmekapazität des eingesetzten Perlits. Dessen Dichte liegt bei ca. 250 kg/m^3 , während der gängige Hochtemperaturdämmstoff Calciumsilikat auf 2.000 kg/m^3 kommt. Bei vergleichbarer Dämmwirkung sinkt so die Wärmekapazität auf ein Zehntel, der Wärmeverlust auf etwa ein Fünftel des Ursprungswertes. So ist eine schnellere Zyklisierung der Proben mit höherer Messgenauigkeit möglich. Dabei wird auch durch die verkürzte Laufzeit der Messungen eine signifikante Energiemenge eingespart.

Bewährt sich die Dämmung im Versuch langfristig, kann sie auch in realen Anlagen zum Einsatz kommen. Beispielsweise könnten mobile Wärmespeicher damit ausgestattet und so auch bei dieser Anwendung der Wärmeverlust reduziert werden.

Heat loss at the feeder was significantly reduced, yet in relation to the total consumption of a glass factory, the saved amount of energy was rather marginal. The hotter melt, however, resulted in fewer glass defects, thereby considerably reducing total energy consumption. The plant's reject rate dropped to zero with the newly insulated trough. Also, the improved insulation rendered extended heating phases and the restarting or tempering of other production facilities unnecessary.

Another application for which the powder proved suitable is its use in evacuated enclosures on experimental installations subjected to high thermal loads. ZAE's measuring system for the characterisation of zeolite fills was also equipped with it (Fig. 3). Here, the advantage lies mainly in a further reduction of heat loss due to the vacuum and the perlite's comparatively low heat capacity. Its density ranges around 250 kg/m^3 , while the common high-temperature insulation material calcium silicate comes to $2,000 \text{ kg/m}^3$. With a comparable insulation effect, the heat capacity is thus reduced to one tenth, the heat loss to about one fifth of their original values. This allows for faster cycling of samples at higher measurement accuracy. Also, the shorter runtime of the measurements saves a significant amount of energy.

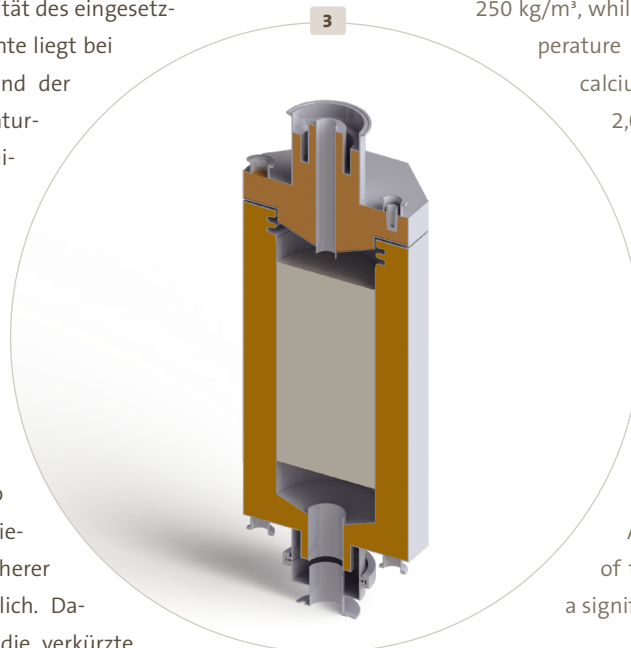


Abb. 3: Kolonne zur Vermessung der Durchbruchkurven von Zeolithproben mit Dämmschicht aus Perlit (orange)

Fig. 3: Column for determining breakthrough curves of zeolite samples with insulating perlite layer (orange)

Once the insulation has proven its long-term reliability, it can enter service in operational systems. For example, mobile heat storages could be equipped with it to reduce heat loss in this application as well.

1.5

MODIFIZIERTE MONOPOLARPLATTEN FÜR METALLFREIE STAPELENDEN IN FLUSSBATTERIEN

MODIFIED MONOPOLAR PLATES FOR METAL-FREE STACK ENDS IN FLOW BATTERIES

Autor | Author
M. Radspieler

Ansprechpartner | Contact
Dipl.-Ing. (FH) Michael Radspieler
Elektrochemische Energiespeicher
Electrochemical Energy Storage
+49 89 329442-54
michael.radspieler@zae-bayern.de

Fördermittelgeber | Funding
Bundesministerium für
Wirtschaft und Klimaschutz
(FKZ 03EI3030D)

Kooperationspartner | Partners
Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme
J. Schmalz GmbH
SGL Carbon SE

Flussbatterien sind skalierbare elektrische Energiespeicher, die die Einbindung erneuerbarer Energiequellen mit ihren Produktionsschwankungen ins Stromnetz erleichtern können. Im Gegensatz zu ihren herkömmlichen Gegenstücken wie Lithium-Ionen-Akkus nutzen sie einen flüssigen Elektrolyten als Speichermedium, der mittels einer Flusszelle gelad und entladen wird. So werden die Leistung der Batterie (bestimmt durch die Größe der Flusszelle) und ihre Kapazität (bestimmt durch die Größe der Elektrolytbehälter) unabhängig voneinander anpassbar.

