

Strömungs- und kältetechnische Optimierung von Latentkältespeichern

Abschlussbericht

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (Az: 24825)

Bearbeiter: Sebastian Pinnau

Dresden, 2009

INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
3	Untersuchung potentieller Speichermedien	7
3.1	Gruppen von Latentspeichermedien	7
3.2	Literaturrecherche	8
3.3	Stoffdatenermittlung	9
3.3.1	Bestimmung der Schmelzenthalpie	9
3.3.2	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	10
4	Untersuchung der Speicherkonstruktion	13
4.1	Überblick zum Stand der Technik	13
4.2	Vergleich verschiedener Speicherkonzepte	14
4.3	Betrachtungen zu möglichen Kapselformen	17
4.4	Strömungstechnische Untersuchungen	18
4.4.1	Konstruktion des Versuchsspeichers	19
4.4.2	Herstellung der Behälterfüllungen	19
4.4.3	Ermittlung sinnvoller Volumenströme	22
4.4.4	Druckverlustmessung	24
4.4.5	Strömungsvisualisierung	27
4.5	Leistungsmessung Modellspeicher	29
4.5.1	Parameter der untersuchten Varianten	29
4.5.2	Beschreibung des Versuchsstandes	29
4.5.3	Kugelschüttung	30
4.5.4	Schlauchbeutel stehend	32
4.5.5	Schlauchbeutel schüttung	34
4.6	Leistungsmessung Prototyp	36
4.6.1	Konstruktion des Speichers	36
4.6.2	Messergebnisse	38
4.6.3	Einordnung der Ergebnisse in die Literaturlauswertung	41
4.7	Gestaltungshinweise und Kostenvergleich	42
5	Fazit	43
	Literaturverzeichnis	44
A	Diagramme der Leistungsmessungen	48

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Typisches Lastprofil des Elektroenergiebedarfes von Gewerbebauten	3
2.2	Betriebs- und Teillastverhalten von Hubkolbenverdichtern	4
3.1	Hitzdrahtsonde zur Messung der Wärmeleitfähigkeit	11
3.2	Messung der Wärmeleitfähigkeit für flüssiges Paraffin RT 6	11
4.1	Mögliche Einteilung der Wärmespeicher	13
4.2	Speicherdichte im Vergleich zum theoretisch möglichen Maximalwert	16
4.3	Vergleich der spezifischen Leistung	16
4.4	Zeichnung und Bild vom Modellspeicher	19
4.5	Folienschweißgerät für die Schlauchbeutel	21
4.6	Verwendete Schüttungen	22
4.7	Technisch sinnvolle Volumenströme für den Versuchsspeicher	24
4.8	Versuchsaufbau für die Druckverlustmessung	25
4.9	Druckverlustmessung für verschiedene Schüttungen	26
4.10	Bilder der Strömung	28
4.11	Schema und Bild des Latentspeicher-Prüfstandes	30
4.12	Kugelschüttung, Beladung	31
4.13	Kugelschüttung, normale Entladung	32
4.14	Schlauchbeutel stehend, normale Entladung	33
4.15	Schlauchbeutel Schüttung, normale Entladung	34
4.16	Schlauchbeutel Schüttung, schnelle Entladung	35
4.17	Beschädigungen der Schlauchbeutel	36
4.18	Zeichnung und Bild vom Prototypen-Speicher	37
4.19	Schlauchbeutel-Füllung des Prototypen	37
4.20	Prototyp, Laden	39
4.21	Prototyp, normale Entladung	39
4.22	Vergleich der spezifischen Leistung	41
A.1	Kugelschüttung, schnelle Entladung	48
A.2	Schlauchbeutel stehend, Laden	49
A.3	Schlauchbeutel stehend, schnelle Entladung	49
A.4	Schlauchbeutel Schüttung, Laden	50
A.5	Prototyp, schnelles Laden	50
A.6	Prototyp, schnelle Entladung	51

TABELLENVERZEICHNIS

3.1	Mögliche PCM für die Anwendung in der Klimatechnik	8
3.2	Ergebnisse der DSC-Messung	10
3.3	Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung	12
4.1	Kennzahlen der verwendeten Schüttungen	21
4.2	Berechnete Druckverluste für Kugelschüttungen	25
4.3	Kapazitäten der Speicherfüllungen	29
4.4	Maximale Messfehler der Durchflussmessung	30
4.5	Speicherkapazität des Prototypen	38

SYMBOLVERZEICHNIS

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
Δh_S	spezifische Schmelzenthalpie	kJ/kg
I	Stromstärke	A
k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m K
L	Länge	m
ℓ	charakteristische Abmessung	m
m	Anstieg	
Q	Wärme	kWh
q_S	Speicherichte	kWh/m ³
\dot{q}	Wärmequellendichte	W/m
U	Spannung	V
V	Volumen	m ³

Griechische Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
ε	Kälteleistungszahl	
ε	Porosität	
η	Wirkungsgrad, Nutzungsgrad	
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
ξ	dimensionslose Koordinate	
ϱ	Dichte	kg/m ³

Indizes

Symbol	Bedeutung
aus	Austritt
ein	Eintritt
f	fest
fl	flüssig
lat	latent
m	mittel
S	Schmelz-
Sp	Speicher
sen	sensibel
th	theoretisch

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

COP	Coefficient of Performance
PCM	Phase Change Material
WTF	Wärmeträgerfluid
WÜ	Wärmeübertrager

1 ZUSAMMENFASSUNG

Schwankende Lastbedingungen führen bei Anlagen zur Kälteerzeugung häufig zu Betriebszuständen mit niedrigen Teillasten oder gar zum Takten der Aggregate, was mit niedrigen Gesamtwirkungsgraden verbunden ist. Der Einsatz von Speichern kann in diesen Fällen zur Steigerung der Anlageneffizienz beitragen. Eisspeicher, die eine sehr hohe Speicherdichte aufweisen, sind derzeit nur für große Anlagen wirtschaftlich einsetzbar. Im Temperaturbereich zwischen 4 °C und 15 °C stehen zudem nur Kaltwasserspeicher zur Verfügung, die sehr große Volumina benötigen. Das Projekt befasste sich daher mit der Optimierung von Latentkältespeichern, mit dem Ziel die Effizienz solcher Speicher zu verbessern und diese andererseits unter wirtschaftlichen Aspekten auch für den Kleinkältebereich zugänglich zu machen.

Dazu wurden einerseits potentielle Latentspeichermedien für den genannten Temperaturbereich recherchiert und für einige Substanzen fehlende Stoffdaten ermittelt. So wurden Schmelzenthalpien und Wärmekapazitäten mittels DSC-Untersuchungen bestimmt und Messungen der Wärmeleitfähigkeiten mit einer eigens dafür angefertigten Hitzdrahtsonde vorgenommen. Die Untersuchungen zur Optimierung des Speichers beschränkten sich auf statische Systeme, bei denen das Speichermedium vom Wärmeträger durch eine Wand räumlich getrennt ist. Hierzu wurden verschiedene Varianten der Verkapselung des Speichermediums auf ihre Eignung hinsichtlich strömungs- und kältetechnischer Aspekte betrachtet. So wurden u. a. Messungen der auftretenden Druckverluste sowie der übertragbaren Leistungen beim Be- und Entladen des Speichers durchgeführt.

Im Ergebnis konnten Schlauchbeutelerschüttungen als eine sinnvolle Alternative zu den bisher häufig verwendeten Kugelschüttungen aufgezeigt werden. Diese erlauben bei gleichen Behälterabmessungen deutlich höhere Speicherkapazitäten bei gleicher oder leicht verbesserter Übertragungsleistung. Durch die geringen Materialkosten für die Verkapselung, verbunden mit einer kostengünstigen, automatisierten Herstellung, sind auch Anwendungen im kleineren Leistungsbereich denkbar.

Um das vorgestellte Speicherkonzept bis zur Marktreife zu führen, sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der Zyklenbeständigkeit der Verkapselungen durchzuführen. Ein wichtiger Schritt, vor allem zur Nutzung mit Absorptionskältemaschinen für die solare Klimatisierung, ist die Entwicklung geeigneter Speichermedien für Temperaturbereiche oberhalb von 0 °C. Aufgrund der Unterkühlungsneigung vieler potentieller Speichermedien stellt dabei die Suche nach geeigneten Keimbildnern eine Hauptaufgabe dar. Diese Thematik ist jedoch derart umfangreich und komplex, dass dies die Aufgabe eines eigenen Forschungsprojektes darstellt.

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte im Verbund durch die Projektpartner *Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik* und *pro:genius® hoffmann piossek gbr*. Der besondere Dank der Projektpartner gilt der *Deutschen Bundesstiftung Umwelt* für die Förderung des Vorhabens (Az: 24825).

2 EINLEITUNG

Technische Anlagen zur Bereitstellung von Wärme oder Kälte müssen in der Regel über einen breiten Leistungsbereich verfügen, da die auftretenden Lasten auf der Abnehmerseite zeitlichen Schwankungen unterliegen. Die momentane Leistungsanforderung ist dabei von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Dies können je nach Art der Anlagennutzung beispielsweise das Wetter, Prozessabläufe oder auch Nutzerwünsche sein. Die Anlage muss dabei alle auftretenden Zustände von geringen Teillasten bis hin zur Maximallast problemlos abdecken können. Für die Auslegung wird daher die maximal zu erwartende Leistungsanforderung herangezogen, obwohl diese meist nur einen Bruchteil der gesamten Betriebszeit ausmacht.

Im realen Betrieb der Anlage treten dann fast ausschließlich Teillastzustände auf. Neben den dadurch verursachten Herausforderungen und Problemen auf der technischen und regelungstechnischen Seite, sind damit häufig auch Nachteile bei der energetischen Effizienz der gesamten Anlage verbunden. Durch den Einsatz von Speichern ist es möglich, die Erzeugerleistung zumindestens teilweise vom Bedarf zu entkoppeln und somit einen Beitrag zur Lösung der auftretenden Probleme zu leisten. Nachfolgend soll dies an einigen Beispielen, die auch die Motivation für dieses Projekt geliefert haben, näher erläutert werden.

Zum einen treten in der Ingenieurpraxis zahlreiche Fälle auf, bei denen nichtstationäre Kühlvorgänge realisiert werden müssen. Dazu zählen z. B. die Einlagerung von Nahrungsmitteln in Kühlräume, die Getränkekühlung, die Kühlung von Kühltransporten nach Teilentladung von Gütern (LKW) oder auch die aus Komfortgründen notwendige Kühlung von PKW nach dem Parken in der Sonne. Die Wiederherstellung der gewünschten oder notwendigen Temperatur in einer bestimmten Zeitspanne erfordert zumeist große Kälteleistungen, die deutlich über denen bei stationärem Betrieb liegen. Die Kältemaschine wird für die maximale Kühllast während des instationären Einfahrvorganges ausgelegt, obwohl dieser zeitlich betrachtet meist nur einen geringen Anteil am gesamten Kühlvorgang besitzt. Wird hier zur Abdeckung dieser Spitzenlasten ein Kältespeicher installiert, kann die notwendige Leistung der Kältemaschine meist drastisch reduziert werden.

Ein weiteres Beispiel stellen Kälte-Klima-Prozesse bei stationärem Betrieb dar. Abbildung 2.1 zeigt einen typischen Lastgang des Elektroenergiebedarfes für einen Gewerbebau an einem warmen Sommertag. Aufgrund der Außenbedingungen (Temperatur, Sonneneinstrahlung) treten die größten Kühllasten zu den Zeiten auf, in denen bedingt durch das Nutzerverhalten der Bedarf an Elektroenergie ohnehin auf hohem Niveau liegt. Mit dem Einsatz von Kältespeichern lässt sich das Lastprofil vergleichmäßigen, indem Kühllastschwankungen im tageszeitlichen Verlauf vom Speicher abgepuffert werden, oder sogar die gesamte Kälteerzeugung in Schwachlastzeiten verlegt wird (siehe Abb. 2.1b).

Auf Grund der ständig wachsenden Komfortansprüche wird die Klimatisierung auch in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen. Laut einer europäischen Studie [1] soll allein in Deutschland die klimatisierte Fläche von $216,74 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ im Jahr 2005 bis auf einen Wert von $298,51 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ im Jahr 2010 und $400,13 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ im Jahr 2020 ansteigen.

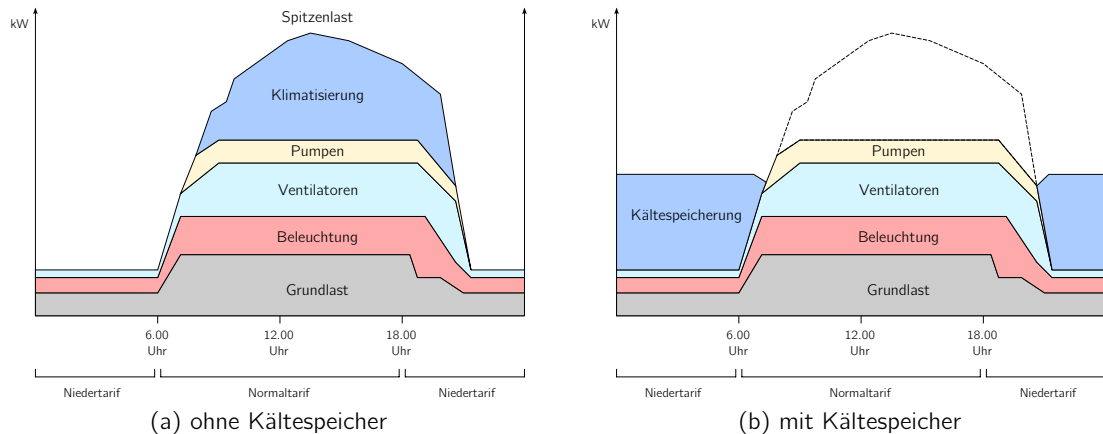


Abbildung 2.1: Typisches Lastprofil des Elektroenergiebedarfes von Gewerbebauten nach [8]

Eine Lösung für dieses Problem liegt sicherlich in der solaren Klimatisierung mittels Absorptionskältemaschinen, da der Bedarf an Klimakälte und das Angebot an solarer Strahlung im jahreszeitlichen Verlauf prinzipiell zusammenfallen. Aber auch hier können Kältespeicher sinnvoll eingesetzt werden. Sie ermöglichen den Ausgleich der im tageszeitlichen Verlauf auftretenden Verschiebung zwischen solarem Strahlungsangebot und Kältebedarf. Diese Verschiebung ergibt sich zum einen aus dem verzögerten Wärmetransport infolge der Speicherfähigkeit der Baumasse und zum anderen durch die geografische Ausrichtung der Kollektoren. Diese werden, um einen optimalen Ertrag über das gesamte Jahr zu erzielen, üblicherweise nach Süden ausgerichtet. Dadurch treten in den frühen Morgenstunden an den Ostwänden bereits sehr große Kühllasten auf, während der Ertrag der nach Süden ausgerichteten Kollektoren noch gering ist. Am Abend ergibt sich die gleiche Situation für die Westwände. Der Einsatz von Kältespeichern zum Ausgleich dieser Verschiebung kann somit sinnvoll zur Verbesserung der Nutzbarkeit der solaren Klimatisierung beitragen.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass aus den bestehenden Anwendungen eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten für Speichertechnologien abgeleitet werden kann. Doch während die Speicherung im Bereich der Wärmetechnik schon seit Jahrzehnten in großem Umfang praktiziert wird, sind Speicher in der Kältetechnik vergleichsweise selten anzutreffen. Im nachfolgenden Absatz werden einige Probleme dargestellt, die bei einem geplanten Einsatz eines Kältespeichers zu berücksichtigen sind.

Für den Bereich der Kältespeicherung sind am Markt derzeit fast ausschließlich Kaltwasserspeicher und Eisspeicher verfügbar. Kaltwasserspeicher müssen aufgrund ihrer geringen Speicherdichte allerdings sehr große Volumina aufweisen. Dies liegt darin begründet, dass im Kältebereich nur sehr geringe Temperaturdifferenzen zur Verfügung stehen. So werden Kaltwassernetze für klimatische Anwendungen häufig mit einem Temperaturniveau von $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefahren. Eisspeicher ermöglichen große Speicherdichten, sind jedoch bei vertretbarem Investitionsaufwand bisher nur im Bereich über ca. 100 kWh am Markt. Darüber hinaus besteht die zwingende Notwendigkeit, Temperaturen unterhalb von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu realisieren. Gerade für die Klimatechnik sind dies unnötig tiefe Temperaturen, die die Leistungszahl der Kältemaschine deutlich verringern. Bei der Anwendung von Absorptionskälte kommt zudem häufig Wasser als Kältemittel zum Einsatz, wodurch die Verwendung von Eisspeichern schon prinzipbedingt ausgeschlossen ist. Aufgrund der zunehmenden Anwendung von Absorptionskältemaschinen für die solare, CO_2 -neutrale Klimatisierung ist am

Markt ein Bedarf an leistungsfähigen, kompakten Latentkältespeichern im Temperaturbereich von 4 °C bis 15 °C vorhanden. Trotz zahlreicher Bemühungen und Entwicklungen, die vor allem einen wissenschaftlichen Charakter hatten, ist es bisher nicht gelungen derartige Systeme am Markt zu etablieren. Für den genannten Temperaturbereich stehen zwar ein paar Speichermedien (Paraffine und Salzhydrate) zur Verfügung, es sind aber bisher kaum Speicher verfügbar.

Damit ergeben sich maßgeblich zwei Problemstellungen. Dies ist einerseits die Beschaffung eines Speichermediums, welches sowohl unter ökologischen als auch ökonomischen Gesichtspunkten gewissen Anforderungen genügen muss. Das nächste Problem, das trifft auch für Eisspeicher im Kleinkältebereich zu, ist die optimale Gestaltung des Speichers mit der Zielstellung einer hohen Entladegeschwindigkeit, da alle hierfür in Frage kommenden Speichermedien ein relativ schlechtes Wärmeleitvermögen besitzen und die treibenden Temperaturdifferenzen im Anwendungsbereich sehr gering sind.

Die folgende Darstellung soll anhand von Beispielen die Umweltrelevanz des Themas aufzeigen. Im Bereich der Klimatechnik können, wie bereits erwähnt, Speicher wirkungsvoll zur Abdeckung von auftretenden Lastspitzen eingesetzt werden. Die Kältemaschine muss nun nicht mehr für diese Extremfälle ausgelegt werden, wodurch sich die installierte Aggregateleistung deutlich reduzieren lässt. Aufgrund dessen kommt es zu einer Erhöhung der mittleren Auslastung und sehr niedrige Teillasten können vermieden werden. Da der Wirkungsgrad η von Kompressionskältemaschinen im Teillastbetrieb mit sinkender Leistung abnimmt (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 2.2), ergibt sich hier ein Einsparpotential an elektrischer Antriebsenergie.

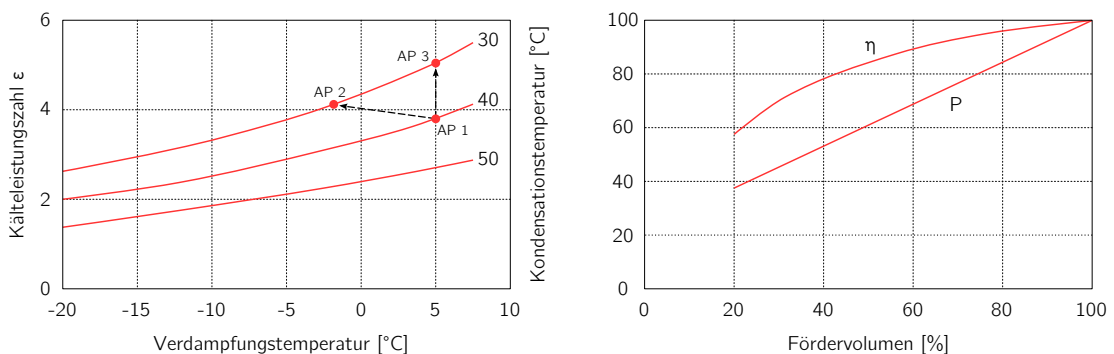


Abbildung 2.2: Betriebs- und Teillastverhalten von Hubkolbenverdichtern nach [26]

Wird die Kälteerzeugung zumindest teilweise in die Nachtzeit verlegt, so ergibt sich weiteres Potential für die Einsparung von Elektroenergie, da die Außenluftbedingungen nachts für die Kälteerzeugung erheblich besser sind. Dies soll anhand des linken Diagramms in Abbildung 2.2, in dem das Betriebsverhalten eines Hubkolbenverdichters mit dem Kältemittel R 404 dargestellt ist, verdeutlicht werden. Betrachtet man eine direkte Versorgung der Verbraucher über die Kältemaschine während des Tages, so ergibt sich bei einer Verdampfungstemperatur von 5 °C und einer Kondensationstemperatur von 40 °C eine Kälteleistungszahl $\epsilon = 3,8$ (AP 1). Nachts kann die Kondensation dagegen bei 30 °C oder sogar darunter erfolgen. Bei Einsatz eines Eisspeichers verschiebt sich der Arbeitspunkt somit zu AP 2. Hier kommt es trotz der erforderlichen niedrigeren Verdampfungstemperatur zu einer Verbesserung der Kälteleistungszahl ϵ . Betrachtet man die Anwendung eines Latentspeichers mit einem auf den Anwendungsfall abgestimmtem Speichermedium, so wäre im Idealfall keine, oder nur eine sehr geringe, Reduzierung der Verdampfungstemperatur zur Speicherladung notwendig. Der Arbeitspunkt verschiebt sich somit zu AP 3,

wodurch sich eine Kälteleistungszahl von $\varepsilon = 5,0$ ergibt. Bei elektrisch betriebenen Anlagen bedeutet dies ein CO₂-Einsparpotential von 39 g/kWh¹. Betrachtet man als Beispiel ein Hotel mit einer installierten Kälteleistung von 500 kW und 800 Vollbenutzungsstunden pro Jahr, so kann damit eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 15,6 t jährlich erzielt werden.

