

IEA Solares Heizen und Kühlen (SHC) Task 58 / Energieeinsparung durch Energiespeicherung (ECES) Annex 33: Material und Komponentenentwick- lung für thermische Energiespeicher

R. Köll, W. van Helden,
D. Lager, A. Werner,
B. Zettl, H. Schranzhofer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

28/2021

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

IEA Solares Heizen und Kühlen (SHC) Task 58/ Energieeinsparung durch Energiespeicherung (ECES) Annex 33: Material und Komponentenentwicklung für thermische Energiespeicher

Rebekka Köll, Wim van Helden
AEE INTEC

Daniel Lager
AIT

Andreas Werner
TU Wien

Bernhard Zettl
FH Oberösterreich

Hermann Schranzhofer
TU Graz

Gleisdorf, Jänner 2021

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

IEA SHC Task 58/ECES Annex 33	3
1 Kurzfassung	6
2 Abstract	8
3 Ausgangslage	10
4 Projektinhalt	11
4.1. Ziele.....	11
4.2. Struktur und Methode	12
4.2.1. Inhalte Subtask 1	13
4.2.2. Inhalte Subtask 2	13
4.2.3. Inhalte Subtask 3	13
4.2.4. Inhalte Subtask 4	13
4.3. Teilnehmer	14
5 Ergebnisse	15
5.1. Energierelevante Anwendung für anwendungsorientierte Entwicklung von verbesserten Speichermaterialien	15
5.2. Entwicklung und Optimierung von verbesserten Speichermaterialien.....	17
5.3. Messverfahren und Testung der Materialien unter anwendungsorientierten Bedingungen	20
5.4. Komponentendesign für innovative TES-Materialien.....	23
5.5. Übersicht der Publikation aus dem Task/Annex.....	25
6 Vernetzung und Ergebnistransfer	28
7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	29
7.1. Schlussfolgerung	29
7.2. Empfehlungen/weitere Arbeiten	29

1 Kurzfassung

Thermische Energiespeichertechnologien spielen eine zentrale Rolle bei der weiteren Integration von erneuerbaren Wärmequellen in das Energiesystem, angefangen von Gebäudeanwendungen bis hin zu Fernwärme- und Industrieanwendungen. Darüber hinaus bieten sie die notwendige Flexibilität für die Kopplung von Energiesektoren. Energiespeicherung durch sensible Wärme wird häufig genutzt, doch bei beschränktem Platzangebot, sehr langen Speicherzeiten oder wenn hohe Temperaturen benötigt werden, sind neue, kompakte thermische Speichertechnologien gefordert. Zum Einsatz in verschiedenen Energiesektoren müssen diese kompakten thermischen Speichertechnologien spezifisch weiterentwickelt werden. Die Motivation für den IEA SHC Task 58/ECES Annex 33 war die Weiterentwicklung von Speichermaterialien und Speicherkomponenten für kompakte thermische Energiespeicher durch bessere Kenntnis ihrer physikalischen und chemischen Grundlagen.

ExpertInnen aus den Bereichen Materialentwicklung, Komponentenentwicklung und Systemintegration arbeiteten drei Jahre vereint an der effizienten Entwicklung von Materialien und Komponenten für thermische Energiespeicher (TES). Durch die Zusammenarbeit sind MaterialwissenschaftlerInnen nun besser mit den tatsächlichen Rahmenbedingungen vertraut, unter denen Speichermaterialien funktionieren müssen, und die SystemingenieurInnen wissen genauer über Möglichkeiten der Speichermaterialien und deren Grenzen Bescheid. Die gemeinsame Betrachtung von Material- und Anwendungsbereich erlaubt eine passgenaue Entwicklung von Materialien und Speichersystemen.

Die Arbeiten wurden aufgeteilt in einen allgemeinen Teil zur Definition der Randbedingungen für eine Reihe von Anwendungen und einen technischen Teil, welcher in zwei parallelen Linien für die Technologieentwicklung und Charakterisierung von a) Phasenwechselmaterialien (PCM) und b) thermochemischen Materialien (TCM) auf Material- und Komponentenebene geteilt wurde.

Für verschiedene Anwendungen der thermischen Energiespeicherung wurden Randbedingungen definiert, welche als Basis für eine effiziente Material-, Komponenten- und Systementwicklung dienen. Insbesondere für die Anwendung Raumheizung/Heißwasser ermöglichen sich dadurch vergleichbare und repräsentative Messergebnisse.

Bei PCM gestaltet sich die Reproduzierbarkeit der Materialcharakterisierung als große Herausforderung. In vorangegangenen Projekten gelang es, ein Messverfahren zur reproduzierbaren Bestimmung der Phasenübergangstemperatur und -enthalpie zu definieren. Im vorliegenden Projekt wurde ein standardisiertes Messverfahren für die Wärmeleitfähigkeit und für die Wärmekapazität von PCM erarbeitet und in Round-Robin Versuchen getestet.

Parallel wurde ein Inventar von neu entwickelten TCM-Materialien erstellt, welches auch den Fortschritt im Feld der Kompositmaterialien abbildet. Die Composite haben besonders gute Eigenschaften bezüglich Stabilität und Speicherenthalpie. Wie für PCM, wurde auch für TCM in Round-Robin Versuchen mit Erfolg an der besseren Vergleichbarkeit von Messungen gearbeitet, wobei bei Salzhydraten hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Weitere Ergebnisse der Kooperation sind die systematische Beschreibung von Reaktor-Designs und die Inventur von in der Praxis erprobten Designs bei TCM.

Die Leistung des Speichermaterials wird vom spezifischen Einsatz im Bauteil beeinflusst. Daher galt es einen Weg zu finden, um aus Materialeigenschaften auf die Performance in der Komponente zu schließen. Dazu wurde zunächst ein Überblick über die verschiedenen Konzepte der Komponentengestaltung gewonnen. Als erster Schritt wurden Konstruktionsrichtlinien formuliert z.B. für Wärmetauscher anhand einheitlicher Leistungsindikatoren. Dieser Indikator soll in zukünftigen Arbeiten verwendet werden, um verschiedene Wärmetauscher-Designs und Auslegungsmethoden zu vergleichen.

2 Abstract

Thermal energy storage technologies play an enabling role in further integrating renewable heat sources in the energy system, from domestic applications to district heating and industrial applications. Furthermore, they provide the necessary flexibility for the coupling of energy sectors. In a number of state-of-the-art applications, the primary technology is the sensible storage of heat in water. When higher temperatures, volume restrictions, or very long storage periods come into play, new compact thermal storage technologies are needed. These compact thermal storage technologies need further development to be applicable in the different energy sectors. This was the motivation for SHC Task 58/ECES Annex 33: Improvement of storage material and component development for compact thermal energy storages based on a better knowledge of the underlying physics and chemistry.

The joint project, IEA SHC Task 58/ECES Annex 33 on Material and Component Development for Thermal Energy Storage, achieved a remarkable three-year collaboration of experts from the fields of materials development, thermal storage component development, and system integration on thermal energy storage (TES) materials and components development. Through the collaboration materials scientists are now more familiar with the actual condition under which the storage materials have to perform, and the system engineers know more precisely about the possibilities and limitations of the storage materials. The joint consideration of materials and application areas allows for a precisely tailored development of materials and storage systems.

The work was divided in a general part to define the boundary conditions for a number of applications and a technical part, further divided into two parallel lines for a) phase change materials (PCM) technologies and b) thermochemical material (TCM) technologies working on materials, components and characterisation development.

Boundary conditions for various thermal energy storage applications were defined, in order to serve as a basis for efficient material, component and system development work. Especially for the application space heating/domestic hot water, the common set of boundary conditions allows the production of comparable and representative measurement results.

For PCM, the reproducibility of the material characterisation is a challenge. In previous projects experts achieved to define a measurement procedure which enables a reliable and reproducible determination of the phase transition temperature and enthalpy. In the present project, a standardized measurement procedure for the thermal conductivity and heat capacity of PCM was developed and tested with the round robin method, to achieve comparable results.

In parallel, an inventory on the newly developed TCM materials was compiled, which shows the advances in composite materials with better stability and higher storage enthalpy. As for PCM, also TCM have been subject of round robin tests, where an improvement of the sample preparation and testing procedure has led to good reproducibility of the measurement method, whereas for salt hydrates further investigations are needed. Further results are a classification of reactor designs and the inventory of designs for TCM that have been tested in real setups.

The storage material performance is influenced by the specific use in the component. Therefore, the properties of the material determined on material level cannot be used one to one in storage components and a way had to be found to infer the performance in the component from material

properties. To tackle this challenge, first an overview of the different component design concepts was made. As a first step, design guidelines were formulated, e.g. for heat exchangers based on unified performance indicators. In future work, this indicator will be used to compare different heat exchanger designs and design methods.

3 Ausgangslage

Mit dem wachsenden Anteil der erneuerbaren Energien im Energienetz wächst auch die Rolle der thermischen Energiespeicherung. Wärmespeichersysteme werden aufgrund ihres erheblichen Flexibilitäts- und Ausgleichspotentials in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Integration von erneuerbaren Energiequellen und Abwärme spielen [1]. Kompakten thermischen Energiespeichern kommt in einer Vielzahl von Anwendungen zur Energieversorgung (Gebäude, Netze, Industrie, Mobilität) und zur verstärkten Integration erneuerbarer Energieträger große Bedeutung zu, und zwar sowohl im Wärmesektor als auch durch Sektorkopplung wie beispielsweise Power2Heat [2] [3].