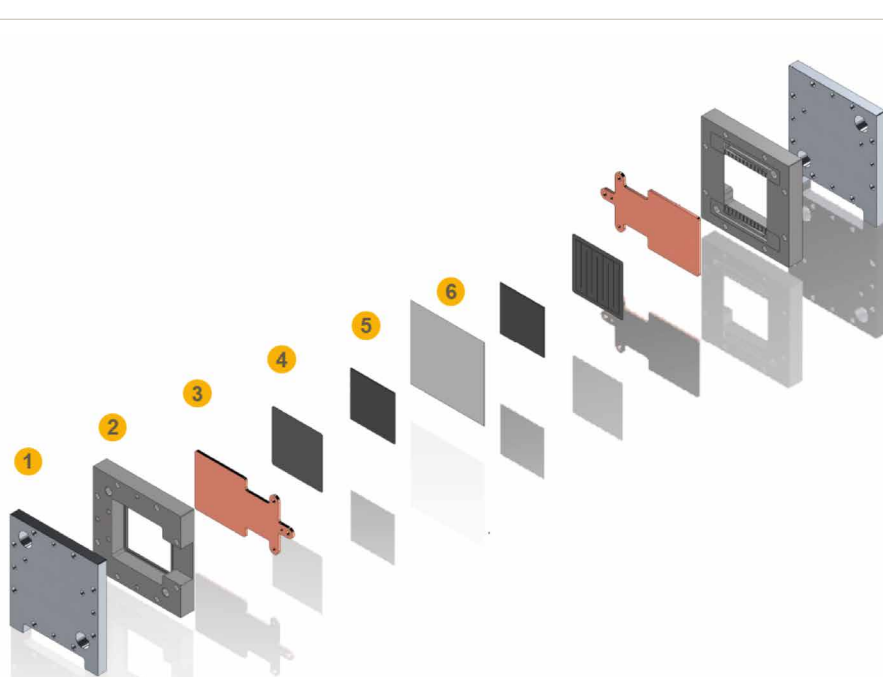
Da in Flusszellen (Abb. 1) hohe elektrische Spannungen auftreten und der verwendete Elektrolyt stark korrosiv ist, werden ihre internen Bauteile aus entsprechend beständigen, nichtmetallischen Materialien gefertigt.

Flow batteries are scalable electrical energy storages that can facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources into the power grid. Unlike their conventional counterparts, such as lithium-ion batteries, they store energy in a liquid electrolyte which is charged and discharged through a flow cell. This allows for individual adjustment of the battery's performance (determined by flow cell size) and capacity (determined by the size of the electrolyte tank).

Since high electrical voltages occur in flow cells (Fig. 1) and the employed electrolyte is highly corrosive, their internal components are built from correspondingly resistant, non-metallic materials.

Abb. 1: Explosionszeichnung einer herkömmlichen symmetrischen Einzelzelle mit Endplatte zur mechanischen Stabilisierung (1), Flussrahmen (2), kupfernem Stromabnehmer (3), Monopolarplatte (4), poröser Elektrode (5) und Membran (6)

Fig. 1: Exploded view of a conventional symmetrical single cell with end plate for mechanical stabilisation (1), flow frame (2), copper current collector (3), monopolar plate (4), porous electrode (5), and membrane (6)



Dabei kommen meist Kunststoffe oder Materialien aus Graphit bzw. Verbundstoffe aus beiden zum Einsatz. Lediglich an den Stapelenden, also der jeweils ersten und letzten Zelle des Stapels, dienen metallische Platten, meist aus Kupfer oder Aluminium, als Stromabnehmer. Diese werden durch Dichtungen und eine flüssigkeitsdichte, aber elektrisch leitfähige Schicht, die sogenannte Monopolarplatte, vom korrosiven Elektrolyten getrennt. Weil im Elektrolyten gespeicherte elektrische Energie zunächst durch diese Monopolarplatte fließen muss, um den metallischen Stromabnehmer zu erreichen, hängt die Leistung der Batterie gleichermaßen von der Leitfähigkeit der Monopolarplatte und ihrem elektrischen Kontakt zum Stromabnehmer ab. Eine Wartung solcher Anlagen im Betrieb ist nicht wirtschaftlich möglich, entsprechend müssen elektrische Kontaktierung und hydraulische Trennung vom Elektrolyten über die gesamte Lebensdauer der Batterie konstant aufrechterhalten werden.

Um diese Bauweise zu vereinfachen, wird im Projekt *EmboPlate* der Einsatz deutlich dickerer Monopolarplatten (> 4 mm statt 0,6 mm) untersucht, die metallische Stromabnehmer unnötig machen sollen (Abb. 2). Die Materialien dieser Platten weisen allerdings eine im Vergleich um Größenordnungen geringere Leitfähigkeit auf.

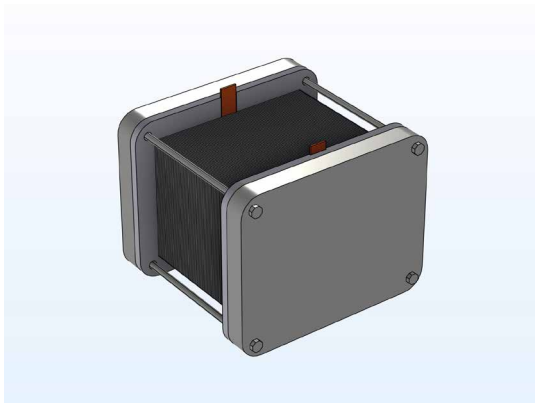
In most cases, these are plastics, graphite-based materials, or composites of the two. Only at the stack ends, i.e. the first and last cell of a battery stack, metallic plates, usually made of copper or aluminium, serve as current collectors. These are kept separate from the corrosive electrolyte by seals and a liquid-tight but electrically conductive layer, the so-called monopolar plate. Since electrical energy stored in the electrolyte must pass through this monopolar plate to reach the metallic current collector, the battery's performance depends equally on the conductivity of the monopolar plate and its electrical contact with the current collector. Maintenance of such systems during operation is not economically feasible, so electrical contact and hydraulic separation from the electrolyte must remain constant over the entire service life of the battery.

To simplify this design, the *EmboPlate* project inquires into the use of significantly thicker monopolar plates (> 4 mm instead of 0.6 mm) with the intention of rendering metallic current collectors unnecessary (Fig. 2). However, the materials used in these plates exhibit a conductivity, which is orders of magnitude lower in comparison.

2

Abb. 2: Herkömmlicher Zellstapel mit schmalen Stromabnehmer aus Kupfer (l.), neuer Zellstapel mit breitem, metallfreiem Stromabnehmer (r.)

Fig. 2: Conventional cell stack with narrow current collector made of copper (l.), new cell stack with wide, metal-free current collector (r.)

