

# Untersuchung der Mechanismen zur Wärmeübertragung in Direktkontaktlatentwärmespeichern

vorgelegt von

M.Sc.

Sven Kunkel

von der Fakultät III - Prozesswissenschaften

der Technischen Universität Berlin

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens-Uwe Repke

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Matthias Rädle

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07. August 2019

Berlin 2019



## Vorwort / Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme (seit 2018: Kompetenzzentrum CeMOS) der Hochschule Mannheim in Kooperation mit dem Fachgebiet Dynamik und Betrieb technischer Anlagen der Technischen Universität Berlin im Zeitraum von April 2013 bis März 2019.

Besonders danken möchte ich meinen Betreuern Herrn Prof. Dr. Jens-Uwe Repke und Herrn Prof. Dr. Matthias Rädle für die Vergabe des Themas und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Des Weiteren möchte ich mich für die Betreuung, die konstruktiven Diskussionen und die sehr gute Zusammenarbeit während der gesamten Zeit bedanken.

Mein Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme der Hochschule Mannheim für das stets sehr gute Arbeitsklima, die vielen anregenden fachlichen Diskussionen und die große Hilfsbereitschaft. Mein besonderer Dank gilt hierbei Juniko Tedy, Tobias Teumer, Felix Kübel-Heising, Kerstin Schlachter und Timon Schumacher.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Philipp Schütz vom Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher der Hochschule Luzern für die gute Zusammenarbeit und den Zugang zu dem Computertomograf der Universität Zürich bedanken.

Ich danke meiner Frau Talita für die Unterstützung und den Rückhalt während der gesamten Dauer der Promotion sowie meinen Kindern Klara und Theo für die sagenhafte Bereicherung in meinem Alltag.

Mannheim, März 2019

Sven Kunkel

## Kurzfassung

Die Energiewende in Deutschland ist in vollem Gange. Durch den gezielten Ausbau der erneuerbaren Energien steigt gleichzeitig der Anteil der fluktuierenden Energiequellen entsprechend an. Dies erfordert effiziente und wirtschaftliche Speichertechnologien zum Ausgleich der Diskrepanz zwischen Energieangebot und -nachfrage. Ebenfalls wird eine solche Speichertechnologie zur effizienten Nutzung von thermischer Abwärme benötigt. Als mögliches Konzept wird hierfür ein Latentwärmespeicher betrachtet, der das Prinzip des Direktkontaktes nutzt. Bei diesem Speichertyp steht das Speichermedium, ein Phasenwechselmaterial (PCM), im direkten Kontakt mit dem Wärmeträgerfluid (WTF), zum Beispiel einem Mineralöl.

Die Auslegung solcher Systeme ist komplex, da stetig sich ändernde wärmeübertragende Flächen im Speichersystem vorliegen und bisher keine Daten zum Wärmeübergang des 3-phasigen Systems Wärmeträgerfluid, flüssiges PCM, festes PCM bekannt sind. Zur Ermittlung der charakteristischen Kenndaten des Speichersystems wie der wärmeübertragenden Flächen und der Wärmeübergangskoeffizienten ist zu Beginn eine Beschreibung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs erforderlich, da hier unterschiedliche und somit zeitlich veränderliche wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten vorliegen. Folgende drei Bereiche werden im Direktkontaktlatentwärmespeicher unterschieden:

- Bereich 1: Das PCM liegt im festen und das WTF im flüssigen Aggregatzustand vor: Bereich 1 liegt zu Beginn des Schmelz- und zum Ende des Kristallisationsvorgangs vor. Das PCM wird erwärmt bzw. abgekühlt.
- Bereich 2: Das PCM befindet sich im Phasenwechsel und das WTF verbleibt im flüssigen Aggregatzustand. Im Bereich 2 wird das PCM geschmolzen bzw. kristallisiert.
- Bereich 3: Das PCM wie auch das WTF liegen im flüssigen Aggregatzustand vor: Bereich 3 liegt zu Beginn des Kristallisations- und zum Ende des Schmelzvorgangs vor. Das PCM wird abgekühlt bzw. erwärmt.

In den beiden Bereichen 1 und 3 liegen hierbei eindeutige wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten vor. Im Bereich 2, dem Phasenwechsel, verändern sich die wärmeübertragenden Flächen sowie auch die vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten stetig in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Anteils an festem / flüssigen PCM.

Zur Ermittlung der unbekanntenen, aber notwendigen Auslegungsdaten, wie der wärmeübertragenden Flächen und der entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten für die unterschiedlichen Bereiche des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs, werden Versuchsaufbauten auf 2 Größenskalen entwickelt und gebaut, an denen die grundsätzlichen Eigenschaften und die up-scale-Möglichkeiten erarbeitet werden.

Zunächst wird im Labormaßstab das Konzept der direkten Wärmeübertragung nachgestellt, wobei ein Speicherbehälter mit einer PCM-Masse von 0,60 kg und einer WTF-Eintrittsöffnung im Boden des Speicherbehälters realisiert worden ist. Um den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen WTF und festem (Bereich 1) bzw. schmelzendem PCM (Bereich 2) ermitteln zu können, wird ein künstlicher Kanal mit einem Durchmesser von 6 mm innerhalb des PCM erzeugt und abschnittsweise die Öltemperatur innerhalb des Kanals sowie die PCM-Temperatur erfasst,

wobei die Erfassung der PCM-Temperatur Rückschlüsse auf die Innenwandtemperatur des Kanals erlaubt. Zur Detektion der Temperatur der im Kanal aufsteigenden Ölphase wird ein neuartiges, am Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme entwickeltes Messsystem verwendet, welches optisch die Temperatur erfasst. Bei dieser optischen Temperaturerfassung wird die vom Öl emittierte Wärmestrahlung mittels einer 910  $\mu\text{m}$  dicken Glasfaser zu einer Indiumgalliumarsenid-Photodiode geleitet, welche Wärmestrahlung in einem Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  detektiert. Mit Hilfe von Computertomographie werden die wärmeübertragenden Flächen und die Kanalstruktur innerhalb des PCM für den Bereich 1 experimentell bestimmt. Zur Bestimmung der wärmeübertragenden Fläche für den Bereich 2, wird beispielhaft der Schmelzvorgang für den künstlichen Kanal betrachtet. Durch die Erfassung der Temperatur innerhalb des PCM auf unterschiedlichen Höhen wird ein idealisiertes Aufschmelzmodell des Kanals entwickelt, mit Hilfe dessen die wärmeübertragende Fläche als Funktion der Zeit und der Höhe abgeleitet werden kann.

Um den Wärmeübergangskoeffizienten für den Bereich 3 zwischen Öl und flüssigem PCM zu ermitteln, wird das Temperaturprofil in Strömungsrichtung der einzeln im flüssigen PCM aufsteigenden WTF-Tropfen nahinfrarot-optisch mittels der Glasfaser erfasst. Dies ist durch die hohe Messfrequenz des eigens entwickelten Messgerätes von 2000 Temperaturmessungen pro Sekunde möglich. Die wärmeübertragende Fläche für den Bereich 3 wird aus optischen Aufnahmen der Tropfen abgeleitet.

Im Anschluss wird an einer Technikumsanlage eines Direktkontaktlatentwärmespeichers mit einer PCM-Masse von 12,0 kg und 18 WTF-Eintrittsöffnungen die Übertragbarkeit der ermittelten charakteristischen Kenndaten aus der Laboranlage gezeigt.

Für Bereich 1 und 3 liegen eindeutige wärmeübertragende Flächen als auch Wärmeübergangskoeffizienten vor, welche ermittelt worden sind. Für Bereich 1 beträgt die wärmeübertragende Fläche 168,1  $\text{cm}^2$  und für den Bereich 3 24,61  $\text{cm}^2$ . Der Wärmeübergangskoeffizient für den Bereich 1 beträgt 87  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$  und für Bereich 3 1845  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ . Für Bereich 2 wird beispielhaft das Schmelzen betrachtet. Hier ist die wärmeübertragende Fläche eine Funktion der Zeit und der Kanalhöhe. Der Wärmeübergangskoeffizient im Bereich 2 steigt mit zunehmender Zeit bis zu einem Maximalwert von 459  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$  an und fällt im Anschluss schlagartig ab. Das Abfallen wird mit einer Änderung im Wärmeübergangsmechanismus erklärt.

Die anschließende Übertragung der Ergebnisse aus der Labor- auf die Technikumsanlage zeigt eine gute Übereinstimmung.

## Abstract

The energy revolution in Germany is in full swing. At the same time, the targeted expansion of renewable energies is increasing the proportion of fluctuating energy sources accordingly. This requires efficient and economical storage technologies to balance the discrepancy between energy supply and demand. Such a storage technology is also required for the efficient use of thermal waste heat. A latent heat storage system using the principle of direct contact is considered as a possible concept. In this storage system, the storage medium, a phase change material (PCM), is in direct contact with the heat transfer fluid (WTF), for example a mineral oil.