Ein weiterer Punkt betrifft die Klimatisierung von Kraftfahrzeugen. Um Einsparungen beim Kraftstoffverbrauch zu erzielen, können Neufahrzeuge mit einer Start-Stop-Automatik ausgerüstet werden, die bei Stillstand vorübergehend den Motor abschaltet. Im innerstädtischen Fahrzyklus kann dies nach [6] bis zu 30 % der gesamten Fahrzeit ausmachen. Angaben verschiedener Hersteller zufolge lassen sich, bezogen auf den gesamten Fahrzyklus, Kraftstoffeinsparungen von 3 % bis 10 % erreichen. Nach einer ersten Einführung dieser Technik Anfang der 80er Jahre fand diese aber wenig Beachtung und kam dann erst Ende der 90er Jahre zunächst in den sogenannten 3l-Fahrzeugen zum Einsatz. Diese Fahrzeuge wurden aber i. d. R. nur ohne Klimaanlage angeboten, da im Stillstand der Klimakompressor nicht angetrieben werden kann. Aufgrund der steigenden Energiekosten in den letzten Jahren fand die Start-Stop-Automatik aber auch Einzug in andere Fahrzeugklassen, und gehört inzwischen bei zahlreichen Fahrzeugen zur Serienausstattung. Aus Komfortgründen erfolgt die Steuerung hier aber so, dass bei einer notwendigen Kühlung (Sollwertabweichung der Innenraumtemperatur) der Motor nicht abschaltet oder eben wieder anspringt. Mit dem Einsatz leistungsfähiger Latentkältespeicher, die eine schnelle Be- und Entladung erlauben, könnten diese Standzeiten überbrückt werden, ohne dass Komforteinbußen in Kauf genommen werden müssen. Solche Speicher werden bereits für die Standklimatisierung in einigen LKW eingesetzt und ermöglichen eine Kühlung während der Ruhezeiten bis zu 8 Stunden [40]. In Nordamerika ist es ohne Kältespeicher üblich, den LKW-Motor während der Ruhezeiten im Standgas laufen zu lassen. Nach [11] kommt ein LKW somit auf ca. 2400 Leerlaufstunden im Jahr nur zu Klimatisierungszwecken. Der Kraftstoffverbrauch ist für einen typischen LKW-Diesel mit ca. 3,8 l je Leerlaufstunde angegeben.

Mit diesem Vorhaben soll ein Beitrag zur Lösung der genannten Problemstellungen geleistet werden. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung von Latentspeichern für klimatische Anwendungen sowie der Optimierung hinsichtlich dynamischem Lastverhalten (hohe Entladegeschwindigkeit/Leistung) und Speicherdichte (geringer Platzbedarf). Das Ziel des Vorhabens ist deshalb eine systematische Untersuchung des gesamten Speichers:

- Recherche potentieller Speichermedien sowie ggf. Bestimmung von fehlenden thermodynamischen Stoffdaten
- Gestaltung der Speichermasse und Hülle hinsichtlich eines optimierten Wärmeübertragungsverhaltens
- Anordnung des Speichermaterials im Speicher (Schüttung, mäanderförmige Gestaltung, wärmeleitende Strukturen)
- Strömungs- und kältetechnische Optimierung

Für die Gestaltung der Kapselung bzw. der Wärmeübertrager soll auf Messdaten von Speichern aus der Literatur zurückgegriffen werden. Anhand dieser Daten wird die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Konzepte hinsichtlich einer Vorauswahl ausgewertet und

¹Bezogen auf kWh Kälte, ausgehend von einem CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommixes von 625 g/kWh

verglichen. Da es sich bei den bereits untersuchten Speichern meist um Anwendungen in höheren Temperaturbereichen handelt, ist eine Überprüfung notwendig, inwiefern die Ergebnisse ohne weiteres auf kältetechnische Anwendungen übertragbar sind, da bei diesen i. d. R. wesentlich geringere Temperaturspreizungen zur Verfügung stehen. Eine Adaption der von den Eisspeichern bekannten Bauarten für andere Speichermedien erfordert weitere Untersuchungen hinsichtlich optimaler Abmessungen der Wärmeübertrager bzw. Verkapselungen. Dies ist notwendig, da die Wärmeleitfähigkeit λ von Salzhydraten und Paraffinen etwa um den Faktor 4 bis 11 kleiner ist, als die von Eis.

Für verschiedene Varianten der inneren Speichergestaltung, also der Anordnung und Verkapselung des Speichermediums, sollen strömungstechnische Untersuchungen hinsichtlich auftretendem Druckverlust und Gleichmäßigkeit der Durchströmung durchgeführt, und die erreichbaren Speicherdichten verglichen werden. Anhand der Ergebnisse sollen Vorzugsvarianten ausgewählt werden, für die weitere experimentelle Untersuchungen zum Lade- und Entladeverhalten durchzuführen sind. Dazu kommt ein Versuchsspeicher im Labormaßstab zum Einsatz, bei dem sich die Bestückung schnell verändern lässt.

Die Resultate sollen die Auswahl von zwei geeignet erscheinenden Konzepten ermöglichen, deren Parameter anhand von Simulationsrechnungen für die Konstruktion von zwei Prototypen optimiert werden sollen. Die Prototypen sollen eine möglichst anwendungsnahe Konstruktion für die Verwendung im kleineren Leistungsbereich darstellen und anhand von messtechnischen Untersuchungen Aussagen hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Zyklfestigkeit liefern. Aus den Ergebnissen sollen konstruktive Verbesserungsmöglichkeiten, Auslegungshinweise und Angaben zu den Produktkosten abgeleitet werden.

3 UNTERSUCHUNG POTENTIELLER SPEICHERMEDIEN

Für die Entwicklung von anwendungsreifen Technologien zur Kältespeicherung spielt die Verfügbarkeit von entsprechenden Speichermedien eine entscheidende Rolle. Obwohl das Hauptziel des Projektes die konstruktive Gestaltung des Speichers hinsichtlich eines optimierten Wärmeübertragungsverhaltens darstellt, sollte aus diesem Grund auch ein Beitrag zur Bereitstellung von potentiellen Speichermedien geleistet werden.

Aus dem bereits genannten Grunde, der in Klimakälteanlagen nur sehr geringen zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenzen, wurde im Vorfeld des Projektes der Blickpunkt auf das Verfahren der latenten Kältespeicherung gerichtet. Dabei durchläuft das Speichermedium beim Lade- und Entladezyklus jeweils eine reversible Phasenumwandlung unter Zufuhr oder Freisetzung der entsprechenden Umwandlungsenthalpie. Während dieses Vorganges bleibt die Temperatur des Speichermediums konstant, so dass für die Speicherung letztendlich nur geringe Temperaturänderungen des Mediums erforderlich sind. Für die technische Nutzung in Speicherbehältern kommen dabei eigentlich ausschließlich fest-flüssig oder auch fest-fest Umwandlungen in Frage. Der Übergang flüssig-gasförmig ist zwar mit deutlich größeren Umwandlungsenthalpien verbunden, allerdings treten hier auch sehr große Dichtesprünge auf, so dass entweder sehr große Behälter oder große Drücke notwendig sind. Ein Überblick über weitere Verfahren zur Wärme- bzw. Kältespeicherung wird in Abschnitt 4.1 gegeben.

3.1 Gruppen von Latentspeichermedien

Latentspeichermedien werden in der Literatur häufig als PCM (engl., Phase Change Material) bezeichnet. Im Bereich der Klimatechnik sind als mögliche PCM neben Wasser vor allem die Gruppen der Salzhydrate, Gashydrate und Paraffine relevant.

Gashydrate sind Clathratverbindungen, bei denen Gasmoleküle im Gitter der Eiskristalle eingeschlossen werden. Dies verleiht dem Gitter eine höhere Stabilität, wodurch Schmelztemperaturen deutlich über dem eigentlichen Gefrierpunkt von Wasser möglich sind. Für die Lösung des Gases im Wasser ist aber meist ein Überdruck erforderlich, was hinsichtlich der Behälterkonstruktion nachteilig ist. Die latenten Speicherkapazitäten liegen etwas unterhalb der des Wassers.

Bei Paraffinen handelt es sich um vollständig gesättigte Kohlenwasserstoffe. Sie sind daher chemisch weitgehend inert und zeigen keine Korrosion an Metallen. Aufgrund des weiten Schmelztemperaturbereiches von ca. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind sie vielseitig einsetzbar. Ihre volumenspezifische Schmelzenthalpie liegt z. T. deutlich unter 200 kJ/l und ist somit vergleichsweise gering. Nachteilig sind vor allem der hohe Preis, die enormen Kriecheigenschaften sowie die Brennbarkeit.

Salzhydrate und deren eutektische Mischungen sind in einem Temperaturbereich von ca. $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ verfügbar. Sie zeichnen sich durch hohe Schmelzenthalpien und einen z. T.

niedrigen Preis (je nach Typ) aus. Ein Nachteil bei dieser Stoffgruppe ist der häufig inkongruente Schmelzvorgang. Dabei entsteht neben dem freiwerdenden Kristallwasser eine feste Phase, die sich durch Stratifikation am Boden absetzen kann. Bei unzureichender Durchmischung kann dies zu einer dauerhaften Reduzierung der nutzbaren Umwandlungsenthalpie führen.

3.2 Literaturrecherche

In der Literatur wurde nach möglichen Speichermedien für eine Anwendung in der Klimatechnik gesucht. Die Schmelztemperaturen der PCM's sollten dabei möglichst im Bereich 4 °C bis 15 °C liegen.

Die Ergebnisse der Recherche sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Die in der Literatur angegebenen Stoffwerte sind aber häufig unvollständig. Es fehlen zum Teil Werte für die Schmelzenthalpie, sowie bei vielen Substanzen Angaben zur Wärmekapazität, zur Wärmeleitfähigkeit und zu Volumeneffekten bei der Umwandlung. Für eine Bewertung hinsichtlich der Anwendbarkeit sind diese Daten jedoch zwingend erforderlich.

Tabelle 3.1: Mögliche PCM für die Anwendung in der Klimatechnik

Bezeichnung	t_S [°C]	Δh_S [kJ/kg]	Δh_S [kJ/l]	Quelle
Schweres Wasser, D_2O	3,7	318	–	[29]
$Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O + 2 KCl$	3,7	–	–	[38]
Antimonpentachlorid, $SbCl_5$	4,0	33	–	[29]
$Na_2SO_4 + NaCl + KCl + H_2O$	4,5–5,5	234	–	[29]
Tetradecan, $C_{14}H_{30}$	4,5–5,5	165–231	127–178	[19, 29, 41]
$Na_2SO_4 + NH_4Cl + NH_4Br + H_2O$	7,2–11,0	–	260	[21]
Ameisensäure, CH_2O_2	7,8	247	303	[29]
Polyglykol E400	8,0	100	112	[41]
$LiClO_3 \cdot 3 H_2O$	8,1	253	393	[14, 17, 19, 29, 41]
Antimonpentafluorid, SbF_5	8,3	–	–	[20]
Pentadecan, $C_{15}H_{32}$	8,0–10,0	153–207	117–159	[19, 29, 41]
$ZnCl_2 \cdot 3 H_2O$	10,0	–	–	[19, 41]
Propyl palmiate	10,0	186	–	[29, 41]
Monoethanolamin (2-Aminoethanol)	10,0	–	–	[23]
Schwefelsäure, H_2SO_4	10,4	100	184	[29]
$Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O + NH_4Cl$	10,8	163	–	[29, 38]
$Na_2SO_4 + NaCl + NH_4Cl + H_2O$	11,0–12,7	181	–	[29, 34]
Decanol, $C_{10}H_{21}OH$	6,9	213	176	[19, 37]
$C_{11}H_{10} + C_{12}H_{10}$	12,0	98	–	[29]
$CaCl_2 \cdot 6 H_2O + Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$	13,0	–	–	[19]
$C_5H_{12}O_3 + CH_4N_2O$	13,4	160	182	[19]
$K_2HPO_4 \cdot 6 H_2O$	13,0–14,0	108	–	[19, 29, 41]
Isopropyl stearate	14,0–19,0	140–142	–	[29, 41]
$CaCl_2 \cdot 6 H_2O + CaBr_2 \cdot 6 H_2O$	15,0	140	249	[36]
$NaOH \cdot 3,5 \frac{1}{2} H_2O$	15,4	200	280	[14, 19, 41]
Octadecan + Hexadecan	15,8	222	–	[19]
Caprylsäure (Octansäure)	16,0	149	134	[14, 29, 41]
Dimethylsulfoxid, C_2H_6OS	16,5	86	86	[41]
Essigsäure, $C_2H_4O_2$	16,7	187	196	[23, 29]
$Na_2CrO_4 \cdot 10 H_2O$	18,0	–	–	[19, 41]
$NaCl \cdot Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$	18,0	286	–	[19, 29]
$K_2HPO_4 \cdot 4 H_2O$	18,0	330	–	[29]
Hexadecan, $C_{16}H_{34}$	18,2	238	184	[19, 29]
$KF \cdot 4 H_2O$	18,5	231	336	[14, 17, 19, 29, 41]

Am Markt gibt es zudem einige Hersteller, die PCM's als fertiges Produkt anbieten. Die Firma Rubitherm¹ vertreibt im gewünschten Temperaturbereich verschiedene Paraffine. Diese können auch in einer plattenförmigen Verkapselung geliefert werden. Hierfür steht eine Blechkassette mit einer Dicke von 1 cm und einem Füllvolumen von ca. 0,7 l zur Verfügung.

Von der Firma EPS² sind organische und anorganische PCM's im Temperaturbereich zwischen 0 und 19 °C in mehreren Abstufungen erhältlich. Als Verkapselung werden stapelbare plattenförmige Kunststoffbehälter, Edelstahl- und Kunststoffkugeln sowie konzentrische Rohre mit PCM-Füllung im Ringspalt angeboten. Die Kunststoffbehälter sind mit Abstandshaltern versehen, so dass diese nach dem Stapeln mit Luft oder Wasser durchströmt werden können.

Die verfügbaren fertigen PCM's weisen allerdings ein hohes Preisniveau auf. Für einen 1000 l Tank belaufen sich die Kosten für das PCM entsprechend Herstelleranfragen auf etwa 3 bis 6 T€.

3.3 Stoffdatenermittlung

Um Aussagen über die Verwendungsfähigkeit der recherchierten chemischen Substanzen als Latentspeichermedium treffen zu können, wurden für einige der PCM aus Tabelle 3.1 fehlende Stoffwerte messtechnisch ermittelt. Von Interesse waren hier in erster Hinsicht der Temperaturbereich der Phasenumwandlung und die zugehörige Schmelzenthalpie, sowie die Wärmeleitfähigkeit der Substanzen.

3.3.1 Bestimmung der Schmelzenthalpie

Für vier Substanzen bzw. Gemische wurden von Vecur³ die Schmelzenthalpie bestimmt. Als Meßverfahren wurde die Differential Scanning Calorimetry (DSC) verwendet. Dabei kam ein Meßgerät DSC 92 von Seiko zum Einsatz. Zur Durchführung der Messungen wurden jeweils ca. 50 mg der Substanzen in Edelmetalltiegel eingewogen und anschließend dicht verpresst. Die Messungen erfolgten jeweils mit einer Heiz- und Abkühlrate von 2 K/min [5].

Die untersuchten Proben und die ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt. Der angegebene Temperaturbereich stellt dabei den gesamten Phasenübergang dar, wobei das Einsetzen des Schmelzvorganges bei der unteren Temperatur beginnt. Zu beachten ist, dass die Breite des Umwandlungsbereiches bei DSC-Messungen deutlich von der verwendeten Heizrate abhängt.

Alle Proben wurden aus Laborchemikalien mit hohen Reinheitsgraden hergestellt. Für die Anfertigung der Gemische wurden die in der Tabelle aufgeführten stöchiometrischen Verhältnisse verwendet. Alle Proben zeigten während der Abkühlungszyklen eine deutliche Neigung zur Unterkühlung. Das Einsetzen der Erstarrung geschieht also deutlich unterhalb der Schmelztemperatur. Für eine Nutzung als PCM müsste dieses Verhalten durch Zusetzen eines passenden Keimbildners unterbunden werden.

¹Rubitherm Technologies GmbH, <http://www.rubitherm.de>

²Environmental Process Systems Ltd., <http://www.eps1td.co.uk>

³Vecur Forschungsinstitut für Chemie, Umwelttechnik und Recycling e. V. Freiberg

Tabelle 3.2: Ergebnisse der DSC-Messung

Bezeichnung	Schmelztemperaturbereich t_S [°C]	Schmelzenthalpie Δh_S [kJ/kg]
$Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O + 2 KCl$	6–18	60–112
$CaCl_2 \cdot 6 H_2O + Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$	–	–
Monoethanolamin (2-Aminoethanol)	2–13	204–221
$ZnCl_2 \cdot 3 H_2O$	-3–17	50–64

Das Gemisch aus Natriumsulfat-Dekahydrat (Glaubersalz) und Kaliumchlorid weist ein inkongruentes Schmelzverhalten auf. Die Schmelze besteht aus einer gesättigten Lösung und wasserfreiem Natriumsulfat als Bodenkörper. Durch den Zusatz von Kaliumchlorid wird die Schmelztemperatur des reinen Glaubersalzes ($t_S = 33\text{ °C}$) herabgesetzt. Es wurden zwei Proben hergestellt und vermessen, die wahrscheinlich einen etwas unterschiedlichen Wassergehalt aufwiesen. Beide Proben zeigen daher starke Abweichungen in der Schmelzenthalpie, weshalb diese in der Tabelle als größerer Bereich angegeben ist. Der Wassergehalt stellt daher einen sensiblen Parameter bei der Herstellung von PCM auf Basis von Salzhydraten dar [5].

Beim Vermischen der Substanzen Calciumchlorid-Hexahydrat und Calciumnitrat-Tetrahydrat entsteht sofort unter deutlicher Abkühlung eine klare Schmelze. Im Ergebnis der DSC-Messung sind für dieses Gemisch aber keine deutlichen Enthalpieänderungen erkennbar. Zinkchlorid-Trihydrat zeigt ein kongruentes Schmelzverhalten mit einer klaren Schmelze. Die Schmelzenthalpie des Trihydrates ist vergleichsweise gering, so dass eine Nutzung als Speichermedium eher ausgeschlossen ist. Monoethanolamin (MEA) weist klare Kristallisations- und Schmelzbereiche auf, zeigt aber auch eine deutliche Unterkühlung von ca. 30 K [5].

3.3.2 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit wird sehr häufig die stationäre Plattenmethode angewendet, bei der ein plattenförmiger Probenkörper einseitig beheizt und auf der gegenüberliegenden Seite gekühlt wird. Aus Messungen der Oberflächentemperaturen sowie der Wärmestromdichte lässt sich dann im eingeschwungenen, stationären Zustand die Wärmeleitfähigkeit berechnen. Dieses Verfahren findet auch an der Professur für Technische Thermodynamik der TU Dresden Verwendung, weist aber für den geplanten Einsatzzweck einige Nachteile auf. Das Meßverfahren erlaubt zum einen nur die Verwendung von festen Körpern, und diese müssen andererseits auch noch zwei planparallele Oberflächen besitzen. Die Vorbereitung der Proben für die möglichen Kältespeichermedien würde sich somit ziemlich schwierig gestalten. Die Proben müssen zuerst abgekühlt und zur Erstarrung gebracht werden, wobei sich durch Dichteänderungen starke Unebenheiten in den Oberflächen einstellen. Anschließend müssen die Oberflächen geplant werden. Dabei tritt das Problem auf, dass der Schmelzpunkt sämtlicher Proben unterhalb der üblichen Raumtemperatur liegt.

Es wurde daher beschlossen, die Messungen mit einem instationären Hitzdrahtverfahren durchzuführen. Grundlage für dieses Meßverfahren bildet die Lösung der Fourier'schen Differentialgleichung für das Temperaturfeld in einem unendlich ausgedehnten Körper mit einer linienförmigen Wärmequelle. Lösungen für diese Temperaturfeldgleichung sind z. B. in [9] zu finden. Für die durchzuführenden Messungen wurde eigens eine Hitzdrahtsonde

angefertigt. Diese besteht im Wesentlichen aus einem dünnen Draht, der als ohmscher Widerstand durch Anlegen einer elektrischen Spannung die entsprechende Wärmequelle darstellt. Mittig am Draht wird die Temperatur mit einem Thermoelement erfasst. Die verwendete Hitzdrahtsonde ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

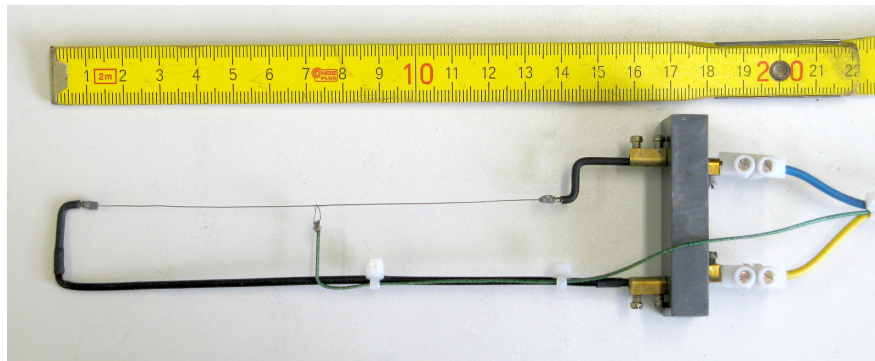


Abbildung 3.1: Hitzdrahtsonde zur Messung der Wärmeleitfähigkeit

Mit der Sonde sind sowohl Messungen im flüssigen als auch im festen Zustand möglich. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit muss die Sonde lediglich mittig in den Probenbehälter mit der Substanz eingebracht werden. Für die Untersuchungen in der festen Phase wurde der gesamte Probenbehälter einschließlich Probe und Sonde in ein Thermostatbad getaucht, um eine Erstarrung der Substanz zu erreichen. Da sich das Thermoelement am Draht etwa im Mittelpunkt des Probenbehälters befindet, konnte dies vor der eigentlichen Messung auch als Indikator dafür dienen, ob die Phasenumwandlung in der gesamten Probe abgeschlossen ist. Während der Durchführung der Messung verblieb der Probenbehälter im Thermostatbad.

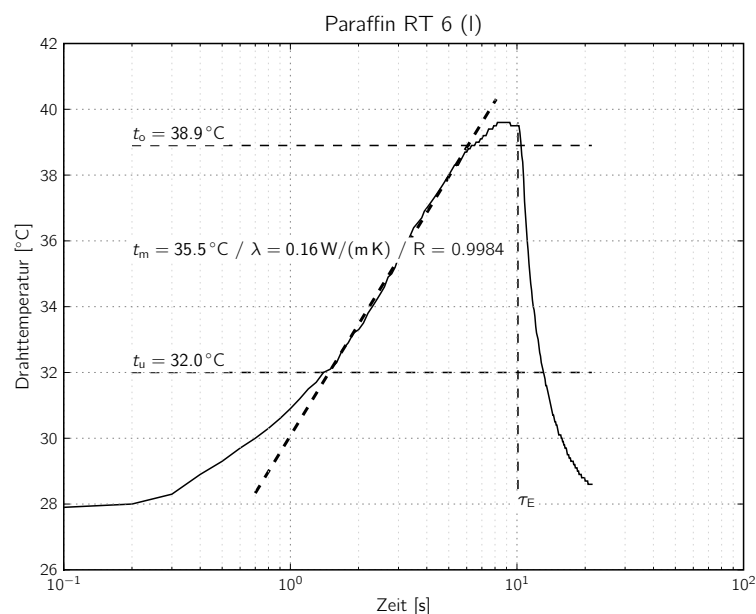


Abbildung 3.2: Messung der Wärmeleitfähigkeit für flüssiges Paraffin RT 6

In Abbildung 3.2 wird beispielhaft ein Diagramm mit den Messdaten für das Paraffin Rubitherm RT 6 in flüssiger Form gezeigt. Verwendet man für die Darstellung vorteilhaft eine logarithmisch skalierte Zeitachse, so weisen die Temperaturverläufe nach einer kurzen

Einschwingphase einen linearen Anstieg auf, zu dem sich die Wärmeleitfähigkeit umgekehrt proportional verhält. Für die Auswertung darf nur der lineare Bereich herangezogen werden, da nur in diesem die zugrunde liegende Differentialgleichung erfüllt ist. Bei der Messung in Flüssigkeiten kommt es mit zunehmender Erwärmung zu einem Einsetzen von konvektivem Wärmetransport, was sich in einem Abflachen des Temperaturanstieges äußert. Dies ist im Beispieldiagramm im oberen Temperaturbereich ebenfalls zu erkennen.

