

Kurzfassung

Der verstärkte Ausbau der erneuerbaren Energien erfordert Möglichkeiten zur effizienten und wirtschaftlichen Speicherung von elektrischer sowie thermischer Energie. Die Speicherung thermischer Energie mittels Phasenwechselmaterialien (PCM) erlaubt die Konstruktion kompakter Speichersysteme mit hohen Energiedichten. Häufig sind die erzielbaren Be- und Entladeleistungen dieser Systeme jedoch durch die vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeiten der eingesetzten PCM limitiert. Die Verwendung makroverkapselter PCM verspricht hier Verbesserungspotenzial, da durch die Makrokapseln große Oberflächen zur Wärmeübertragung bereitgestellt werden.

Diese Arbeit untersucht unterschiedliche Konzepte zur metallischen Verkapselung von PCM. Hierfür werden Makrokapseln unterschiedlicher Geometrien (Kugeln, Zylinder, Platten) und Werkstoffe (unlegierter Baustahl 1.0038, Aluminium-Knetlegierung EN AW-6060, korrosionsbeständiger Stahl 1.4401) bezüglich deren Verhalten beim Einsatz als Kapselung in einem thermischen Energiespeicher miteinander verglichen und bewertet. Zur thermischen Charakterisierung dieser Packungen wird ein vereinfachtes analytisches Speichermodell entwickelt, welches die mittlere thermische Leistung des Systems berechnet. Die Wärmeübertragung ist darin auf den Phasenwechsel reduziert und als reiner Wärmeleitvorgang beschrieben, womit die Gültigkeit auf kleine Stefan-Zahlen und erstarrendes PCM beschränkt ist. Die Validierung dieses Modells erfolgt mithilfe existierender numerischer Rechenmodelle sowie mit experimentellen Daten. Zur Beschreibung der Kosten der untersuchten Konzepte wird größtenteils auf selbst entwickelte sowie auf aus der Literatur entnommene Kostenkorrelationen zurückgegriffen. Der Vergleich und die Bewertung unterschiedlicher Konzepte erfolgt anhand ökonomischer Kriterien und Kennzahlen, wofür aus den thermischen Kennwerten und den Kostenkorrelationen die energie- und leistungsspezifischen Kosten sowie die Wärmegestehungskosten ermittelt werden.

Mit den entwickelten Modellen erfolgt dann eine exemplarische Berechnung am Beispiel eines thermischen Speichers mit einem Volumen von 1 m^3 , dem PCM Magnesiumchlorid-Hexahydrat und den Wärmeträgerfluiden Luft sowie Thermoöl. Die Ergebnisse zeigen, dass die zylindrischen und plattenförmigen Makrokapseln den Kugeln aus ökonomischer Sicht deutlich überlegen sind. Für den untersuchten Speicher konnten mit zylindrischen Kapseln minimale leistungsspezifische Kosten von 76 €/kW sowie energiespezifische Kosten von 77 €/(kW h) ermittelt werden.

Abstract

The increased expansion of renewable energies requires possibilities for efficient and economical storage of electrical as well as thermal energy. The storage of thermal energy with phase change materials (PCM) enables the construction of compact storage systems with high energy densities. However, the achievable charging and discharging rates of these systems are often limited by the comparatively low thermal conductivities of the applied PCM. The use of macro-encapsulated PCM promises potential for improvement here, since the macro-capsules provide large surfaces for heat transfer.

This work investigates different concepts for the metallic encapsulation of PCM. For this purpose, macro-capsules of different geometries (spheres, cylinders, plates) and materials (mild steel 1.0038, aluminium EN AW-6060, stainless steel 1.4401) are compared and evaluated regarding their behaviour when used as capsule packing in a thermal energy storage system. For the thermal characterization of these packings a simplified analytical storage model is developed, which calculates the average thermal performance of the system. The heat transfer is reduced to the phase change process and described as a pure heat conduction process, which limits the validity to small Stefan numbers and solidifying PCM. The validation of this model is done with existing numerical models and experimental data. To describe the costs of the investigated concepts, mostly self-developed cost correlations as well as cost correlations taken from the literature are used. The comparison and evaluation of different concepts is carried out on the basis of economic criteria and key figures, for which the energy- and power-specific costs as well as the heat generation costs are determined from the thermal parameters and the cost correlations.

The developed models are then applied for an exemplary calculation based on the case of a thermal storage tank with a volume of 1 m^3 , the PCM magnesiumchloride-hexahydrate and the heat transfer fluids air and thermal oil. The results indicate that from an economic point of view, the cylindrical and plate-shaped macro-capsules are clearly superior to spheres. For the investigated storage tank with cylindrical capsules minimum power-specific costs of 76 €/kW and energy-specific costs of 77 €/(kW h) could be determined.