The dimensioning of such systems is complex, since continuously changing heat transfer surfaces are present in the storage system and no data on heat transfer of the 3-phase system heat transfer fluid, liquid PCM, solid PCM are known so far. In order to determine the characteristic data of the storage system such as the heat transfer surfaces and the heat transfer coefficients, a description of the melting and crystallization process is required at the beginning, since different and thus temporally variable heat transfer surfaces and heat transfer coefficients are present. The following three sections are distinguished in the direct contact latent heat storage system:

- Section 1: The PCM is in the solid state and the WTF in the liquid state: Section 1 is present at the beginning of the melting process and at the end of the crystallization process. The PCM is heated or cooled.
- Section 2: The PCM is in phase change and the WTF is in liquid state. In this section, the PCM is melted or crystallized.
- Section 3: The PCM as well as the WTF are in the liquid state: This happens at the beginning of the crystallization process and at the end of the melting process. In this section the PCM is either cooled or heated.

In both sections, 1 and 3, there are clear heat transfer surfaces and heat transfer coefficients. In section 2, the phase change, the heat transfer surfaces as well as the existing heat transfer coefficients change continuously as a function of time or the proportion of solid / liquid PCM.

In order to determine the unknown yet necessary dimensioning data, such as the heat transfer surfaces and the corresponding heat transfer coefficients for the different sections of the melting and crystallization process, experimental set-ups on two size scales are developed and built on which the basic properties and upscale possibilities are elaborated.

First, the concept of direct heat transfer is simulated on a laboratory scale, whereby a storage tank with a PCM mass of 0.60 kg and one WTF inlet opening in the bottom of the storage tank has been realized. In order to determine the heat transfer coefficient between WTF and solid (section 1) or melting PCM (section 2), an artificial channel with a diameter of 6 mm is created within the PCM and the oil temperature within the channel and the PCM temperature are recorded in sections, whereby the recording of the PCM temperature allows conclusions to be drawn about the internal wall temperature of the channel. In order to determine the temperature of the oil phase rising in the channel, an innovative measuring system developed at the Institute for Process Control and Innovative Energy Conversion is used, which measures the temperature optically. In the process, the thermal radiation emitted by the oil is conducted to an indium

gallium arsenide photodiode by means of a 910  $\mu\text{m}$  thick glass fiber, which detects thermal radiation in a wavelength range from 1.1 to 2.2  $\mu\text{m}$ . Computer tomography is used to experimentally determine the heat transfer surfaces and the channel structure within the PCM for section 1. To determine the heat transfer area for section 2, the phase change, the melting process for the artificial channel is considered as an example. By measuring the temperature within the PCM at different heights, a melting model of the channel is developed, which can be used to derive the heat transfer surface as a function of time and height.

In order to determine the heat transfer coefficient for the section 3 between oil and liquid PCM, the temperature profile in the direction of flow of the WTF droplets rising individually in the liquid PCM is measured near-infrared optically by means of the glass fiber. This is possible due to the high measuring frequency of the specially developed measuring device of 2000 temperature measurements per second. The heat transfer surface for section 3 is derived from optical images of the drops.

Subsequently, the transferability of the determined characteristic data from the laboratory plant will be demonstrated at a pilot plant of a direct contact latent heat storage system with a PCM mass of 12.0 kg and 18 WTF inlet openings.

For sections 1 and 3 there are clear heat transfer surfaces as well as heat transfer coefficients which have been determined. For section 1 the heat transfer area is 168.1  $\text{cm}^2$  and for section 3 24.61  $\text{cm}^2$ . The heat transfer coefficient for section 1 is 87  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$  and for section 3 1845  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ . For section 2, melting is considered as an example. In this case, the heat transfer surface is a function of time and channel height. The heat transfer coefficient in section 2 increases with time up to a maximum value of 459  $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$  and then drops suddenly. The drop is explained by a change in the heat transfer mechanism.

The subsequent transfer of the results from the laboratory to the pilot plant shows good agreement.

# Inhalt

Kurzfassung.....	II
Abstract .....	IV
Symbole und Abkürzungen.....	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Hintergrund.....	1
1.2 Zielstellung.....	3
2 Theoretische Grundlagen.....	5
2.1 Thermische Energiespeicher.....	5
2.1.1 Klassifizierung von thermischen Energiespeichern.....	5
2.1.2 Klassifizierung von Latentwärmespeichern.....	8
2.2 Klassifizierung von Phasenwechselmaterialien.....	10
2.3 Thermodynamik der Phasenwechselmaterialien.....	12
2.4 Wärmeübertragung.....	16
2.4.1 Wärmeleitung.....	16
2.4.2 Konvektiver Wärmeübergang.....	18
2.4.3 Wärmestrahlung.....	21
2.5 Rohrströmung.....	24
2.6 Umströmter Körper: Kugel.....	26
3 Stand des Wissens.....	27
3.1 Direktkontaktlatentwärmespeicher.....	27
3.2 Differenzierung des Standes des Wissens zu der vorliegenden Arbeit.....	41
4 Versuchsaufbau und Messmethode.....	43
4.1 Teststand.....	43
4.2 Material.....	44
4.3 Messmethode.....	47
4.3.1 Infrarot-Messtechnik zur Temperaturmessung.....	47
4.3.2 Computertomographie (CT).....	50
4.3.3 VIS-Messtechnik zur Bestimmung charakteristischer Größen der Öltropfen ...	51
4.4 Messfehler.....	51
5 Versuchsdurchführung und Auswertemethode.....	52
5.1 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an festem / schmelzendem PCM.....	53
5.2 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an flüssigem PCM.....	59

5.3	Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche an festem PCM .....	60
5.3.1	Flächenermittlung mittels Computertomographie .....	60
5.3.2	Flächenermittlung mittels Temperaturmessung .....	62
5.4	Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche am Öltropfen / der Ölphase.....	65
6	Experimentelle Ergebnisse und Diskussion .....	67
6.1	Beschreibung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs .....	67
6.1.1	Schmelzvorgang des PCM im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal.....	67
6.1.2	Schmelz- und Kristallisationsvorgang des PCM im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal.....	69
6.1.3	PCM-Mittriss.....	72
6.2	Wärmeübertragende Flächen .....	74
6.2.1	Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche im erstarrten PCM (Computertomographie).....	74
6.2.2	Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche im erstarrten PCM (Temperaturmessung) .....	80
6.2.3	Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche bei geschmolzenem PCM.....	82
6.3	Wärmeübergangskoeffizienten .....	88
6.3.1	Wärmeübergangskoeffizienten an festem PCM.....	88
6.3.2	Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an schmelzendem PCM .....	90
6.3.3	Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten am Öltropfen.....	94
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Messungen aus der Laboranlage.....	98
7	Direktkontaktlatentwärmespeicher – Scale-up .....	100
8	Zusammenfassung und Ausblick .....	106
	Literaturverzeichnis.....	108
	Abbildungsverzeichnis .....	117
	Tabellenverzeichnis.....	120
	Anhang .....	122

## Symbole und Abkürzungen

A	Fläche [m <sup>2</sup> ]
A <sub>real</sub>	wärmeübertragende Fläche im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal [m <sup>2</sup> ]
A <sub>Zylinder</sub>	wärmeübertragende Fläche im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal [m <sup>2</sup> ]
a	Temperaturleitfähigkeit [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ], Absorptionsgrad [-]
b	Massenanteil geschmolzenes PCM [-]
c	Lichtgeschwindigkeit [m s <sup>-1</sup> ]
c <sub>1</sub>	1. Konstante zur Ermittlung der spektralen spezifischen Ausstrahlung [W m]
c <sub>2</sub>	2. Konstante zur Ermittlung der spektralen spezifischen Ausstrahlung [μm K]
c <sub>p</sub>	spezifische Wärmekapazität [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
c <sub>p,l</sub>	spezifische Wärmekapazität Medium flüssig [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
c <sub>p,l,PCM</sub>	spezifische Wärmekapazität PCM flüssig [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
c <sub>p,öl</sub>	spezifische Wärmekapazität Öl [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
c <sub>p,s</sub>	spezifische Wärmekapazität Medium fest [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
c <sub>p,s,PCM</sub>	spezifische Wärmekapazität PCM fest [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
d	Durchmesser [m]
d <sub>K</sub>	Durchmesser Kanal [m]
d <sub>K,k</sub>	kritischer Durchmesser Kanal [m]
d <sub>S</sub>	Durchmesser Speicherbehälter [m]
E <sup>10</sup>	Extinktion des Öls für eine Schichtdicke von 10 mm [-]
E <sup>Tr</sup>	Extinktion des Öls für die Schichtdicke des Öltropfens [-]
e <sub>x</sub>	Einheitsvektor in Richtung x [-]
e <sub>y</sub>	Einheitsvektor in Richtung y [-]
e <sub>z</sub>	Einheitsvektor in Richtung z [-]