Unter der Annahme einer konstanten Wärmequellendichte und Vernachlässigung der Speicherwirkung der Sonde, was bei dem verwendeten dünnen Draht als gerechtfertigt angesehen werden kann, lässt sich nach [18] die Wärmeleitfähigkeit λ der Probe mit der Gleichung

$$\lambda = \frac{\ln \frac{\tau_2}{\tau_1}}{4 \pi (t_2 - t_1)} \cdot \tilde{q} \quad (3.1)$$

berechnen. Die Quellendichte kann im vorliegenden Fall aus der elektrischen Leistung bezogen auf die Drahtlänge L

$$\tilde{q} = \frac{P}{L} = \frac{U I}{L} \quad (3.2)$$

ermittelt werden. Die mit den Indizes 1 und 2 versehenen Zeitpunkte τ_i sowie die Temperaturen t_i stellen jeweils Beginn und Ende des betrachteten linearen Bereiches dar. Schreibt man nun für das Verhältnis aus Temperaturdifferenz und logarithmischer Zeitdifferenz den Anstieg m der Geraden, so gilt für die Wärmeleitfähigkeit der Zusammenhang

$$\lambda = \frac{U I}{4 \pi L m} \quad (3.3)$$

Die Messgenauigkeit der Hitzdrahtsonde wurde vor der Verwendung anhand von drei Referenzproben bestimmt. Dazu kamen destilliertes Wasser, Thermoöl Addinol XW 15 und Mineralwolle mit der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040 zum Einsatz. Bei allen drei Referenzen blieb der relative Meßfehler innerhalb einer Grenze von $\pm 3\%$. Im Rahmen des Projektes wurde dann an 7 Substanzen oder Gemischen aus Tabelle 3.1 die Wärmeleitfähigkeit für den flüssigen und den festen Zustand mit jeweils drei Messungen bestimmt. Die Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeiten und der zugehörigen Temperaturen sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung

Bezeichnung	flüssig		fest	
	$t_{m,fl}$ [°C]	$\lambda_{m,fl}$ [W/m K]	$t_{m,f}$ [°C]	$\lambda_{m,f}$ [W/m K]
$CaCl_2 \cdot 6 H_2O + CaBr_2 \cdot 6 H_2O$	27,6	0,51	-0,7	0,74
$CaCl_2 \cdot 6 H_2O + Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$	30,5	0,57	-1,4	0,87
$K_2HPO_4 \cdot 6 H_2O$	31,4	0,59	-1,1	0,92
Monoethanolamin (2-Aminoethanol)	34,0	0,25	-1,5	0,91
$Na_2SO_4 + NaCl + NH_4Cl + H_2O$	27,2	1,12	3,5	1,42
Paraffin Rubitherm RT 6	35,4	0,16	2,0	0,16
$ZnCl_2 \cdot 3 H_2O$	35,6	0,36	-4,3	0,64

4 UNTERSUCHUNG DER SPEICHERKONSTRUKTION

4.1 Überblick zum Stand der Technik

In Abbildung 4.1 ist eine Möglichkeit zur schematischen Einteilung der Wärmespeicher dargestellt. Prinzipiell kann zwischen der thermischen und der thermochemischen Speicherung unterschieden werden. Die thermochemische Speicherung beinhaltet die Sorptionsprozesse. Dabei handelt es sich um reversible chemische Reaktionen, bei denen die Bindungsenergie zwischen Sorptionsmittel (Sor bent) und aufgenommenem Stoff (Sorbat) zur Speicherung dient.

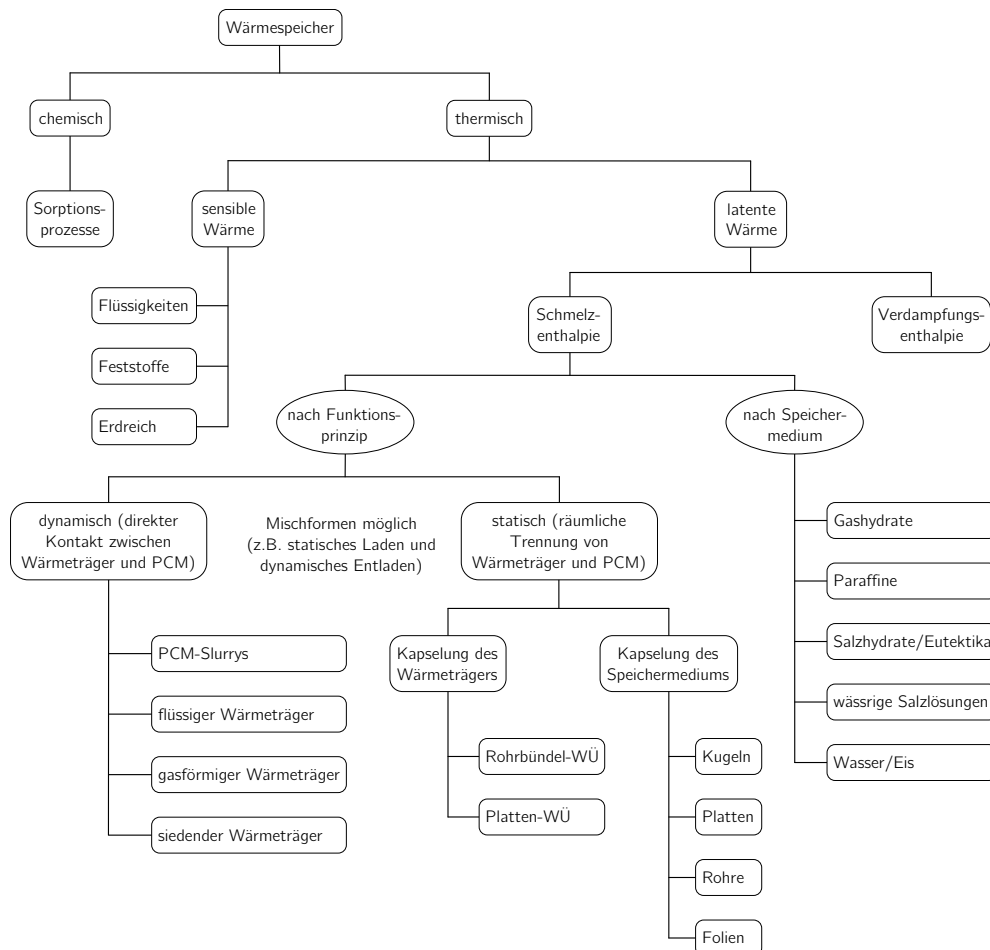


Abbildung 4.1: Mögliche Einteilung der Wärmespeicher

Die thermische Speicherung lässt sich in die Nutzung von sensibler (fühlbarer) und latenter (versteckter) Wärme unterteilen. Die sensible Speicherung beinhaltet die Temperaturänderung eines Speichermediums, wobei der Aggregatzustand erhalten bleibt. Die Speicherdichte hängt von der Wärmekapazität des Mediums sowie von der Temperaturdifferenz ab, und

beträgt für Kaltwasserspeicher bei einer Spreizung von 6 K etwa 7 kWh/m^3 . Bei der latenten Speicherung wird die Energie einer reversiblen Phasenumwandlung, meist fest–flüssig, ausgenutzt. Damit können große Speicherdichten bei sehr kleinen Temperaturdifferenzen erreicht werden. Es muss aber ein Speichermedium gefunden werden, dessen Schmelzpunkt im gewünschten Arbeitstemperaturbereich liegt. Die erreichbare Speicherdichte hängt sehr stark von der Schmelzenthalpie des Speichermediums ab. Für Eisspeicher ergibt sich eine theoretische Speicherdichte von $85,3 \text{ kWh/m}^3$. Hinzu kommt die sensible Wärme aus der Temperaturänderung des Mediums. Aufgrund des notwendigen Platzbedarfs für den Wärmeübertrager liegen praktisch erreichbare Werte für Eisspeicher je nach Bauart bei etwa 40 kWh/m^3 bis 75 kWh/m^3 .

Latentspeicher können nach ihrem Funktionsprinzip in dynamische und statische Speicher eingeteilt werden. Bei den dynamischen Speichern besteht ein direkter Kontakt zwischen Speichermedium (PCM) und Wärmeträgerfluid (WTF), wodurch potentiell große Leistungen übertragen werden können. Verschiedene konstruktive Details wirken sich hier aber negativ auf die erreichbare Speicherdichte aus. So muss i. d. R. ein ausreichend großes Reservoir der Wärmeträgerflüssigkeit im Bereich des Speicheraustrittes vorgehalten werden, um Austragungen des Speichermediums in die Rohrleitungen zu verhindern. Es ist zudem zu berücksichtigen, dass im PCM immer ausreichend große Freiräume erhalten bleiben, um jederzeit eine ausreichend gute Durchströmung zu ermöglichen.

Bei statischen Speichern sind PCM und Wärmeträger durch Verkapselung räumlich voneinander getrennt, wodurch die vorstehenden Schwierigkeiten vermieden werden. Der Wärmetransport zwischen WTF und PCM wird hier maßgeblich von der Wärmeleitung im Speichermedium dominiert. Dabei wirkt sich die allgemein sehr geringe Wärmeleitfähigkeit der Latentspeichermaterialien negativ aus. Die benötigte Leistung des Speichers begrenzt somit die maximalen Abmessungen der Verkapselungen bzw. die maximalen Abstände von Rohren und Platten bei eingesetzten Wärmeübertragern.

4.2 Vergleich verschiedener Speicherkonzepte

Um eine Vorauswahl von möglichen Speicherkonzepten für weitere Untersuchungen treffen zu können, wurden einige Speicher aus der Literatur miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Literaturrecherche sollen später zur Bewertung eigener Konstruktionen dienen. Ziel war die Gewinnung technischer Daten bezüglich Speicherdichte und Leistungsfähigkeit von marktüblichen Speichern oder Prototypen. Dabei wurden sowohl Latentwärme- als auch Latentkältespeicher berücksichtigt. Als Wärmeträger kommt meist Wasser oder ein Wasser-Glykol-Gemisch zum Einsatz, einige der Speicher verwenden dagegen Luft. Um eine einheitliche Auswertung zu ermöglichen, wurden nur Literaturquellen herangezogen, in denen zumindest folgende Angaben vorhanden sind:

- Schmelztemperatur und Schmelzenthalpie des PCM
- Masse des eingesetzten PCM
- Volumen des Speicherbehälters
- Lade-/Entladedauer sowie dabei gesamt umgesetzte Wärme oder alternativ die zeitliche Verlaufskurve der Leistung
- Vorlauftemperatur beim Laden/Entladen

Die Speicherdichte q_{Sp} eines Latenspeichers ergibt sich aus dem Verhältnis von Speicherkapazität und benötigtem Behältervolumen. Entsprechend der Definition

$$q_{Sp} = \frac{Q_{Sp}}{V_{Sp}} = \frac{m_{PCM} \Delta h_S}{V_{Sp}} \quad (4.1)$$

ist diese maßgeblich vom ausgewählten PCM und dessen Schmelzenthalpie Δh_S sowie von der Konstruktion des Speichers abhängig. Die Konstruktion hat durch eventuell benötigte Einbauteile, Wärmeübertrager und Verrohrungen einen direkten Einfluss auf das Behältervolumen. Aufgrund der Abhängigkeit vom PCM eignet sich die Speicherdichte nicht zum objektiven Vergleich von verschiedenen Speicherkonstruktionen. Es wird daher unter Verwendung der maximalen theoretischen Speicherdichte

$$q_{Sp,th} = \Delta h_S \cdot \min(\rho_{PCM,fl}; \rho_{PCM,f}) \quad (4.2)$$

ein Nutzungsgrad des Volumens

$$\eta_V = \frac{q_{Sp}}{q_{Sp,th}} = \frac{V_{PCM,max}}{V_{Sp}} \quad (4.3)$$

definiert. Bei der Berechnung der theoretisch möglichen Speicherdichte ist entsprechend Gleichung 4.2 immer die niedrigste, während der Betriebsphasen vorkommende Dichte von flüssigem oder festem Zustand zu berücksichtigen, da dass PCM in allen Zuständen vom Behälter aufgenommen werden muss.

Für die betrachteten Speichermodelle ist in Abbildung 4.2 die Speicherdichte über dem theoretischen Maximalwert aufgetragen. Der resultierende Volumennutzungsgrad η_V lässt sich über die Kennlinien im Diagramm ablesen. Die Speicherkonstruktionen mit Rohrbündel-Wärmeübertragern erreichen tendenziell die größten Werte für dieses Verhältnis und weisen somit die beste Raumausnutzung auf. Alle anderen Speicher mit Kugelschüttungen oder dynamischem Prinzip beim Schmelzvorgang liegen auf einem ähnlichen Niveau bei $\eta_V \approx 0,5$.

Für einen Vergleich der Leistungen dieser Speicher besteht das Problem von uneinheitlichen Messbedingungen. So werden zum einen verschiedene PCM mit entsprechend unterschiedlichen Umwandlungstemperaturen eingesetzt. Andererseits wurden auch abweichende Differenzen zwischen Schmelztemperatur und Eintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids verwendet. Da diese Temperaturdifferenz den Wärmetransport zwischen PCM und WTF maßgeblich beeinflusst, wurde eine spezifische Leistung

$$\dot{q}_{Sp} = \frac{\dot{Q}_{Sp,m}}{V_{Sp} \cdot |t_{S,PCM} - t_{WTF,ein}|} \quad (4.4)$$

bezogen auf diese Temperaturdifferenz und das Behältervolumen definiert. Die Leistung $\dot{Q}_{Sp,m}$ entspricht dabei dem Mittelwert während des gesamten Schmelz- oder Erstarrungsvorganges.

In Abbildung 4.3 ist dieser Wert für alle Speicher über dem Volumennutzungsgrad η_V dargestellt. Die zwei Speicher mit der geringsten spezifischen Leistung verwenden beide Luft als Wärmeträger. Aus der Verteilung der Werte lässt sich keine allgemeingültige Aussage zur Einordnung der verschiedenen Konzepte ableiten. Es ist aber festzustellen, dass die dynamischen Systeme nicht zwangsläufig auch die größten spezifischen Leistungen aufweisen müssen. Zudem ist erkennbar, dass auch bei hohen Volumennutzungsgraden große spezifische Leistungen machbar sind.

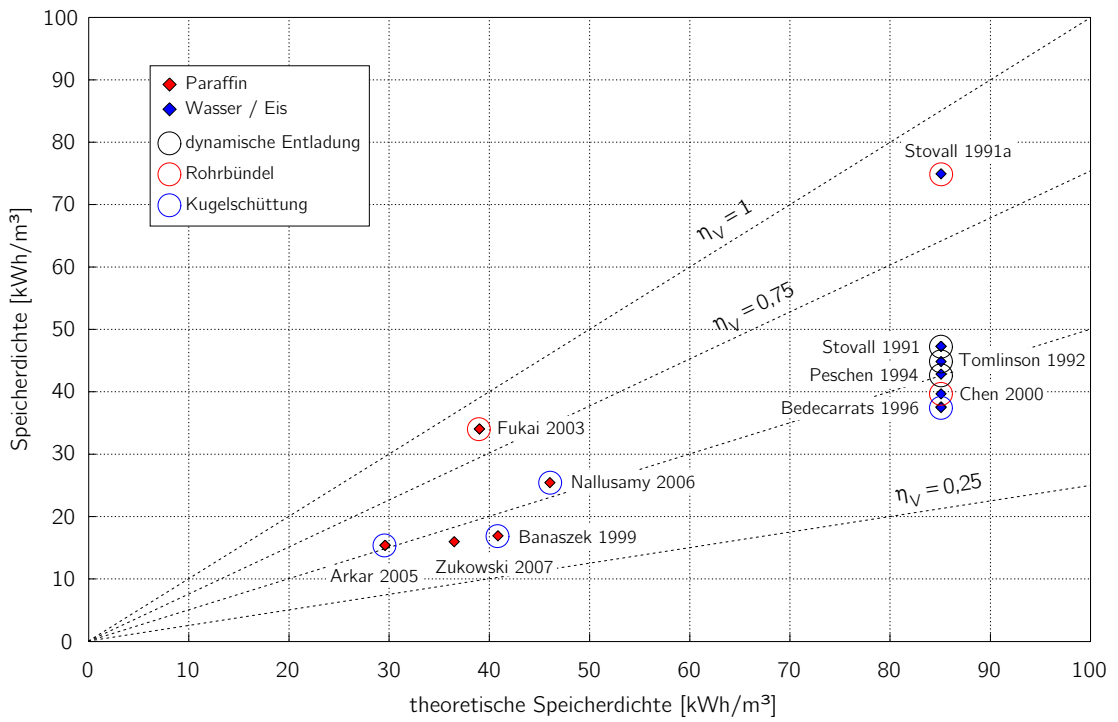


Abbildung 4.2: Speicherdichte im Vergleich zum theoretisch möglichen Maximalwert

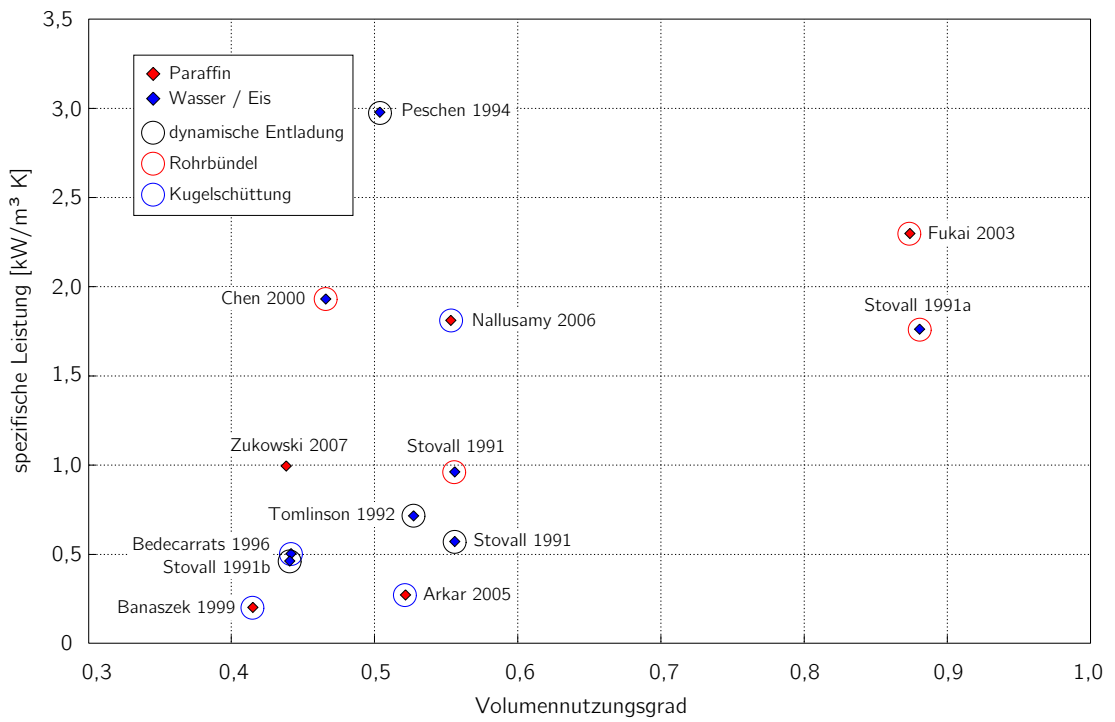


Abbildung 4.3: Vergleich der spezifischen Leistung

Wie im Vorfeld bereits geplant wurden im weiteren Verlauf Speicherkonstruktionen mit statischem Funktionsprinzip untersucht. Diese Entscheidung wurde durch den Vergleich nun noch einmal bestätigt. Statische Latentspeicher besitzen die Vorteile einer höheren erreichbaren Speicherdichte sowie einer einfacheren und wartungsärmeren Konstruktion. Bei den Untersuchungen soll der Fokus auf Varianten mit Verkapselung des Speichermediums gerichtet werden, da die Bearbeiter hier einen Vorteil sehen. Bei Salzhdraten besitzt der korrekte stöchiometrische Wasseranteil einen großen Einfluss auf die Schmelzenthalpie. Dadurch ist es vorteilhaft, die Speichermedien fertig verkapselt zu liefern. Vor Ort erfolgt nur noch eine Einbringung als Schüttgut in den Speicherbehälter, wodurch eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung des PCM ausgeschlossen ist.

4.3 Betrachtungen zu möglichen Kapselformen

Nachfolgend sollen Überlegungen zu Möglichkeiten bezüglich Geometrie und Beschaffenheit für die Verkapselungen von Latentspeichermedien zusammengestellt werden. Dazu ist es ersteinmal notwendig, aus den bereits genannten Problemstellungen ein Anforderungsprofil zu definieren:

- geringer Eigenplatzbedarf des Verkapselungsmaterials,
- effiziente Schüttung mit geringer Porosität möglich,
- Möglichkeit zur automatisierten Herstellung und Befüllung,
- chemische Beständigkeit gegenüber einer Vielzahl an PCM
- diffusionsdicht zur Vermeidung von Änderungen am Wassergehalt des PCM,
- dauerhafte Beständigkeit gegen wechselnde thermische Beanspruchungen,
- tolerant gegenüber mechanischen Spannungen durch Ausdehnung des Mediums
- geringe Material- und Herstellungskosten

Bei Eisspeichern ist die kugelförmige Verkapselung eine am Markt gängige Lösung. Dabei kommen üblicherweise Kugeln mit Durchmessern von 80 mm bis 140 mm zum Einsatz. Bei der Wärmeleitfähigkeit von Eis sind diese Größen wahrscheinlich ein guter Kompromiss zwischen Herstellungskosten und Leistungsfähigkeit des Speichers. Betrachtet man die verschiedenen Arten der räumlichen Anordnung von Kugelpackungen, so ergeben sich zwei Grenzfälle für die Packungsdichte, wobei das kubisch-primitive Gitter (sc) mit einer Packungsdichte von ca. 52 % die untere Grenze darstellt. Dichteste Kugelpackungen weisen eine Dichte von etwa 74 % auf. Solche Anordnungen sind z. B. das kubisch-flächenzentrierte Gitter (fcc) oder die hexagonal dichteste Packung (hcp). Diese Werte gelten unabhängig von der gewählten Kugelabmessung.