1 Einleitung

Energiespeicher sind ein wichtiger Baustein zur Erreichung der im Rahmen der Energiewende definierten Klimaziele Deutschlands. Die zunehmende Umstellung auf regenerative Energien wie beispielsweise Fotovoltaik oder Windkraft erfordert den Ausbau der verfügbaren Speicherkapazitäten, um trotz witterungs- und saisonal bedingter Fluktuationen die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Aktuelle Ansätze sind unter anderem der Einsatz von Strom-Wärme-Strom-Speichern, bei welchen Überschussstrom durch einen linkslaufenden thermodynamischen Kreisprozess in thermische Energie umgewandelt und zwischengespeichert wird und bei Bedarf mit einem rechtslaufenden Kreisprozess zurückverstromt werden kann [1]. Schlüsselkomponenten dieser Systeme sind die dafür benötigten thermischen Energiespeicher, welche in Abhängigkeit von den eingesetzten Kreisprozessen als sensible oder latente thermische Speicher gestaltet sein können. Weitere große Einsatzgebiete von thermischen Energiespeichern sind die Bereiche der Raum- und Prozesswärme [2–4], des Warmwassers [2, 3] und der Prozess- und Klimakälte [5–7], welche zusammen in Deutschland für über 50 % des Endenergieverbrauchs verantwortlich sind [8]. Thermische Speicher bieten in diesen Bereichen das Potenzial, die Steigerung des Anteils an erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch zu erhöhen. Weiterhin können Speicher zur Nutzbarmachung industrieller Abwärmeströme eingesetzt werden [9], wodurch die Energieeffizienz gesteigert wird.

Der Fokus dieser Arbeit liegt im Anwendungstemperaturbereich zwischen 100 und 250 °C, womit vor allem die Nutzung thermischer Energiespeicher für Prozesswärme im industriellen Umfeld, aber auch für Nah- und Fernwärmenetze und somit die Bereiche Raumwärme und Warmwasser thematisiert werden. Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Industriesektoren und Anwendungen sowie deren Temperaturniveaus zeigt Abbildung 1.1 [10–14]. Nach einer Abschätzung von Nast et al. [15] liegen in Deutschland etwa 26,6 % der Prozesswärme unterhalb von 250 °C vor, womit diese Prozesswärme zusammen mit Raumwärme und Warmwasser für etwa 37 % der 2017 in Deutschland genutzten Endenergie verantwortlich ist [8]. In den genannten Anwendungsbereichen kommen dabei noch zu 70 % die konventionellen Energieträger Öl, Gas und Kohle zum Einsatz und jeweils etwa 10 % werden durch Fernwärme, Strom und erneuerbare Energieträger abgedeckt [16], wobei diesen Zahlen der komplette Prozesswärmesektor zugrunde liegt. Somit besteht sowohl aus energetischer als auch aus ökologischer Sicht ein großes Potenzial für den Einsatz von thermischen Energiespeichern.

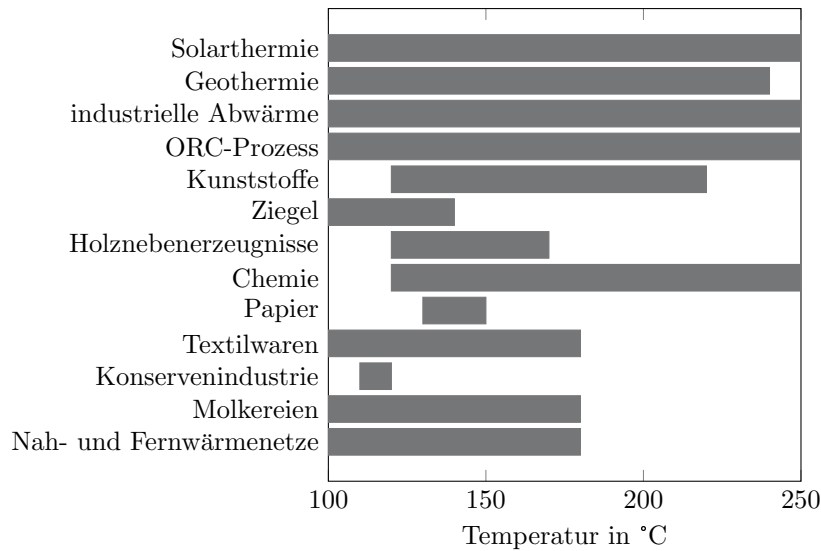


Abbildung 1.1: Typische Temperaturbereiche für unterschiedliche Industriesektoren und Anwendungen [10–14].

Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeit, dieses Potenzial durch latente thermische Energiespeicher nutzbar zu machen. Die zur Speicherung eingesetzten Phasenwechselmaterialien (engl. Phase Change Materials, PCM) werden hierfür in verkapselter Form eingesetzt, wobei für die Kapseln ausschließlich metallische Werkstoffe betrachtet werden. Die Grundlagen und Besonderheiten dieses Speicherkonzeptes sind in Kapitel 2 zusammengefasst. Nach der Definition der Ziele dieser Arbeit in Kapitel 3 erfolgt in Kapitel 4 eine detaillierte Beschreibung aller zur Entwicklung und Herstellung von makroverkapselten Speichern benötigten Prozessschritte, welche die zu berücksichtigenden Randbedingungen und Eingangsgrößen festlegen. Die zur Bewertung verwendeten ökonomischen Kennzahlen und Kostenfunktionen zur Beschreibung der einzelnen Prozessschritte werden in Kapitel 5 abgeleitet und detailliert erklärt. Das thermische und fluiddynamische Verhalten unterschiedlicher Verkapselungskonzepte wird durch vereinfachte analytische Speichermodelle beschrieben. Die Modelle betrachten die Wärmeübertragung im Speicher als ein Netzwerk aus thermischen Widerständen sowie den Druckverlust beim Durchströmen des Speichers durch Druckverlustkorrelationen und werden im Detail in Kapitel 6 erläutert. Schließlich erfolgt in Kapitel 7 die Validierung der entwickelten vereinfachten Speichermodelle mit numerischen Modellen und experimentellen Daten. Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse zur Bewertung unterschiedlicher Verkapselungskonzepte am Beispiel eines exemplarischen Speichers mit dem PCM Magnesiumchlorid-Hexahydrat erfolgt dann in Kapitel 8.

2 Stand der Forschung und Entwicklung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung und Entwicklung im Bereich der thermischen Energiespeicherung mit PCM. Nach einem allgemeinen Überblick über die Speicherung latenter thermischer Energie und fest/flüssig-PCM werden die Vorteile und bestehenden Herausforderungen der Makroverkapselung von PCM vorgestellt. Abschließend erfolgt ein Überblick zu Auslegungs- und Berechnungsverfahren solcher Speichersysteme. Die folgenden Ausführungen beschränken sich dabei auf den fokussierten Arbeitstemperaturbereich zwischen 100 und 250 °C und die Verkapselung mit metallischen Werkstoffen.

2.1 Latente thermische Energiespeicher

Energiespeicher sind technische Mittel zur möglichst wirtschaftlichen Speicherung von Sekundärenergie und ermöglichen eine räumliche und/oder zeitliche Entkopplung von Energieverfügbarkeit und Energiebedarf [17]. Eine häufig angewandte Klassifizierung von Energiespeichern erfolgt anhand der physikalischen Form der gespeicherten Energie, wonach zwischen elektrischen, elektrochemischen, chemischen, mechanischen und thermischen Speichern unterschieden werden kann [18]. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich hierbei auf die thermische Energiespeicherung, welche, wie in Abbildung 2.1 gezeigt, wiederum in sensibler, latenter oder thermochemischer Form und mit unterschiedlichen Medien und Verfahren erfolgen kann.

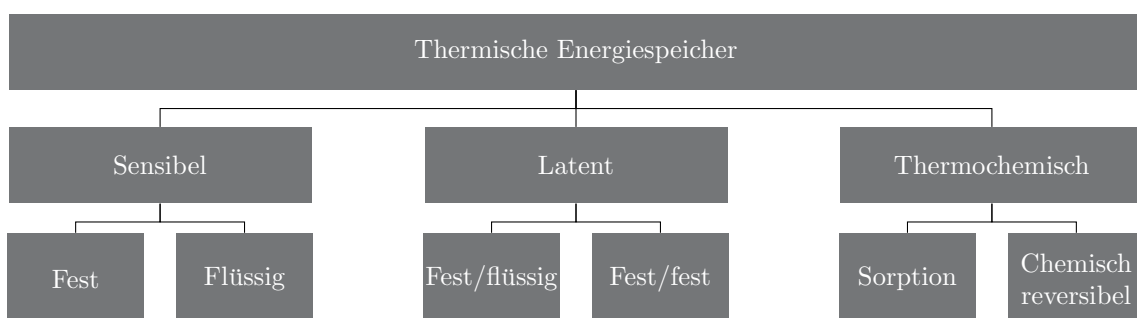


Abbildung 2.1: Klassifizierung thermischer Energiespeicher in Anlehnung an Sterner und Stadler [18]