f	Frequenz [Hz], f-Faktor [-]
Gz	Graetz-Zahl [-]
$h_m$	spezifische Schmelzenthalpie [ $\text{J kg}^{-1}$ ]
I	Intensität der emittierten Strahlung [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$I_{0,a}$	Intensität der absorbierten Strahlung [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$I_{0,r}$	Intensität der reflektierten Strahlung [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$I_{0,\tau}$	Intensität der transmittierten Strahlung [ $\text{W m}^{-2}$ ]
L	Länge [m]
$L_c$	charakteristische Länge [m]
$L_{\text{hyd}}$	hydrodynamische Einlaufänge [m]
$L_{\text{th}}$	thermische Einlaufänge [m]
$M_{\lambda S}$	spektrale spezifische Ausstrahlung [ $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ]
m	Masse [kg]
$m_{\text{PCM}}$	Masse PCM [kg]
$m_{\text{öl,Tr}}$	Masse Öltropfen [kg]
$\dot{m}_F$	Massenstrom Fluid [ $\text{kg s}^{-1}$ ]
$\dot{m}_{\text{öl}}$	Massenstrom Öl [ $\text{kg s}^{-1}$ ]
Nu	Nußelt-Zahl [-]
p	Druck [ $\text{N m}^{-2}$ ]
Pe	Peclet-Zahl [-]
Pr	Prandtl-Zahl [-]
$Pr_m$	mittlere Prandtl-Zahl [-]
$Pr_w$	Prandtl-Zahl des Fluid mit Wandtemperatur [-]
Q	Energiemenge [J]
$\Delta Q_{\text{latent}}$	gesamt gespeicherte Energiemenge latent [J]
$\Delta Q_{\text{sensibel}}$	gesamt gespeicherte Energiemenge sensibel [J]
$\dot{Q}$	Wärmestrom [ $\text{J s}^{-1}$ ]
$\dot{Q}_K$	übertragener Wärmestrom durch Konvektion [ $\text{J s}^{-1}$ ]

$\dot{Q}_{\text{real}}$	übertragener Wärmestrom im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal [ $\text{J s}^{-1}$ ]
$\dot{Q}_W$	übertragener Wärmestrom an der Wand [ $\text{J s}^{-1}$ ]
$\dot{Q}_{WL}$	übertragener Wärmestrom durch Wärmeleitung [ $\text{J s}^{-1}$ ]
$\dot{Q}_{\text{Zylinder}}$	übertragener Wärmestrom im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal [ $\text{J s}^{-1}$ ]
$\dot{q}_s$	Wärmestromdichte Schwarzer Strahler [ $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]
$\dot{q}_W$	Wärmestromdichte an der Wand [ $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]
Re	Reynolds-Zahl [-]
$Re_{\text{krit}}$	kritische Reynolds-Zahl [-]
r	Radius [m], Reflexionsgrad [-]
$r_a$	Radius außen [m]
$r_i$	Radius an der Stelle i [m]
$r_K$	Radius Kanal [m]
$r_{\text{PCM}}$	Abstand Kanalmitte bis Temperaturmessstelle $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$ [m]
T	thermodynamische Temperatur [K]
t	Zeit [s]
$t_0$	Startzeit [s]
$t_k$	kritische Zeit [s]
$\Delta t$	Zeitdifferenz [s]
$U_V$	volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{W L}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
V	Volumen [ $\text{m}^3$ ]
v	Geschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$v_{\text{schmelz}}$	Schmelzgeschwindigkeit des PCM [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$v_{\text{Varsol}}$	Aufstiegsgeschwindigkeit Varsol [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$v_{\text{WTF-Tropfen}}$	Geschwindigkeit WTF-Tropfen [ $\text{m s}^{-1}$ ]
x	Ortskoordinate [-]
y	Ortskoordinate [-]

$z$	Ortskoordinate [-]
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\bar{\alpha}_{\text{real}}$	mittlerer Wärmeübergangskoeffizient im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\bar{\alpha}_{\text{Zylinder}}$	mittlerer Wärmeübergangskoeffizient im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\varepsilon$	Emissionsgrad [-]
$\eta$	dynamische Viskosität [ $\text{Pa s}$ ]
$\eta_{\text{PCM}}$	dynamische Viskosität PCM flüssig [ $\text{Pa s}$ ]
$\vartheta$	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz [K]
$\vartheta_{\text{A,Tr}}$	Oberflächentemperatur Tropfen, korrigiert [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{A,Tr,mess}}$	Oberflächentemperatur Tropfen, gemessen [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{aus}}$	Austrittstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{E}}$	Endtemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{ein}}$	Eintrittstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{F}}$	Temperatur Fluid [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{F},8.i}$	Temperatur Fluid an der Messstelle 8.i [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{F},8.i+1}$	Temperatur Fluid an der Messstelle 8.i+1 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{F},8.i-1}$	Temperatur Fluid an der Messstelle 8.i-1 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{F,aus}}$	Austrittstemperatur Fluid [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{F,ein}}$	Eintrittstemperatur Fluid [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{m}}$	Schmelzpunkt [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{öl}}$	Temperatur Öl [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{öl},8.i}$	Temperatur Öl an der Messstelle 8.i [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{öl,aus}}$	Austrittstemperatur Öl [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{öl,ein}}$	Eintrittstemperatur Öl [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{PCM}}$	Temperatur PCM [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\vartheta_{\text{PCM},8,i}$	Temperatur PCM an der Messstelle 8.i [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{PCM},8,i+1}$	Temperatur PCM an der Messstelle 8.i+1 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{PCM},8,i-1}$	Temperatur PCM an der Messstelle 8.i-1 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{S}}$	Starttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{W}}$	Wandtemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{W},8,i}$	Innenwandtemperatur an der Messstelle 8.i [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{Wi}}$	Wandtemperatur an der Stelle i [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{W},i}$	Innenwandtemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{\text{WTF},8,i}$	Temperatur WTF an der Messstelle 8.i [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeitskonstante [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ], Wellenlänge [ $\mu\text{m}$ ]
$\lambda_{\text{PCM},l}$	Wärmeleitfähigkeitskonstante flüssiges PCM [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$\lambda_{\text{PCM},s}$	Wärmeleitfähigkeitskonstante festes PCM [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$\nu$	kinematische Viskosität [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$\rho$	Dichte [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_{\text{PCM},l}$	Dichte PCM flüssig [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ]
$\tau$	Transmissionsgrad [-]
$\tau^{\text{Tr}}$	Transmissionsgrad Öltropfen [-]
$\overline{\tau^{\text{Tr}}}$	mittlerer Transmissionsgrad Öltropfens im Wellenlängenbereich zwischen 1,7 und 2,2 $\mu\text{m}$ [-]
$\tau^{10}$	Transmissionsgrad Öl für eine Schichtdicke von 10 mm [-]
2D	Zweidimensional
CT	Computertomographie
D/A	Digital/Analog
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
grad	Gradient

P	Drucksensor
PC	Personal Computer
PCM	Phase change material, Phasenwechselmaterial
PtH	Power-to-Heat
Smp.	Schmelzpunkt
S	Schmelze
T	Temperatursensor
VIS	visible (sichtbar)
WK	Wärmekapazität
WTF	Wärmeträgerfluid
WTF <sub>aus</sub>	Austritt Wärmeträgerfluid
WTF <sub>ein</sub>	Eintritt Wärmeträgerfluid

# 1 Einleitung

Im ersten Abschnitt werden die Motivation und der Hintergrund zur Speicherung von thermischer Energie erläutert und die Zielstellung der vorliegenden Arbeit dargestellt.

## 1.1 Motivation und Hintergrund

Die Energiewende in Deutschland ist in vollem Gange. Zentrales Element der Energiewende ist es, die Energieversorgung in Deutschland grundlegend umzustellen. Hierzu zählen der Weggang von nuklearen sowie fossilen Brennstoffen und der Ausbau der erneuerbaren Energien. Außerdem soll Energie effizienter genutzt werden. Hierbei sind Wind- als auch Sonnenenergie die wichtigsten erneuerbaren Energieträger. [1] Mit diesen Maßnahmen soll in Deutschland bis zum Jahr 2050 unter anderem die CO<sub>2</sub>-Emission um mindestens 80 % gegenüber der Emission aus dem Jahr 1990 gesenkt werden. [2]

Aktuell beträgt der Primärenergieverbrauch in Deutschland für das Jahr 2017 13.525 PJ (vorläufig). [3] Abbildung 1-1 zeigt hierbei die Verteilung der jeweiligen Energieträger am Primärenergieverbrauch für das Jahr 2017.