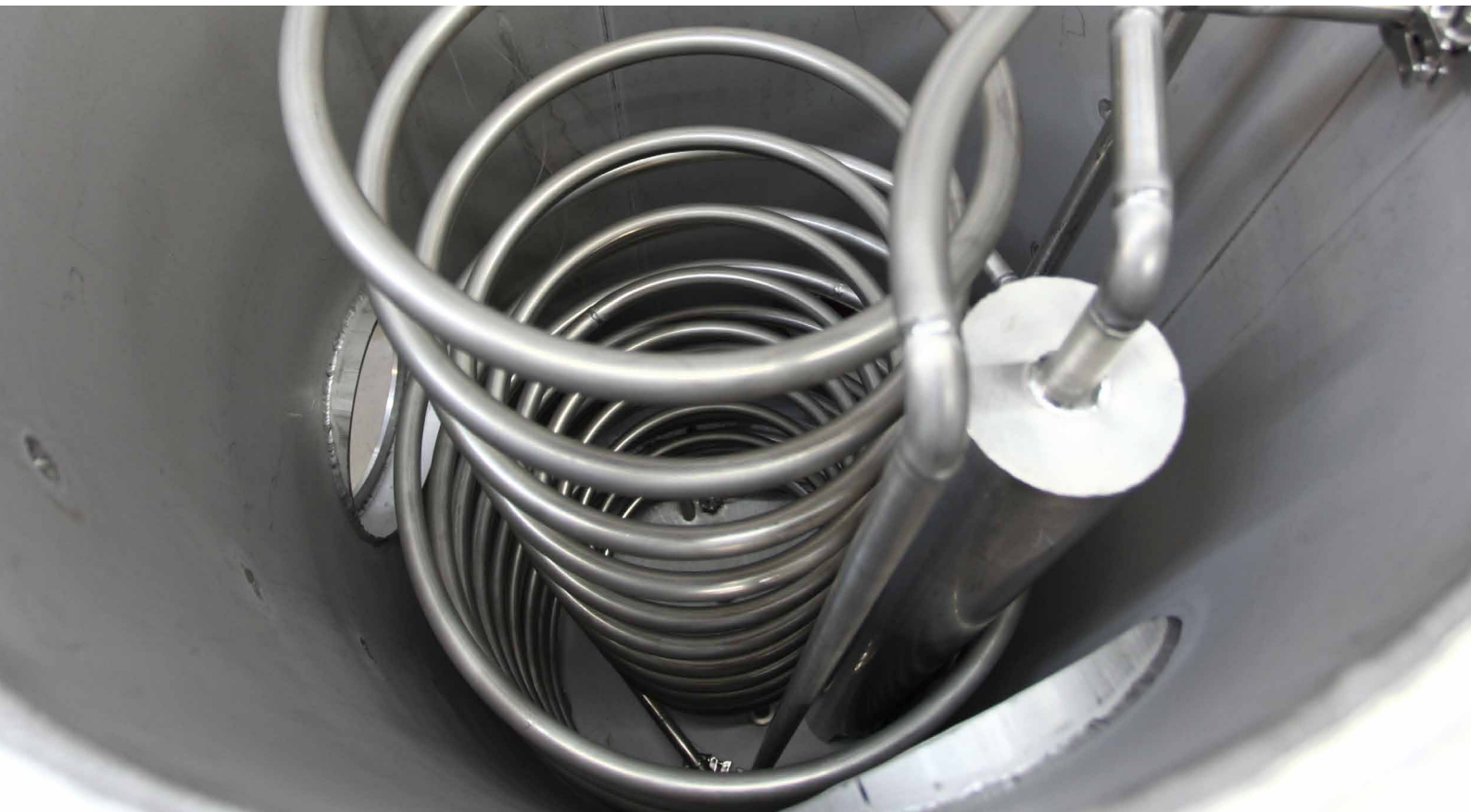


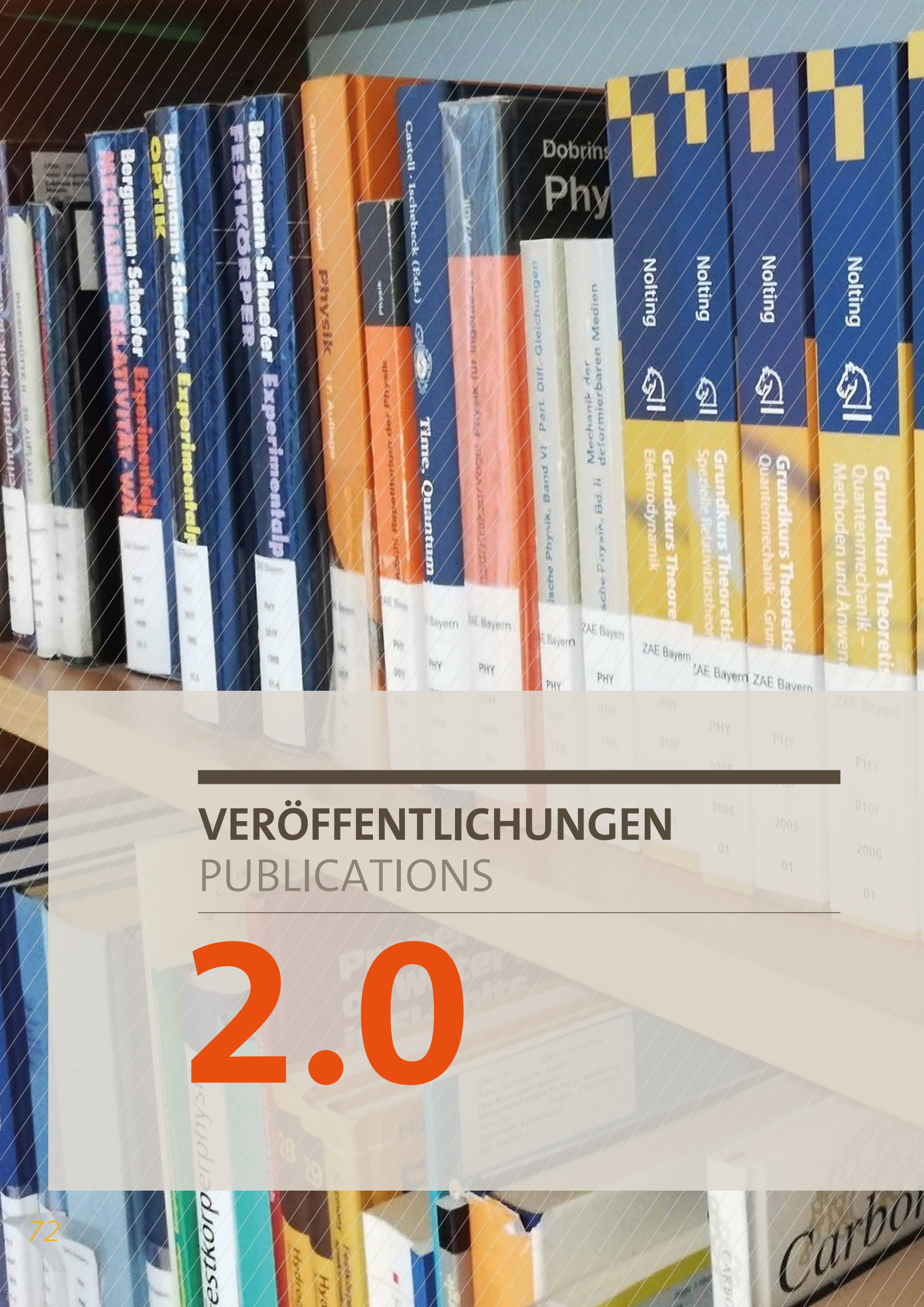
Daher wurde auch die Kontaktfläche vergrößert, auf der der Strom abgegriffen wird, um die Stromdichte zu minimieren. So bleibt die elektrische Verlustleistung klein genug, um die Effizienz der Flussbatterie nicht zu beeinträchtigen und den Elektrolyten vor Überhitzung zu schützen. Dieser kann, je nach verwendeter Stoffkombination, bereits durch kurzzeitige Erhitzung auf 40 °C irreversibel beschädigt werden.

Die bisher ausgeführten Arbeiten umfassen Leitfähigkeitsmessungen an dicken Monopolarplatten und Simulationen der Verlustleistung der Flussbatterie in Abhängigkeit von Abnehmergeometrie und Betriebszustand. Dabei erwärmte sich der Elektrolyt, bei korrekter Auslegung der Zellstapel, im nominalen Betrieb um weniger als 1 K. Somit liegt die Verlustleistung deutlich unter einem Prozent der elektrischen Leistung eines marktüblichen Zellstapels. Als nächster Schritt folgen Messungen an Flussbatterien mit metallfreien Stapelenden im Labormaßstab.

Therefore, the contact area on which the current is tapped was also increased in order to minimise current density. Electrical power loss thus remains small enough not to impair the flow battery's efficiency while also protecting the electrolyte from overheating. Depending on the combination of substances used, the latter may be irreversibly damaged by, even briefly, heating it to 40 °C.

The work carried out to date includes conductivity measurements on thick monopolar plates and simulations of the flow battery's power loss as a function of current collector geometry and state of operation. With correctly designed cell stacks, the electrolyte's temperature rose by less than 1 K in nominal operation. Consequently, the power loss is significantly below one percent of a commercially available cell stack's electrical power. In a next step, laboratory-scale measurements will be carried out on flow batteries with metal-free stack ends.