Für einen Speicherbehälter muss von zufälligen Schüttungen ausgegangen werden, da eine strukturierte Anordnung für große Kugelanzahlen nicht praktikabel ist. Die Packungsdichten solcher zufälliger Anordnungen liegen immer zwischen den möglichen Grenzwerten. Für die dichteste Zufallspackung wird in [4] ein Wert von 63,6 % angegeben. Zu berücksichtigen ist auch der Randeinfluss durch Strukturstörungen direkt an der Behälterwand. Die Stärke dieses Einflusses auf die Packungsdichte ist dabei maßgeblich vom Verhältnis aus Kugel- und Behälterdurchmesser abhängig. Im Idealfall entspricht der Volumennutzungsgrad η_V dann genau der erreichten Packungsdichte. Bei Eisspeichern werden die Kugeln aber häufig so befüllt, dass im Zustand der geringsten Dichte, also beim festen Eis, noch

ein kleiner Freiraum verbleibt, um eine Sprengwirkung bei der Erstarrung auszuschließen. Vorteilhaft bei Schüttungen aus strukturfesten Kugeln sind die, idealisiert betrachtet, nur punktförmigen Kontaktstellen zwischen den Einzelelementen. Dadurch ist die gesamte Oberfläche fluidberührt und trägt dementsprechend zur Wärmeübertragung zwischen PCM und Wärmeträger bei. Andererseits stellen Kugeln denjenigen Körper mit dem geringsten Verhältnis von Oberfläche zu Volumen dar.

Als weitere mögliche Grundform für die Verkapselung kommen Zylinder in Frage. Bei der Herstellung von Schüttungen erzielt man gegenüber Kugeln aber üblicherweise etwas geringere Packungsdichten. Einen deutlichen Vorteil haben Zylinder aber bei der strukturierten Anordnung, deren Optimierung sich bei gleicher Achsausrichtung auf das 2-dimensionale Problem der dichtesten Kreisgitterpackung reduziert. Hier lassen sich maximale Packungsdichten von 90,7% erreichen, wobei dann allerdings eine geordnete Einbringung in den Behälter notwendig ist. Bei Formstabilen Zylindern treten untereinander ideal nur linienförmige Berührungsstellen auf, so dass auch hier die gesamte Oberfläche zur Wärmeübertragung mit dem Fluid zur Verfügung steht. Aufgrund der Anordnung ergeben sich aber im Umfeld der Kontaktstellen sehr schmale Spalte, so dass in diesen Bereichen die Strömungsgeschwindigkeit wahrscheinlich deutlich reduziert wird.

Aufgrund der definierten Anforderungen und der bei Kugelschüttungen relativ geringen Packungsdichte, drängte sich der Gedanke auf, nichtformstabile Kapseln zu verwenden. Hier bieten sich insbesondere Schlauchbeutel an, wie sie aus der Lebensmittelverpackung beispielsweise für Tütensuppen, Wurst und auch Getränkepackungen bekannt sind. Bei einer entsprechenden Stabilität der Folie lassen sich die Kapseln als Schüttgut weiterverarbeiten. Aber auch aus fertigungstechnischer Sicht bietet diese Variante Vorteile. Mit sogenannten Schlauchbeutelmaschinen kann der gesamte Prozess mit den Arbeitsschritten Füllen, Verschweißen und Zuschneiden vollkommen automatisiert erfolgen. Für die Verpackung können dabei sowohl Einzelbeutel oder auch Endlosschläuche verarbeitet werden. Durch die Verwendung in der Lebensmittelindustrie ist diese Technologie zudem weit verbreitet und verfügbar. In einem Vorversuch mit wenigen Beuteln wurde festgestellt, dass sich damit sehr hohe Packungsdichten erzielen lassen. Andererseits lässt eine solche Schüttung auch Probleme vermuten. Aufgrund der instabilen Form sind die Kontaktflächen zwischen den Einzelelementen nicht vorhersehbar, insbesondere wenn man die statische Pressung durch die notwendige Höhe der Schüttung bedenkt. Die fluidberührte Oberfläche kann daher wesentlich kleiner sein, als die Oberfläche der Beutel. Im schlimmsten Falle wäre die Umströmung sehr stark eingeschränkt, so dass trotz kleiner Kapselabmessungen größere Wege durch Wärmeleitung zu überbrücken sind.

4.4 Strömungstechnische Untersuchungen

Da sich aus dem Vergleich von verschiedenen Speicherkonstruktionen aus der Literatur keine eindeutige Vorzugsvariante ableiten lässt, sollen verschiedene Verkapselungsvarianten auf ihre Eignung überprüft werden. Dazu sollen im ersten Schritt auftretende Druckverluste und die Gleichmäßigkeit der Durchströmung ermittelt und bewertet werden. Als Referenzschüttung werden Kunststoffkugeln mit einem Außendurchmesser d_K von ca. 59 mm eingesetzt. Da in dem erstellten Literaturvergleich (siehe Abschnitt 4.2 auf Seite 14) einige Speicher mit Kugelschüttungen enthalten sind, ermöglicht dies eine Überprüfung der eigenen Messungen bei der Einordnung der Versuchsergebnisse in die Vergleichsdaten.

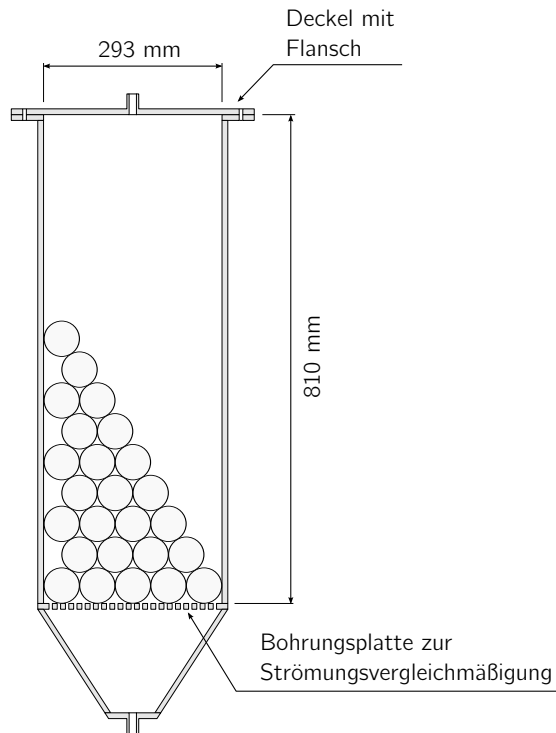


Abbildung 4.4: Zeichnung und Bild vom Modellspeicher

4.4.1 Konstruktion des Versuchsspeichers

Für die vorstehend genannten Untersuchungen wird ein Versuchsspeicher im Labormaßstab benötigt, der einen unkomplizierten Austausch der Füllung erlaubt und eine transparente Hülle besitzt. Dazu wurde ein Behälter aus Plexiglas mit einem angeflanschten Deckel konzipiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Unterhalb des eigentlichen Füllvolumens befindet sich eine kegelförmige Einströmkammer, die mit einer Bohrungsplatte abgedeckt ist. Auf diese Weise soll eine vergleichmäßigte Anströmung über den gesamten Behälterquerschnitt erreicht werden, um einen Einfluss der Anschlussgestaltung auf das Strömungsbild weitgehend zu eliminieren. Da die Einströmkammer also nur aus messtechnischen Gründen vorhanden ist, findet diese bei der Berechnung von Kennwerten des Speichers keine Beachtung.

4.4.2 Herstellung der Behälterfüllungen

Zur Durchführung der Messungen der auftretenden Druckverluste wurden, analog zu den Vorüberlegungen aus Abschnitt 4.3, verschiedene Füllungen für den Behälter angefertigt. Hierbei tritt insbesondere bei den Schlauchfolien das Problem auf, dass diese zwingend einen Inhalt benötigen, um im Speicher auch ein entsprechendes Volumen einzunehmen. Um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, wurde daher beschlossen für die Befüllung gleich ein PCM zu verwenden, welches auch für die späteren Versuche zur Messung der erreichbaren Leistung beim Laden und Entladen herangezogen werden kann. Dafür wurde aus Gründen der einfachen Handhabbarkeit im ersten Schritt Wasser ausgewählt.

Da die bereits erwähnte Referenzschüttung auf jeden Fall für die spätere Leistungsmessung herangezogen werden sollte, wurde die Kugeln ebenfalls bereits zu diesem Zeitpunkt mit Wasser gefüllt. Bei den verwendeten Kugeln handelt es sich Kunststoffbälle mit einem Außendurchmesser von etwa 59 mm. Die Kugeln bestehen aus Polyethylen und weisen eine Wandstärke von ca. 2 mm auf. Zur Befüllung wurde eine Spritze mit Injektionskanüle verwendet, anschließend wurden die Kugeln mit einem LötKolben wieder verschlossen.

Vor der Befüllung aller Kugeln wurde an einigen PE-Bällen getestet, ob es während der Erstarrung, aufgrund von mechanischen Belastungen, zu Beschädigungen an den Kugeln kommt. Die Füllmenge wurde dabei so vorgesehen, dass die Kapseln im erstarrten Zustand komplett ausgefüllt sind. Ein Test mit 4 Kugeln über 20 komplette Zyklen ließ keine Beanstandungen an der Haltbarkeit erkennen. Es zeigte sich bei den Versuchen jedoch, dass das eingefüllte Wasser zum Einsetzen der Kristallisation eine deutliche Unterkühlung benötigt. Erst ab Temperaturen zwischen -9 und -14 °C setzte der Erstarrungsvorgang ein.

Zur Erläuterung soll ganz kurz etwas zu den Mechanismen der Keimbildung erzählt werden. Es wird prinzipiell zwischen homogener und heterogener Keimbildung unterschieden. Bei der homogenen Keimbildung, auch als Eigenkeimbildung bezeichnet, ordnen sich bei der Abkühlung auf oder unter den Schmelzpunkt einige Atome in kleinen Bereichen zu Gittern an. Ausgehend von diesen Keimen wachsen dann weitere Kristalle. Mit zunehmender Unterkühlung reduziert sich die Bewegung der Atome und die Wahrscheinlichkeit der Keimbildung nimmt zu. Bei der heterogenen Keimbildung wird der Vorgang durch Fremdstoffen, wie z. B. Verunreinigungen, oder auch die Behälterwand unterstützt. Diese erleichtern mit ihrer Oberflächenenergie die Bildung von Kristallisationskeimen. Voraussetzung dafür ist aber, dass der Fremdkörper vom Feststoff, nicht aber von der Schmelze benetzt wird [22, 28].

Aufgrund der geringen Füllmenge je Kugel und der sehr glatten Oberfläche ist die Anzahl an fremden Keimbildnern sehr gering. In den Versuchen war dies sowohl bei deionisiertem Wasser, als auch bei Leitungswasser und bei Teichwasser der Fall. Da am Prüfstand für die Latentspeicher derartige Temperaturen nicht erreicht werden können, musste ein geeigneter Keimbildner gefunden und zugesetzt werden. In der Fachliteratur werden dafür unter anderem Silberiodid und Metaldehyd genannt [16]. Diese werden beispielsweise dazu eingesetzt, um Wolken gezielt abzuregnen und somit die Bildung von großen Hagelkörnern zu vermeiden. Für eine verlässliche Keimbildung wird die Dosierung in [30] mit 500 bis 2000 ppm angegeben. Da Silberiodid aufgrund seiner Lichtempfindlichkeit sowie aus preislichen Gründen ausschied, wurde Metaldehyd als Keimbildner ausgewählt. Durch die Zugabe in die Kugeln konnte die Unterkühlung auf etwa 1 K reduziert werden.

Als weitere Verkapselungen wurden zwei verschiedene Arten von Schlauchbeuteln gefüllt. Zum einen wurden längere Schläuche hergestellt, die als parallele Zylinder stehend im Speicher angeordnet werden sollen. Dazu kam ein Endlosfolienschlauch aus Polyethylen mit einer Folienstärke von $55 \mu\text{m}$ und einer Schlauchbreite von 60 mm zum Einsatz. Dies entspricht etwa einem Durchmesser von 38,2 mm. Die Länge der Schläuche wurde an die Behälterhöhe angepasst.

Weiterhin wurde ein Schüttgut aus Schlauchbeuteln hergestellt. Dazu wurden Einzelbeutel aus einer Polyamid-Polyethylen-Verbundfolie mit einer Dicke von $20/70 \mu\text{m}$ hergestellt. Die Polyamid-Schicht sorgt dabei für eine höhere mechanische Festigkeit und für einen höheren Wasserdampf-Diffusionswiderstand gegenüber einer reinen Polyethylenfolie. Die

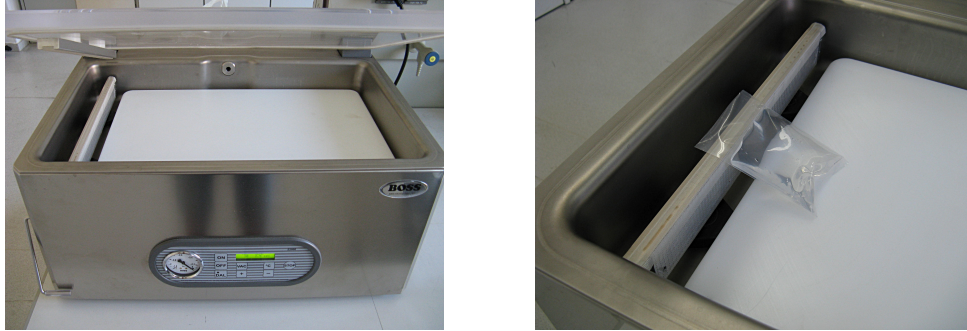


Abbildung 4.5: Folienschweißgerät für die Schlauchbeutel

Abmessungen der Beutel betragen jeweils 75 mm × 110 mm. Um ein Luftpolster in den Beuteln zu vermeiden bzw. zu reduzieren wurden diese mit einem Vakuumschweißgerät verschlossen. Die Beutel werden dazu in die Kammer des Gerätes eingebracht. Diese wird nach dem Schließen des Deckels evakuiert und anschließend der Schweißvorgang ausgelöst. Das Schweißgerät ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

Die Verarbeitung von wassergefüllten Beuteln erwies sich damit prinzipiell als einfach. Eine Benetzung der Folie im Nahtbereich mit Wasser stellt für die Zuverlässigkeit der Verschweißung kein Problem dar. Es ist lediglich darauf zu achten, dass der zugesetzte Keimbildner Metaldehyd nicht in den Nahtbereich gelangt, da dies zu Undichtigkeiten führen kann. Bei anderen PCM als Wasser gestaltet sich die Verarbeitung mit diesem manuellen Verfahren daher als sehr schwierig, da bei der Befüllung und dem Einlegen in die Maschine immer wieder etwas vom Material in den Nahtbereich gelangt. Bei einer vollständig maschinellen Herstellung ist dieses Problem aber nicht vorhanden. Aufgrund der großen Anzahl der herzustellenden Beutel erwies sich die Vorgehensweise dennoch als ziemlich aufwändig. Eine Auftragsfertigung ist bei den geringen Stückzahlen für die Laborversuche aber eher ausgeschlossen, zumal der Keimbildner Metaldehyd gesundheitsschädlich ist, wodurch eine Fertigung bei Verarbeitern von Lebensmitteln ausgeschlossen ist. Ein Test mit 4 Beuteln über 15 Zyklen zeigte keine Probleme hinsichtlich der Stabilität.

Zur Ermittlung der eingefüllten PCM-Masse wurde in allen Fällen jeweils eine Wägung der Schüttung bzw. der Verkapselungsmaterialien vor und nach der Befüllung durchgeführt. Die Füllmengen und die damit erreichten Volumen-Nutzungsgrade im Modellspeicher sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Beide Schlauchbeutelvarianten erreichen dabei eine sehr hohe Ausnutzung des vorhandenen Volumens, und sind aus dieser Sicht der Kugelschüttung auf jeden Fall vorzuziehen.

Tabelle 4.1: Kennzahlen der verwendeten Schüttungen

Bezeichnung		Kugel- schüttung	Schaumstoff- Flocken	Schlauchbeutel stehend	Schlauchbeutel Schüttung
Anzahl		302	–	60	624
m_{PCM}	[kg]	24,75	–	46,89	42,05
$\rho_{\text{PCM,min}}$	[kg/m ³]	917,0	–	917,0	917,0
η_V		49,5	–	93,6	84,1

Als zusätzliche Dummy-Schüttung, die nur zur Druckverlustmessung gedacht ist, wurden Schaumstoff-Flocken aus der Verpackungsmittelindustrie verwendet. Die Größe entspricht



Abbildung 4.6: Verwendete Schüttungen

dabei etwa einem äquivalenten Kugeldurchmesser von 20 mm. In Abbildung 4.6 sind die Flocken zur Darstellung der Größenverhältnisse neben einer Kunststoffkugel und den verwendeten Schlauchbeuteln dargestellt.

4.4.3 Ermittlung sinnvoller Volumenströme

Die Hauptaufgabe eines Latentkältespeichers ist die Rückkühlung des durch die Verbraucheranlage erwärmten Wärmeträgerfluids auf die Soll-Vorlauftemperatur. Daraus ergibt sich eine Mindestspreizung, die über den Speicher erzielt werden muss, ansonsten ist eine Nachkühlung über die Kältemaschine notwendig. Diese Spreizung beträgt in Kaltwassernetzen üblicherweise etwa 4 K bis 6 K. Das Speichermedium sollte so ausgewählt werden, dass die Schmelztemperatur etwas unterhalb der Soll-Vorlauftemperatur liegt, um diese am Speicheraustritt auch erreichen zu können.

Zur Regelung der Leistung des Speichers kann der Massenstrom des Wärmeträgers variiert werden. Hier gibt es einerseits den Effekt, dass durch eine Erhöhung des Durchflusses, aufgrund der größeren Anströmgeschwindigkeiten, eine Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten α erreicht wird. Andererseits ist mit dem höheren Massenstrom auch ein höherer Wärmekapazitätsstrom verbunden, so dass dem Fluid zur Temperaturänderung auch ein größerer Wärmestrom zugeführt werden muss. Beide Effekte verhalten sich bezüglich der erreichbaren Temperaturspreizung über den Speicher gegenläufig.

Vor der Durchführung der Druckverlustmessungen soll deshalb zuerst der relevante Bereich der Volumenströme abgeschätzt werden, innerhalb dessen der Modellspeicher noch die geforderte Mindestspreizung bereitstellen kann. Dazu soll eine idealisierte Betrachtung des Lade- bzw. Entladevorganges herangezogen werden, für die die nachfolgenden Annahmen getroffen werden. Die Phasenumwandlung findet während der Betrachtungszeit bei einer konstanten Temperatur und über die gesamte wärmeübertragende Oberfläche, also über die gesamte Behälterlänge, statt. Diese Annahmen sollten für einen Latentspeicher bei Verwendung eines reinen Stoffes als PCM für einen großen zeitlichen Bereich des Lade- bzw. Entladezyklus mit guter Näherung erfüllt sein. Bei Verwendung von Stoffgemischen als PCM treten hingegen i. d. R. etwas größere Schmelztemperaturbereiche auf. Aufgrund des auftretenden Temperaturprofils entlang der Behälterlänge entwickeln sich die Schichtdicken des erstarrten oder geschmolzenen Speichermediums über der Lauflänge unterschiedlich, wodurch sich auch verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten k zwischen der Umwandlungszone im PCM und dem Wärmeträgerfluid ergeben. Zur Vereinfachung

soll hier jedoch über die gesamte Behälterlänge mit einem mittleren k -Wert gerechnet werden.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen kann der Vorgang für ausreichend kurze Zeitabschnitte, in denen sich der k -Wert nur geringfügig ändert, jeweils als stationär angesehen werden und mit der Methode der Betriebscharakteristik der Wärmeübertrager betrachtet werden. Dazu wird die Betriebscharakteristik bzw. der Austauschgrad als

$$\Phi_{\text{WTF}} = \frac{|t_{\text{ein}} - t_{\text{aus}}|}{|t_{\text{ein}} - t_{\text{S}}|} \quad (4.5)$$

definiert, und setzt somit die über den Speicher erzielte Temperaturänderung des Wärmeträgers mit dem möglichen Maximum, also einer Änderung von der Temperatur am Eintritt bis auf die Schmelztemperatur, ins Verhältnis.

Da auf der PCM-Seite keine Temperaturänderungen auftreten sollen, spielt die Auswahl der Strömungsrichtung keine Rolle, so dass zur Berechnung der Betriebscharakteristik sowohl die Gleichungen für Gleich- als auch für Gegenströmer verwendet werden können. Nach [12] kann für die Betriebscharakteristik somit

$$\Phi_{\text{WTF}} = \frac{1 - \exp[-(1 + R_{\text{WTF}}) \cdot N_{\text{WTF}}]}{1 + R_{\text{WTF}}} \quad (4.6)$$

mit dem Verhältnis der Wärmekapazitätsströme

$$R_{\text{WTF}} = \frac{\dot{C}_{\text{WTF}}}{\dot{C}_{\text{PCM}}} \quad (4.7)$$

und der Übertragungszahl

$$N_{\text{WTF}} = \frac{k A}{\dot{C}_{\text{WTF}}} \quad (4.8)$$

geschrieben werden. Aufgrund der konstanten Temperatur im PCM ergibt sich für diese Seite ein unendlich großer Wärmekapazitätsstrom \dot{C}_{PCM} , wodurch das Verhältnis R_{WTF} den Wert Null annimmt. Für diesen Fall vereinfacht sich Gleichung (4.6) zu dem Ausdruck

$$\Phi_{\text{WTF}} = 1 - e^{-N_{\text{WTF}}} \quad (4.9)$$

Abbildung 4.7 zeigt die berechnete Betriebscharakteristik und den Wärmeübergangskoeffizienten α über dem Volumenstrom für den Modellspeicher unter Verwendung der Referenzschüttung mit 59 mm Kugeln und Eis als PCM. Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden nach [39] mit den Gleichungen für durchströmte Partikelhaufwerke bestimmt. Bei diesen wird zuerst der Wärmeübergang für die Umströmung eines Einzelpartikels bestimmt, und dann mittels einem geometrieabhängigen Formfaktor auf die Schüttung umgerechnet. Für den Wärmeträger wurden beispielhaft die Stoffdaten von Wasserflüssigkeit bei 0 °C nach [39] verwendet. Für reale Anwendungsfälle differieren die Stoffdaten in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur und einem eventuell vorhandenem Glykolanteil im Wärmeträger etwas. Dadurch sollten die grundsätzlichen Aussagen des Diagrammes aber nicht beeinflusst wer-

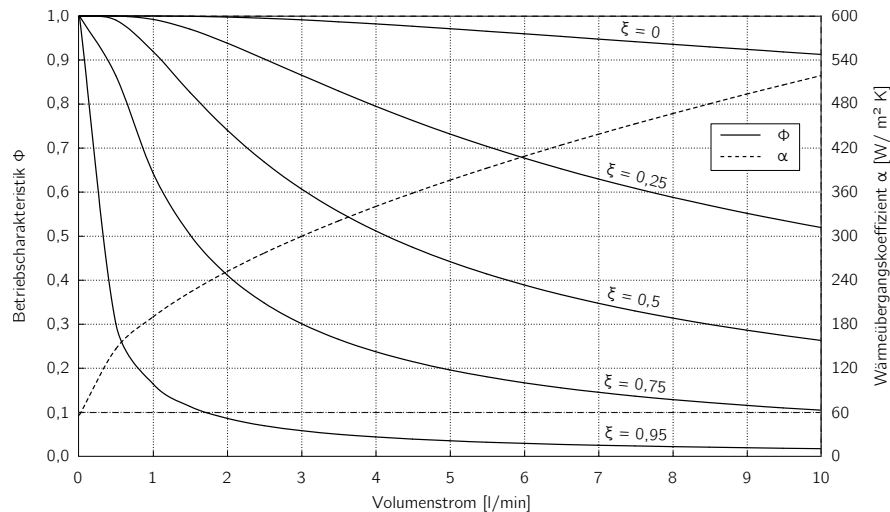


Abbildung 4.7: Technisch sinnvolle Volumenströme für den Versuchsspeicher

den. In der Abbildung sind die Kennlinien der Betriebscharakteristik jeweils für verschiedene relative Ortskoordinaten

$$\xi = \frac{d_K - d_i}{d_K} \quad (4.10)$$

dargestellt. Die Ortskoordinate beschreibt die Bewegung der Phasengrenze, wobei $\xi = 0$ bedeutet, dass sich diese an der äußeren Hülle der Kugel befindet. Mit dem Fortschreiten der Phasenumwandlung wandert die Grenze in Richtung Kugelmittelpunkt, welcher dann bei $\xi = 1$ erreicht ist. Entsprechend vergrößert sich mit der wachsenden Ortskorrdinate ξ aufgrund der Schichtdicke auch der k -Wert.