Einige wenige spezifische Wärmespeicherkonzepte sind bereits Teil unseres täglichen Lebens. So werden beispielsweise Wasserspeicher häufig zur Entkopplung der Strom- und Wärmeerzeugung von Heizkraftwerken eingesetzt. Ebenso werden vor allem in Dänemark und Deutschland großvolumige Wasserspeicher zur Speicherung von solarthermisch erzeugter Wärme für Fernwärmenetze genutzt. Im Gebäudebereich kommen Boiler für Warmwassererzeugung und Nutzung von günstigerem Nachtstrom ebenso zum Einsatz wie Pufferspeicher, welche in Kombination mit Solarthermie-Anlagen als Kurzzeitspeicher dienen [4]. Ein weiteres Beispiel sind konzentrierende Solarkraftwerke, die durch den Einsatz modernster Zwei-Tank-Molten-Salt Speichertechnik Solarstrom erzeugen.

Im Gebäudebereich spielt die Kompaktheit der Speichertechnologie eine große Rolle, da gerade in Ballungsräumen die Grundstückspreise stetig steigen und eine kompakte Bauweise und hohe Energiespeicherdichte der verwendeten Materialien zur Verminderung von Kosten beitragen können. Neben den schon bereits angewendeten sensiblen Wärmespeichern haben latente Wärmespeicher auf Basis von Phasenwechsel- (PCM) und thermochemischen Materialien (TCM) großes Potenzial, diese Anforderungen zu erfüllen [5]. In Verbindung mit einer intelligenten Betriebsweise steigt der Anteil an lokal erzeugter erneuerbarer Energie deutlich und die Energiekosten werden gesenkt [6].

Frühere Tasks/Annex des IEA SHC und des ECES, insbesondere Task 42/Annex 24 und deren Nachfolger Task 42/Annex 29, erreichten wesentliche Fortschritte im Verständnis von kompakten Wärmespeichermaterialien und Systemen besonders auf den Gebieten Speichermaterialien, Charakterisierung und Tests, Komponenten, Numerische Modelle, Wirtschaftlichkeit und Systemeinbindungen [1]. ExpertInnen sowohl aus dem Bereich der Materialien und Systemanwendungen und aus einer Vielzahl von Ländern, hauptsächlich aus Europa und Japan, schafften es, in sieben Jahren eine solide Wissensbasis effizient aufzubauen, kamen jedoch auch zum Schluss, dass eine Fortsetzung notwendig ist, insbesondere für weitere Materialentwicklung, Materialcharakterisierungstechniken und Komponentenentwicklung für Speichertechnologien auf Basis thermochemischer und Phasenwechsel-Materialien [7].

4 Projektinhalt

Der IEA SHC Task 58/ECES Annex 33 ist eine Zusammenarbeit der zwei IEA Programme *Solar Heating and Cooling* und *Energy Conversion and Energy Storage*. Der Task/Annex versucht, eine anwendungsorientierte Entwicklung von innovativen Speichermaterialien in drei Schritten zu unterstützen. Der erste Schritt ist die Charakterisierung des neuen Materials hinsichtlich seiner Eigenschaften wie Reaktionsenthalpie, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, etc.

In einem zweiten Schritt muss das Material unter definierten Referenzbedingungen getestet werden. Dabei werden Ergebnisse und Definitionen aus den vorherigen Tasks/Annex herangezogen. Diese umfassen ein Set von Rahmenbedingungen mit zwei Temperaturen für PCM (Lade- und Entladetemperatur) und vier Temperaturen oder Konzentrationen für TCM (Lade- und Entladetemperatur in Reaktor-Komponente und Lade- und Entladetemperatur in der Verdampfer-/Kondensator-Komponente). Das einheitliche Prüfverfahren ist von hoher Bedeutung, da die Energiedichte nicht nur eine Materialeigenschaft ist, sondern auch durch den Prozess maßgeblich bestimmt wird.

Der dritte Schritt konzentriert sich auf die Interaktion zwischen dem Speichermaterial und der Speicherkomponente, welche das Speichermaterial beinhaltet. Wichtig ist dabei vor allem die Untersuchung des Wärme- und Massentransfers im Reaktor.

4.1. Ziele

Die Hauptziele des gemeinsamen Task/Annex waren:

- Identifikation und Bewertung der TES-Anwendungsmöglichkeiten hinsichtlich der Anforderungen für das Speichermaterial
- Entwicklung und Charakterisierung von Speichermaterialien zur Verbesserung der TES-Leistung
- Entwicklung von neuen Methoden für die Materialcharakterisierung basierend auf Anwendungsbedingungen
- Entwicklung von Komponenten für kompakte thermische Energiespeichersysteme

Dieser Task/Annex befasst sich mit Materialien der zweiten Generation für PCM- und TCM-Energiespeicherung und umfasst die Materialentwicklung, die Charakterisierung und Prüfung unter Anwendungsbedingungen. Außerdem liegt der Fokus auf der Wechselwirkung zwischen Material und Speicherkomponente und auf der zu erwartenden Speicherleistung von innovativen Materialien. Ein wichtiges Augenmerk liegt auf der Verwendung der Speichermaterialien im Gebäudebereich (Bereitstellung von Warmwasser und Raumheizung), aber auch weitere Anwendungen werden berücksichtigt. Zusätzliches Ziel ist die Intensivierung der Zusammenarbeit von ExpertInnen der Materialwissenschaften und ExpertInnen aus den Anwendungsgebieten, damit eine effektive und gezielte Materialentwicklung stattfinden kann.

Für die österreichischen Vertreter des Tasks/Annex hat außerdem die weitere Vernetzung der wissenschaftlichen Akteure im Bereich der kompakten Wärmespeicherung mit der internationalen Forschungslandschaft hohen Stellenwert, sowie die Verbreitung der entwickelten Expertise. Für alle nationalen PartnerInnen besteht die Möglichkeit, Ergebnisse ihrer eigenen F&E-Projekte in den Task zu integrieren, um sich im internationalen Rahmen weiter positionieren und vernetzen zu können.

4.2. Struktur und Methode

Die Arbeit des Tasks wurde in vier Subtasks unterteilt. Zwei der geplanten Subtasks konzentrierten sich auf das Material selbst, seine Charakterisierung und die Definition von Prüfverfahren. Subtask 1 und 4 befassten sich mit der Interaktion zwischen den neuen Materialien und den Speicherkomponenten bzw. mit der eigentlichen Anwendung.

Da die untersuchten Speichermaterialien deutliche unterschiedliche Charakteristiken und dadurch auch unterschiedliche Prüfverfahren und Anforderungen an Komponenten haben, wurden die Subtasks weiter untergliedert in PCM- und TCM-Bereiche. Dies hat auch den Vorteil, dass kleinere Arbeitsgruppen die Themen detaillierter behandeln können. In Abbildung 1 ist die weitere Unterteilung mit den jeweiligen Subtaskleitern ersichtlich.

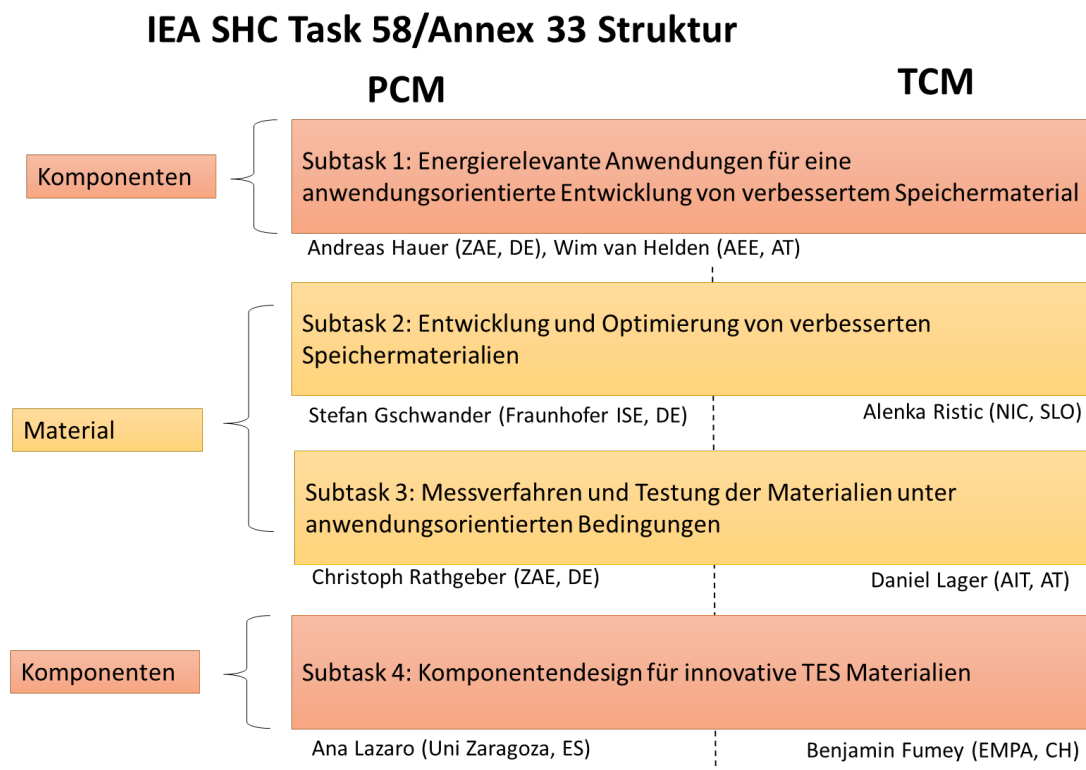


Abbildung 1: Untergliederung des Tasks/Annex in 4 Subtasks und nach Speichermaterialien inkl. Übersicht der Leitung

4.2.1. Inhalte Subtask 1

Ziel war die Identifikation von wichtigen Betriebsparametern relevanter Anwendungsbereiche. Die Daten sollen im Rahmen der Aktivitäten anderer Tasks und Annex zusammengeführt werden. Hier wurde nicht in PCM- und TCM-bezogene Anwendungen unterteilt, da die Ergebnisse und Erkenntnisse für alle Speichermaterialien gültig sind.