VERÖFFENTLICHUNGEN PUBLICATIONS

2.0

VERÖFFENTLICHUNGEN

PUBLICATIONS



Unsere Arbeit findet nicht nur im Labor und am Simulationsrechner statt. Forschung braucht Dokumentation, Wissenschaft braucht Gemeinschaft. Deshalb versuchen wir, die Resultate unserer Arbeit innerhalb der Wissenschaftsgemeinde und darüber hinaus sichtbar und nutzbar zu machen. Wir veröffentlichen unsere Forschungsergebnisse in referierten Fachzeitschriften, nehmen an Konferenzen und Tagungen teil, veranstalten Workshops und engagieren uns in der Lehre und Ausbildung künftiger Generationen von Forschenden. Wir sind in vielfältigen Expertengremien vertreten, beteiligen uns inhaltlich wie organisatorisch an Normierungsprozessen und Forschungsnetzwerken und versuchen auch sonst, unsere Expertise einzubringen, wo immer sie einen Mehrwert bietet. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über all diese Aktivitäten und Veröffentlichungen.

We do more than just laboratory work and computer simulations. Research needs documentation, science needs community. Therefore, we strive to make the results of our work visible and usable within the scientific community and beyond. We publish our findings in peer-reviewed journals, attend conferences and congresses, organise workshops, and contribute to the teaching and training of future generations of researchers. We hold seats on a variety of expert committees, contribute to standardisation processes and research networks in both content and organisation, and generally try to provide our expertise wherever it offers additional value. The following section provides an overview of all these activities and publications.