Im Diagramm ist deutlich erkennbar, dass es mit steigendem Durchfluss trotz einer deutlichen Vergrößerung des Wärmeübergangskoeffizienten zu einem Absinken des Austauschgrades Φ kommt, und sich die erreichbare Temperaturspannung über den Speicher somit verringert. Dieser Effekt nimmt für größere Ortskoordinaten ξ zu, da der gesamte Vorgang dann immer mehr von der Wärmeleitung im Speichermedium dominiert wird. Geht man von einer maximal möglichen Temperaturänderung $|t_{\text{ein}} - t_S|$ von 8 K aus, dann dürfte Φ für die vorgegebenen Spannungen von 4 K bis 6 K minimal Werte von 0,5 bis 0,75 annehmen. Dabei gilt zu beachten, dass diese Werte nicht unbedingt über den gesamten Bereich der Koordinate ξ eingehalten werden müssen, da bei einer kugelförmigen Geometrie bei $\xi = 0,5$ bereits 87,5 % und bei $\xi = 0,75$ sogar 98,4 % des Inhaltes die Phasenumwandlung durchlaufen haben.

Der Modellspeicher sollte unter technisch sinnvollen Bedingungen somit bis zu einem Volumenstrom von etwa 4 l/min zu betreiben sein. Die nachfolgenden Messungen der Druckverluste werden bis zu einem Durchfluss von 10 l/min durchgeführt, was auch im Falle anderer Schüttungen mit größeren inneren Oberflächen ausreichend sein sollte.

4.4.4 Druckverlustmessung

Für die Referenzschüttung wurde für den ermittelten Volumenstrombereich vor der Versuchsdurchführung eine Berechnung der zu erwartenden Druckverluste vorgenommen.

Tabelle 4.2: Berechnete Druckverluste für Kugelschüttungen

Kugeldurchmesser	Δp bei $\dot{V} = 4 \text{ l/min}$ [Pa]	Δp bei $\dot{V} = 10 \text{ l/min}$ [Pa]
59 mm	0,53	1,97
30 mm	1,66	5,58
20 mm	3,42	10,83
10 mm	12,25	35,80

Dazu wurden die Druckverlustgleichungen für durchströmte Partikelhaufwerke basierend auf dem Modell der Einzelpartikelumströmung nach [39] verwendet. Die berechneten Werte für die Geometrie des Modellspeichers sind in Tabelle 4.2 zu finden. Als Basis für die Stoffdaten wurde wieder Wasserflüssigkeit bei 0°C verwendet. Die resultierenden Werte sind sehr niedrig, was mit der geringen Strömungsgeschwindigkeit zu begründen ist. Dieses Ergebnis legt die Schlussfolgerung nahe, zur Verbesserung der Wärmeübertragung kleinere Kugelabmessungen zu verwenden. Zur Abschätzung wurden daher ebenfalls Druckverluste für Schüttungen mit kleineren Kugeln berechnet. Auch diese Werte sind durchgehend tragbar, da reale Speicher aufgrund von begrenzten Deckenhöhen in Gebäuden maximal die dreifache Länge, und somit den dreifachen Druckverlust, aufweisen werden. Im Vergleich zu den Gesamtdruckverlusten im Netz, die selbst bei kleinen Anlagen meist 20 kPa und mehr betragen, spielt der Druckverlust der Kugelschüttung somit nur eine untergeordnete Rolle. Hier wäre bei der Konstruktion des Speichers mehr Wert auf die Gestaltung der Anschlüsse zu legen.

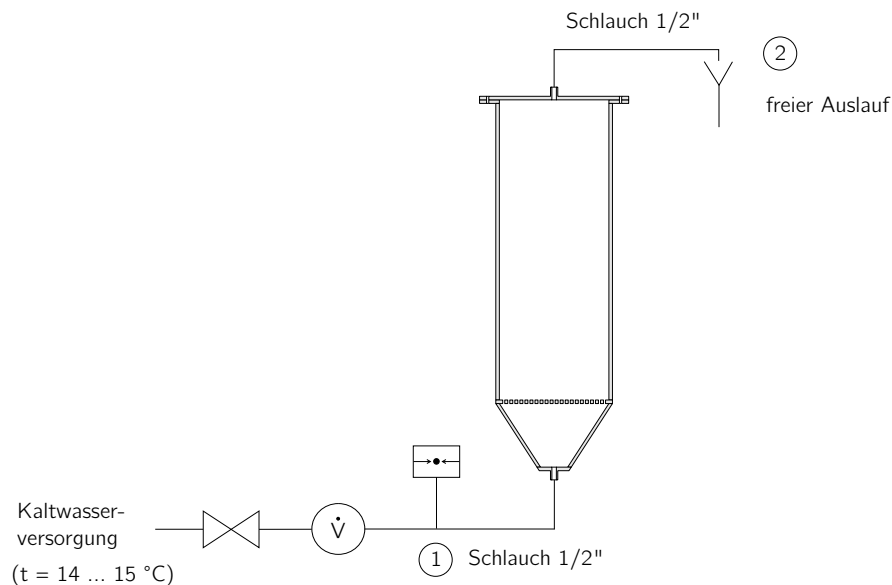


Abbildung 4.8: Versuchsaufbau für die Druckverlustmessung

Für die verschiedenen Füllungen des Modellspeichers (siehe Abschnitt 4.4.2) wurde eine Messung der Druckverluste durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Als strömendes Medium wurde Leitungswasser verwendet, wobei der Volumenstrom schrittweise von 0 bis 10 l/min erhöht wurde. Die Messung des statischen Überdrucks erfolgte unmittelbar vor dem Eintritt in den Modellspeicher. Das aus dem Speicher aus-

tretende Wasser wurde über einen freien Auslauf abgeleitet. Aus der Bernoulli-Gleichung

$$p_{\text{stat},1} + \frac{\rho}{2} w_1^2 + z_1 \rho g = p_{\text{stat},2} + \frac{\rho}{2} w_2^2 + z_2 \rho g + \Delta p \quad (4.11)$$

folgt unter den Bedingungen

$$w_1 = w_2$$

und

$$p_{\text{stat},2} = p_{\text{Umg}} = 0$$

die Gleichung für den Gesamtdruckverlust

$$\Delta p = p_{\text{stat},1} - \Delta z \rho g . \quad (4.12)$$

Die gemessenen Druckverluste sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Da in den Werten auch die Druckverluste des Speicherbehälters mit der Bohrungsplatte sowie der Anschlussleitungen enthalten sind, wurde der Behälter zusätzlich im leeren Zustand vermessen. Die Differenzen zwischen den einzelnen Messreihen stellen somit den bereinigten Druckverlust für die Schüttungen dar.

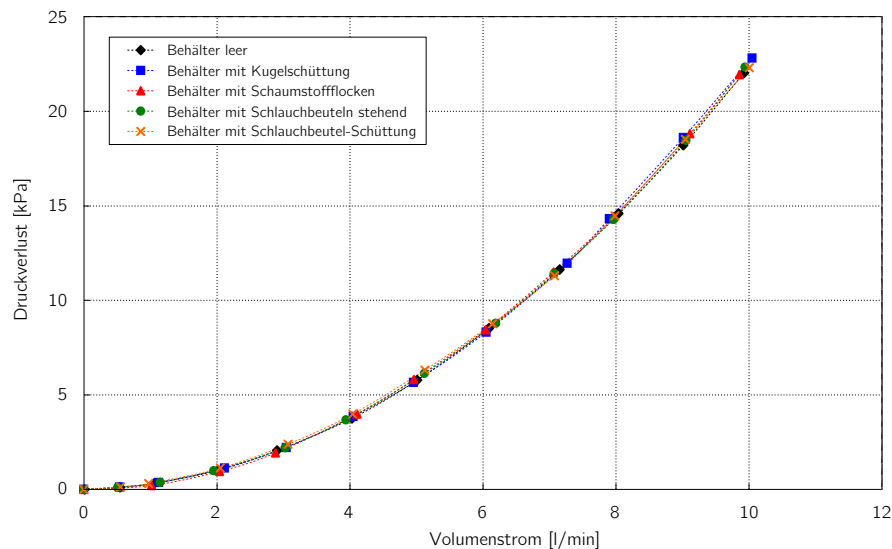


Abbildung 4.9: Druckverlustmessung für verschiedene Schüttungen

Aus der grafischen Darstellung der Messdaten wird deutlich, dass im relevanten Volumenstrombereich keine maßgeblichen Unterschiede zwischen den Druckverlusten der verschiedenen Speicherfüllungen auftreten. Da dies auch für die verhältnismäßig kleinen Einzelpartikel bei den verwendeten Schaumstoff-Flocken gilt, lässt sich die eindeutige Aussage ableiten, dass im Sinne einer optimierten Wärmeübertragung möglichst kleine Kapselabmessungen verwendet werden sollten. Dadurch kann letztendlich auch auf ein Einbringen von gut wärmeleitenden Gerüststrukturen in das PCM verzichtet werden. Die tatsächlich verwendete Größe der Kapseln hängt aber auch deutlich von den Möglichkeiten der Herstellung ab, da hier ebenfalls eine Kostenoptimierung erfolgen muss.

4.4.5 Strömungsvisualisierung

Zur Bewertung der Geschwindigkeitsverteilung des Wärmeträgerfluids in der Schüttung wurde für alle vorstehend beschriebenen Behälterfüllungen eine Visualisierung der Strömung durchgeführt. Dazu wurde in die Anschlussleitung des Behälters eine wässrige Lösung von Bromthymolblau als Farbstoff eingespritzt. Die Darstellung der Strömungsverläufe ist in Abbildung 4.10 zu sehen.

Für den leeren Behälter ist zu erkennen, dass die eingelegte Bohrungsplatte keine komplette Vergleichmäßigung des Geschwindigkeitsprofils erzielt. Unmittelbar über der Platte liegt noch ein deutliches Profil vor, welches aber zunehmend in eine gleichmäßige Kolbenströmung übergeht. Der eintretende Volumenstrom verteilt sich dadurch zügig auf das gesamte Behältervolumen. Die Kugelschüttung weist eine sehr homogene Durchströmung auf, der Farbstoff steigt rings um den Behälter gleichmäßig schnell auf. Eine Beobachtung im Bereich des Deckels zeigte zudem eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Behälterquerschnitt, da der Farbstoff im Kernbereich sowie an der Behälterwand gleichzeitig oben ankam. Die Schaumstoff-Flocken wurden durch die Auftriebskraft bei der Füllung des Behälters und durch die Strömung etwas zusammengedrückt, so dass sich im unteren Bereich ein Leerraum ergeben hat. Bei der Durchströmung ist hier aber ebenfalls eine sehr gleichmäßige Verteilung zu erkennen.

Bei den stehenden Schlauchfolien ist, aufgrund der Transparenz der Füllkörper, der Strömungsverlauf gut erkennbar, wobei eine gleichmäßige Verteilung über den gesamten Behälterquerschnitt vorliegt. Die aufsteigenden, fadenförmigen Farbströmungen machen aber deutlich, dass sich zwischen den Schlauchfolien nur kleine Strömungskanäle ausbilden. Der Farbstoff verteilt sich im weiteren Verlauf aber auf das gesamte Porenvolumen, woraus auf eine durchaus großflächigere Benetzung der Folienschläuche geschlossen werden kann. In den Randbereichen außerhalb der Strömungskanäle treten aber sicherlich deutlich geringere Anströmgeschwindigkeiten auf. Auch die Schlauchbeutel-Schüttung weist eine gleichmäßige Strömungsverteilung rings um den Behälter auf. In den Anfangsmomenten ist deutlich die Ausbildung von kleinen Strömungskanälen zwischen den Beuteln zu sehen. Der Farbstoff verteilt sich aber schnell um die kompletten Beutel, so dass auch hier durchaus von größeren benetzten Oberflächen ausgegangen werden kann.

Bei beiden Schlauchbeutel-Varianten gilt aber zu bedenken, dass der Strömungsversuch im flüssigen Zustand des PCM durchgeführt wurde. Bei der Erstarrung zu Eis erfolgt eine Volumenausdehnung um etwa 9 %, so dass sich die freien Strömungsquerschnitte entsprechend reduzieren. Für die Versuche zur Leistungsmessung stellt sich dabei insbesondere die Frage nach der Ausdehnungsrichtung. Bei den stehenden Schläuchen sammeln sich die Luftpolster natürlich im oberen Behälterbereich, wodurch sich dort auch ein großer Teil der verbleibenden Freiräume befindet. Aufgrund der von unten beginnenden Erstarrung ist aber damit zu rechnen, dass durch die Expansion das noch flüssige Wasser nach oben verdrängt wird. Anderenfalls könnte es zu einer mechanischen Beschädigung des Speicherbehälters kommen. Bei der Schüttungsvariante ist durch die gleichmäßigere Verteilung eher nicht mit solchen Problemen zu rechnen.



Abbildung 4.10: Bilder der Strömung für den leeren Behälter, Kugelschüttung, Schaumstoff-Flocken, Schlauchbeutel stehend, Schlauchbeutel-Schüttung (von oben nach unten)

4.5 Leistungsmessung Modellspeicher

Mit den bereits für die Druckverlustmessungen verwendeten Bestückungen des Speichers wurden weitere Versuche zur Messung der Be- und Entladeleistung durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden dazu die berechneten Parameter für die verschiedenen Varianten, der Aufbau des Versuchsstandes und die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Zur Reduzierung des Wärmeeintrages von der Umgebung in den Speicher wurde der Behälter mit einer Isolierung aus geschlossenzelligem Kautschuk mit einer Dicke von 50 mm versehen.

4.5.1 Parameter der untersuchten Varianten

In Tabelle 4.3 sind die berechneten latenten und sensiblen Speicherkapazitäten der untersuchten Varianten aufgeführt. Zur Berechnung der sensiblen Kapazitäten wurde ein Temperaturbereich von -4 bis 12°C herangezogen, da dieser bei vielen der durchgeführten Versuche durchlaufen wird. Als Schmelzenthalpie für Eis wurde ein Wert von 334 kJ/kg verwendet. Für das Volumen der Wärmeträgerflüssigkeit im Behälter $V_{\text{WTF},m}$ ist für die Schlauchbeutelvarianten der Mittelwert zwischen festem und flüssigem Zustand des PCM angegeben, da sich dieses aufgrund der nichtformstabilen Verkapselung während des Erstarrungs- bzw. Schmelzvorganges ändert. Angaben zu den Abmessungen der Verkapselungen sind in Abschnitt 4.4.2 zu finden.

Tabelle 4.3: Kapazitäten der Speicherfüllungen

Bezeichnung		Kugel- schüttung	Schlauchbeutel stehend	Schlauchbeutel Schüttung
Kapselanzahl		302	60	624
m_{PCM}	[kg]	24,75	46,89	42,05
$A_{\text{WÜ}}$	[m ²]	3,3	5,8	10,3
V_{B}	[l]	54,6	54,6	54,6
$V_{\text{PCM},\text{fl}}$	[l]	24,8	46,9	42,1
$V_{\text{PCM},\text{f}}$	[l]	27,0	51,1	45,9
V_{Kapsel}	[l]	5,5	0,3	0,9
$V_{\text{WTF},m}$	[l]	22,1	5,3	9,7
η_V	[%]	49,5	93,6	84,1
$Q_{\text{PCM},\text{lat}}$	[kWh]	2,3	4,4	3,9
$Q_{\text{PCM},\text{sen}}$	[kWh]	0,5	0,9	0,8
$Q_{\text{WTF},\text{sen}}$	[kWh]	0,4	0,1	0,2
Q_{ges}	[kWh]	3,2	5,4	4,9

4.5.2 Beschreibung des Versuchsstandes

Für die durchzuführenden Messungen des Be- und Entladeverhaltens wird auf einen vorhandenen Prüfstand für Latentspeicher zurückgegriffen. Das hydraulische Schaltschema und ein Bild des Versuchsstandes sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Temperierung des Wärmeträgerfluids erfolgt über eine Wärmepumpe mit einer Heiz- und Kühlleistung von je etwa 8 kW . Zur Vermeidung von häufigen Schaltvorgängen der Kältemaschine bei geringem Leistungsbedarf, kommt ein Pufferspeicher mit einem Inhalt von 200 l als hydraulische Weiche zum Einsatz. Durch den Pufferspeicher sind kurzzeitig auch größere Leistungen abrufbar. Der Volumenstrom im Verbraucherkreis kann über einen Bypass und

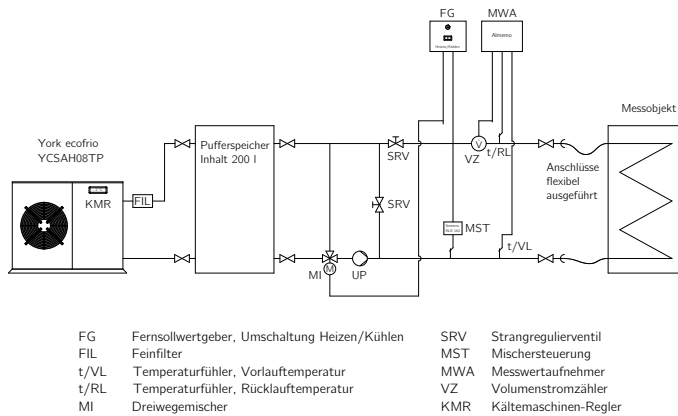


Abbildung 4.11: Schema und Bild des Latentspeicher-Prüfstandes

ein Drosselventil eingestellt werden, die Vorlauftemperatur wird über einen Dreiwegemischer mit PI-Regler konstant gehalten. Als Wärmeträger wird eine Sole mit einem Volumenanteil von 38 % Propylenglykol (Antifrogen L) verwendet.

Zur Bestimmung der Be- und Entladeleistung von Versuchsspeichern werden die Vor- und Rücklauftemperatur sowie der Volumenstrom über den Speicher messtechnisch erfasst. Die Temperaturmessung erfolgt über Thermoelemente vom Typ K, die vor den Messungen in einem Thermostatbad kalibriert wurden. Dazu wurde aus Messungen in drei Temperaturbereichen bei -5 °C , 11 °C und 21 °C eine lineare Kalibrierfunktion ermittelt. Die Differenz zwischen den beiden Messfühlern liegt damit an diesen Punkten innerhalb eines Bereiches von $\pm 0,1\text{ K}$. Für die Messung des Volumenstromes ist ein Ultraschalldurchflussmesser vom Typ Profimess SU-01 mit einem Messbereich von 0,04 bis 10 l/min verbaut. Der Linearitätsfehler ist bei 25 °C mit einem Wert von $\pm 2,5\%$ bezogen auf den Meßwert angegeben. Dazu kommt ein Temperatureinfluss von $\pm 0,2\%$ des Endwertes pro 10 K. Der Durchfluss wird immer auf der Austrittsseite des Speichers gemessen. Geht man an dieser Stelle von einer mittleren Fluidtemperatur von 5 K aus, so ergeben sich die in Tabelle 4.4 dargestellten maximalen Messfehler bezogen auf den Messwert. Der unterste Bereich des Gerätes sollte also eher gemieden werden. Mechanische Durchflussmesser weisen im unteren Messbereich aber i. d. R. deutlich größere Ungenauigkeiten auf, da deren Messabweichung meist $\pm 2,5\%$ vom Messendwert beträgt. Der Temperatureinfluss kann als systematisch auftretender Fehler zudem korrigiert werden. Als nachteilig hat sich bei der Messung von Latentspeichern allerdings die große Empfindlichkeit gegenüber Luftblasen erwiesen, da es bei den verschiedenen Konstruktionen kaum möglich ist, den Speicher vor der Messung zuverlässig komplett zu entlüften.