4.2.2. Inhalte Subtask 2

Ziel war die Entwicklung und Charakterisierung von PCM und TCM, um die Performance des Speichersystems zu verbessern, Materialeigenschaften zu identifizieren und zu messen. Die Materialdatenbank, die in Task 42/Annex 24 und Task 42/Annex 29 begonnen wurde, sollte gewartet und erweitert werden.

PCM: Ziel war es, PCM so zu designen, dass ihre Eigenschaften für bestimmte Anwendungen ideal sind. Dafür ist ein grundlegendes Verständnis über den Zusammenhang zwischen den thermophysikalischen Eigenschaften der Materialien wie Enthalpie, Wärmeleitfähigkeit und den Materialparametern wie der Materialzusammensetzung (z.B. Beimischung von Graphit zu PCM zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit) notwendig.

TCM: Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung verbesserter pulverförmiger TCM-Materialien, die auf Sorption (mikro-/mesoporöse Feststoffe und Flüssigkeiten (Hydroxide)), chemischen Reaktionen (Salzhydrate und Metalloxide/-hydroxide) und Kombinationen aus beidem (mikro-/mesoporöse Feststoffe + Salzhydrate/Metall) basieren.

4.2.3. Inhalte Subtask 3

Ziel war die Definition von Messverfahren für relevante Materialeigenschaften. Bei PCM lag der Schwerpunkt auf Skaleneffekten. Eigenschaften wie Schmelzverhalten, Enthalpie und Unterkühlungseffekte sind von der Materialmenge abhängig. Es sollte ein Verfahren entwickelt werden, mit dem aus den Messergebnissen von Proben von geringer Größe (wenige ml) auch die Eigenschaften von großen Materialmengen berechnet werden können. Ziel für die TCM Entwicklung war es, ein einheitliches Verfahren für die Testung der Materialeigenschaften Wasseraufnahmekapazität und Reaktionsenthalpie zu definieren und anhand von Round-Robin Tests die Umsetzbarkeit der Prüfverfahren von unterschiedlichen Laboren zu testen.

4.2.4. Inhalte Subtask 4

Ziel der PCM-Entwicklung war die Auflistung von in verschiedenen Konzepten verwendeter Komponenten und Beschreibung von Möglichkeiten zur Definition und Messung der Performance-Charakteristik für PCM-Komponenten. Eine Bewertung der Konzepte anhand der angestrebten Performance wurde durchgeführt.

Ziel der TCM-Entwicklung war die Auflistung der von verschiedenen Konzepten verwendeter Komponenten mit Fokus auf Wärme- und Massentransfer in der Komponente. Da in der Regel ein signifikanter Unterschied der gemessenen Speicherkapazität zwischen Materialtests (einige Gramm)

und Labormaßstab inklusive Reaktoraufbau (einige kg) auftritt, wurde angestrebt, den Grund für diesen Unterschied zu identifizieren.

4.3. Teilnehmer

Die vorgestellten Arbeiten und Ergebnisse wurden von internationalen ExpertInnen aus 13 Ländern durchgeführt. Neben den bereits als Subtask-Leiter erwähnten Instituten und Universitäten waren weitere ExpertInnen unter anderen von Instituten wie NRCan, DLR, CNR ITAE, SPF, TNO, DTU, etc. dabei. Die vollständige Liste der teilnehmenden Länder ist in Tabelle 1 ersichtlich:

Tabelle 1: Teilnehmende Länder des IEA SHC Task 58/Annex 33:

Land	Anzahl Forschungs- institute	Anzahl Universitäten	Anzahl Industrie- teilnehmer
Austria	2	3	-
Canada	1	3	-
Switzerland	2	1	-
Germany (ECES)	4	7	2
Denmark	-	1	-
Spain (ECES/SHC)	1	4	-
France	1	6	-
Italy	1	1	-
Netherlands	1	1	-
Sweden (ECES)	-	1	-
Slovenia (ECES)	1	-	-
Turkey (ECES)	-	2	-
United Kingdom	-	3	-
TOTAL	14	33	2

5 Ergebnisse

Die ExpertInnen im Task 58/Annex 33 führten in folgenden vier Hauptfeldern bzw. Subtasks Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durch:

- 1) Definition der geeigneten Randbedingungen von **energierelevanten Anwendungen für eine anwendungsorientierte Entwicklung von verbesserten Speichermaterialien**
- 2) **Entwicklung und Optimierung von verbesserten Speichermaterialien**
- 3) Definition von **Messverfahren und Testung der Materialien unter anwendungsorientierten Bedingungen**
- 4) Analyse von **Komponentendesign für innovative TES-Materialien.**

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse aus den genannten vier Hauptarbeitsfeldern zusammen mit einigen Schlüsselaussagen vorgestellt.

Allgemeine Schlüsselaussagen aus dem Task 58/Annex 33 sind:

- Die Zusammenarbeit zwischen MaterialexpertInnen und AnwendungsexpertInnen im SHC Task58/ECES Annex33 führte zu einem besseren Verständnis und damit zu einer beschleunigten Materialentwicklung auf internationaler Ebene.
- Standards für Messung und Dokumentation sind Voraussetzung für konstruktive Diskussionen, rasche Bewältigung von Herausforderungen und die Weiterentwicklung der TES-Technologien.

5.1. Energierelevante Anwendung für anwendungsorientierte Entwicklung von verbesserten Speichermaterialien

Der erste Teil des Tasks zielte darauf ab, eine Kombination von Test-Randbedingungen (z.B. Be- und Entladetemperaturen, Be- und Entladeleistungen) für eine Reihe von Anwendungen zu definieren, zum Beispiel für die Verwendung von TES für die Warmwasserbereitung in Haushalten. Die **Herausforderung** bestand darin, die richtige Balance zwischen einer kleinen Anzahl an allgemeinen Test-Randbedingungen zu finden, die evtl. die Details der einzelnen Technologien nicht zeigen, und engeren Test-Randbedingungen, welche die Technologien besser widerspiegeln, aber die Material- und Komponentenverbesserung für die Technologien in Bezug auf ihre individuelle Anwendung erschweren. Dieses Problem trat vor allem im Bereich der industriellen Anwendungen auf, da die unterschiedlichen Branchen wiederum eine sehr **große Variation von Rahmenbedingungen** wie Leistung oder Temperaturbereich aufweisen. Die Haupteinflussfaktoren für die Performance sind vor allem die Temperaturen, bei denen der Speicher be- und entladen wird. In der Praxis bedeutet dies die Temperatur, die für das **Laden von einer Energiequelle** zur Verfügung steht, z.B. von einem solarthermischen Kollektor, und jene Temperatur, die **vom Verbraucher benötigt** wird, z.B. für Warmwasser. Abbildung 2 zeigt, dass diese beiden Temperaturen stark von konkreten Anwendungen und verwendeten Technologien abhängen. [8]

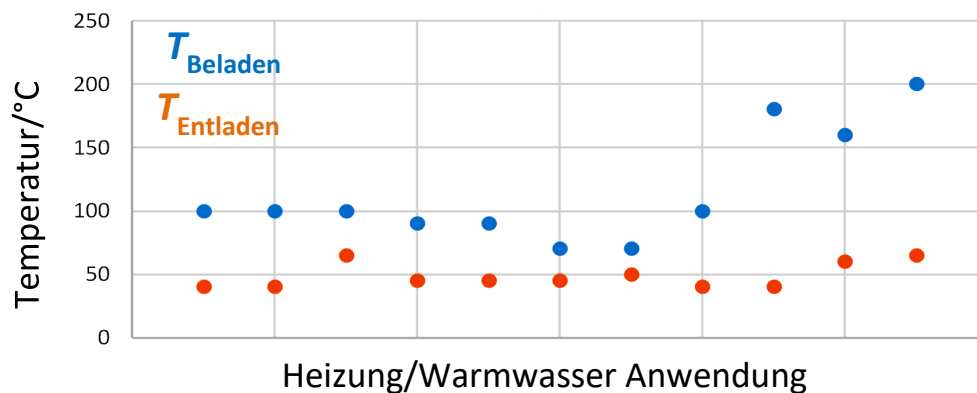


Abbildung 2: Typische Belade- und Entladetemperaturen für 11 verschiedene thermische Energiespeichertechnologien, beladen über Solarthermie [8]

Für thermochemische Speichertechnologien müssen zwei weitere Temperaturen spezifiziert werden. Beim Belade-Prozess ist neben der Beladetemperatur die **Kondensationstemperatur** entscheidend, bei der das ausgetriebene Sorbens (meist Wasserdampf) kondensiert werden kann. Beim Entlade-Prozess ist neben der bereits genannten Entladetemperatur die **Verdampfungstemperatur** entscheidend, bei der das Sorbens verdampft werden kann (siehe Abbildung 3). In der Praxis sind Verdampfungstemperatur und Kondensationstemperatur **an die Außentemperatur gekoppelt**. Dies führt dazu, dass bei Kurzzeitspeicherung die Kondensations- und Verdampfungstemperatur sehr ähnlich sind, es aber je nach gewählter Niedertemperaturquelle gerade bei **saisonalen Speicherung** **wesentliche Unterschiede** der beiden Temperaturen gibt, die in Abhängigkeit von der geographischen Lage des TES spezifiziert werden müssen.