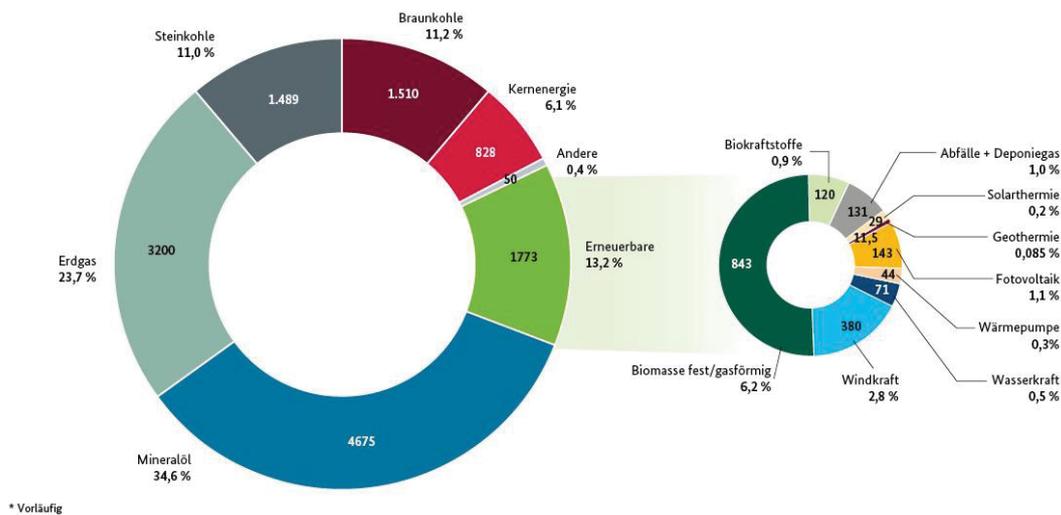


Abbildung 1-1: Verteilung der jeweiligen Energieträger am Primärenergieverbrauch für das Jahr 2017 [3]

Weiterhin ist es das Ziel der Energiewende, im Jahr 2050 den Primärenergieverbrauch in Deutschland um 50 % im Vergleich zum Jahr 2008 (14.380 PJ [3]) zu senken. Um dies umsetzen zu können, ist der Stromsektor wesentlich reformiert worden. [1] Der regenerative Anteil an der Bruttostromerzeugung beträgt in Deutschland bereits 33,3 % (Stand Feb. 2018). Demnach sind die erneuerbaren Energien bereits, quantitativ betrachtet, die wichtigste Stromquelle in Deutschland und bilden somit eine tragende Säule der Energiewende. [4] Letztlich ist dies durch das im Jahr 2000 eingeführte und mehrmals novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz

(EEG) erreicht worden. Ziel ist es, einen Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von 40 bis 45 % im Jahr 2025 und 55 bis 60 % im Jahr 2035 zu erreichen. [5] Allgemein lässt sich elektrische Energie in Form von Strom in Batterien speichern. Es besteht daneben weiterhin die Möglichkeit, durch den Prozess Power-to-Heat Strom in Form von Wärme zu speichern. [6] Der Begriff Power-to-Heat ist wie folgt definiert: “Als Power-to-Heat (PtH) wird ein Energiewandler bezeichnet, der Strom direkt oder indirekt in Wärme wandelt. Dieser Energiewandler kann mit einem anderen Wärmeerzeuger auf Basis eines chemischen Energieträgers (Gas, Holz etc.) zu einem Hybridsystem kombiniert werden. Dabei kann grundsätzlich zwischen der direkten Nutzung über elektrische Widerstandsheizungen (Heizstäbe, Boiler, Elektroheizkessel) und der indirekten Nutzung durch Elektrowärmepumpen (Warmwasser-Wärmepumpen, Heizungs-/Kälte-Wärmepumpen, Großwärmepumpen) unterschieden werden.“ [6]

Gerade bei der Stromerzeugung ist es für die Stabilität des Stromnetzes sehr wichtig, dass ein Ausgleich von Stromerzeugung und Stromverbrauch kontinuierlich und ohne zeitlichen Verzug stattfindet. [7] So lassen sich Stromüberschüsse, welche beispielsweise mittels erneuerbarer Energiequellen erzeugt worden sind, sinnvoll durch die Power-to-Heat Technologie in Form von thermischer Energie speichern. Durch die Koppelung des Wärme- und Stromsektors lässt sich eine kostengünstige Flexibilität des Stromsektors erzielen. Dies führt dazu, dass Wärmespeicher in umfangreicher Form benötigt und zukünftig in Kombination mit einer Wärmepumpe eine tragende Rolle einnehmen werden. [6]

Der Ausbau der erneuerbaren Energien im Wärmesektor ist ebenfalls von großer Bedeutung für die aktuelle Energiewende. In diesem Sektor wird der Einsatz der erneuerbaren Energien durch das im Jahr 2009 verabschiedete Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) geregelt. [4]

Abbildung 1-2 zeigt die Verteilung des Endenergieverbrauchs nach dem jeweiligen Anwendungsbereich für das Jahr 2016. Hierbei ist ersichtlich, dass mehr als die Hälfte der Energie zur Erzeugung von Wärme verwendet wird. [8]

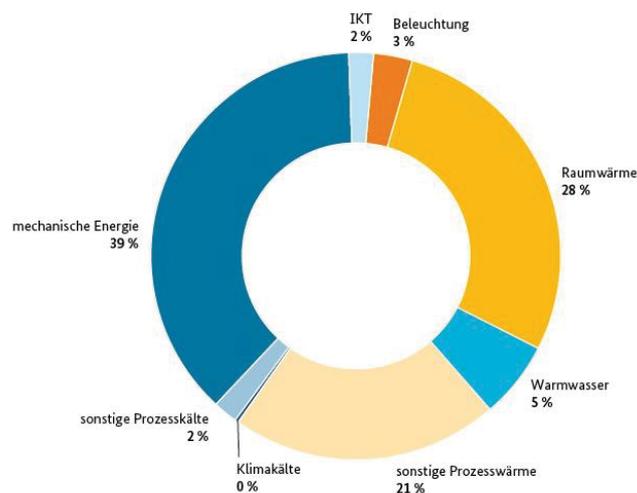


Abbildung 1-2: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland im Jahr 2016 [8]

Um auch im Wärmesektor den Anteil an erneuerbaren Energien auszubauen, ist es notwendig, eine hocheffiziente Speichertechnologie bereitzustellen, um den zeitlichen Versatz zwischen Energieangebot und -nachfrage zu kompensieren. [6]

Um weiterhin CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, werden gewerbliche Unternehmen in Deutschland finanziell gefördert, um Investitionen zur Abwärmevermeidung oder Abwärmenutzung tätigen zu können. [9] Abwärme lässt sich direkt mittels unterschiedlicher Technologien wie eine Dampfturbine nutzen. [10] Oftmals ist allerdings das Wärmeangebot der vorliegenden Abwärmequelle zum Bedarf der entsprechenden Wärmesenke ebenfalls zeitlich versetzt. In solchen Fällen ist der Wärmespeicher sinnvoll einzusetzen. [11] Nach [12] lässt sich Abwärme entsprechend ihrem Temperaturniveau in drei Klassen unterteilen:

- Niedertemperaturabwärme:  $\vartheta < 150$  °C
- Mitteltemperaturabwärme:  $\vartheta$  von 150 bis 500 °C
- Hochtemperaturabwärme:  $\vartheta > 500$  °C

Um die genannten Ziele der Energiewende durch die verstärkte Nutzung der fluktuierenden Energiequellen Sonne und Wind zu erreichen sowie Abwärme wiederzuverwenden, kommt dem Energiespeicher eine Schlüsselfunktion bei der nachhaltigen Energieversorgung zu. [13]

Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein in seiner Konstruktion neuartiger Direktkontaktlatentwärmespeicher weiterentwickelt und im Labor-, Technikums- und Industriemaßstab am Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme der Hochschule Mannheim aufgebaut. [14], [15]

### 1.2 Zielstellung

Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist es, durch Grundlagenuntersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher charakteristische Kenndaten wie wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln. Außerdem sollen die Phasenwechsellvorgänge während des Schmelz- und des Kristallisationsvorgangs beschrieben werden. Die Ermittlung der charakteristischen Kenndaten wie auch die Beschreibung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs dienen dazu, ein tiefergehendes Verständnis des direkten Wärmeübergangs zu erhalten und den Mechanismus der vorliegenden Wärmeübertragung aufzuklären.

Für die Untersuchungen werden unterschiedliche Direktkontaktlatentwärmespeicher mit entsprechender Peripherie aufgebaut. Im Labormaßstab wird ein Speicherbehälter untersucht, der lediglich eine Eintrittsöffnung für das Wärmeträgerfluid (WTF) besitzt, um eine mögliche Beeinflussung mehrerer Öffnungen zu vermeiden. Im Anschluss wird eine Technikumsanlage mit 18 WTF-Eintrittsöffnungen aufgebaut, wobei die Übertragbarkeit der erhaltenen Daten aus der Laboranlage auf die Technikumsanlage überprüft wird.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Laboranlage und der Technikumsanlage dienen letztlich dazu, die Auslegung beliebig großer Speicher zu vereinfachen.