2.1 VORTRÄGE UND POSTER

PRESENTATIONS AND POSTERS

2.1.1

EINGELADENE PLENARVORTRÄGE PLENARY INVITED LECTURES

- A. Hauer, **Thermal Solutions for a Successful Heat Transition in Industry**, Enabling Heat Transition for the Industry: Heat Supply & Flexibility Options with Thermal Technologies, BETD/DCSP Side Event, online, 31.03.2022
- A. Hauer, **Heizen und Nutzung von Abwärme**, Energieeffizienz in der Industrie und im Gewerbe, digitale Geschäftsreise, Deutsch-Französische Industrie- und Handelskammer, online, 29.03.2022
- A. Hauer, **Energieversorgung mit erneuerbaren Energien durch Energiespeicherlösungen**, Erneuerbare Energien und Netzintegration, digitale Geschäftsreise, Deutsch-Griechische Industrie- und Handelskammer, online, 25.01.2022
- A. Hauer, **What is the Value of Energy Storage?**, 13th World Renewable Energy Technology Congress, online, 25.08.2022
- A. Hauer, **What is the Value of Energy Storage?**, 1st BVES Investor Summit, Berlin, Germany, 23.11.2022
- A. Hauer, **Compact Thermal Energy Storage Materials and Components**, 2nd IEA ES TCP OnSeminar, online, 17.02.2022
- A. Hauer, **Flexible Sector Coupling**, 2nd International Sustainable Energy Conference, Graz, Austria, 05.–07.04.2022
- A. Hauer, **Wärmenutzung aus thermischer Abfallbehandlung**, 34. ITAD-VDI-Fachkonferenz thermische Abfallbehandlung 2022, Würzburg, Germany, 22.09.2022
- A. Hauer, **What is the value of energy storage in our future energy system?**, 5th International Conference on Clean Energy Systems and Technologies, online/Dehradun, India, 14.10.2022
- A. Hauer, **The Role of Thermal Energy Storage in our Future Energy System**, EIRES Lunch Lecture, online, 14.01.2022
- A. Hauer, **Thermal Energy – The sleeping giant of the energy transition starts moving**, EIRES Workshop 2022, Eindhoven, the Netherlands, 01.07.2022
- A. Hauer, **Economics of Longterm Energy Storage in a Decarbonized Energy World**, European Commission Investors Dialogue on Energy, Working Group 3 – Storage, online, 21.09.2022
- A. Hauer, **Flexible Sector Coupling**, EuroSun 2022, Kassel, Germany, 25.–29.09.2022
- A. Hauer, **The Role of Thermal Energy Storage in our Future Energy System**, International Symposium on Thermal Energy Storage Science and Engineering 2022, online/Hokkaido, Japan, 24.03.2022
- A. Hauer, **Abwärmenutzung in Deutschland**, Internationale Fachmesse für Abwassertechnik 2022, Munich, Germany, 31.05.2022
- A. Hauer, **The Role of Thermal Energy Storage in our Future Energy System**, Online workshop on thermal energy storage for the European Commission, online, 11.05.2022
- A. Hauer, **Thermal Energy – The sleeping giant of the energy transition starts moving**, The Sixth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems, Barcelona, Spain, 25.–27.10.2022
- C. Rathgeber, **Compact Thermal Energy Storage Materials and Components**, 2nd IEA ES TCP OnSeminar, online, 17.02.2022
- C. Rathgeber, **New Ideas in the Energy Storage TCP: Economics – Medium Duration Storage – Building Mass Utilization**, 3rd IEA ES TCP OnSeminar, online, 17.03.2022
- C. Rathgeber, **Salt hydrates as PCM II – Mixtures of salt hydrates**, Latent Thermal Energy Storage Summer School 2022, Horw, Switzerland, 06.09.2022

2.1.2

FACHVORTRÄGE

CONTRIBUTED TALKS

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, W. Aich, **Holzpelletbetriebene Absorptionskälteanlage**, DKV-Tagung 2022, Magdeburg, Germany, 16.–18.11.2022

E. Lävemann, **Thermische Energiespeicher**, Netzwerktreffen EnBW Netzwerk Energieeffizienz und Klimaschutz, online, 14.07.2022

A. Maußner, **Increasing energy independence through the profitable use of energy efficiency and renewable energies**, German-Lithuanian-Estonian Expert Conference Energy Efficiency in Industry, Vilnius, Lithuania, 18.10.2022

M. Möckl, M. F. Ernst, M. Kornherr, F. Allebrod, M. Bernt, J. Byrknes et al., **Durability Testing of Low-Iridium PEM Water Electrolysis Membrane Electrode Assemblies**, 5th International Workshop on Degradation Issues of Fuel Cells and Electrolysers, Corfu, Greece, 03.–04.05.2022

D. Preßl, E. Lävemann, **Experimental Investigation of a Falling Film Horizontal Tube Bundle Absorber for Thermal Absorption Storage with H₂O/LiBr**, EuroSun 2022, Kassel, Germany, 25.–29.09.2022

D. Preßl, E. Lävemann, **Partiell kristallisierender Absorptionskältespeicher**, DKV-Tagung 2022, Magdeburg, Germany, 16.–18.11.2022

T. Schmetzer, R. Gurtner, **Task 65: Solar Cooling for the Sunbelt Regions** IEA SHC Solar Academy, online, 25./27.10.2022

H. Schmit, S. Pöllinger, C. Rathgeber, S. Tafelmeier, P. Hooock, S. Hiebler et al., **Trockeneisfreier Impfstofftransport – Entwicklung und Test von Kältespeicher-materialien**, DKV-Tagung 2022, Magdeburg, Germany, 16.–18.11.2022

H. Schmit, S. Pöllinger, C. Rathgeber, S. Tafelmeier, P. Hooock, S. Hiebler et al., **Development of a phase change material for vaccine transport without dry ice**, The Sixth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems, Barcelona, Spain, 25.–27.10.2022

L. Staudacher, P. Osgyan, G. Mederl, R. Zorn, H. Steger, **Eisfreihaltung von Oberflächen mit oberflächennaher Geothermie durch CO₂-Erdwärmesonden**, GeoTHERM expo & congress 2022, Offenburg, Germany, 02.–03.06.2022

S. Tafelmeier, S. Gschwander, S. Zunft, **Rolle thermischer Speicher im zukünftigen Energiesystem**, FVEE-Jahrestagung 2022, Berlin, Germany, 12.–13.10.2022

S. Tafelmeier, **Rolle thermischer Speicher im zukünftigen Energiesystem**, ETG-Fachtagung: Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie, Kassel, Germany, 21.09.2022

2.1.3

POSTER

POSTERS

C. Stegner, **Was ist schon ähnlich? Geeignete Volatilitätsmaße von elektrischen Haushaltslastprofilen zur Anwendung bei Gleichzeitigkeitsfaktoren und solarem Eigenverbrauch**, Tagung Zukünftige Stromnetze, Berlin, Germany, 26.–27.01.2022

G. Streib, C. Stegner, F. Solka, T. Plessing, **Innovatives Energieversorgungssystem für ein gewerbliches Quartier im Wandel**, 3. Kongress Energiewendebauen, Wuppertal, Germany, 09.–10.06.2022

G. Streib, V. Langer, F. Solka, T. Plessing, **Room-Integrated Large Hot Water Storage Tank**, EuroSun 2022, Kassel, Germany, 25.–29.09.2022

2.1.4

KOLLOQUIEN, SEMINARE, FOREN ...