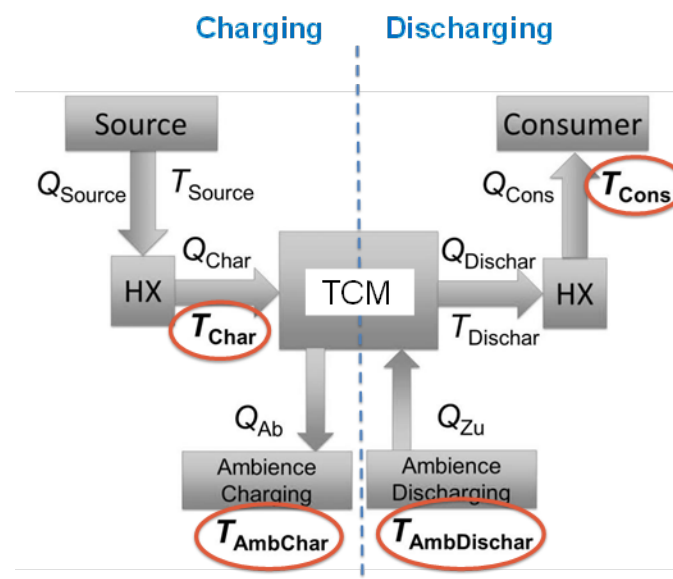


Abbildung 3: 4-Temperaturen-Ansatz für thermochemische Speichertechnologien. Neben Be- und Entladetemperatur sind auch die Temperaturen bei denen das Sorbens kondensiert bzw. verdampft werden kann ausschlaggebend für die Performance des Speichers und müssen daher für die Charakterisierung definiert werden [8].

Details zur Identifikation von wichtigen Betriebsparametern relevanter Anwendungsbereiche sind in den Publikationen [9] und [10] dargestellt.

Die **Schlüsselaussagen** aus dem Feld **Energierrelevante Anwendung** sind:

- Für die kompakte thermische Energiespeicherung gibt es eine Vielzahl von relevanten Anwendungen z.B. Raumheizung/Warmwasser für Heizung, Anwendung als Hochtemperaturspeicher für z.B. Lebensmittelindustrie, Fernwärme, KWK-Anlagen, Power2Heat Anwendungen, etc.
- Für den Gebäudesektor können standardisierte Referenzbedingungen definiert werden. Für industrielle Anwendungen macht die Vielfalt der Prozesse dies jedoch sehr schwierig!

5.2. Entwicklung und Optimierung von verbesserten Speichermaterialien

Kompakte thermische Energiespeichertechnologien basieren entweder auf Phasenwechselmaterialien (PCM) oder auf thermochemischen Materialien (TCM).

PCM befinden sich schon deutlich **länger in der Entwicklung** und werden bereits in einer Vielzahl von **Anwendungen** eingesetzt z.B. für konstante Temperaturregelung in der Medizin z.B. Temperaturregelung von Patienten während chirurgischer Operationen, Transport von Gütern, in Kleidung, als Wärmepads, als Wandelemente im Verputz oder als Warmwasserspeicher. Daher konzentriert sich die PCM-Entwicklung in diesem Projekt auf die **Verbesserung der Methoden**, mit denen Materialeigenschaften bestimmt werden können. Diese Eigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit oder Viskosität, werden für eine bessere **numerische Simulation** der Technologien benötigt, was wiederum zu einer **Verbesserung im Komponentendesign und Leistung** führt.

Ein Teil der Arbeit bestand darin, die **Qualität der Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit** von PCM zu verbessern. Eine Reihe von Labors führte Messungen an Proben desselben Materials durch. Die Ergebnisse des **Round-Robin Versuchs** zeigten eine beträchtliche **Standardabweichung** zwischen den Messergebnissen, siehe Abbildung 4. Die ExpertInnen analysierten die möglichen Ursachen für diese Abweichungen, und untersuchten dazu sowohl die Art und Weise, wie die Proben vorbereitet wurden, als auch Unterschiede im Messverfahren. **Verbesserungen und Standardisierung bei Probenvorbereitung und Messverfahren** wurden anschließend getestet. Diese führten zu wesentlich geringeren Abweichungen zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Labors [11].

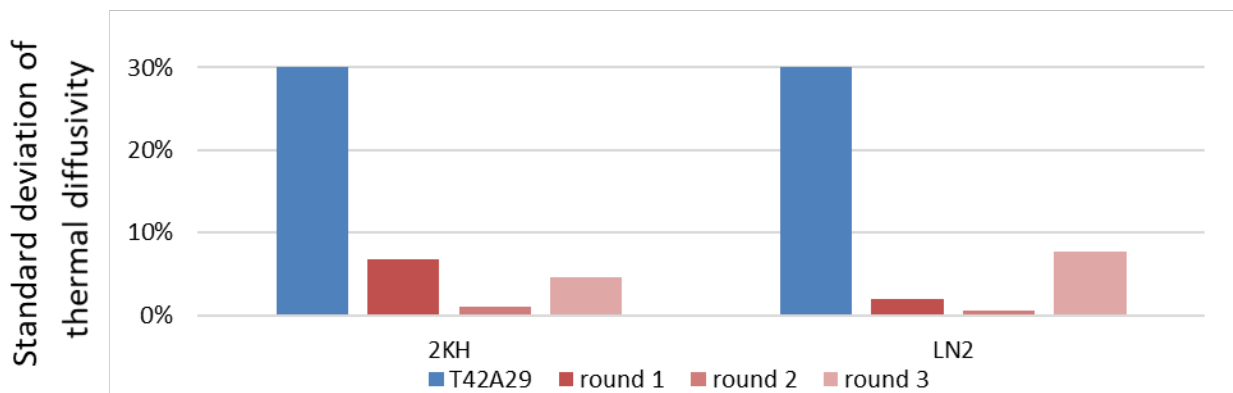


Abbildung 4: Standardabweichung zwischen Messwerten der Temperaturleitfähigkeit von 2 verschiedenen PCMs in verschiedenen Laboren. Die blauen Balken zeigen die Abweichung vor Standardisierung der Probenvorbereitung und Messverfahren, die roten Balken zeigen die Abweichung nach den Maßnahmen. Die Balken auf der linken Seite (2KH) zeigen Ergebnisse aus den Experimenten bei gleichmäßiger Kühlrate von 2 K/h, während die Balken rechts die Ergebnisse mit schneller Abkühlung (flüssiger Stickstoff LN2) zeigen[8].

Im **Bereich der TCM** arbeitete die internationale Kooperation an der **Verbesserung thermochemischer Materialien**. Ein Fokus dabei lag auf der **Entwicklung neuer Kompositmaterialien** bestehend aus einer Kombination eines Salzhydrats und eines porösen Materials. Die Kombination dieser Materialien führt zu **höheren Energiedichten** und einem besseren **Langzeitverhalten**. Salzhydrate können sich verflüssigen, wenn sie zu viel Wasserdampf aufnehmen, was zu einer deutlichen Verschlechterung der Performance führt und daher verhindert werden muss. Wenn das Salzhydrat in ein poröses Material imprägniert wird, wird die Verflüssigung verhindert, während die thermische Speicherkapazität des porösen Materials durch die Zugabe des Salzhydrats erhöht wird. Die Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen mikroskopische Bilder einiger Probenmaterialien und eine Grafik der Energiedichten von porösen Materialien und neu entwickelten Kompositmaterialien. Es ist deutlich zu erkennen, dass letztere eine höhere Energiedichte aufweisen.

Es wurde auch an der **Materialdatenbank** gearbeitet, die Daten zu einer Reihe von Materialien – sowohl PCM als auch TCM – enthält. **Neue Materialeigenschaften** wurden in die Datenbank inkludiert und bis dato wurden insgesamt 56 Messungen an PCM-Materialien nach den definierten Standards durchgeführt und die Ergebnisse in die Datenbank **integriert**. Für TCM-Materialien wurde ebenfalls ein Datenbestand aufgebaut aber aufgrund der unterschiedlichen Materialien, deren Charakteristiken und Verhalten in drei Teile unterteilt: Materialien im Bereich 1) chemische Reaktion (Salzhydrate, Oxide, Kompositmaterialien), 2) Adsorption (poröse Feststoffe und Kompositmaterialien) und 3) Absorption (Flüssige Absorption). Zusätzlich zur Datenbank wird auch ein **Wiki** aufgebaut mit dem Ziel, Begriffe und Definitionen zu dokumentieren und eine **einheitliche Verwendung** zu garantieren.

Diese Datenbanken sowie das Wiki soll im Rahmen des nachfolgenden SHC/ECES-Folgeprojekts erweitert werden. Die bisherigen Ergebnisse können hier gefunden werden:

<https://www.thermalmaterials.org/>

Schlüsselaussagen aus dem Bereich **Entwicklung und Optimierung von verbesserten Speichermaterialien:**

- Eine Reihe innovativer und verbesserter Materialien wurde entwickelt, diese werden stetig weiterentwickelt und getestet
- Die entwickelten Charakterisierungsmethoden bilden die Grundlage für die einheitliche Bewertung und den Vergleich von Materialien und sind ebenso die Grundlage für die Eingaben in die aufgebaute Datenbank.
- Die Materialeigenschaften umfassen nicht nur die technische Performance, sondern auch Fragen zu Stabilität und Kompatibilität.

5.3. Messverfahren und Testung der Materialien unter anwendungsorientierten Bedingungen

MaterialwissenschaftlerInnen **charakterisieren** Materialien, indem sie Messungen an meist **sehr kleinen Proben** durchführen. Die gemessene Wärmeleitfähigkeit bzw. der gemessene Wärmestrom sind oft **nicht identisch** mit dem erreichten Wärmestrom bzw. der effektiven Wärmeleitfähigkeit in einer Speicherkomponente, d.h. letztendlich muss die **Systemleistung** eines Wärmespeichermaterials inklusive der Umgebungsbedingungen und der Komponente bewertet werden. Messungen am Speichermaterial sollten unter **anwendungsbezogenen Randbedingungen** durchgeführt werden. Unter diese Randbedingungen fallen nicht nur Temperatur, Druck, Feuchtigkeit usw., sondern auch die Geometrie eines Wärmetauschers und die Kombinationen mit den Materialien der Komponente z.B. Stahl, Kupfer, etc. Ziel ist es, anhand weiterer Ergebnisse aus den Materialtests auch die Performance innerhalb der Speicherkomponente vorhersagen zu können.