In der vorliegenden Arbeit werden zu Beginn in Abschnitt 1 die Motivation und der Hintergrund zur Speicherung thermischer Energie erläutert und die Zielstellung der Arbeit dargestellt. In Abschnitt 2 folgen die Beschreibung unterschiedlicher thermischer Energiespeicherkonzepte und entsprechende theoretische Grundlagen zur Wärmeübertragung. Im Anschluss folgt in Abschnitt 3 ein detaillierter Überblick über den Stand des Wissens zu Latentwärmespeichern, welche die direkte Wärmeübertragung zwischen einem PCM und einem WTF nutzen. In Abschnitt 4 werden der Versuchsaufbau der Laboranlage, die eingesetzten Materialien sowie die Messmethoden dargestellt. In Abschnitt 5 sind die Durchführung der experimentellen Untersuchungen und die Auswertemethoden erläutert, gefolgt von den experimentellen Ergebnissen und der Diskussion, welche in Abschnitt 6 dargestellt sind. Zum Ende der vorliegenden Arbeit wird in Abschnitt 7 die Übertragbarkeit der Messwerte aus der Laboranlage auf die Technikumsanlage gezeigt. Letztlich folgt in Abschnitt 8 eine Zusammenfassung der in der vorliegenden Arbeit gewonnen Erkenntnisse und der experimentellen Ergebnisse sowie ein Ausblick.

## 2 Theoretische Grundlagen

Im vorliegenden Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen zu den unterschiedlichen thermischen Energiespeichertypen und Phasenwechselmaterialien sowie die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung erläutert.

### 2.1 Thermische Energiespeicher

#### 2.1.1 Klassifizierung von thermischen Energiespeichern

Abbildung 2-1 zeigt die unterschiedlichen thermischen Energiespeichertechnologien und stellt die Energiedichte sowie den Entwicklungsstand dar.

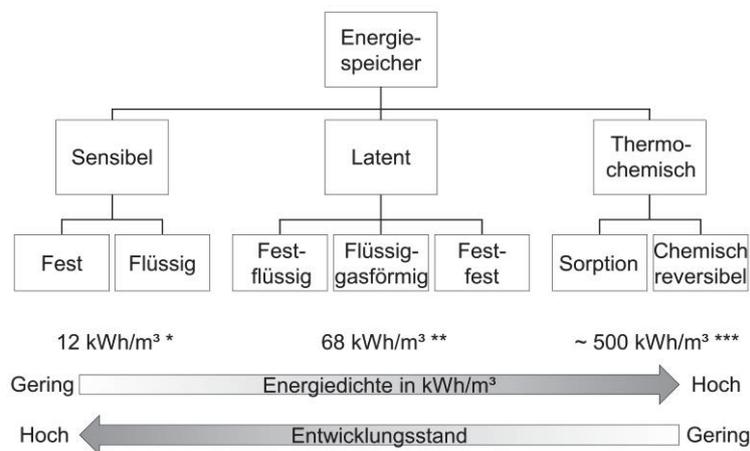


Abbildung 2-1: Klassifizierung thermischer Energiespeicher; eigene Darstellung nach [16]

\* Wasserspeicher,  $\Delta\vartheta = 10 \text{ K}$ ; \*\* PCM mit Phasenwechsel fest/flüssig,  $\Delta h = 132,2 \text{ kJ/kg}$ ,  $c_{p,s} = 1,86 \text{ kJ/kg K}$ ,  $c_{p,l} = 2,42 \text{ kJ/kg K}$ ,  $\Delta\vartheta = 10 \text{ K}$ ; \*\*\* nach [17]

Thermische Speicher lassen sich in drei Arten unterteilen: sensible Wärmespeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Wärmespeicher. Thermochemische Wärmespeicher sind trotz hoher Energiespeicherdichten von  $\sim 500 \text{ kWh/m}^3$  aufgrund ihrer technischen Komplexität und der hohen Investitionskosten noch nicht weit in der Praxis verbreitet. [17]

Anders sieht dies bei den sensiblen Wärmespeichern aus. Durch Erwärmen und Kühlen des Speichermediums sind sensible Wärmespeicher einfach zu implementieren. Ihr Nutzen ist aufgrund der geringen Energiespeicherdichte und des großen Volumen- bzw. Gewichtsbedarfs allerdings begrenzt. Bei einem Wasserspeicher mit einem Wasservolumen von  $1 \text{ m}^3$  können durch eine Erhöhung der Temperatur um  $10 \text{ K}$   $12 \text{ kWh}$  an thermischer Energie gespeichert werden. Bis heute basieren allerdings die meisten Untersuchungen und die vielversprechendsten Einsatzfelder von Wärmespeichern auf der Basis von Latentwärmespeichern. [18] Neben einer hohen Energiedichte (5-14 mal höher als sensible Speicher [19]) zeichnen sich Latentwärme-

speicher dadurch aus, dass die Energiezu- bzw. Energieabfuhr auf konstantem Temperaturniveau realisiert werden kann. [20] Wird als Beispiel ein PCM mit einem fest/flüssig-Phasenwechsel, einer Phasenwechselenthalpie von 132,2 kJ/kg, spezifischen Wärmekapazitäten von 1,86 kJ/kg K (fest) bzw. 2,42 kJ/kg K (flüssig) und einer Temperaturdifferenz des PCM von 10 K zwischen be- und entladendem Speicher zugrunde gelegt, so beträgt die Speicherdichte 68 kWh/m<sup>3</sup>. Wird von der Beladung des Speichers gesprochen, so wird dem Speicher thermische Energie zugeführt. Bei der Entladung des Speichers wird hingegen dem Speicher thermische Energie entzogen.

Abbildung 2-2 zeigt den grundlegenden Unterschied zwischen einem sensiblen Wärmespeicher und einem Latentwärmespeicher bei der Zuführung von thermischer Energie. Betrachtet wird ein PCM mit einem fest/flüssig-Phasenwechsel.

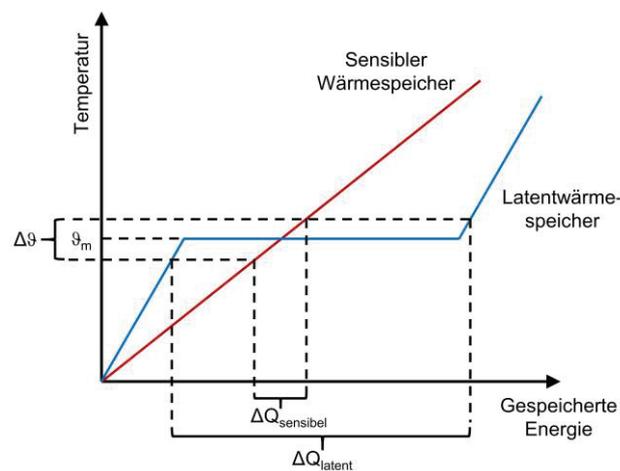


Abbildung 2-2: Unterschied zwischen einem sensiblen Wärmespeicher und einem Latentwärmespeicher bei der Zuführung von thermischer Energie; eigene Darstellung nach [21]

Bei einem sensiblen Wärmespeicher führt die Energiezuführung zu einer kontinuierlichen Zunahme der Temperatur (rote Kurve). Wird dem Latentwärmespeicher thermische Energie zugeführt, so steigt die Temperatur des Phasenwechselmaterials bis zum Erreichen der PCM spezifischen Phasenwechseltemperatur  $\vartheta_m$  an. Die Phasenwechseltemperatur entspricht bei der vorliegenden Betrachtung der Schmelz- bzw. der Kristallisationstemperatur. Im Anschluss führt weiter zugeführte Energie zu einer Änderung des Aggregatzustandes des Materials von fest zu flüssig ohne, im Idealfall, weitere Temperaturzunahme. Erst wenn das gesamte PCM in flüssiger Form vorliegt, führt die Zuführung von thermischer Energie wieder zu einem Temperaturanstieg des Mediums (blaue Kurve). [21] Im Vergleich der blauen mit der roten Kurve ist ersichtlich, dass dieselbe Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta$  im Speichermedium bei einer massengleichen Menge des Speichermediums bei einem Latentwärmespeicher zu einer deutlich höheren speicherbaren Energiemenge  $\Delta Q_{latent}$  führt als bei einem sensiblen Wärmespeicher  $\Delta Q_{sensibel}$ .