COLLOQUIA, SEMINARS, FORUMS ...

M. Riepl, **Solare Kühlung und Klimatisierung – Technologie und Entwicklungen**, Bauzentrum München Web-Forum: Potentiale und Techniken in der Solarthermie, online, 11.05.2022

T. Schmetzer, **Methodology and challenges analyzing global data sets for scientific purposes using the example of a solar cooling GIS-based location study**, QGIS 24th Contributors Meeting, Florence, Italy, 18.–22.08.2022

2.2 VERÖFFENTLICHUNGEN PUBLICATIONS

2.2.1 REFERIERTE VERÖFFENTLICHUNGEN PEER-REVIEWED PUBLICATIONS

M. Möckl, M. F. Ernst, M. Kornherr, F. Allebrod, M. Bernt, J. Byrknes et al., **Durability Testing of Low-Iridium PEM Water Electrolysis Membrane Electrode Assemblies**, *J. Electrochem. Soc.*, 169, 2022, 064505, doi: 10.1149/1945-7111/ac6d14

M. Rottmann, T. Beikircher, **Pressure dependent effective thermal conductivity of pure and SiC-opacified expanded perlite between 293 K and 1073 K**, *Int. J. Therm. Sci.*, 179, 2022, 107652, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107652

A. Biber, M. Tunçinan, C. Wieland, H. Spliethoff, **Negative price spiral caused by renewables? Electricity price prediction on the German market for 2030**, *Electr. J.*, 35 (8), 2022, 107188, doi: 10.1016/j.tej.2022.107188

V. Dieterich, N. Wein, H. Spliethoff, S. Fendt, **Performance Requirements of Membrane Reactors for the Application in Renewable Methanol Synthesis: A Techno-Economic Assessment**, *Adv. Sustainable Syst.*, 6 (12), 2022, 2200254, doi: 10.1002/adsu.202200254

S. Eyerer, F. Dawo, C. Schiffler, A. Niederdränk, H. Spliethoff, C. Wieland, **Experimental evaluation of an ORC-CHP architecture based on regenerative preheating for geothermal applications**, *Appl. Energy*, 315, 2022, 119057, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119057

A. Hanel, S. Fendt, H. Spliethoff, **Impact of varying boundary conditions on the development of future energy systems**, *vgbe Energy Journal*, 11, 2022

R. Pili, C. Wieland, H. Spliethoff, F. Haglind, **Numerical analysis of feedforward concepts for advanced control of organic Rankine cycle systems on heavy-duty vehicles**, *J. Cleaner Prod.*, 351, 2022, 131470, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131470

S. Tafelmeier, S. Hiebler, **Molecular Dynamics Simulation of the Crystallization Behavior of Octadecane on a Homogeneous Nucleus**, *Crystals*, 12, 2022, pp. 2–11, doi: 10.3390/cryst12070987

2.2.2 BÜCHER, MANUSKRIPTE BOOKS, MANUSCRIPTS

T. Beikircher, M. Rottmann, **Vacuum Super Insulated Thermal Storage Systems for Buildings and Industrial Applications**, *Advances in Energy Storage: Latest Developments from R&D to the Market*, ed: A. Hauer, Wiley, Hoboken, 2022, pp. 655–674, ISBN 978-1-119-23935-2

A. Hauer, **Energy Storage Solutions for Future Energy Systems**, *Advances in Energy Storage: Latest Developments from R&D to the Market*, ed: A. Hauer, Wiley, Hoboken, 2022, pp. 1–16, ISBN 978-1-119-23935-2

A. Hauer, E. Lävemann, **Thermal Energy Storage – An Introduction**, *Advances in Energy Storage: Latest Developments from R&D to the Market*, ed: A. Hauer, Wiley, Hoboken, 2022, pp. 591–606, ISBN 978-1-119-23935-2

C. Rathgeber, E. Lävemann, A. Hauer, **Economy of Thermal Energy Storage Systems in Different Applications**, *Advances in Energy Storage: Latest Developments from R&D to the Market*, ed: A. Hauer, Wiley, Hoboken, 2022, pp. 749–760, ISBN 978-1-119-23935-2

2.2.3

REFERIERTE TAGUNGSBANDBEITRÄGE CONFERENCE PAPERS

M. Kausche, M. Helm, M. Riepl, **Two-stage biomass-fired absorption heating and cooling system**, 2nd International Sustainable Energy Conference, Graz, Austria, 05.–07.04.2022

D. Preßl, E. Lävemann, **Experimental Investigation of a Falling Film Horizontal Tube Bundle Absorber for Thermal Absorption Storage with H₂O/LiBr**, EuroSun 2022, 179, Kassel, Germany, 25.–29.09.2022

G. Backofen, F. Kerscher, S. Gleis, H. Spliethoff, **The Influence of Thermochemical Energy Storages with CaO/Ca(OH)₂ on Future Industrial Energy Systems with High Temperature Steam Demand**, The 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Copenhagen, Denmark, 03.–07.07.2022

E. Talebi, L. Morgenstern, M. Würth, F. Kerscher, H. Spliethoff, **Effect of Multiple Storage Cycles on Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds for Thermochemical Energy Storage**, 24th Fluidized Bed Conversion Conference, Gothenburg, Sweden, 08.–11.05.2022