Für **PCMs** lag bereits viel Wissen über die Bestimmung der Änderung von Enthalpie und Wärmeleitfähigkeiten im kleinen Maßstab vor. In der Kooperation wurde an der Entwicklung von Messmethoden gearbeitet, mit denen die **Performance** von PCM **im großen Maßstab** bestimmt werden kann, wie z.B. der Grad der Unterkühlung, Phasentrennung und Langzeitstabilität. Für die Bestimmung der Langzeitstabilität wurden die **verschiedenen Messgeräte und -methoden identifiziert und beschrieben**, siehe Abbildung 7. Um die Anwendbarkeit der verschiedenen

Methoden zu verifizieren und die Methoden zu verbessern, bedarf es weiterer Tests und Vergleiche [12].

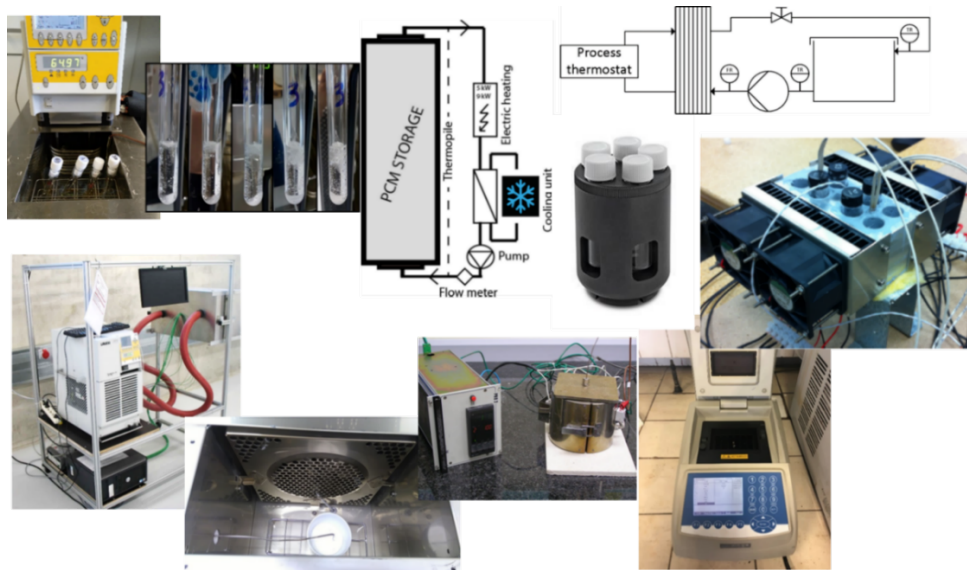


Abbildung 7: Testaufbauten für die Untersuchung der Langzeitstabilität von PCM [8].

Für TCM führt bereits die **Charakterisierung auf der kleinskaligen Ebene zu unterschiedlichen Ergebnissen** zwischen verschiedenen Messmethoden aufgrund kleiner Unterschiede bei der Durchführung der Charakterisierungsversuche. Dies zeigte deutlich die **Notwendigkeit für standardisierte Charakterisierungsmethoden**, um eine effiziente Verbesserung der Messdaten und folglich der Materialien zu ermöglichen. Um die Ursachen für die entdeckten Unterschiede herauszufinden, wurde eine Reihe von **Round-Robin Versuchen** konzipiert und durchgeführt, sowohl mit einem Sorptionsmaterial (Zeolith 13X) als auch mit dem Salzhydrat $\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Strontiumbromid-hexahydrat). Bei diesen Tests untersuchten mehrere Labore das gleiche Material, um anschließend die Ergebnisse zu bewerten. Diese Bewertungen aus den Round-Robin Versuchen sind ein großer Schritt hinsichtlich der Festlegung harmonisierter Verfahren zu den Themen Probenvorbereitung und Messdurchführung [13].

Die erste Serie der **$\text{SrBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Round-Robin Vergleiche** zeigte signifikante Abweichungen bei gleichartigen Proben je nach Labor, in dem die Tests durchgeführt wurden (s. Abbildung 8 für das Anhydrat SrBr_2). Daher überarbeiteten die Task-Mitglieder die Testmethode, einschließlich der Probenvorbereitung, bevor sie die zweite Serie des Round-Robin Vergleichs auf Basis von SrBr_2 durchführten. Das **modifizierte Verfahren** beginnt mit der Dehydratisierung (Trocknung) der Proben unter 1 mbar Wasserdampfdruck, um sicherzustellen, dass der anfängliche Wassergehalt der Probe in allen Testlaboren so weit wie möglich übereinstimmt. Die an dieser zweiten Testreihe teilnehmenden fünf Labore stellten fest, dass die **Ergebnisse** hinsichtlich der Masseänderung durch Hydratbildung **vielversprechend** waren. Die von ihnen gemessene Standardabweichung (SD) der Wasseraufnahme lag unter 4 %, was die Zuverlässigkeit der verwendeten Testverfahren bestätigt. In den Laboren wurde auch die **Reaktionsenthalpie** bestimmt, welche der Schlüsselparameter für die Speicherkapazität bei der Hydratbildung des Salzes ist. Auch hier konnten deutliche **Verbesserungen der Vergleichbarkeit** der Ergebnisse erzielt werden, jedoch gab es noch einige Abweichungen im

zweistelligem Prozentbereich [14]. Daher ist eine **weitere Überarbeitung der Methoden** notwendig. Im Task 58 konnten keine weiteren Versuche durchgeführt werden, da die Projektlaufzeit bereits beendet war. Weitere Tests sind im Folge-Task vorgesehen.

Ein weiteres Beispiel für die notwendige Verbesserung der angewandten Messmethoden zeigt die untenstehende Abbildung 8. Hier werden die Ergebnisse der spezifischen Wärmekapazität von SrBr₂ von drei teilnehmenden Instituten dargestellt und es zeigt sich, dass trotz ähnlich angewandter Verfahren und Normen doch **deutliche Unterschiede in der Messung** auftreten.

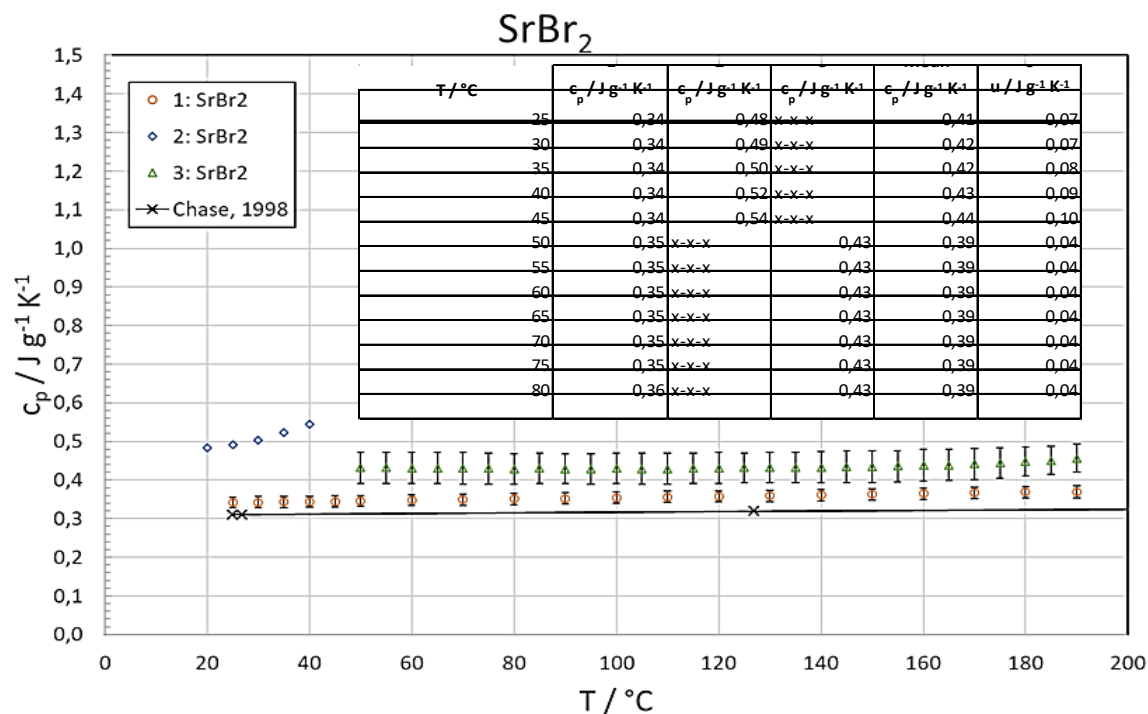


Abbildung 8: Vergleich aus Messungen der spezifischen Wärmekapazität von SrBr₂ mit unterschiedlichen Messaufbauten in 3 unterschiedlichen Laboren [8]

Sowohl das **Konditionierungsverfahren** für die Probenvorbereitung als auch das **Messprotokoll** wurden **analysiert** und **Verbesserungsvorschläge** erarbeitet. Um die Verbesserungen zu quantifizieren, sind weitere Round Robin-Vergleiche anhand der neu definierten Bedingungen durchzuführen. Bei Sorptionsenthalpie-Messungen an Zeolithen hat dieses Verfahren bereits zu einer **Reduktion der Abweichungen** in den Ergebnissen geführt, während das Verfahren für das Salzhydrat aufgrund der Probenvorbereitung und der Komplexität des Materials aufwendiger und daher noch weiter zu untersuchen ist.

Schlüsselaussagen aus dem Bereich Messverfahren und Testung unter anwendungsorientierten Bedingungen:

- Nur durch Testen unter Anwendungsbedingungen kann eine Identifizierung des geeigneten Materials für eine konkrete Anwendung festgestellt werden.
- Für die Angabe von Speicherkapazität und Materialstabilität müssen diese Parameter unter realen Bedingungen und Anforderungen getestet werden.