Bei einem sensiblen Wärmespeicher wird thermische Energie fühlbar gespeichert. Dies führt zu einer Temperaturdifferenz  $d\vartheta$  zwischen der Ausgangstemperatur  $\vartheta_S$  und der Endtemperatur

$\vartheta_E$  des Mediums. Die in der Masse  $m$  mit der spezifischen Wärmekapazität  $c_p(\vartheta)$  gespeicherte Energiemenge  $Q$  berechnet sich nach Gleichung (1): [22]

$$Q = \int_{\vartheta_s}^{\vartheta_E} m \cdot c_p(\vartheta) d\vartheta \quad (1)$$

$$Q = m \cdot c_p(\vartheta) (\vartheta_E - \vartheta_s) \quad (2)$$

Bei einem Latentwärmespeicher berechnet sich die gesamte gespeicherte Energiemenge  $Q$  nach Gleichung (3): [22]

$$Q = \int_{\vartheta_s}^{\vartheta_m} m_{\text{PCM}} \cdot c_{p,s,\text{PCM}}(\vartheta) d\vartheta + m_{\text{PCM}} \cdot b \cdot \Delta h_m + \int_{\vartheta_m}^{\vartheta_E} m_{\text{PCM}} \cdot c_{p,l,\text{PCM}}(\vartheta) d\vartheta \quad (3)$$

$$Q = m_{\text{PCM}} \left[ c_{p,s,\text{PCM}}(\vartheta) (\vartheta_m - \vartheta_s) + b \cdot \Delta h_m + c_{p,l,\text{PCM}}(\vartheta) (\vartheta_E - \vartheta_m) \right] \quad (4)$$

Hierbei wird die Energie nicht nur sensibel, sondern auch latent gespeichert. Bei der Berechnung der gesamt gespeicherten Energie kommt demnach der Term  $m_{\text{PCM}} \cdot b \cdot \Delta h_m$  hinzu, der die Schmelzenthalpie berücksichtigt, wobei  $b$  dem Massenanteil an geschmolzenem PCM entspricht.

Bei Latentwärmespeichern lassen sich die Phasenwechsel von fest nach flüssig (flüssig nach fest), von flüssig nach gasförmig (gasförmig nach flüssig) und fest nach fest unterscheiden. Der Phasenwechsel von flüssig nach gasförmig, welcher beim Verdampfen bzw. Kondensieren des Mediums auftritt, besitzt üblicherweise eine große Phasenwechselenthalpie. Allerdings führt das Verdampfen bei einem geschlossenen Speicherbehälter zu einem starken Druckanstieg, weshalb diese Art des Phasenwechsels für die Wärmespeicherung ungeeignet ist. Bei dem fest/fest-Phasenwechsel handelt es sich um reversible Phasenübergänge zwischen einer (festen) kristallinen oder teilkristallinen und einer anderen (festen) amorph kristallinen oder amorph teilkristallinen Phase. Im Vergleich zu fest/flüssig-Phasenwechsel besitzen fest/fest-Phasenwechsel eine geringe Phasenwechselenthalpie. [21], [23] In [23] wird eine detaillierte Zusammenfassung der literaturbekannten Materialien mit einem fest/fest-Phasenwechsel dargestellt. Die vorliegenden Phasenwechselenthalpien reichen von ca. 40 bis 60 kJ/kg für anorganische Materialien bis ca. 20 bis 270 kJ/kg für Materialien aus der Stoffklasse der Polymere. Im Vergleich hierzu können Materialien mit fest/flüssig-Phasenwechsel eine Phasenwechselenthalpie von über 1000 kJ/kg erreichen (Materialien aus der Stoffklasse der Fluoride). [23] Es gibt nur wenige Anwendungen, bei denen der fest/fest-Phasenwechsel eingesetzt wird. [21]

Der Phasenwechsel von fest nach flüssig bzw. flüssig nach fest findet in technischen Anwendungen aufgrund folgender Vorteile häufig Verwendung: kleine Volumenänderung (in der Regel kleiner als 10 % [21]), Kompaktheit, einfache Handhabung. [24]

### 2.1.2 Klassifizierung von Latentwärmespeichern

In der Literatur werden unterschiedliche Konzepte von Latentwärmespeichern dargestellt. [15] [25] - [28] Grundsätzlich kann bei der Ausführung eines Latentwärmespeichers zwischen zwei Arten unterschieden werden. Ein Latentwärmespeicher kann als durchströmtes oder als nicht durchströmtes System ausgeführt werden. Bei den durchströmten Systemen wird ein Wärmeträgerfluid auf unterschiedliche Arten durch das PCM geleitet. Der Wärmeübergang findet an der innerhalb des Speicherbehälters vorliegenden Wärmeübertragungsfläche statt. Außerdem wird zwischen einem Direktkontaktverfahren, bei dem das PCM und das Wärmeträgerfluid im direkten Kontakt stehen, und einem Indirektkontaktverfahren, bei dem das PCM und das Wärmeträgerfluid im indirekten Kontakt aufgrund einer räumlichen Trennung beider Medien stehen, unterschieden. Bei nicht durchströmten Systemen findet der Wärmeübergang an der Behälterwand des Speichers statt. Innerhalb des zu erwärmenden bzw. zu kühlenden Mediums bildet sich aufgrund des Wärmetransports an der Behälterwand eine natürliche Konvektion aus. [21] Abbildung 2-3 zeigt die unterschiedlichen Ausführungen eines Latentwärmespeichers schematisch.

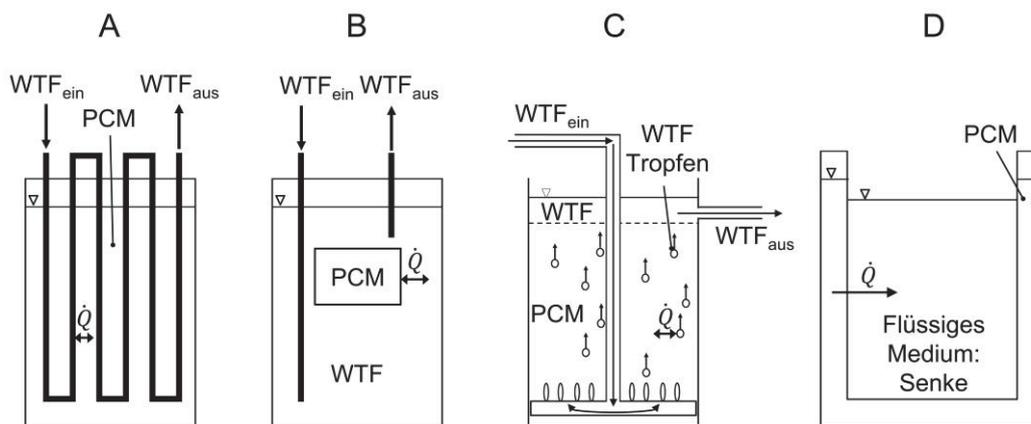


Abbildung 2-3: unterschiedliche Ausführungen von Latentwärmespeichern schematisch, A) indirekter Latentwärmespeicher: WTF in Rohrschlange, B) indirekter Latentwärmespeicher: PCM in Elementen, C) Direktkontaktlatentwärmespeicher, D) indirekter Latentwärmespeicher: Mantelspeicher; eigene Darstellung nach [15] [26] - [28]

In Abbildung 2-3 A ist ein Latentwärmespeicher dargestellt, bei dem ein Wärmeträgerfluid durch eine sich im Speicherbehälter befindende Rohrleitung gefördert wird. Das PCM befindet sich entsprechend umliegend der Rohrleitung. Die Rohrleitung kann hierbei unterschiedliche Geometrien aufweisen. Letztlich ist es das Ziel, eine große wärmeübertragende Fläche zu erzeugen. In [25] wird das Wärmeträgerfluid durch eine helixförmige Rohrleitung gefördert. In [26] hingegen werden mehrere Rohre miteinander verbunden, welche parallel zur Behälterwand geführt werden und das Speichervolumen ausfüllen. Die Ausführung ist vergleichbar mit der Darstellung in Abbildung 2-3 A. In den Freiräumen zwischen Behälter und Rohrschlange befindet sich PCM.

Abbildung 2-3 B zeigt einen Latentwärmespeicher mit PCM-Elementen. Hierbei liegt das PCM in einer Verkapselung vor, und das Wärmeträgerfluid umströmt die einzelnen mit PCM gefüllten Behältnisse. In [27] befindet sich das PCM in zylindrischen Gefäßen mit einem PCM-Volumen von 1,5 L. Diese Gefäße befinden sich innerhalb eines Wasserspeichers. Das Wärmeträgerfluid ist gleichzeitig auch ein weiteres, in diesem Fall sensibles Speichermedium. Die wärmeübertragende Fläche bildet die Summe aus der Oberfläche der einzelnen PCM-Elemente.

Abbildung 2-3 C zeigt einen Direktkontaktlatentwärmespeicher. In [15] wird das Wärmeträgerfluid durch eine Rohrleitung in den unteren Teil des Speicherbehälters geleitet. Hier befindet sich ein Verteilersystem, durch das das Wärmeträgerfluid gleichmäßig dem PCM zugeführt wird. Durch die geringere Dichte des Wärmeträgerfluids im Vergleich zu dem PCM durchströmt das Wärmeträgerfluid das PCM und sammelt sich oberhalb des PCM an. Hierdurch wird der Direktkontakt realisiert. Ist das PCM komplett flüssig, so tritt das Wärmeträgerfluid tropfenförmig aus dem Verteiler aus. Bei der Entladung kühlt sich das PCM bis zum Erreichen der Phasenwechseltemperatur ab. Im weiteren Verlauf der Entladung beginnt nun die Kristallisation des PCM, wobei sich einzelne Kanäle im PCM ausbilden. Diese bleiben nach Beendigung der Kristallisation bestehen und bilden ein stabiles und verzweigtes Kanalsystem. Die wärmeübertragende Fläche ist jeweils die Grenzfläche zwischen PCM und Wärmeträgerfluid.