F. Kaufmann, C. Schiffler, C. Wieland, H. Spliethoff, **Techno-Economic Evaluation of reversible Organic Rankine Cycles in geothermal combined Heat and Power Plants**, The 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Copenhagen, Denmark, 03.–07.07.2022

L. Morgenstern, E. Talebi, S. Gleis, F. Kerscher, H. Spliethoff, **Experimental Investigation of CaO/Ca(OH)₂ for Thermochemical Energy Storage – Commissioning of a 0.5 kWh Experimental Set-Up**, 24th Fluidized Bed Conversion Conference, Gothenburg, Sweden, 08.–11.05.2022

C. Schiffler, L. Irrgang, F. Kaufmann, C. Martin Apolinario, C. Wieland, H. Spliethoff, **Optimal integration of different absorption chillers in geothermal trigeneration systems with Organic Rankine Cycles**, The 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Copenhagen, Denmark, 03.–07.07.2022

C. Schiffler, L. Irrgang, C. Wieland, H. Spliethoff, **Efficient and flexible plant configurations for geothermal trigeneration systems with an Organic Rankine Cycle**, European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany, 17.–22.10.2022, pp. 425–432, ISBN 978-2-9601946-2-3

L. Staudacher, P. Osgyan, Y. Apfel, M. Martin, **Geothermal de-icing using a two-phase borehole heat exchanger**, European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany, 17.–22.10.2022, pp. 404–407, ISBN 978-2-9601946-2-3

C. Stegner, **Was ist schon ähnlich? Geeignete Volatilitätsmaße von elektrischen Haushaltslastprofilen zur Anwendung bei Gleichzeitigkeitsfaktoren und solarem Eigenverbrauch**, Tagung Zukünftige Stromnetze, online, 26.–27.01.2022, pp. 200–209, ISBN 978-3-948176-16-7

W. van Helden, A. Hauer, D. Lager, S. Doppiu, G. Englmaier, R. Djebbar, C. Rathgeber et al., **Compact Thermal Energy Storage: Materials within Components within Systems**, 2nd International Sustainable Energy Conference, Graz, Austria, 05.–07.04.2022, pp. 404–406

2.2.4

TECHNISCHE BERICHTE TECHNICAL REPORTS

R. Gurtner, D. Eckl, R. Jennes, **Industrielle Abwärmenutzung einer Gießerei durch thermische Energiespeicherung in Kombination mit einem Absorptionsprozess – iAST**, FKZ 03ESP370A-C, BMWi

D. Kucevic, B. Tepe, B. Schachler, T. Röpcke, K. Helfenbein, P. Dotzauer, H. C. Hesse, A. Jossen, **Open Battery Models for Electrical Grid Applications – open_BE**, FKZ 03ET4072, BMWK

2.2.5

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN MISCELLANEOUS PUBLICATIONS

T. Beikircher, P. Osgyan, M. Rottmann, **Opacified Perlite-Based Superinsulation for Industrial Use up to 800°C**, Global Gypsum Magazine, Burlington, Canada, 11/2022, pp. 46–48

2.3 STUDIENABSCHLUSSARBEITEN UND DISSERTATIONEN

DEGREE AND DOCTORAL THESES

2.3.1

STUDIENABSCHLUSSARBEITEN DEGREE THESES

J. Mathes, **Programmierung und Parameteroptimierung von Simulationsmodellen zur Analyse des Wärmeübergangs bei Absorption und Verdampfung in thermisch angetriebenen Wärmepumpen sowie deren Validierung anhand experimenteller Werte**, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Fakultät Umweltingenieurwesen, 06/2022, Bachelor

G. Mederl, **Inbetriebnahme eines Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Übertragungsleistung von CO₂-Sonden im Realmaßstab**, Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, 06/2022, Master

V. Menne, **Electrochemical Investigations on Vanadium Redox Flow Batteries**, Hochschule München, Department of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering, 04/2022, Master

2.3.2

DISSERTATIONEN DOCTORAL THESES

C. Rathgeber, **Mischungen aus Salzhidraten und Salzen als Phasenwechselmaterialien: Thermodynamische Modellierung und experimentelle Untersuchung von fest-flüssig Phasendiagrammen**, Technische Universität Berlin, Fakultät III – Prozesswissenschaften, 01.05.2022

2.4 PATENTE

PATENTS

R. Gurtner, M. Riepl, C. Wuschig, M. Helm, **Zweistufige Sorptionswärmepumpe mit großem Temperaturhub**, DE102018220128A1, Patent, 30.03.2022

2.5 MITARBEIT IN GREMIEN

MEMBERSHIP IN COMMITTEES

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

DR. A. HAUER

Member of Scientific Committee, **2nd International Sustainable Energy Conference**, Graz, Austria, 05.–07.04.2022

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

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

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

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

Member of Scientific Committee, **EnerStock Conference**

Member of the Steering Committee, **EU Investors Dialogue on Energy, Working Group 3 "Energy Storage"**, European Commission, Brussels, Belgium

Theme-Chair "Thermal Energy Storage", **EuroSun 2022**, Kassel, Germany, 25.–29.09.2022

Mitglied des Direktoriums, **Forschungsverbund Erneuerbare Energien**, Berlin, Germany

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

Tagungsbeirat, **International Renewable Energy Storage Conference 2022**, Düsseldorf, Germany, 20.–22.09.2022

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

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

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

Task-Manager, **Task 41 "Economics of Energy Storage – EcoEneSto"**, International Energy Agency Energy Storage Technology Collaboration Programme

Scientific Chair, **Volta-X Conference**, Stuttgart, Germany

DR. S. HIEBLER

Mitglied, **Arbeitsausschuss Thermische Energiespeicher**, ProcessNet, Frankfurt am Main, Germany