5.4. Komponentendesign für innovative TES-Materialien

Die **Performance** des Speichersystems wird nicht nur vom Material selbst sondern auch von der **Interaktion** in und mit den Speicherkomponenten beeinflusst, daher sind für ein optimales Design der Komponenten Kenntnisse über diese Interaktion ausschlaggebend [15].

Die **Hauptkomponenten** für einen PCM-Speicher sind der **Behälter** und der **Wärmetauscher**. Die Herausforderung bei der Auslegung des Wärmetauschers besteht darin, die erforderliche thermische **Leistung** bereitzustellen (möglichst große Wärmetauscherfläche), gleichzeitig aber das **Wärmetauschervolumen zu reduzieren**, um eine maximale Energiespeicherdichte und Kostenreduktion zu erreichen. In der Praxis gibt es viele Auslegungen von Wärmetauschern für PCM [16]. Daher wurde eine **Bestandsaufnahme** von PCM-Wärmetauschern vorgenommen und anschließend eine Methode entwickelt, um die **Leistung** des PCM-Wärmetauschers, unabhängig von designspezifischen Aspekten, **einheitlich** zu bestimmen (siehe Abbildung 9). Ziel ist es, verschiedene Ausführungen von Wärmetauschern für eine bestimmte Anwendung zu **vergleichen**, um die beste Konstruktion zu finden und ein **besseres Verständnis der Wechselwirkung** zwischen dem thermischen Verhalten der PCM-Komponente und den Materialeigenschaften zu erhalten. Ein erster Satz von normalisierten Leistungsparametern wurde vorgeschlagen, aber weitere Arbeiten sind notwendig, um die am besten geeigneten Parameter zu untersuchen [17].

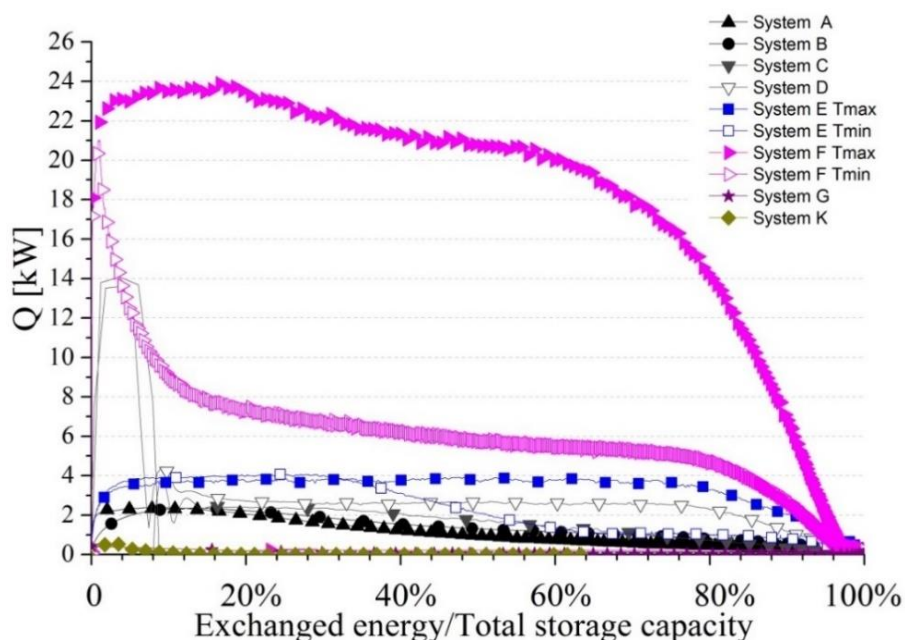


Abbildung 9: Normalisierte Leistung und Kapazität von unterschiedlichen PCM Speichern [8].

Bei **TCM-Systemen** ist die Vielfalt der **Komponentenvariation** aufgrund der unterschiedlichen thermochemischen Speicherprinzipien **sehr groß**. Für niedrige Temperaturen gibt es z.B. Sorptionssysteme i) auf Basis von Feststoffen, ii) aus Salzhydraten mit möglichem Wechsel von fest zu flüssig und iii) flüssige Sorptionssysteme, die unter bestimmten Bedingungen eine Kristallisation zeigen. Bei höheren Temperaturen ist die Vielfalt mit Feststoff-Gas-Reaktionen, bei denen auch die Feststoffe schmelzen oder sich verbinden können, noch größer. Eine erste Bestandsaufnahme der verschiedenen Wärmetauscher und Reaktoren und der **Entwurf einer Klassifizierungsmethode**

wurde abgeschlossen (siehe Abbildung 10) [18]–[20]. Diese bilden die Grundlage für zukünftige Auslegung und Optimierung der Komponenten.

Bis heute ist die einheitliche Bewertung und der Vergleich aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Systemen sehr schwierig, selbst wenn man sich auf eine einzige Anwendung konzentriert, wie z.B. die saisonale Wärmespeicherung für die Raumheizung. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine **Literaturstudie** durchgeführt, in welcher der erforderliche Temperatur-Hub für die Desorption/Beladung (GTLD), der resultierende Temperatur-Hub in der Sorption/Entladung (GTLS) und sein Verhältnis GTLS/GTLD, definiert als Temperatureffektivität (TE), untersucht wurden. Diese **Temperatureffektivität** beschreibt, wie gut das System das volle Potential des verwendeten Speichermaterials ausnutzt und **ermöglicht einen grundlegenden Vergleich** zwischen den Systemen sowie den grundlegenden Prozessdesigns. Weitere Arbeiten zur Definition von standardisierten Testbedingungen und Dokumentation des Fortschritts in diesem Bereich werden vorbereitet [9], [21], [22].

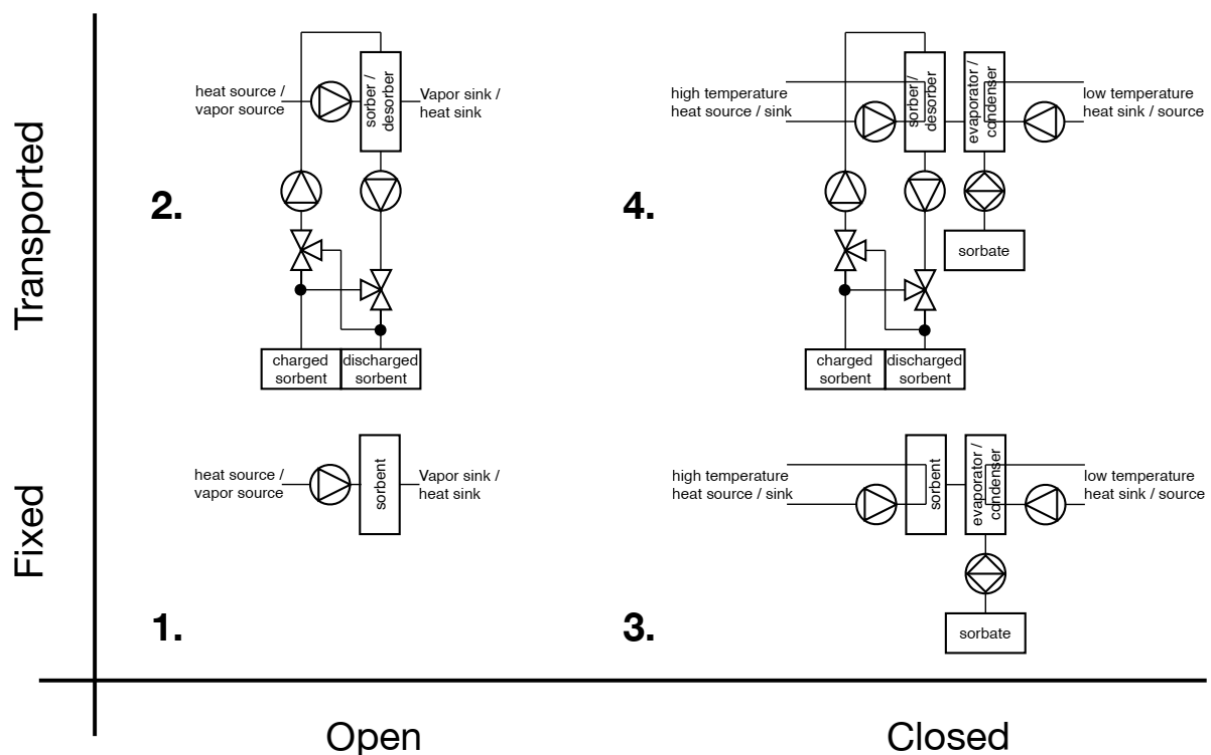


Abbildung 10: Beschreibung der vier Basiskonzepte von TCM Prozessen [21]

Aus dem Bereich **Komponentenentwicklung** sind die folgenden **Schlüsselbotschaften** zu nennen:

- Die Identifizierung von Komponenten-Leistungsparametern ist notwendig, um den Vergleich von kompakten Speicherkonzepten zu ermöglichen.
- Die erzielbare Be-/Entladeleistung wird stark durch das Komponentendesign beeinflusst, wobei die Wechselwirkung des Speichermaterials mit der Komponente entscheidend ist.

5.5. Übersicht der Publikation aus dem Task/Annex

Die folgende Tabelle zeigt Publikationen der österreichischen ProjektpartnerInnen im Rahmen des Task/Annex.