Hingegen wird in Abbildung 2-3 D ein nicht von einem Wärmeträgerfluid durchflossenes System gezeigt. Das PCM befindet sich in einem Mantel, welcher den eigentlichen Speicherbehälter umgibt. In [28] wird ein solches System dargestellt, wobei der Speicherbehälter aus einem zylindrischen Behälter mit einem mit PCM gefüllten Doppelmantel besteht. Innerhalb des Doppelmantels befindet sich zusätzlich eine Rohrschlange, um dem PCM thermische Energie zuzuführen und es letztlich zu schmelzen. Die Energiequelle ist im gezeigten Beispiel Solarthermie. Zur Energieentnahme wird kaltes Wasser in den inneren Teil des zylindrischen Behälters gefüllt. Das Wasser erwärmt sich, und entsprechend wird dadurch das PCM abgekühlt, wobei es im weiteren Verlauf der Energieentnahme kristallisiert. Das System stellt eine solar betriebene Kocheinheit dar.

Bei den durchflossenen Systemen besitzt das Direktkontaktverfahren aus Abbildung 2-3 C einige Vorteile gegenüber den Indirektkontaktverfahren aus Abbildung 2-3 A, B und D: [21], [29], [30]

- Hohe Be- und Entladeleistung, da der Wärmewiderstand von Rohrschlangen oder PCM-Verkapselungen nicht vorhanden ist. Der Wärmewiderstand wird außerdem noch deutlich erhöht aufgrund der Bildung einer festen PCM-Schicht an den Rohrschlangen oder den PCM-Verkapselungen während des Kristallisationsvorgangs.
- Hohe Be- und Entladeleistung aufgrund der vorliegenden Durchmischung von Wärmeträgerfluid und PCM.
- Einfache Bauweise und hoher Füllgrad an PCM im Speicherbehälter, da keine aufwendige Konstruktion zur Führung des Wärmeträgerfluids oder eine PCM-Verkapselung erforderlich ist, welche außerdem PCM-Volumen beansprucht.

Um die Vorteile zu nutzen, besteht letztlich die Herausforderung in der Auslegung der Direktkontaktlatentwärmespeicher. Wie auch in Abbildung 2-3 ersichtlich, ist der Direktkontaktlatentwärmespeicher aus Abbildung 2-3 C der einzige der gezeigten Latentwärmespeicher, bei dem keine eindeutige und über den gesamten Schmelz- sowie Kristallisationsvorgang konstante Phasengrenze zwischen PCM und WTF vorliegt. Aufgrund der sehr unterschiedlichen wärmeübertragenden Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Speicher- bzw. PCM-Zustands ist die Auslegung stark erschwert. Hier setzt demnach der Forschungsbedarf an.

### 2.2 Klassifizierung von Phasenwechselmaterialien

Bei einem Latentwärmespeicher ist das Wärmespeichermedium ein Phasenwechselmaterial, Phase Change Material oder kurz PCM genannt. Abbildung 2-4 zeigt unterschiedliche Stoffklassen, die als PCM mit einem fest/flüssig-Phasenwechsel Verwendung finden. Für die betrachteten Stoffklassen findet eine Kategorisierung nach Schmelzenergie (Phasenwechselenthalpie) und Schmelztemperatur (Phasenwechseltemperatur) statt.

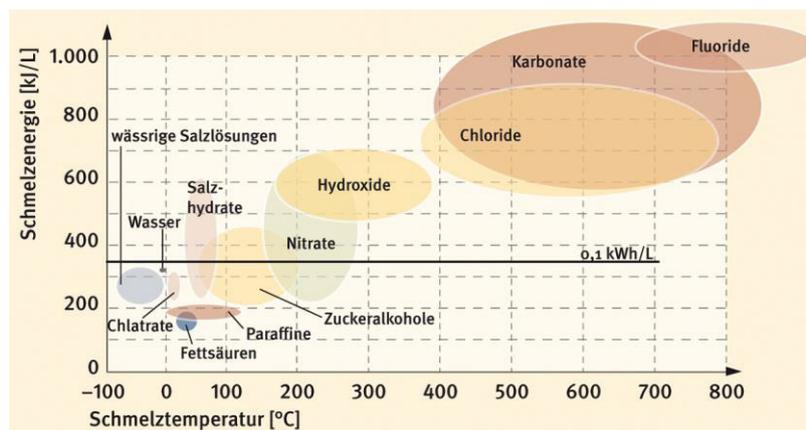


Abbildung 2-4: Stoffklassen, welche als PCM mit einem fest/flüssig-Phasenwechsel Verwendung finden [31]

Wie in Abbildung 2-4 ersichtlich, eignen sich Paraffine und Salzhydrate, um Niedertemperaturabwärme oder thermische Energie aus erneuerbaren Energiequellen zu speichern. PCM aus diesen beiden Stoffklassen besitzen einen geeigneten Schmelzpunkt. Salzhydrate besitzen einige Vorteile gegenüber Paraffinen. Hierzu zählen, dass Salzhydrate eine höhere Wärmeleitfähigkeit und eine höhere Energiespeicherdichte als Paraffine besitzen. Außerdem sind Salzhydrate gut verfügbar und dies, in der Regel, zu einem deutlich geringeren Preis. [32], [33]

Um das für die Anwendung passende PCM zu wählen, muss das PCM unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Die wichtigsten Anforderungen sind die passende Phasenwechseltemperatur und eine hohe Phasenwechselenthalpie. Als Phasenwechseltemperatur wird die Temperatur bezeichnet, bei der der Phasenwechsel des PCM von fest nach flüssig (flüssig nach fest) stattfindet. Während des Phasenwechsels ist diese Temperatur konstant. Die Phasenwechselenthalpie entspricht der Energiemenge, welche während des Phasenwechsels gespeichert bzw. frei wird.

In [19], [21], [34] ist eine Übersicht für die Anforderungen, die ein zur Auswahl stehendes PCM erfüllen muss bzw. sollte, dargestellt und in Tabelle 2-1 zusammengefasst:

Tabelle 2-1: Übersicht für die Anforderungen eines PCM zur Nutzung als Energiespeichermedium

Anforderungen				
Thermische	Physikalische	Kinetische	Chemische	Wirtschaftliche
- passende Phasenwechseltemperatur	- Hohe Dichte	- Geringe Unterkühlung	- Chemisch stabil	- Kostengünstig
- Große Phasenwechselenthalpie	- Geringer Dampfdruck	- Zyklenstabilität: reproduzierbarer Phasenwechsel	- Sicherheitsrelevante Gegebenheiten: ungiftig, nicht brennbar, nicht explosiv	- Gute Verfügbarkeit
- Gute Wärmeleitfähigkeit	- Geringe Volumenänderung zwischen den beiden Phasen		- Geringe korrosive Eigenschaft	
			- Reproduzierbare Kristallisation ohne Phasentrennung	

Anorganische PCM wie Salzhydrate weisen nach [21], [35] - [37] allerdings auch Nachteile auf:

- **Unterkühlung:** Bei dem Energieentzug aus dem PCM kann es zu einer Unterkühlung des PCM kommen. Hierbei sinkt die PCM-Temperatur unterhalb der Phasenwechseltemperatur ab, wobei kein Phasenwechsel auftritt. Steigt die Temperatur nicht wieder auf die Phasenwechseltemperatur an, so kann es sein, dass kein Phasenwechsel eintritt und ausschließlich sensible Wärme während der Entladung abgeführt wird.
- **Phasentrennung:** Bei einem Salzhydrat oder einer Mischung aus Salzhydraten besteht stets die Möglichkeit einer Phasentrennung. Hierbei können sich während des Schmelzens aufgrund von Dichteunterschieden zwei oder mehrere Phasen bilden. Dies beeinträchtigt stark die Speicherkapazität.
- **Geringe Wärmeleitfähigkeit:** Generell ist die Wärmeleitfähigkeit von PCM gering. Die geringe Wärmeleitfähigkeit beeinflusst stark die Wärmeübertragung und somit den Be- und Entladungsvorgang bzw. die Leistung des Be- und Entladungsvorgangs. Die Wärmeleitfähigkeit von Paraffine beträgt  $\sim 0,2$  W/m K [32] und die von Salzhydrate  $\sim 0,5$  W/m K. [38]
- **Korrosive Eigenschaften:** Speziell Salzhydrate besitzen teilweise eine schlechte Verträglichkeit mit verschiedenen Metallen, welche als Speicherbehältermaterialien verwendet werden. Um eine lange Standzeit des Speicherbehälters zu gewährleisten und somit einer Zerstörung des Behälters durch Korrosion entgegen zu wirken, ist es erforderlich, eine günstige Materialpaarung PCM / Metall auszuwählen.