Tabelle 4.4: Maximale Messfehler der Durchflussmessung

Durchfluss	[l/min]	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
max. Messfehler	[%]	10,5	6,5	4,5	3,3	2,9

4.5.3 Kugelschüttung

Für jede Füllung des Speichers wurden mehrere komplette Zyklen, bestehend aus Be- und Entladung durchgeführt. Unter Beladung soll hierbei der Vorgang der Kältespeicherung, also die Erstarrung des PCM verstanden werden. Die Entladung stellt dementsprechend den

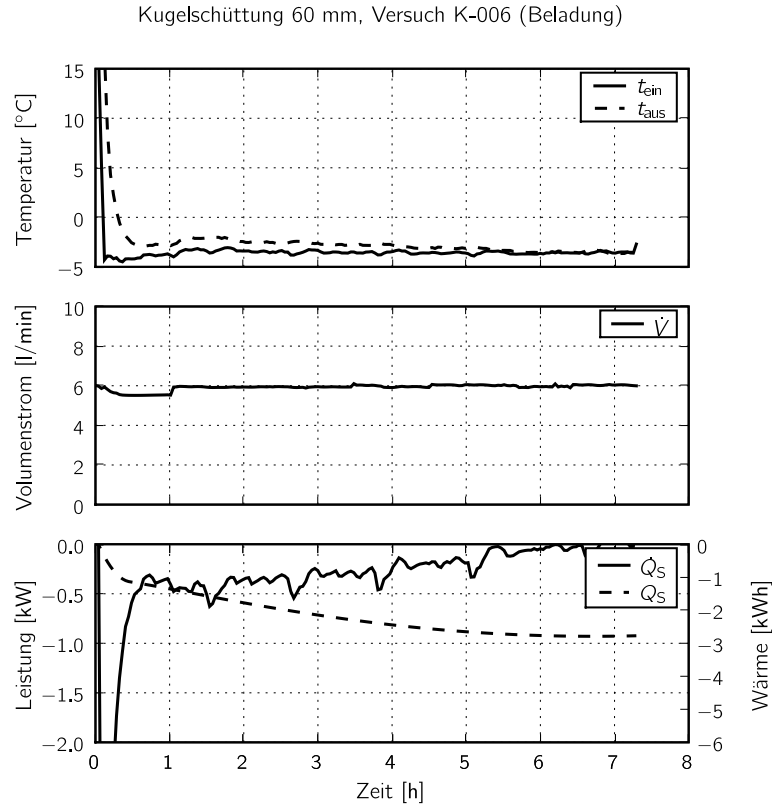


Abbildung 4.12: Kugelschüttung, Beladung

anschließenden Schmelzvorgang dar, bei dem ein Wärmeträger aus der Verbrauchieranlage durch den Speicher abgekühlt wird. Die Versuche wurden mit verschiedenen Temperaturen und Volumenströmen durchgeführt, um das Spektrum der möglichen Speicherleistung zu ermitteln. Aus den gemessenen Werten wurde die Leistung mit der Gleichung

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{WTF}} c_{p,\text{WTF}} (t_{\text{ein}} - t_{\text{aus}}) = \dot{V}_{\text{WTF}} \rho_{\text{WTF}} c_{p,\text{WTF}} (t_{\text{ein}} - t_{\text{aus}}) \quad (4.13)$$

bestimmt, wobei die Dichte ρ_{WTF} und die spezifische Wärmekapazität $c_{p,\text{WTF}}$ des Wasser-Glykol-Gemisches jeweils für die mittlere Temperatur zwischen Ein- und Austritt mittels Stoffdatenfunktionen berechnet wurden.

In Abbildung 4.12 ist ein Beispiel für einen Ladevorgang dargestellt. Aufgrund des großen Volumenstromes fällt die Austrittstemperatur aber sehr schnell unter 0°C ab, und nähert sich an die Eintrittstemperatur an. Nach einem Zeitraum von etwa 6 h kommt es zu einer deutlichen Angleichung zwischen Ein- und Austrittstemperatur. Es kann davon ausgegangen werden, dass zu diesem Zeitpunkt die Phasenumwandlung zum größten Teil abgeschlossen ist. Zur Beobachtung befanden sich im Speicherbehälter auch einige transparente Kugeln, so dass im Bereich des Deckels der Ladezustand auch visuell nachgeprüft werden konnte. Zum Ende des Versuches war das Wasser in diesen Kugeln vollständig zu Eis umgewandelt. Zur Bestimmung der mittleren Leistung soll der Peak zu Beginn des Vorganges nicht mit berücksichtigt werden, da dieser nicht den Vorgang der Phasenumwandlung charakterisiert, sondern vom schnellen Austausch des Wärmeträgerfluids verursacht wurde. Die mittlere Leistung wurde daher für den Zeitraum zwischen 0,5 und 6 h bestimmt, wofür sich ein Wert von 295 W ergibt.

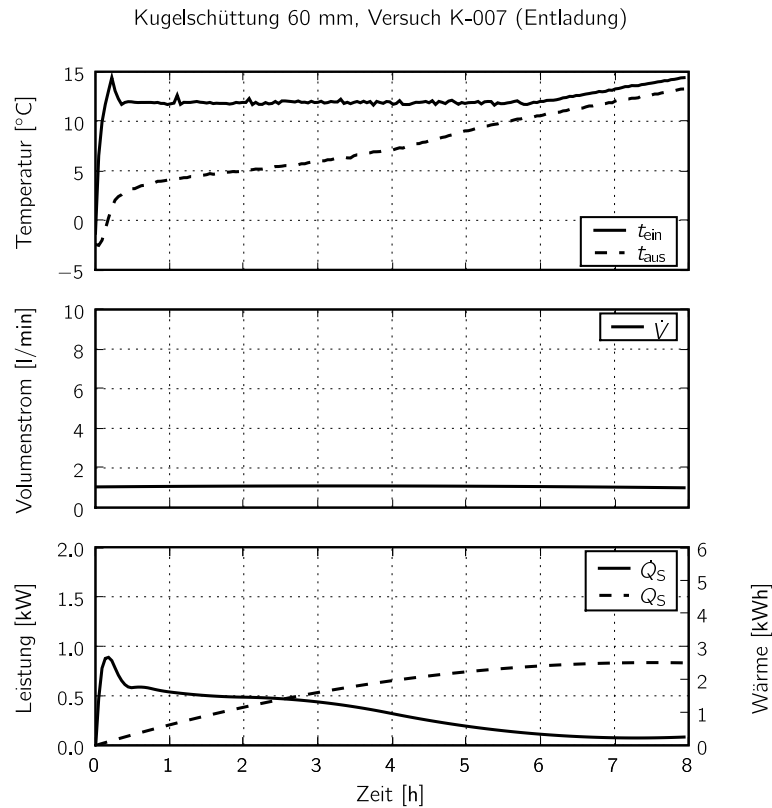


Abbildung 4.13: Kugelschüttung, normale Entladung

Die darauf folgende Entladung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Hier wurde mit einem niedrigen Volumenstrom von 1 l/min gearbeitet, wodurch sich sinnvoll nutzbare Temperaturdifferenzen zwischen Ein- und Austritt ergeben. Nach einer kurzen Einschwingphase ist am flachen Verlauf der Austrittstemperatur deutlich die Wirkung der Phasenumwandlung zu erkennen. Dadurch kann die Temperatur am Austritt über einen Zeitraum von etwa 4 h nahezu konstant gehalten werden. Dass es auch während dieses Zeitraumes zu einem leichten Temperaturanstieg kommt, lässt sich vor allem damit begründen, dass die Phasenumwandlung nicht gleichmäßig über die gesamte Behälterlänge erfolgt. Im Eintrittsbereich kommt es aufgrund der höheren Temperaturen zu einem schnelleren Schmelzvorgang, wodurch die Anzahl der Kugeln, die noch Eis enthalten, mit fortschreitender Zeit immer weiter abnimmt. Zwischen Versuchsbeginn und dem Zeitpunkt von 6 h ergibt sich eine mittlere Leistung von ca. 400 W.

Bei einer weiteren Entladung mit ebenfalls 12°C und einem Volumenstrom von 6 l/min konnte der Vorgang innerhalb von knapp 3 h abgeschlossen werden. Die Messdaten sind in Abbildung A.1 auf Seite 48 wiedergegeben. Im Zeitraum zwischen 0,3 und 3 h, ohne den anfänglichen Peak, wurde eine mittlere Leistung von etwa 790 W erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt beträgt am Anfang ca. 4 K und ist nach 2 h bereits auf 1,5 K abgesunken.

4.5.4 Schlauchbeutel stehend

Die Variante mit den stehend angeordneten Schlauchbeuteln (parallele Zylinder), lässt aufgrund der größeren Wärmeübertragungsfläche sowie der ebenfalls größeren PCM-Masse

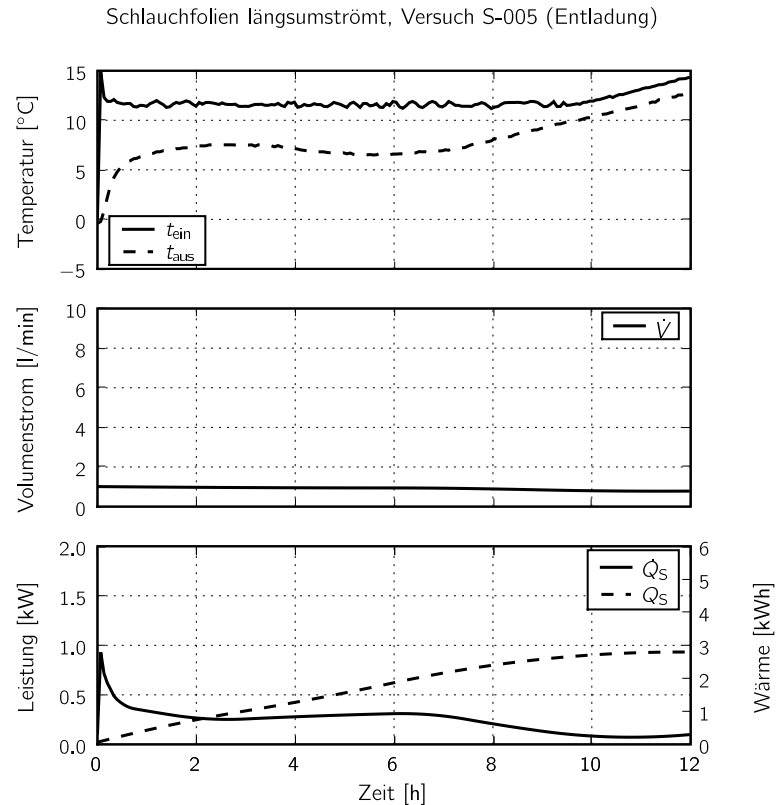


Abbildung 4.14: Schlauchbeutel stehend, normale Entladung

(siehe Tabelle 4.3 auf Seite 29) gegenüber der Kugelschüttung auch einen Zuwachs bei der erreichbaren Leistung erwarten. Die hier zum Vergleich herangezogenen Versuchsreihen wurden unter den selben Eintrittstemperaturen und Volumenströmen wie bei der Kugelschüttung durchgeführt. Die Messdaten der normalen Entladung sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Gegenüber der Kugelschüttung bleibt die erzielte Temperaturdifferenz etwas zurück, kann dafür aber über einen deutlich längeren Zeitraum aufrechterhalten werden. Hierbei fällt auf, dass die Austrittstemperatur etwa zur Mitte der Versuchszeit sogar noch einmal absinkt. Eine Erklärung dafür sind einsetzende Konvektionsströmungen, die durch die große Höhe der Verkapselungen zu erklären sind. Das PCM wird im unteren Bereich erwärmt und steigt dadurch auf. Beim Schmelzvorgang kommt es ebenfalls immer wieder zur Zerteilung der verbleibenden Eis-Segmente, wodurch die Strömungen im flüssigen PCM verstärkt werden. Im Zeitraum bis 9 h beträgt die mittlere Leistung 285 W.

Die Messdaten für einen Beladungsvorgang und für eine schnelle Entladung sind in den Abbildungen A.2 und A.3 auf Seite 49 dargestellt. Die mittleren Leistungen betragen dort 250 W bzw. 850 W. Das Diagramm zur Beladung zeigt, dass ein großer Zeitraum erforderlich ist, um eine vollständige Phasenumwandlung zu erreichen, und somit die gesamte Kapazität auszuschöpfen. Bei der schnellen Entladung kann gegenüber der Kugelschüttung keine größere Leistung erzielt werden, das Temperaturniveau am Austritt bleibt aber über eine wesentlich größere Dauer konstant.

Nach vier kompletten Zyklen wurde der Speicherbehälter geöffnet. Dabei wurde festgestellt, dass 16 Folienschläuche defekt waren. Als Begründung kann hier die relativ geringe Foliendicke in Verbindung mit den Bewegungen während des Erstarrungsvorgangs

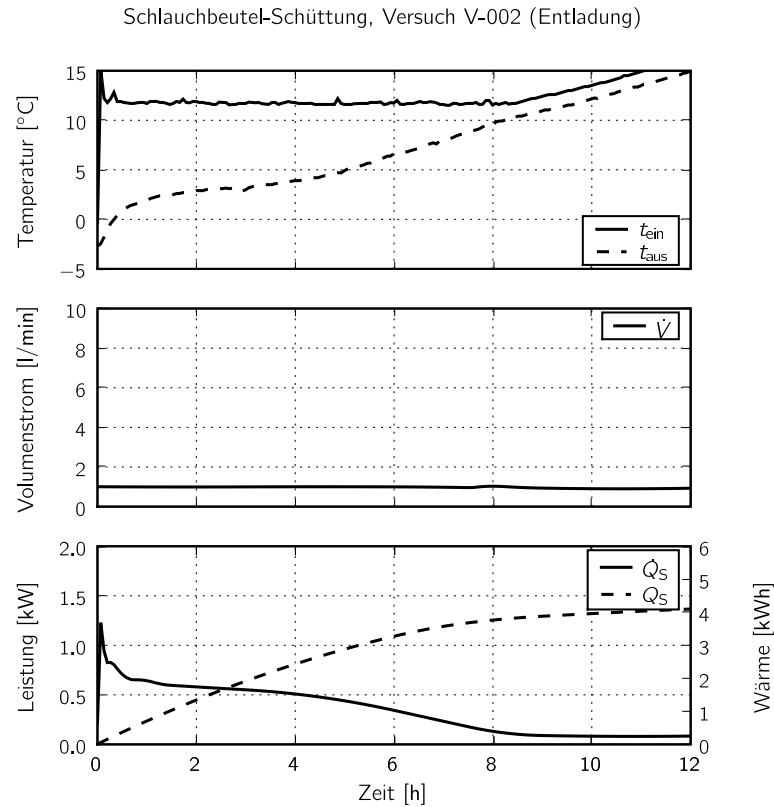


Abbildung 4.15: Schlauchbeutel Schüttung, normale Entladung

ges genannt werden. Größere Foliendicken werden bei der gewählten Schlauchbreite aber nicht als Standardware angeboten, so dass hier keine weiteren Versuche durchgeführt wurden.

4.5.5 Schlauchbeutel schüttung

Auch die Schlauchbeutel schüttung weist gegenüber den Kugeln eine deutlich größere Kapazität und eine größere Wärmeübertragerfläche auf. Abbildung 4.15 zeigt die aufgezeichneten Messdaten bei einer normalen Entladung. Unter gleichen Versuchsparametern wie bei der Kugelschüttung kann die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt vergrößert werden. Die Dauer des Entladevorganges kann bei einem qualitativ ähnlichen Verlauf zudem um etwa 2 h verlängert werden. Die mittlere Leistung im Zeitraum bis 7 h beträgt 510 W.

Abbildung 4.16 zeigt eine schnellere Entladung mit einem erhöhten Volumenstrom von 4 l/min. Über einen großen Zeitraum des Vorganges treten dabei noch nutzbare Temperaturdifferenzen über den Speicher auf. Ohne den anfänglichen Peak ergibt sich zwischen 0,5 und 3 h eine mittlere Leistung von 1130 W. Ein Beispiel für einen Ladevorgang wird in Abbildung A.4 wiedergegeben. Die Beladung ist nach etwa 10 h abgeschlossen, wobei die mittlere Leistung 370 W beträgt. Im Vergleich zur Kugelschüttung ist mit dieser Variante im gleichen Behälter eine deutliche Leistungssteigerung möglich. Entgegen der im Vorfeld genannten Bedenken steht also eine ausreichend große, vom Fluid angeströmte Oberfläche zur Verfügung.

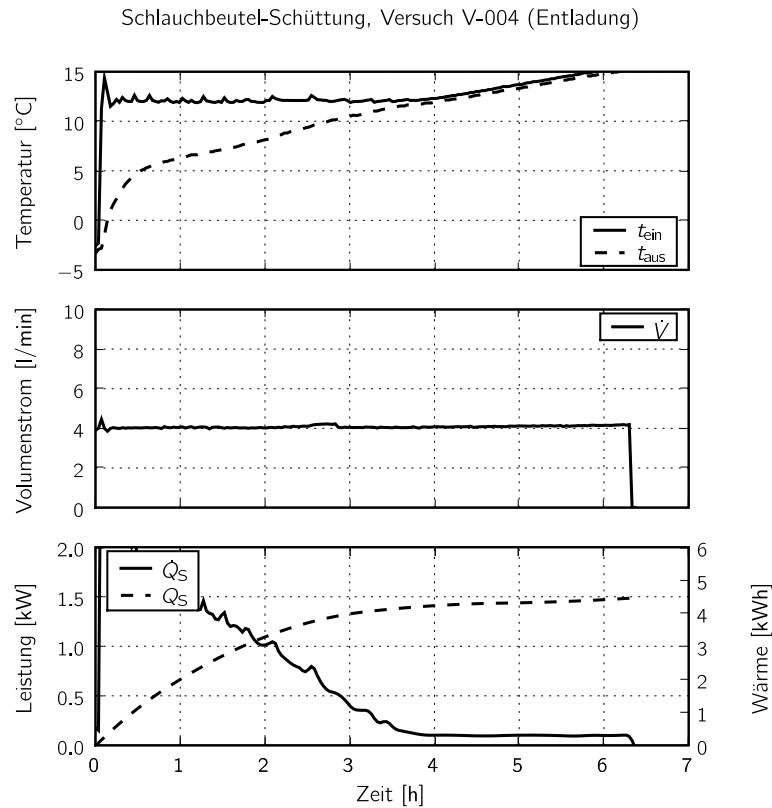


Abbildung 4.16: Schlauchbeutel Schüttung, schnelle Entladung

Im Gegensatz zu den Vorversuchen, welche im Eisschrank stattgefunden haben, kam es bei den Zyklen aber zu Beschädigungen der Beutel. Bereits nach zwei kompletten Zyklen waren 42 von insgesamt 624 Schlauchbeuteln defekt. Die Beschädigungen traten dabei überwiegend mitten in der Folienfläche in Form von Durchstichen auf, was bei 31 Beutel der Fall war. Die restlichen Folien zeigten Risse im Bereich der seitlichen Faltkante oder an der Schweißnaht. Da bei einer Erstarrung im Eisschrank derartige Probleme nicht auftreten, liegt die Ursache wahrscheinlich in der Relativbewegung zwischen den Beuteln. Bei der Erstarrung kommt es zu einer Ausdehnung des Eises, wodurch sich die Kapseln gegenseitig verdrängen. Diese Bewegung in Verbindung mit den entstehenden, teilweise scharfkantigen Festkörpern führt dann zu entsprechenden Beschädigungen an der Folie. Bei den Betrachtungen gilt aber zu bedenken, dass Wasser hinsichtlich seines Verhaltens eine Ausnahme darstellt. Im Gegensatz dazu weisen alle anderen potentiellen PCM einen Volumenschwund bei der Erstarrung auf, wodurch sich das Problem deutlich reduzieren könnte.

Als Versuch zur Lösung dieses Problemes wurde die Füllung des Behälters noch einmal modifiziert. Dazu wurden im Austausch 37 Beutel mit einer verstärkten Folie (160 μm) sowie 73 Stück aus einer Aluminium-Verbundfolie eingesetzt. Nach weiteren drei Zyklen zeigten sich an 36 der normalen Beutel sowie an 26 Schlauchbeuteln aus der Alufolie mechanische Beschädigungen. Bei der Alu-Verbundfolie äußerten sich die Probleme überwiegend in Beschädigungen der Schweißnähte, da die Folie keine Flexibilität, wie die Verbundmaterialien aus Polyethylen und Polyamid, aufweist. Trotz der größeren Foliendicke gab es aber auch Risse mitten in der Folienfläche. Ein typisches Schadenbild der Beutel ist in



Abbildung 4.17: Beschädigungen der Schlauchbeutel

Abbildung 4.17 dargestellt. Die Kapseln aus der verstärkten PA/PE-Folie waren dagegen alle intakt.

4.6 Leistungsmessung Prototyp

Aufgrund der Ergebnisse der Leistungsmessungen im Modellspeicher wurde entschieden, einen Prototypen auf Basis der Schlauchbeutelstützung herzustellen. Die im Modellspeicher verwendete Beutelgröße hat sich dabei als vernünftiges Maß erwiesen, allerdings soll für den Prototypen die dickere 160 μm -Verbundfolie aus Polyethylen und Polyamid verwendet werden. Diese Folie ist allerdings sehr steif, so dass sich damit bei den kleinen Beutelabmessungen nur geringe Füllmengen realisieren lassen. Beim Verschließen der Beutelöffnung wird das eingefüllte Wasser verdrängt, so dass der Schlauchbeutel dann sehr flach wird. Die verwendete Beutelgröße konnte daher nicht unter Aspekten einer optimierten Wärmeübertragung ausgewählt werden, sondern musste stattdessen den technischen Gegebenheiten für eine sinnvolle Befüllung genügen. Es kamen daher Beutel mit den Abmessungen 150 mm \times 200 mm zum Einsatz, die mit jeweils etwa 500 ml Wasser befüllt wurden. Aufgrund der bereits geschilderten Probleme bei der manuellen Befüllung wurde auch hier ausschließlich Wasser als PCM verwendet.

4.6.1 Konstruktion des Speichers

Mit dem Prototyp soll die Einsatzfähigkeit des Konzeptes für den kleineren Leistungsbereich näher untersucht werden. Der Speicher sollte daher über Abmessungen verfügen, wie diese typischerweise auch bei Warmwasserspeichern für die Gebäudetechnik auftreten. So muss der Speicher beispielsweise einen Transport durch gängige Türabmessungen erlauben. Das Resultat der Konstruktion ist als Zeichnung und Foto in Abbildung 4.18 dargestellt.

Der abgebildete Behälter besteht aus dem Kunststoff Polypropylen, wobei die zylinderförmige Hülle aus einem Lüftungsrohr angefertigt wurde. Der Deckel ist genau wie beim Modellspeicher angeflanscht, um eine optimale Befüllung und gegebenenfalls auch einen Austausch des gekapselten PCM zu ermöglichen. Bei der verwendeten Speicherbauhöhe

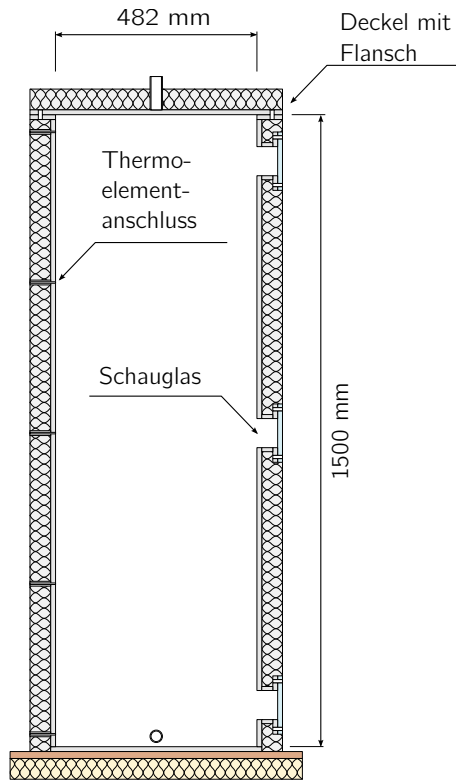


Abbildung 4.18: Zeichnung und Bild vom Prototypen-Speicher



Abbildung 4.19: Schlauchbeutel-Füllung des Prototypen

Tabelle 4.5: Speicherkapazität des Prototypen

Bezeichnung		Schlauchbeutel Schüttung
Kapselanzahl		465
m_{PCM}	[kg]	229,55
$A_{\text{WÜ}}$	[m ²]	27,9
V_{B}	[l]	273,7
$V_{\text{PCM,fl}}$	[l]	229,7
$V_{\text{PCM,f}}$	[l]	250,3
V_{Kapsel}	[l]	4,5
$V_{\text{WTF,m}}$	[l]	29,2
η_{V}	[%]	91,5
$Q_{\text{PCM,lat}}$	[kWh]	21,3
$Q_{\text{PCM,sen}}$	[kWh]	4,3
$Q_{\text{WTF,sen}}$	[kWh]	0,5
Q_{ges}	[kWh]	26,1

ist ein Austausch grad noch so möglich, wobei für die untersten Schichten der Behälter bereits gekippt werden muss. Für einen Praxiseinsatz sollte daher, vor allem bei höheren Speichern, zusätzlich ein Hand- oder Mannloch im unteren Bereich vorgesehen werden. Die Speicheranschlüsse wurden so vorgesehen, wie dies auch bei Wasserspeichern üblich ist. Die Ein- und Austrittsöffnungen wurden im Behälter aber jeweils mit einem halbkugelförmigen, engmaschigen Edelstahlsieb abgedeckt, um ein Verstopfen durch direkt anliegende Schlauchbeutel zu verhindern. Es ist vorgesehen den Speicher von unten nach oben zu durchströmen.