Tabelle 2: Liste der Publikationen der österreichischen ProjektpartnerInnen

Autor	Titel	Publication	Reference, Link
Gschwander St.	Task 42/Annex29 Material Data Base	Webpage	https://www.thermalmaterials.org/
Fumey B., Baldini L., Lazaro A., Fischer F., Hauer A., Englmaier G., Furbo S., Zettl B., Cuypers R., Köll R., van Helden W.	Building application specific temperatures for the testing of phase change and thermo chemical materials, components and systems	In Einreichung	
Fumey B., Beving M., Fischer F., Weber R., Skrylnyk A., Zettl B., Köll R., Cuypers R., Fumey B., Blanchard D., Gantenbein P., Vandersickel A.,	Inventory of sorption heat storage component and system designs currently under investigation by task and annex partners	IEA Task 58 Report, Subtask 4T Deliverable 2	https://www.thermalmaterials.org/
Fumey B.,	Do's and Don'ts of designing thermal energy storage	In Einreichung	
Wim van Helden u. a.	„IEA SHC & IEA ECES Collaboration Makes Advances in Thermal Energy Storage“,	<i>SolarUpdate</i> , Nr. 72, Dez. 2020, Zugriffen: Dez. 23, 2020. [Online].	https://task58.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/2020-12-IEA-SHC-and-IEA-ECES-Collaboration-Makes-Advances-in-Thermal-Energy-Storage.pdf

Daniel Lager u.a.	TCM measuring procedures and testing und application conditions.	Task58/Annex33 Final report Subtask 3T,	https://task58.iea-shc.org/publications
Christoph Moser, Gerald Englmaier, Hermann Schranzhofer, Andreas Heinz	Simulation Study of a Novel Solar Thermal Seasonal Heat Storage System based on Stable Supercooled PCM for Space Heating and Domestic Hot Water Supply of Single Family Houses	12th International conference on Buildings and Environment "enviBuild 2017", Technical University of Vienna, Austria, September 7-8, 2017.	
M. Deutsch, F. Birkelbach, C. Knoll, M. Harasek, A. Werner, F. Winter	An extension of the NPK method to include the pressure dependency of solid state reactions	Thermochemica Acta, 654 (2017), 168 - 178	
C. Knoll, D. Müller, W. Artner, Jan Welch, A. Werner, M. Harasek, P. Weinberger	Oxalate-hydrates in thermochemical energy storage - a so far neglected class of salt hydrates	The International Symposium on Energy 7, Manchester, United Kingdom, 2017-08-13 - 2017-08-17	
D. Müller, C. Knoll, W. Artner, J. M. Welch, A. Werner, M. Harasek, P. Weinberger	Enhancing the hydration reactivity of MgO about particle morphology and chemical dopants	The International Symposium on Energy 7, Manchester, United Kingdom, 2017-08-13 - 2017-08-17	
C. Moser, G. Englmaier, H. Schranzhofer, A. Heinz.	Simulation study of a novel solar thermal seasonal heat storage system based on stable supercooled PCM for space heating and domestic hot water supply for single family houses.	Applied Mechanics and Materials, Volume 887. Pp. 650-658, 2019.	
G. Englmaier, C. Moser, J. Fan, S. Furbo	A solar combi-system utilizing stable supercooling of sodium acetate trihydrate for heat storage: Numerical performance investigation.	Applied Energy, Volume 242, pp. 1108-1120, 2019.	
G. Englmaier, C. Moser, S. Furbo, H. Schranzhofer, J. Fan.	Combined short and long-term heat storage with sodium	Poster presentation at Tværpolitisk klimadebat Conference, March	

	acetate trihydrate for solar heat supply in buildings.	2019, Kgs. Lyngby, Denmark.	
Thomas Aigenbauer, et al. (FH-Wels)	Project SKEF: "Conditioning of electric vehicles interior with sorption storage material"	at IRES 2019 Poster Exhibition, 11.03.2019, Düsseldorf	

6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Im Task wurden verschiedene Zielgruppen identifiziert und adressiert:

- Wissenschaft: die Ergebnisse des Projektes führen zum besseren Verständnis über Speichermaterialien, -Komponenten und -Systeme.
- Industrie: Kenntnisse aus dem Projekt führen zu neuen Materialien, Produkten und Messmethoden.
- EntscheidungsträgerInnen: das Projekt identifiziert Wissenslücken bei Speichermaterialien, -komponenten und -systemen und zeigt den Nutzen von Speichertechnologien auf.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Projekt wurden auf unterschiedliche Weise an die Zielgruppen kommuniziert. Durch Vorträge auf Tagungen und Konferenzen wurden allgemeine Informationen über Stand der Technik, Anwendungsmöglichkeiten und weitere Ergebnisse der Forschungsarbeit veröffentlicht. Die Forschungsmethoden und Forschungsergebnisse wurden in eine Vielzahl von wissenschaftlichen Artikeln in Zeitschriften veröffentlicht sowie allgemeine Beschreibungen des Projekts und Ergebnisse über IEA Kommunikationskanäle, über Websites (z.B. www.solarthermalworld.org) und über nationale Kanäle verbreitet. Zum weiteren wurde der Task in verschiedensten internationalen Workshops für Industrie z.B. in Kanada vorgestellt und Workshops für ExpertInnen auf dem Gebiet von Materialcharakterisierung organisiert.

Das Projekt hat hohe internationale und nationale Relevanz. Die Zusammenarbeit einer großen Gruppe von internationalen ExpertInnen in den Gebieten der Materialien und Speicheranwendungen führt zu einem effektiven Wachstum der Entwicklungsarbeiten und einem verbesserten Wissen. Die Vernetzung führt auch zu besseren Chancen für internationale Projekte und die österreichischen PartnerInnen haben vermehrte Möglichkeiten zur nationalen und internationalen Zusammenarbeit.

7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

7.1. Schlussfolgerung

In den drei Jahren des gemeinsamen Projekts IEA SHC Task 58/ECES Annex 33 wurden wichtige Schritte zur Verbesserung der Materialien und Testmethoden für kompakte thermische Energiespeichertechnologien gemacht. Grundlage für diese wichtigen Schritte war die konstruktive internationale Zusammenarbeit zwischen WissenschaftlerInnen aus den unterschiedlichen Fachgebieten Materialwissenschaften und Komponenten- bis Systementwicklung.

Es wurden erste Maßnahmen durchgeführt, um die Wechselwirkung zwischen Speichermaterial und Speicherkomponenten besser zu verstehen. Die Vereinheitlichung der Probenvorbereitung und Durchführen der Messverfahren erstellte sich als dringend notwendige Abstimmung um zu vergleichbaren und reproduzierbaren Performance-Ergebnissen zu gelangen. Damit können bisherige große Schwankungen der Ergebnisse aus unterschiedlichen Prüflaboren und Publikationen reduziert und die Qualität und Aussagekraft der gemessenen Charakteristiken deutlich verbessert werden.

Die einheitliche Definition der anwendungsbezogenen Rahmenbedingungen ist ebenso ein wichtiger Output der gemeinsamen Arbeit, welche einen einheitlichen und zuverlässigen Vergleich der sehr unterschiedlichen Systeme ermöglichen kann. Damit die Ergebnisse auch der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung stehen, wurden Datenbanken erstellt und von den ExpertInnen mit Ergebnissen befüllt, welche anhand der vereinheitlichten Prüfmethode erreicht wurden.

Ein ebenso wichtiger Schritt der im Zuge des Annexes/Tasks erzielt wurde, ist die systematische Klassifizierung von verschiedenen Komponentenkonstruktionen wie z.B. Wärmetauscher- oder Reaktordesgin. Aufgrund der hohen Komplexität und Vielfalt der Designs konnten über dementsprechende Klassifizierung und Einteilung der Komponenten übergeordnete Erfahrungen und Tendenzen beschrieben und generelle Empfehlungen zusammengeführt werden.

7.2. Empfehlungen/weitere Arbeiten

Trotz der herausragenden Ergebnisse, die bereits erzielt werden konnten, bestehen weiterhin viele Herausforderungen bei der Nutzung und Weiterentwicklung der gewonnenen Erkenntnisse. Um gut funktionierende, zuverlässige und leistungsfähige kompakte thermische Energiespeichersysteme zu entwickeln, müssen diese Herausforderungen methodisch angegangen und weitere Arbeiten zur Verbesserung der Test- und Charakterisierungsmethoden durchgeführt werden. Diese bilden die Basis für ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen zwischen der Materialeistung im Labormaßstab und im realen System. Dieses Verständnis kann nur durch eine detailliertere Untersuchung aufgebaut werden.

Ebenso bietet die Anwendung neuartiger Techniken aus dem Bereich der Digitalisierung großes Potenzial und sollte daher weiterverfolgt werden: Z.B. können digitale Techniken genutzt werden,

um den Ladezustand eines kompakten thermischen Energiespeichers besser bestimmen zu können, womit der Materialentwicklungsprozess unterstützt wird. All dies ist jedoch abhängig von der Fortführung der erfolgreichen engen Zusammenarbeit zwischen MaterialwissenschaftlerInnen und IngenieurInnen für die Komponenten- und Systementwicklung.

Die Arbeiten im Task/Annex und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen zeigen die Notwendigkeit eines Folge-Task/Annex deutlich, da noch weitere Fragestellungen und Weiterentwicklungen für den erfolgreichen Durchbruch von kompakten Wärmespeichertechnologien offen sind. Auch bei den früheren ExCo-Sitzungen von ECES und SHC kam man zu dem Schluss, dass von beiden TCPs eine weitere Zusammenarbeit begrüßt wird. Die zu bearbeitenden Themen und Fragestellungen wurden mit den internationalen ExpertInnen erörtert und eine Reihe von Erklärungen zur Fortsetzung der Aktivitäten abgegeben. Augenmerk muss dabei auf Synergien zwischen der Entwicklung von PCM und TCM und deren Charakterisierung gelegt werden, wovon vor allem Entwicklungen zu den weniger erforschten TCM profitieren können.

Die Materialdatenbank mit den Charakterisierungsergebnissen unter standardisierten Testbedingungen und zur standardisierten Probenvorbereitung ist weiter auszubauen. Sie bildet die Basis für eine gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien. Auch die Alterung und Degradation der Materialien unter unterschiedlichsten Einflussfaktoren wie z.B. der Temperatur muss untersucht werden. Ein besseres Verständnis dieser Vorgänge ist essenziell für die Entwicklung von Speichermaterialien mit langer Lebensdauer und somit auch geringen Systemkosten.