DR. J. M. KUCKELKORN

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

Mitglied, **Richtlinienausschuss VDI 4640 "Thermische Nutzung des Untergrundes", Blatt 6 "Baustoffe zum Verfüllen von Erdwärmesonden-Bohrungen"**, Düsseldorf, Germany

J. KUNKEL

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

DR. C. RATHGEBER

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

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

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

Mitglied, Richtlinienausschuss VDI 4657
 "Planung und Integration von Energiespeichern in Gebäudeenergiesysteme Thermische Energiespeicher", Blatt 2
 "Projekt", Düsseldorf, Germany

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

Expert, Task 41 "Economics of Energy Storage – EcoEneSto", International Energy Agency Energy Storage Technology Collaboration Programme

DR.-ING. M. RIEPL

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

Mitglied des Vorstands/Schatzmeister, Green Chiller Verband für Sorptionskälte e. V., Berlin, Germany

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

PROF. DR.-ING. HARTMUT SPLIETHOFF
 Vorstand und vorsitzender Beirat, Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e. V., Essen, Germany

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

Gutachter, Gutachtertätigkeit bei der EU und diversen Forschungseinrichtungen

Member, The Combustion Institute, deutsche Sektion, Göttingen, Germany

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

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

L. STAUDACHER

Mitglied, Richtlinienausschuss VDI 4640 "Thermische Nutzung des Untergrundes", Blatt 4 "Direkte Nutzungen", Düsseldorf, Germany

Expert, Crystals, Task 38 "Ground Source De-Icing and Snow Melting Systems for Infrastructure", International Energy Agency Energy Storage Technology Collaboration Programme

DR. S. TAFELMEIER

Secretary, International Energy Agency Energy Storage Technology Collaboration Programme

2.6 AKADEMISCHE LEHRVERANSTALTUNGEN

ACADEMIC COURSES

P. OSGYAN

Praktikum Regenerative Energien (Solarthermie), Technische Universität München, SS 2022, WS 2022/23

Lab Course Energy Systems for MSPE (Solar Thermal), Technische Universität München, SS 2022, WS 2022/23

H. SPLIETHOFF

Regenerative Energiesysteme I, Technische Universität München, WS 2021/22

Regenerative Energiesysteme II, Technische Universität München, SS 2022

Strom- und Wärmespeicher im Energiesektor, Technische Universität München, WS 2021/22

Thermal Power Plants, Technische Universität München, SS 2022

Thermische Kraftwerke, Technische Universität München, WS 2021/22

Energetische Nutzung von Biomasse und Reststoffen, Technische Universität München, WS 2021/22

Wasserstoff-Technologien für ein nachhaltiges Energiesystem, Technische Universität München, WS 2021/22

Prozesstechnik thermischer Abfallbehandlungsanlagen, Technische Universität München, SS 2022

2.7 SONSTIGES

MISCELLANEOUS

C. DANY, M. KAUSCHE

Artikel, **Brennstoffverbrauch um die Hälfte reduzieren mit einer Biomasse-Wärmepumpe**, Heat & Power, 4–5/2022, pp. 29–33

Artikel, **Wärmepumpe halbiert Brennstoffbedarf**, VDI Nachrichten, 11.02.2022, Nr. 3, p. 15

Artikel, **Biomasse-Wärmepumpe**, Umweltbriefe aus Kommunen und Forschung, 04/2022, p. 9

A. HAUER

Podiumsdiskussion, **IRES FORUM: Public window on the IRES Conference 2022**, Expo for Decarbonised Industries 2022, Düsseldorf, Germany, 20.–22.09.2022

Podiumsdiskussion, **Cutting Industry emissions through energy efficiency & integration of renewables**, SET-Plan Conference, Prague, Czech Republic, 09.–10.11.2022

Podiumsdiskussion, **Offshore Energy Hubs**, International Energy Agency Wind Technology Collaboration Programme Webinar, online, 02.12.2022

Podiumsdiskussion, **Strategien zur Wärmewende, Sektorenkopplung und Steigerung der Energieeffizienz**, 8. Dialogplattform Power-to-Heat, VDE/ETG, online, 15.12.2022

Session Chair, **Ausgewählte Schlüsseltechnologien für die Wärmewende**, FVEE-Jahrestagung 2022, Berlin, Germany, 12.–13.10.2022

Theme Chair, **Thermal Energy Storage**, EuroSun 2022, Kassel, Germany, 25.–29.09.2022

M. KAUSCHE

Artikel, **Absorptionskälteanlage mit Holzpelletfeuerung**, KI – Kälte, Luft, Klimatechnik, Oktober 2022, pp. 51–55

Artikel, **Holzpellets zur Kälteerzeugung**, KKA – Kälte, Klima, Aktuell, 01/2022, pp. 32–35

ADRESSEN ADDRESSES

GARCHING

Walther-Meißner-Str. 6
85748 Garching
Germany
T + 49 89 329442-0
F + 49 89 329442-12
info@zae-bayern.de



HOF

Bismarckstr. 28
95028 Hof
Germany



HERAUSGEBER PUBLISHER

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

ZAE Bayern – Bavarian Center for Applied Energy Research

Walther-Meißner-Straße 6 | 85748 Garching | T +49 89 329442-0 | F +49 89 329442-12

www.zae-bayern.de | info@zae-bayern.de

TEXTBEITRÄGE UND FOTOS ARTICLES AND PHOTOS

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

by ZAE Bayern staff members; photos, unless otherwise specified, © ZAE Bayern

REDAKTION UND BEARBEITUNG COORDINATION AND EDITING

Jan Kunkel

KONZEPT UND DESIGN CONCEPT AND DESIGN

punktschmiede, visuelle kommunikation, München

COPYRIGHT

ZAE Bayern, Garching, August 2023

Alle Rechte vorbehalten. Vervielfältigungen, Kopie oder Weitergabe nur mit schriftlicher Genehmigung.

ZAE Bayern, Garching, August 2023

All rights reserved. No reproduction, copy, or transmission of this publication without written permission.