Um eine visuelle Kontrolle über den Zustand der Phasenumwandlung vornehmen zu können, wurden über die Bauhöhe verteilt drei Schaugläser vorgesehen. Auf der gegenüberliegenden Seite des Eintrittsstützens wurden zudem fünf Thermoelemente angebracht, um zusätzlich Aussagen über die Temperaturschichtung im Behälter zu erhalten.

Der Speicher wurde komplett mit einer 50 mm dicken Isolierung aus geschlossenzelligem Kautschuk versehen. Zur Reduzierung der Wärmeverluste über den Behälterboden wurde der Speicher auf eine Holzplatte mit einer darunter liegenden Hartschaumisolierung mit einer Dicke von ebenfalls 50 mm gestellt.

Die Befüllung der Schlauchbeutel erfolgte auch hier wieder manuell mit dem Vakuumschweißgerät (siehe Abbildung 4.5 auf Seite 21). Die Beutel wurden anschließend willkürlich als Schüttung in den Behälter eingebracht. Ein einzelner Beutel sowie der bereits zur Hälfte gefüllte Speicher sind in Abbildung 4.19 zu sehen. Angaben zur Behälterfüllung und zu den berechneten Kapazitäten sind in Tabelle 4.5 aufgeführt.

4.6.2 Messergebnisse

Im Vorfeld der Versuche wurde der leere Behälter einer Druckprobe mittels Durchströmung mit Leitungswasser unterzogen. Bis zu einem Durchfluss von 14 l/min zeigten sich hier keine Probleme, wobei die Prüfung vorwiegend zur Kontrolle der Schaugläser und der Anschlüsse vorgesehen war. Die Durchführung der Versuche erfolgte dann am gleichen Prüfstand, der auch für die Messungen am Modellspeicher eingesetzt wurde. Während der ersten Beladung traten nach 14 h aber größere Leckagen am Behälter auf, die auf

Schlauchbeutel-Schüttung, Versuch V-002 (Beladung)

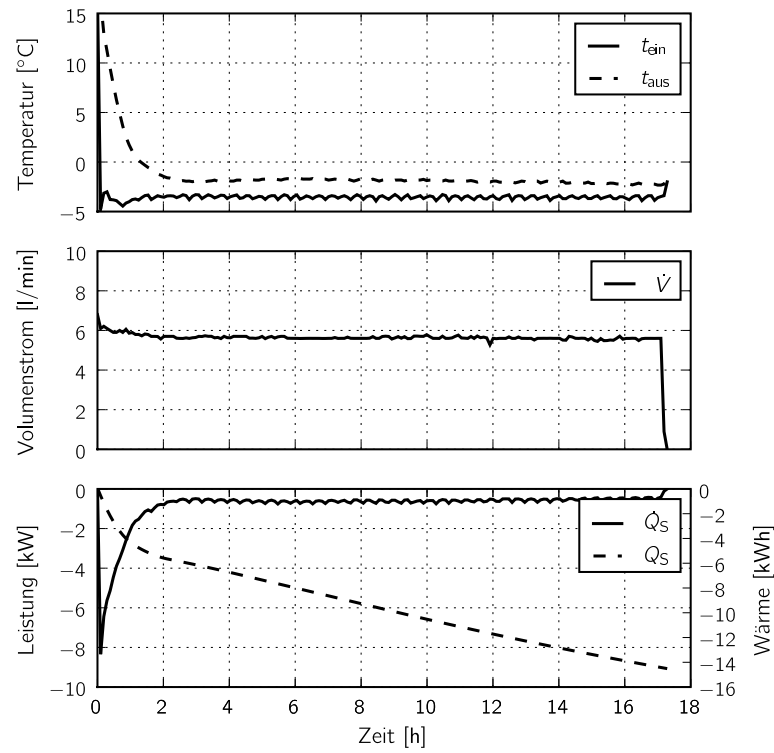


Abbildung 4.20: Prototyp, Laden

Schlauchbeutel-Schüttung, Versuch V-003 (Entladung)

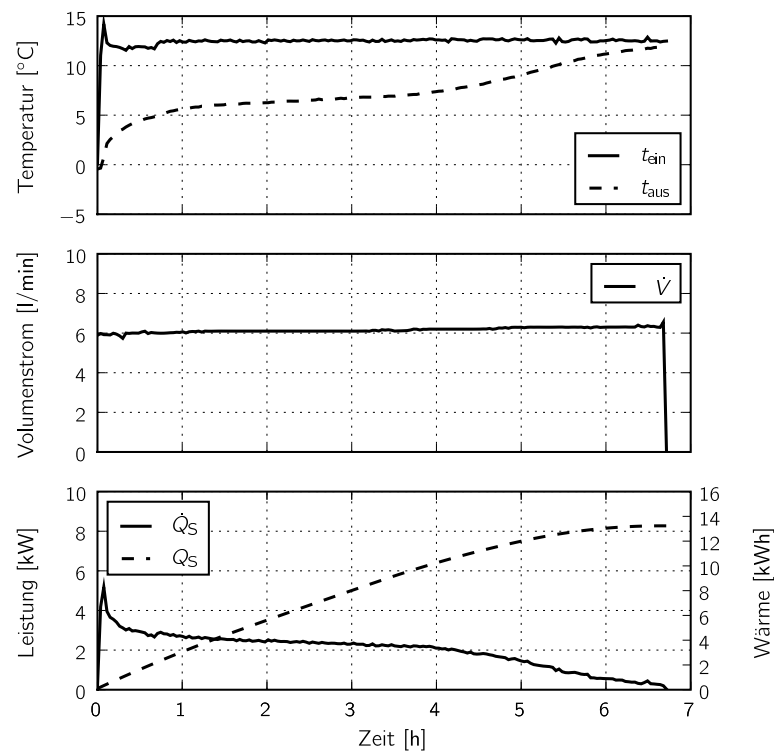


Abbildung 4.21: Prototyp, normale Entladung

fehlerhafte Schweißnähte zurückzuführen waren. Der Speicher musste daraufhin entleert, und die aufgeklebte Isolierung wieder entfernt werden. Anschließend wurden die Nähte beim Hersteller nachgebessert, so dass bei allen weiteren Versuchen keine Undichtigkeiten mehr aufgetreten sind. Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes für die Befüllung der Schlauchbeutel und für die Reparatur wurde im Verlauf des Projektes auf den Bau eines zweiten Prototypen verzichtet.

In Abbildung 4.20 sind die aufgezeichneten Messdaten für eine Beladung dargestellt. Bei dem verwendeten Volumenstrom von 6 l/min konnte die berechnete Kapazität auch nach einer Versuchsdauer von etwa 18 h nicht erreicht werden. Die Leistung pendelt sich nach der Einschwingphase auf einen nahezu konstanten Wert von etwa 700 W ein. Eine komplette Beladung ist damit nicht in akzeptabler Zeit erreichbar. Zum Versuchsende waren aber durch alle drei Schaugläser, und somit auch im oberen Bereich, deutliche Eisschichten sichtbar. Dabei war aber nicht deutlich erkennbar, ob bereits eine komplette Erstarrung der sichtbaren Beutel vorgelegen hat. Die im Speicher angeordneten Thermoelemente weisen aber eindeutig darauf hin, dass der Phasenübergang noch nicht abgeschlossen ist. So zeigen gegen Ende der Laufzeit drei der Temperaturfühler Werte ganz knapp unter 0 °C, während sich die Werte der anderen beiden sogar etwas oberhalb des Gefrierpunktes bewegen.

Die anschließende Entladung ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Aufgrund der Phasenumwandlung kann über eine Dauer von über 4 h die Austrittstemperatur nahezu konstant gehalten werden. Die Leistung weist bis zum Zeitpunkt von 5,5 h einen Mittelwert von 2290 W auf. Zum Vergleich sollen die Messwerte aus dem Versuch V-002 des Modellspeichers mit Schlauchbeutel-Schüttung (siehe Abbildung 4.15) herangezogen werden, bei dem ein ähnlicher Verlauf der Temperaturspreizung auftritt. Bei einer um den Faktor 5,4 größeren PCM-Menge wird eine etwa 4,5-fach höhere Leistung erzielt. Der Leistungszuwachs bleibt somit etwas hinter der Kapazitätssteigerung zurück. Dies ist sicherlich auf die größeren Beutelabmessungen zurückzuführen.

Um eine schnellere Beladung zu erreichen wurde für den Versuch in Abbildung A.5 auf Seite 50 der Volumenstrom von 6 auf 9 l/min erhöht. Ohne Berücksichtigung des anfänglichen Peaks ergibt sich für den Versuch eine mittlere Leistung von etwa 1300 W, was nahezu einer Verdoppelung entspricht. Zum Erreichen der vollen Kapazität müssen hier aber immernoch etwa 16 h eingeplant werden. Eine weitere Steigerung des Volumenstromes war aufgrund der erreichten Kapazitätsgrenze des Versuchsstandes aber nicht mehr möglich. Zudem zeigten Boden und Deckel des Behälters unter diesen Bedingungen bereits deutliche Wölbungen nach außen, so dass bei weiteren Steigerungen auch mit mechanischen Beschädigungen des Behälters zu rechnen wäre. Abbildung A.6 auf Seite 51 zeigt die anschließende Entladung, die ebenfalls mit dem maximalen Volumenstrom von 9 l/min durchgeführt wurde. Über eine Dauer von 3,5 h wurde hier eine mittlere Leistung von etwa 3100 W erreicht. Die Temperaturspreizung über den Speicher liegt hier über weite Bereiche noch in einem gut nutzbaren Rahmen.

Nach dem Abschluss von 5 kompletten Zyklen waren 2 Stück von den insgesamt 465 Beuteln defekt. In beiden Fällen hatte sich die Schweißnaht geöffnet, was vermutlich auf einen Verarbeitungsfehler zurückzuführen ist. An den anderen Beuteln gab es keine Beanstandungen. Nach dem Durchlaufen von 2 weiteren Zyklen waren alle Verkapselungen intakt.

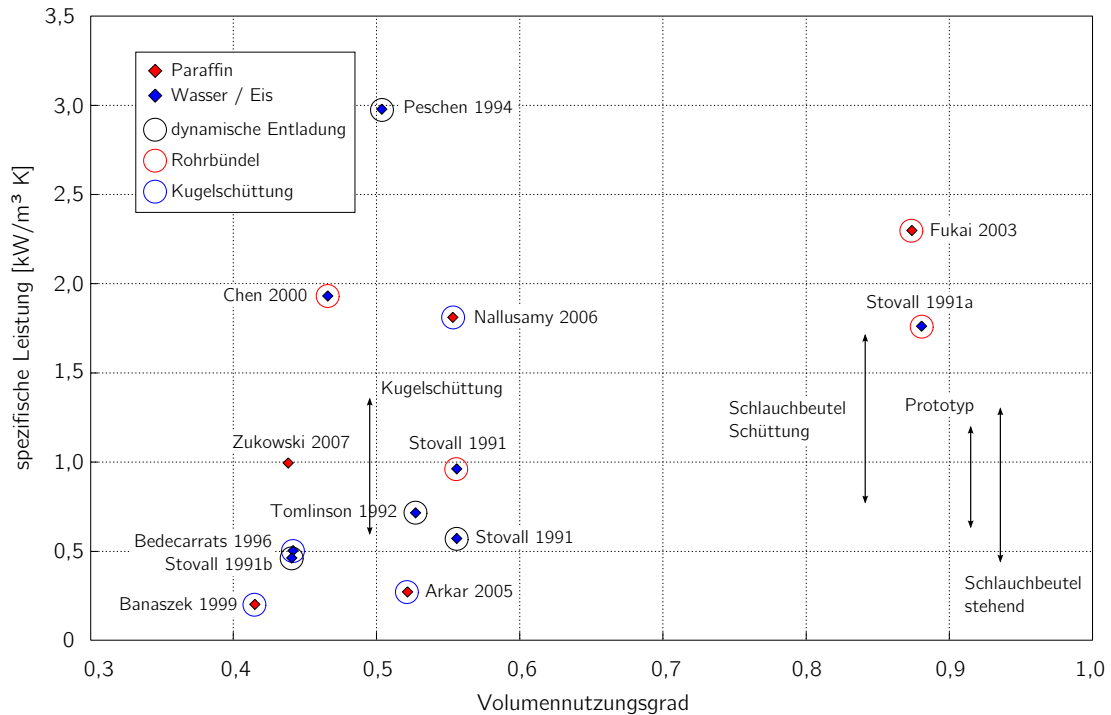


Abbildung 4.22: Vergleich der spezifischen Leistung

4.6.3 Einordnung der Ergebnisse in die Literaturlauswertung

Die gemessenen Leistungsdaten wurden mit denen aus der Literaturrecherche verglichen. Dazu wurde für die dargestellten Versuchsreihen jeweils die spezifische Leistung \dot{q}_{SP} berechnet und als Bereich in die Vergleichsdaten eingearbeitet. Das resultierende Diagramm ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

Die als Referenz verwendete Kugelschüttung ordnet sich in den dafür typischen Bereich ein und zeigt nochmals die schlechte Ausnutzung des verfügbaren Speichervolumens. Bei allen Varianten mit Schlauchbeuteln konnte hingegen ein wesentlich größerer Volumennutzungsgrad erzielt werden. Diese Varianten liegen in den Vergleichsdaten der Literaturlauswertung diesbezüglich am oberen Ende des Feldes. Mit den Schlauchbeutel-Schüttungen ist zudem gegenüber den Varianten mit Kugeln auch eine Leistungssteigerung möglich. Beim eingezeichneten Bereich des Prototypen ist zu bedenken, dass dies aufgrund des begrenzten Volumenstromes noch nicht die Leistungsgrenze des Speichers darstellt.

Größere Leistungen lassen sich entsprechend des Vergleiches vor allem mit Rohrbündel-Wärmeübertragern erreichen. Hier ergeben sich aber aus anwendungstechnischer Sicht u. U. einige Probleme. Einerseits muss das PCM vor Ort unverkapselt in den Behälter eingefüllt werden, wobei es insbesondere bei Salzhydraten zu unbeabsichtigten Veränderungen des Wassergehaltes kommen kann. Viele Salzhydrate zeigen zudem ein inkongruentes Schmelzverhalten. Dies kann zur Separation der verschiedenen Komponenten führen, wodurch eine nachhaltige Reduzierung der Speicherkapazität auftritt. Ausreichend kleine Verkapselungen können eine solche Stratifikation wirksam unterbinden, während in größeren Behältern das Eindicken des PCM mit einem Thixotropiermittel notwendig ist. Bei Konstruktionen mit Rohrbündeln wird dadurch sowohl die Einbringung, als auch der Austausch des PCM erheblich erschwert.

4.7 Gestaltungshinweise und Kostenvergleich

Der Vergleich zwischen zwei verschiedenen Abmessungen bei den Schlauchbeutel-Schüttungen im Modell- und im Prototypenspeicher lässt eindeutig Vorteile für die kleineren Abmessungen erkennen. Im Sinne einer Leistungsmaximierung sollte also nochmals überprüft werden, inwiefern sich auch bei den größeren Folienstärken kleinere Kapselabmessungen realisieren lassen.

Um sinnvoll nutzbare Temperaturdifferenzen über den Speicher zu erhalten muss, bei festgelegter Kapselgröße und Geometrie, zur Erhöhung der Leistung die Wärmeübertragungsfläche vergrößert werden. Dies wird auch dann notwendig, wenn die Differenz zwischen Eintrittstemperatur und Umwandlungstemperatur reduziert wird. Dafür ist eine Vergrößerung der Kapselanzahl nötig, was auch immer mit einer Steigerung der Speicherkapazität verbunden ist. Die Größe der benötigten Fläche kann aus den Angaben in Abschnitt 4.4.3 und Abbildung 4.7 abgeschätzt werden. Für eine bessere Ausnutzung der gesamten wärmeübertragenden Oberfläche kann sich u. U. auch eine Reihenschaltung von mehreren PCM's mit unterschiedlichen Umwandlungstemperaturen positiv auswirken. Derartige Anordnungen wurden in [13, 27] numerisch untersucht.

Hinsichtlich der Handhabung erwiesen sich die Varianten der Schlauchbeutel-Schüttungen als vorteilhaft. Das Einbringen in den Behälter stellt sich als einfach und wenig zeitaufwendig dar. Die ebenfalls untersuchte Variante mit den stehend angeordneten Schlauchfolien erweist sich hingegen für den praktischen Einsatz als weniger geeignet. Aufgrund der Instabilität der Beutel wurden diese in den liegenden Behälter eingebracht, und dieser dann komplett aufgestellt.

Abschließend soll ein Vergleich der zu erwartenden Kosten zwischen Speichern mit Rohrbündel-Wärmeübertrager und solchen mit Schlauchbeutel-Schüttung durchgeführt werden. Der Vergleich lässt sich dabei auf die Verkapselung gegenüber dem Rohrbündel reduzieren, da die Kosten des PCM unter Annahme des gleichen Typs sowie gleich großer Kapazität identisch sind. Das selbige trifft auch für die Kosten des Behälters zu. In beiden Fällen genügt ein einfacher Behälter ohne Einbauten mit zwei Anschlüssen. Ausgehend von einem typischen Volumennutzungsgrad von 85 % für Speicher mit Rohrbündeln, würde sich beim Prototypen ein Volumen von 41 l für den Wärmeübertrager ergeben. Unter Annahme einer Rohrabmessung von $d_a = 15$ mm sind dann etwa 1550 m Rohr notwendig. Bei spezifischen Kosten von ca. 1 €/m entstehen hier Materialkosten von 1550 €. Die Kosten der Schlauchbeutel für den Prototypen belaufen sich demgegenüber auf etwa 30 €. Unter der Maßgabe, dass die Rohrleitungen noch konfektioniert und mit Abstandshaltern versehen werden müssen, sollte diese Preisdifferenz auch bei Berücksichtigung der Kosten für eine automatische Befüllung der Beutel erhalten bleiben. Bei einer weiteren Optimierung bis zur Serienreife ist damit auch eine kostengünstige Fertigung von Eisspeichern für den Kleinkältebereich möglich.

5 FAZIT

Im Projekt wurden verschiedene Varianten zur Bestückung von statischen Latentkältespeichern untersucht und miteinander verglichen. Dabei kamen neben einer Referenzschüttung aus Kugeln, mit einem Durchmesser von 59 mm, zwei verschiedene Anordnungen von Schlauchbeuteln zum Einsatz. Gegenüber der Kugelschüttung treten bei der Durchströmung der Schlauchbeutel nur geringfügig höhere Druckverluste auf, es werden gleichzeitig aber deutlich größere Volumennutzungsgrade erreicht. Während mit zufälligen Kugelschüttungen nur etwa 64 % des Behältervolumens mit dem PCM gefüllt werden können, sind mit den Schlauchbeutelvarianten bis 93 % möglich. Trotz anfänglicher Bedenken, dass aufgrund großer Berührungsflächen zwischen den Beuteln nur ein schlechter Kontakt mit dem Wärmeträgerfluid entsteht, zeigten die Schlauchbeutelvarianten auch bei der übertragbaren Leistung Verbesserungspotential gegenüber der Kugelschüttung. Die Schlauchbeutel haben zudem den Vorteil einer automatisierten und preiswerten Fertigungsmöglichkeit, da derartige Verpackungssysteme in der Lebensmitteltechnik weit verbreitet sind. Für den konstruierten Prototypen mit einem Behältervolumen von etwa 270 l, lassen sich die Kosten für die Verkapselung im Vergleich zu einem System mit Rohrbündelwärmeübertrager von etwa 1550 € auf 30 € reduzieren.

Als kritischer Punkt stellt sich derzeit noch die Haltbarkeit des untersuchten Verkapselungsmaterials heraus. Mit der im Prototyp verwendeten Folienstärke ließen sich die Probleme zwar weitgehend eliminieren, die untersuchte Belastung beträgt aber auch nur wenige Zyklen. Als Alternative wurden jedoch schon andere Materialien ermittelt, die eine deutlich höhere Haltbarkeit erwarten lassen. Hier sind noch weitere Untersuchungen, insbesondere über eine größere Zyklenzahl, notwendig. Dies sollte aber auf jeden Fall in einem Speicher erfolgen, da die zur Beschädigung führenden Belastungen an Einzelproben nicht auftreten. Anschließend könnten sich gegebenenfalls auch Tests mit dem Einsatz von anderen PCM's als Wasser. Ein wichtiger Punkt ist dabei auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber der Diffusion von Wasser oder Wasserdampf. In Anbetracht der hohen Potentiale bei gleichzeitig niedrigen Kosten für die Fertigung erscheinen diese Aufwendungen aber als gerechtfertigt.

Der untersuchte Prototypen-Speicher wurde zudem als druckloses System verwendet, es wurde nur der entsprechende Drucksprung der Pumpe aufgeprägt. In größeren Anlagen ergeben sich aufgrund der vertikalen Netzausdehnung zudem häufig größere statische Drücke. Hierzu wären für die Verkapselungen noch weitere Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit durchzuführen. Speicher mit Kunststoffkugeln werden aber aus diesem Grund meist auch drucklos betrieben. Für eine ausreichende Druckfestigkeit würden die Kugeln sonst große Wanddicken benötigen, da in den formstabilen Kugeln ein kompressibles Gaspolster verbleibt.