Eine weitere Fragestellung, welche noch gelöst werden sollte, ist die Bestimmung des Beladestandes der unterschiedlichen Materialien, besonders was Systeme im realen Maßstab betrifft. In weiteren Arbeiten gilt es, mögliche digitale Methoden zu untersuchen, um deren Anwendbarkeit zu zeigen.

Die Diskussionen im Expertenkreis führten zu einer ersten Liste relevanter Themen für die Nachbereitung:

- I. Materialcharakterisierung und Erweiterung der Datenbank
- II. Methoden zur Bestimmung des Beladungszustands
- III. Digitalisierung und TES-Materialentwicklung
- IV. Langzeitstabilität von PCM und TCM
- V. Entwurf von Komponenten zur Leistungssteigerung

Österreichische ExpertInnen sind im Task stark vertreten und dies spiegelt auch die internationale Vorreiterrolle Österreichs in der Entwicklung von kompakten Wärmespeichertechnologien wider. Um diese Rolle weiter auszubauen und die internationale Position zu verstärken, ist eine kontinuierliche Arbeit und ein effizienter Einsatz von Fördermitteln notwendig. Erste Prototypen, Demonstratoren und Produkte zeigen den Erfolg der Technologien. Für einen endgültigen Durchbruch müssen aber noch einige Fragestellungen hinsichtlich Grundlagenforschung im Bereich der Materialien und Komponentenentwicklung bearbeitet und ein besseres Verständnis aufgebaut werden. Die Teilnahme der österreichischen PartnerInnen an internationalen Expertengruppen, Netzwerken und Gremien ist von hoher Bedeutung, um Entwicklungen und Trends in diesem Bereich aus erster Hand zu erfahren und in eigene Forschungsarbeiten frühzeitig einfließen zu lassen. Somit kann ein rascher und effizienter Fortschritt garantiert werden. Die österreichischen PartnerInnen sind bemüht, in

diesem Bereich weitere gemeinsame Forschungsarbeiten in Bezug auf die offenen Fragestellungen durchzuführen und das Expertenwissen weiter aufzubauen.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Rommel, A. Hauer, und W. van Helden, „IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29 Compact Thermal Energy Storage“, *Energy Procedia*, Bd. 91, S. 226–230, Juni 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.208.
- [2] J.-C. Hadorn, „Thermal energy storage for solar and low energy buildings“, S. 179.
- [3] W. van Helden *u. a.*, „IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29 – Working Group B: Applications of Compact Thermal Energy Storage“, *Energy Procedia*, Bd. 91, S. 231–245, Juni 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.210.
- [4] F. Ochs, „Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher“, Dez. 2013. Zugriffen: Mai 02, 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://www.aee-now.at/cms/fileadmin/downloads/projekte/store4grid/store4grid_stand_der_technik.pdf.
- [5] B. Fumey, R. Weber, und L. Baldini, „Sorption based long-term thermal energy storage – Process classification and analysis of performance limitations: A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 111, S. 57–74, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.006.
- [6] C. Rathgeber *u. a.*, „IEA SHC Task 42 / ECES Annex 29 – A Simple Tool for the Economic Evaluation of Thermal Energy Storages“, *Energy Procedia*, Bd. 91, S. 197–206, Juni 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.203.
- [7] M. Rommel, A. Hauer, und W. van Helden, „Task-42-Annex-29-Position-Paper-and-All-Final-Deliverable-Papers.pdf“. <https://iea-eces.org/wp-content/uploads/public/Task-42-Annex-29-Position-Paper-and-All-Final-Deliverable-Papers.pdf> (zugegriffen Feb. 16, 2021).
- [8] W. van Helden, „Solar Update: IEA SHC and IEA ECES Collaboration makes advances in thermal Energy Storage“, Zugriffen: Feb. 16, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://task58.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/2020-12-IEA-SHC-and-IEA-ECES-Collaboration-Makes-Advances-in-Thermal-Energy-Storage.pdf>.
- [9] B. Fumey *u. a.*, „Building application specific temperatures for the testing of phase change and thermo chemical materials, components and systems“, *Submiss.*
- [10] A. Stamatiou, „Definition of boundary conditions for industrial applications and industrial peak shaving. Task58/Annex33 Subtask 1 Deliverable D1.2“. [Online]. Verfügbar unter: <https://task58.iea-shc.org/publications>.
- [11] C. Rathgeber *u. a.*, „Experimental Devices to Investigate the Long-Term Stability of Phase Change Materials under Application Conditions“, *Appl. Sci.*, Bd. 10, Nr. 22, S. 7968, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10227968.
- [12] C. Rathgeber, „Experimental devices to investigate degradation of PCM. Task58/Annex33 Subtask 3P Deliverable 2“. [Online]. Verfügbar unter: <https://task58.iea-shc.org/publications>.
- [13] D. Lager, „IEA SHC Task 58/Annex 33 Subtask 3T final report - TCM measuring procedures and testing under application conditions“. [Online]. Verfügbar unter: <https://task58.iea-shc.org/publications>.
- [14] Epp Bärbel, „Round robins improve TCM testing | Solarthermalworld“, *solarthermalworld*, S. 4, Juni 2020.

- [15] B. Fumey, R. Weber, P. Gantenbein, X. Daguenet-Frick, I. Hughes, und V. Dorer, „Limitations Imposed on Energy Density of Sorption Materials in Seasonal Thermal Storage Systems | Elsevier Enhanced Reader“.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610215002386?token=1932A8DDDB226F033D04FB0971315F2433D737EBDAB1BD2E8998C2F8C9B6A1C1D1C7AD4AAD3A4E13B10B855616ED1C38> (zugegriffen Feb. 16, 2021).
- [16] A. Lazaro, „IEA SHC Task58/Annex33 Deliverable D4P1: Inventory of concepts to improve component performance“.
- [17] A. Lazaro, „IEA SHC Task58/Annex33 Deliverable D4P2: Definition of the targeted performance characteristic for PCM components“. [Online]. Verfügbar unter: <https://task58.iea-shc.org/publications>.
- [18] B. Zettl, G. Englmaier, und G. Steinmaurer, „Development of a revolving drum reactor for open-sorption heat storage processes“, *Appl. Therm. Eng.*, Bd. 70, Nr. 1, S. 42–49, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.069.
- [19] R. Köll u. a., „An experimental investigation of a realistic-scale seasonal solar adsorption storage system for buildings“, *Sol. Energy*, Bd. 155, S. 388–397, Okt. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.06.043.
- [20] P. Gantenbein, „Fundamental geometrical system structure limitations in a closed adsorption heat storage system“, *Therm. Energy Storage*, S. 9.
- [21] B. Fumey, „Inventory of sorption heat storage component and system designs currently under investigation by task and annex partners“.
- [22] B. Fumey, „Do’s and Don’ts of designing thermal energy storage“, *Submiss.*

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untergliederung des Tasks/Annex in 4 Subtasks und nach Speichermaterialien inkl. Übersicht der Leitung	12
Abbildung 2: Typische Belade- und Entladetemperaturen für 11 verschiedene thermische Energiespeichertechnologien, beladen über Solarthermie [8]	16
Abbildung 3: 4-Temperaturen-Ansatz für thermochemische Speichertechnologien. Neben Be- und Entladetemperatur sind auch die Temperaturen bei denen das Sorbens kondensiert bzw. verdampft werden kann ausschlaggebend für die Performance des Speichers und müssen daher für die Charakterisierung definiert werden [8].....	16
Abbildung 4: Standardabweichung zwischen Messwerten der Temperaturleitfähigkeit von 2 verschiedenen PCMs in verschiedenen Laboren. Die blauen Balken zeigen die Abweichung vor Standardisierung der Probenvorbereitung und Messverfahren, die roten Balken zeigen die Abweichung nach den Maßnahmen. Die Balken auf der linken Seite (2KH) zeigen Ergebnisse aus den Experimenten bei gleichmäßiger Kühlrate von 2 K/h, während die Balken rechts die Ergebnisse mit schneller Abkühlung (flüssiger Stickstoff LN2) zeigen[8].	18
Abbildung 5: Mikroskopische Aufnahmen von verschiedenen Kompostmaterialien welche durch ExpertInnen im Task entwickelt und getestet wurden [8].....	19
Abbildung 6: Energiedichten von verschiedenen Materialien. Die reinen porösen Feststoffmaterialien (schwarze Dreiecke) erreichen eine geringer Energiedichte als die neuentwickelten Kompositmaterialien (blaue Quadrate) [8].	19
Abbildung 7: Testaufbauten für die Untersuchung der Langzeitstabilität von PCM [8].	21
Abbildung 8: Vergleich aus Messungen der spezifischen Wärmekapazität von SrBr ₂ mit unterschiedlichen Messaufbauten in 3 unterschiedlichen Laboren [8].....	22
Abbildung 9: Normalisierte Leistung und Kapazität von unterschiedlichen PCM Speichern [8].	23
Abbildung 10: Beschreibung der vier Basiskonzepte von TCM Prozessen [21]	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilnehmende Länder des IEA SHC Task 58/Annex 33:	14
Tabelle 2: Liste der Publikationen der österreichischen ProjektpartnerInnen	25

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
Art.	Artikel
usw.	und so weiter
TCM	Thermochemische Materialien
PCM	Phasenwechselmaterialien
TES	Thermische Energiespeicher
SHC	Solar Heating and Cooling (IEA Technology Collaboration Platform)
ECES	Energy Conversion and Energy Storage (IEA Technology Collaboration Platform)
IEA	Internationale Energie Agentur
SD	Standardabweichung
TE	Temperatureffektivität
GTLD	Temperaturhub für Desorption
GTLS	Temperaturhub für Sorption
TCP	Technology Collaboration Programme

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)