Für einen Einsatz in Temperaturbereichen oberhalb von 0 °C müssen noch passende und preiswerte PCM gefunden und zur Serienreife geführt werden. Aufgrund der Komplexität der Thematik kann dies jedoch nur die Aufgabe eines eigenen Projektes darstellen. Ein Forschungsantrag zu diesem Thema ist beim Projektträger Jülich in Zusammenarbeit mit der Professur für anorganische Chemie der TU Dresden bereits eingereicht.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Adnot, Jérôme ; Armines, France ; Waide, Paul: Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners (EECCAC) – Final Report / D.G. Transportation-Energy (DGTREN). Version: April 2003. http://www.energyagency.at/publ/pdf/aircondbig_v1.pdf. 2003. – Forschungsbericht. – Volume 1
- [2] Arkar, C. ; Vidrih, B. ; Medved, S.: Numerical modelling of free cooling of low energy building utilizing PCM heat storage integrated into the ventilation system. In: *8th Workshop of Annex 17*. Kizkalesi, Türkei, April 2005
- [3] Banaszek, J. ; Domański, R. ; Rebow, M. ; El-Sagier, F.: Experimental study of solid-liquid phase change in a spiral thermal energy storage unit. In: *Applied Thermal Engineering* 19 (1999), S. 1253–1277. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00120-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00120-3). – DOI 10.1016/S1359-4311(98)00120-3
- [4] Berryman, James G.: Random close packing of hard spheres and disks. In: *Phys. Rev. A* 27 (1983), Nr. 2, S. 1053–1061. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.27.1053>. – DOI 10.1103/PhysRevA.27.1053
- [5] Bremer, M. ; Arnold, T.: *DSC-Untersuchungen von potentiellen Kältespeicher-materialien*. August 2007. – Interner Bericht
- [6] Schutzrecht DE 101 56 944-A1 (11. Juli 2002). Bureau, Cathy ; Burk, Roland ; Dürr, Gottfried ; Feuerecker, Günther ; Molt, Kurt ; Rappard, Gerald von ; Seewald, Wolfgang ; Taxis-Reischl, Brigitte ; Weinbrenner, Marcus (Erfinder); Behr GmbH & Co. (Anmelder). Pr.: DE 101 00 252, DE 101 45 658, DE 101 50 896, DE 201 15 273
- [7] Bédécarrats, J. P. ; Strub, F. ; B., Falcon ; Dumas, J. P.: Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant. In: *Int. J. Refrig.* 19 (1996), Nr. 3, S. 187–196. [http://dx.doi.org/10.1016/0140-7007\(95\)00080-1](http://dx.doi.org/10.1016/0140-7007(95)00080-1). – DOI 10.1016/0140-7007(95)00080-1
- [8] Calmac Manufacturing Corporation: *Calmac Ice Bank thermal energy storage systems*. Version: 2001. <http://www.calmac.com/benefits/general.pdf>
- [9] Carslaw, Horatio S. ; Jaeger, John C.: *Conduction of heat in solids*. 2. ed. Oxford : Clarendon Press, 1959
- [10] Chen, Sih-Li ; Chen, Chin-Lung ; Tin, Chun-Chuh ; Lee, Tzong-Shing ; Ke, Ming-Chun: An experimental investigation of cold storage in an encapsulated thermal storage tank. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 23 (2000), S. 133–144. [http://dx.doi.org/10.1016/S0894-1777\(00\)00045-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0894-1777(00)00045-5). – DOI 10.1016/S0894-1777(00)00045-5
- [11] Clean Air Fleets: *Vehicle Idling Reduction Strategies*. <http://www.cleanairfleets.org/idling.html>. Version: 27. Juli 2006

- [12] Dittmann, Achim ; Fischer, Siegfried ; Huhn, Jörg ; Klinger, Jochen: *Repetitorium der Technischen Thermodynamik*. Stuttgart : B. G. Teubner, 1995. – 469 S. – ISBN 978-3-519-06354-4
- [13] Fang, Ming ; Chen, Guangming: Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system. In: *Applied Thermal Engineering* 27 (2007), Nr. 5-6, S. 994-1000. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.08.001>. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2006.08.001
- [14] Farid, Mohammed M. ; Khudhair, Amar M. ; Razack, Siddique Ali K. ; Al-Hallaj, Said: A review on phase change energy storage: materials and applications. In: *Energy conversion and management* 45 (2004), S. 1597-1615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>. – DOI 10.1016/j.enconman.2003.09.015
- [15] Fukai, Jun ; Hamada, Yuichi ; Morozumi, Yoshio ; Miyatake, Osamu: Improvement of thermal characteristics of latent heat thermal energy storage units using carbon-fiber brushes: experiments and modeling. In: *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (2003), S. 4513-4525. [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00290-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00290-4). – DOI 10.1016/S0017-9310(03)00290-4
- [16] Fukuta, N.: Experimental Studies of Organic Ice Nuclei. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 23 (1966), Nr. 2, S. 191-196. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1966\)023<0191:ES00IN>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1966)023<0191:ES00IN>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0469(1966)023<0191:ES00IN>2.0.CO;2
- [17] Gawron, K. ; Schröder, J.: Eigenschaften einiger Salzhydrate zur latenten Speicherung thermischer Energie. In: *VDI-Berichte Nr. 288*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1977, S. 79-86
- [18] Großmann, Karin: *Neue Wege für das Ermitteln der effektiven Schüttgut-Wärmeleitfähigkeit und für die indirekte Gutfeuchtebestimmung*. VDI-Verlag, 1993 (VDI-Berichte Nr. 3314). – 174 S. – ISBN 3-18-141403-4
- [19] Gustafsson, Eva Mari: *Database for phase change materials*. Version: 1999. <http://www.fskab.com/Annex17/Materialdata/Materialdata.xls>, Abruf: 14.02.2007
- [20] Hoffman, Charles J. ; Jolly, William L.: Antimony Pentafluoride: Density, Melting Point and Vapor Pressure. In: *J. Phys. Chem.* 61 (1957), S. 1574-1575. <http://dx.doi.org/10.1021/j150557a030>. – DOI 10.1021/j150557a030
- [21] Schutzrecht JP 103 30 741-A (05. Dezember 1998). Kakiuchi, Hiroyuki ; Chihara, Shoichi ; Kubokawa, Seiichi (Erfinder); Mitsubishi Chemical Corporation (Anmelder).
- [22] Kanani, Nasser: *Werkstoffkunde für Oberflächentechniker und Galvaniseure*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2006. – 372 S. – ISBN 978-3-446-40741-1
- [23] McDonald, R. A. ; Shrader, S. A. ; Stull, D. R.: Vapor Pressures and Freezing Points of 30 Organics. In: *J. Chem. Eng. Data* 4 (1959), S. 311-313. <http://dx.doi.org/10.1021/je60004a009>. – DOI 10.1021/je60004a009
- [24] Nallusamy, N. ; Sampath, S. ; Velraj, R.: Study on performance of a packed bed latent heat thermal energy storage unit integrated with solar water heating system. In: *J Zhejiang Univ SCIENCE A* 7 (2006), Nr. 8, S. 1422-1430. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.2006.A1422>. – DOI 10.1631/jzus.2006.A1422

- [25] Peschen, Peter: Eisspeicher für Industrie und technische Gebäudeausrüstung – Systeme und Erfahrungen. In: *Energiespeicher für Strom, Wärme und Kälte: Tagung Leipzig, 6./7. Dezember 1994 / VDI-Gesellschaft Energietechnik*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1994 (VDI-Berichte Nr. 1168). – ISBN 3–18–091168–9, S. 329–342
- [26] Recknagel, Hermann (Hrsg.) ; Sprenger, Eberhard (Hrsg.) ; Schramek, Ernst-Rudolf (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*. 71. Aufl. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2003. – ISBN 3–486–26534–2
- [27] Seeniraj, R. V. ; Narasimhan, N. Lakshmi: Performance enhancement of a solar dynamic LHTS module having both fins and multiple PCMs. In: *Solar Energy* 82 (2008), Nr. 6, S. 535–542. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2007.11.001>. – DOI 10.1016/j.solener.2007.11.001
- [28] Seidel, Wolfgang: *Werkstofftechnik*. 4., durchgesehene Auflage. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2000. – 383 S. – ISBN 3–446–21470–4
- [29] Sharma, Someshower Dutt ; Kitano, Hiroaki ; Sagara, Kazunobu: Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications. In: *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.* 29 (2004), S. 31–64
- [30] Schutzrecht US 5 402 650 (4. April 1995). Stewart, William E. (Erfinder); The Curators of the University of Missouri (Anmelder).
- [31] Stovall, Therese K.: Baltimore Aircoil Company (BAC) ice storage test report / Oak Rich National Laboratory. Version: März 1991. <http://www.ornl.gov/info/reports/1991/3445603337324.pdf>. 1991 (ORNL/TM-11342). – Forschungsbericht
- [32] Stovall, Therese K.: Calmac ice storage test report / Oak Rich National Laboratory. Version: August 1991. <http://dx.doi.org/10.2172/5210651>. 1991 (ORNL/TM-11582). – Forschungsbericht
- [33] Stovall, Therese K.: Turbo Refrigerating Company ice storage test report / Oak Rich National Laboratory. Version: Juni 1991. <http://www.ornl.gov/info/reports/1991/3445603549925.pdf>. 1991 (ORNL/TM-11657). – Forschungsbericht
- [34] Telkes, Maria: Das Speichern von Sonnenenergie zum Heizen und Kühlen. In: *Klima- und Kälteingenieur* 2 (1974), Nr. 11, S. 465–470
- [35] Tomlinson, J. J.: Thermal Energy Storage Technical Progress Report, April 1990 – March 1991 / Oak Rich National Laboratory. Version: März 1992. <http://www.ornl.gov/info/reports/1993/3445603755871.pdf>. 1992 (ORNL/TM-12081). – Forschungsbericht
- [36] Ure, Zafer: Positive Temperature Eutectic Energy Storage Systems. In: *CIB-SE/ASHRAE Conference*. Edinburgh, September 2003
- [37] van Miltenburg, J. Cees ; Gabrielova, Hana ; Ruzicka, Kvetoslav: Heat Capacities and Derived Thermodynamic Functions of 1-Hexanol, 1-Heptanol, 1-Octanol, and 1-Decanol between 5 K and 390 K. In: *J. Chem. Eng. Data* 48 (2003), S. 1323–1331. <http://dx.doi.org/10.1021/je0340856>. – DOI 10.1021/je0340856
- [38] van't Hoff, J. H ; Reicher, L. Th.: Die Umwandlungstemperatur bei der doppelten Zersetzung. In: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 3 (1889), S. 482–487

- [39] VDI-Gesellschaft Düsseldorf Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. 9., überarb. u. erw. Aufl. Berlin u. a. : Springer-Verlag, 2002. – ISBN 3-540-41200-X
- [40] Webasto AG: *Geschäftsbericht 2001*. http://www.webasto.net/company/graphics/file_Geschaeftsbericht2001_de_1907kb.pdf
- [41] Zalba, Belén ; Marin, José ; Cabeza, Luisa F. ; Mehling, Harald: Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. In: *Applied Thermal Engineering* 23 (2003), S. 251–283. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8). – DOI 10.1016/S1359-4311(02)00192-8
- [42] Zukowski, Miroslaw: Experimental study of short term thermal energy storage unit based on enclosed phase change material in polyethylene film bag. In: *Energy conversion and management* 48 (2007), S. 166–173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.04.020>. – DOI 10.1016/j.enconman.2006.04.020

A DIAGRAMME DER LEISTUNGSMESSUNGEN

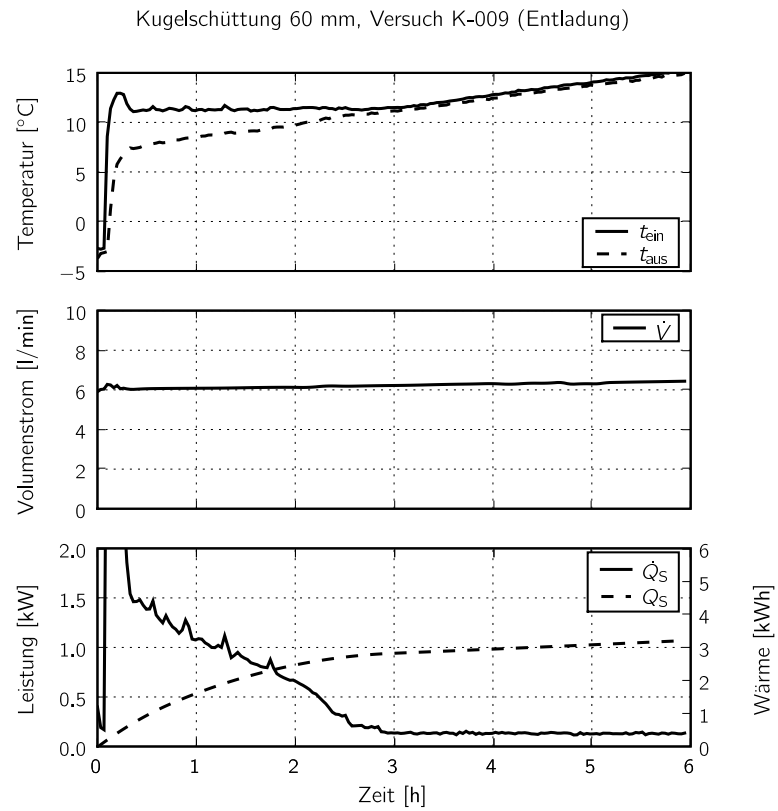


Abbildung A.1: Kugelschüttung, schnelle Entladung

Schlauchfolien längsumströmt, Versuch S-008 (Beladung)

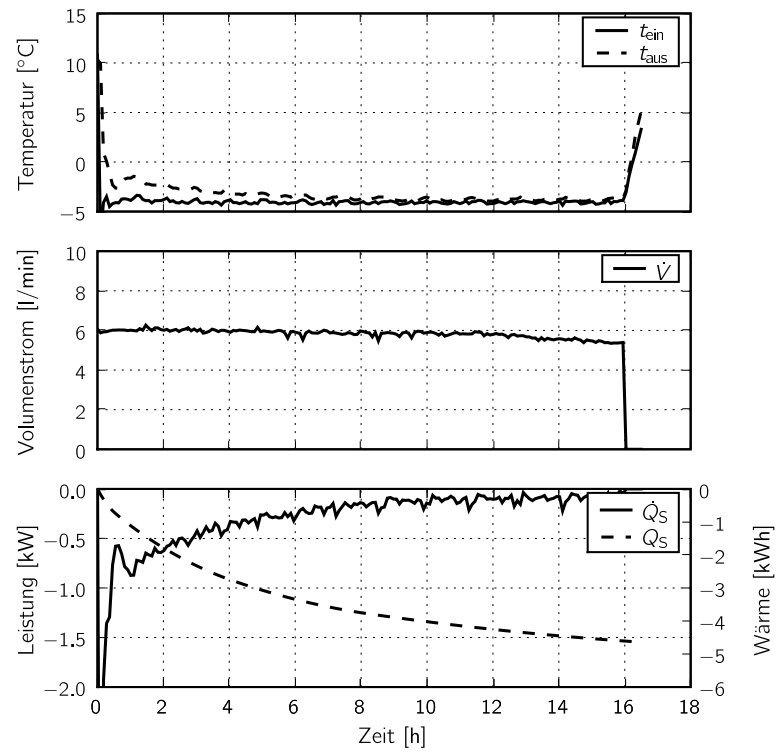


Abbildung A.2: Schlauchbeutel stehend, Laden

Schlauchfolien längsumströmt, Versuch S-009 (Entladung)

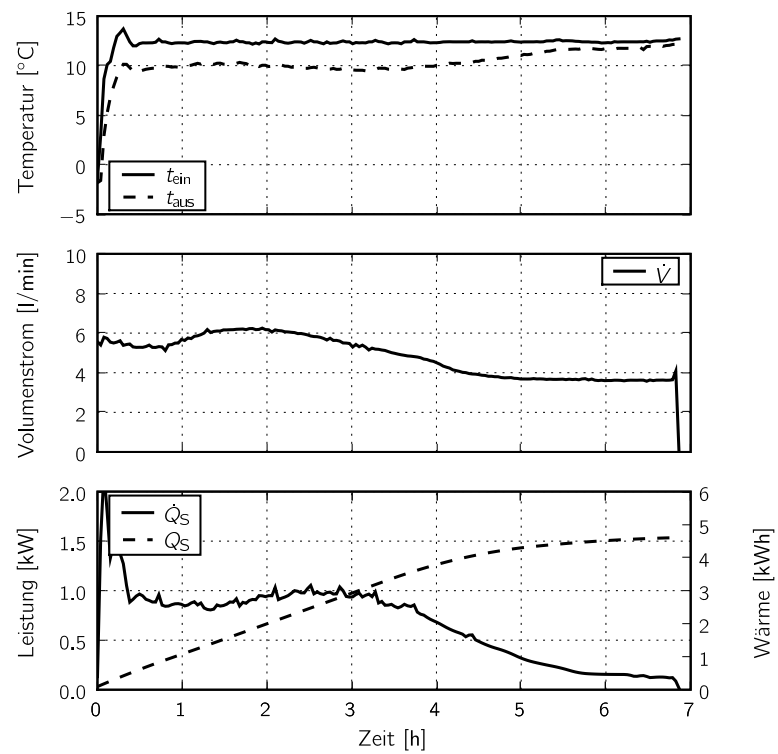


Abbildung A.3: Schlauchbeutel stehend, schnelle Entladung

Schlauchbeutel-Schüttung, Versuch V-003 (Beladung)

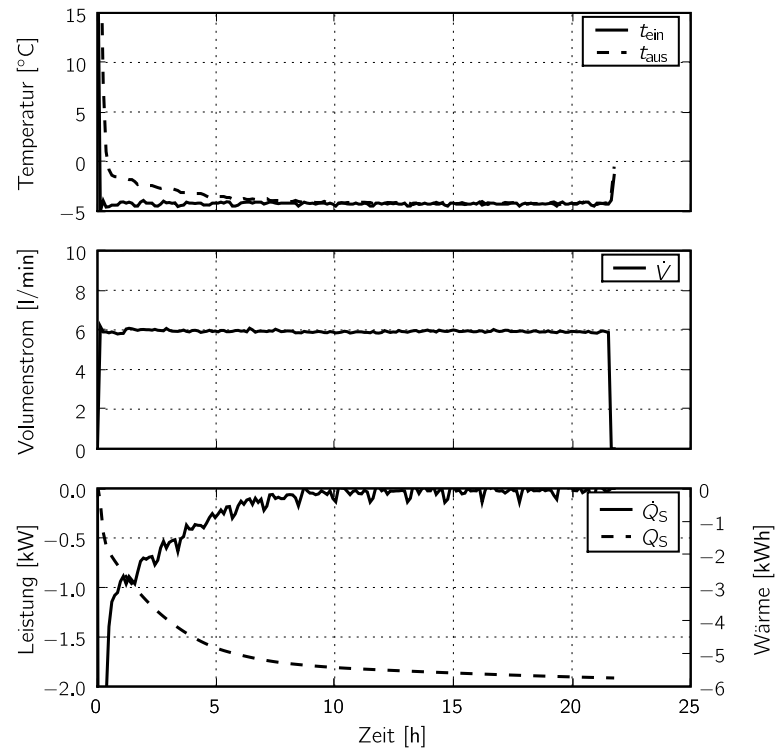


Abbildung A.4: Schlauchbeutel Schüttung, Laden

Schlauchbeutel-Schüttung, Versuch V-014 (Beladung)

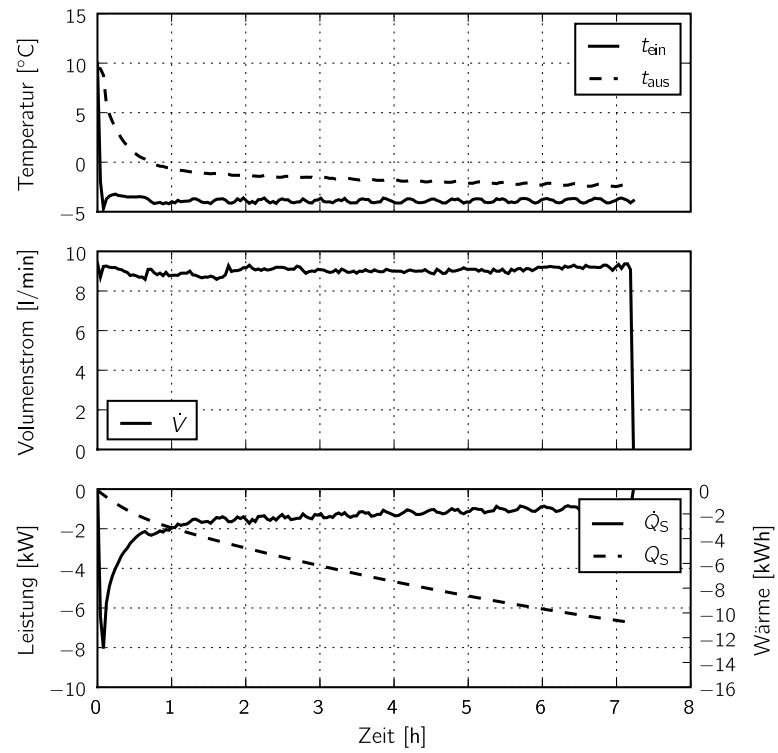


Abbildung A.5: Prototyp, schnelles Laden

Schlauchbeutel-Schüttung, Versuch V-015 (Entladung)

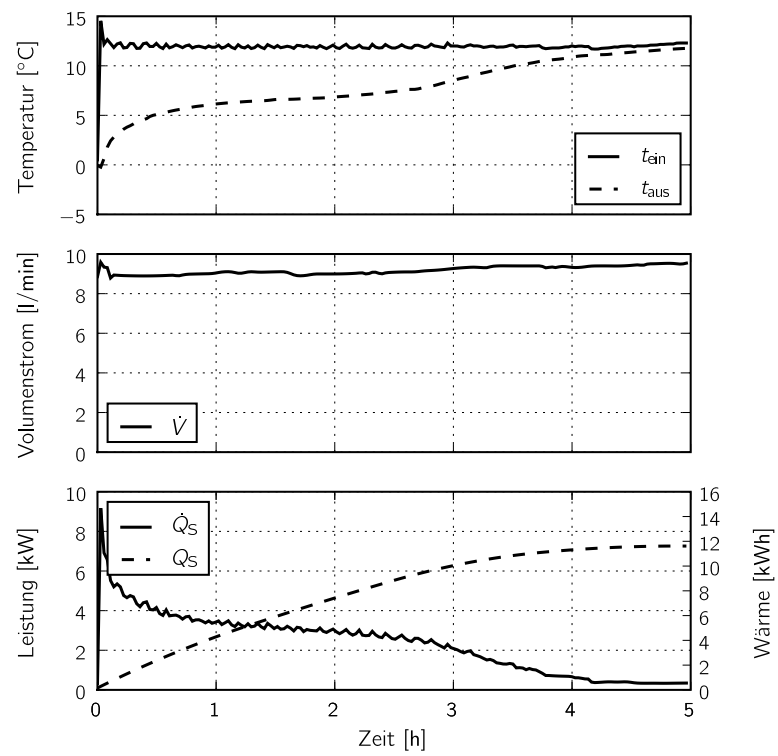


Abbildung A.6: Prototyp, schnelle Entladung