Die oben aufgeführten Nachteile lassen sich allerdings durch unterschiedliche Maßnahmen reduzieren bzw. ausgleichen. Zur Reduzierung von Unterkühlung des PCM wird dem PCM in der Regel ein Keimbildner hinzugefügt. Ein wirksamer Keimbildner sollte eine ähnliche Kristallstruktur wie das erstarrte PCM aufweisen. Für Salzhydrate ist beispielsweise Borax ein gebräuchlicher Keimbildner. [39], [40] Weiterhin wurde mit mechanischen Impulsen, Ultraschall oder mittels einer künstlich implementierten kalten Stelle im Speicher die Unterkühlung reduziert. [18] Um die Phasentrennung von PCM-Mischungen oder die Abspaltung von Kristallwasser aus Salzhydraten zu unterbinden, werden sogenannte Verdickungsmittel eingesetzt. Hierfür können Hydroxyethylcellulose [41], Nanocellulose [42], Cellulose [43], Polymere [18], Polyethylenglykol [44] und unterschiedliche Silikonderivate [45] verwendet werden. Außerdem werden poröse Materialien wie expandierte Graphitverbundstoffe [46] verwendet, um das PCM zu stabilisieren. Der größte Nachteil bei der Verwendung von PCM als Energiespeichermedium ist allerdings die geringe Wärmeleitfähigkeit. [47] Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, die Wärmeleitfähigkeit des PCM zu erhöhen. Dies kann durch das Implementieren von Rippen oder allgemein einer Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche zwischen PCM und Wärmeträgermedium [48], durch Eintragen von Gas in Form von Gasblasen [49], durch Implementierung einer Metallmatrix in das PCM [46], [50], durch Zugabe metallischer Füllkörper [51], durch Zugabe einer Substanz mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit und Erzeugung einer PCM-Emulsion [52], durch Erhöhung der Anzahl der Rohrleitungen im PCM, welche Wärmeträgermedium führen [53], und durch Mikroverkapselung des PCM [54] erzielt werden.

Nach [56] gibt es allerdings einen deutlich vereinfachten Lösungsansatz, um die bestehenden Nachteile der Nutzung von PCM als Energiespeichermedium wie die Unterkühlung, die Phasentrennung und die geringe Wärmeleitfähigkeit zu verringern bzw. zu unterbinden. In [56] wird hierfür erstmals ein Direktkontaktlatentwärmespeicher mit Dinatriumhydrogenphosphat-Dodecahydrat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ) als PCM und einem Mineralöl als Wärmeträgerfluid vorgeschlagen, wobei durch den Direktkontakt die Unterkühlung und die Phasentrennung des PCM reduziert werden sollen. Außerdem wird ein positiver Effekt auf den Wärmeübergang von Wärmeträgerfluid und Speichermedium angenommen, was der geringen Wärmeleitfähigkeit des PCM entgegenwirkt.

### 2.3 Thermodynamik der Phasenwechselmaterialien

Ein Phasenwechselmaterial kann sowohl aus einer Substanz als auch aus einer Mischung mehrerer Substanzen bestehen.[21] In der vorliegenden Arbeit wird als PCM eine eutektische Mischung bestehend aus den beiden Salzhydraten Magnesiumchlorid-Hexahydrat und Magnesiumnitrat-Hexahydrat verwendet.

Bei Salzhydraten ist in das bestehende Kristallgitter Wasser eingelagert, welches als Kristallwasser bezeichnet wird. Das Kristallwasser muss weder an die Anionen noch an die Kationen des Kristallgitters angelagert sein, sondern kann auch in dem Gitter eingebaut vorliegen. [57]

Abbildung 2-5 zeigt beispielhaft für das Salzhydrat Magnesiumchlorid-Hexahydrat das Kristallgitter.

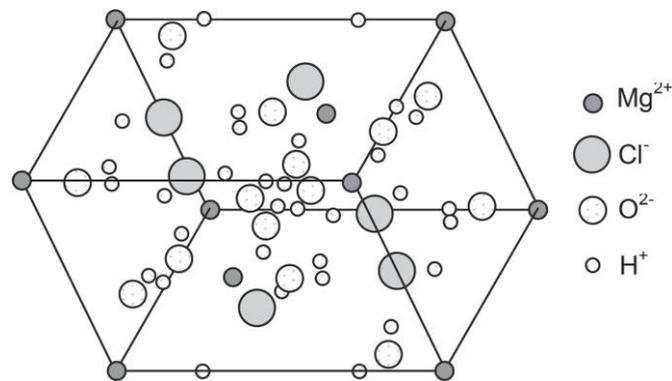


Abbildung 2-5: Kristallgitter von Magnesiumchlorid-Hexahydrat [21]

Das Kristallgitter besteht hierbei aus zwei Teilen:  $Cl^-$ -Ionen mit 6 Wassermolekülen, welche oktaedrisch durch Ion-Dipol-Bindungen um ein Magnesium-Ion  $Mg^{2+}$  angeordnet sind. [21] Beim Schmelzen eines Salzhydrates wird das Kristallwasser aus dem Kristallgitter ausgetrieben, wobei sich eine wässrige Lösung bestehend aus dem Kristallwasser und den dissoziierten Salzionen bildet. [58] Bei der Kristallisation bildet sich das Kristallgitter, und es findet eine entsprechende Einbindung des Kristallwassers statt.

Für das in der Arbeit verwendete PCM liegt das ternäre Stoffsystem  $MgCl_2$ - $Mg(NO_3)_2$ - $H_2O$  vor. Dieses System lässt sich allerdings auf das binäre System  $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ - $Mg(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$  beschränken. Diese Vereinfachung ist möglich, da nur hier eine stabile Mischung vorliegt, welche eine sehr geringe Neigung zur Entmischung zeigt und einen eutektischen Punkt mit entsprechend hoher Phasenwechselenthalpie besitzt. [59], [60], [61] Abbildung 2-6 zeigt schematisch das Phasendiagramm für das binäre System bestehend aus  $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$  und  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$ , welches in [59], [60], [61] entsprechend dargestellt ist.

Hierbei besitzt das betrachtete Zweistoffgemisch eine vollständige Löslichkeit im flüssigen und eine vollständige Unlöslichkeit im festen Zustand mit einem eutektischen Punkt.

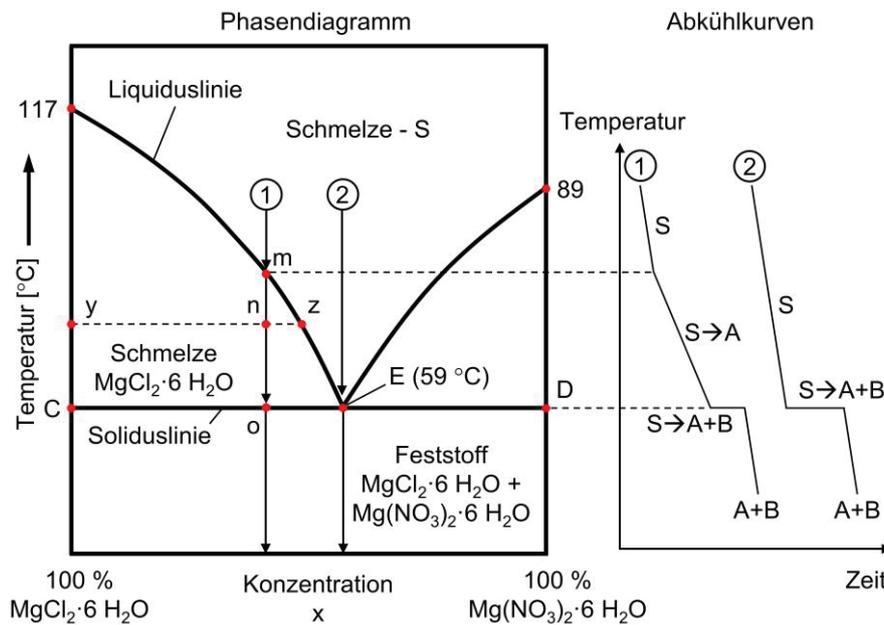


Abbildung 2-6 Schematische Darstellung des Phasendiagramms für das System  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ - $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  (links) und entsprechende Abkühlkurven zweier Beispielmischungen (rechts); eigene Darstellung nach [59], [60], [61]

In dem Phasendiagramm aus Abbildung 2-6 ist auf der y-Achse die Temperatur und auf der x-Achse die Konzentration der Komponenten  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  aufgetragen. Bei der Konzentration  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O} = 100 \%$  lässt sich auf der y-Achse der Schmelzpunkt von reinem Magnesiumchlorid-Hexahydrat auftragen. Entsprechend lässt sich bei der Konzentration  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O} = 0 \%$  (entspricht  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O} = 100 \%$ ) auf der y-Achse die Schmelztemperatur des reinen Magnesiumnitrat-Hexahydrat auftragen. Die jeweilige Liquiduslinie trennt das Gebiet der flüssigen Schmelze von den Gebieten der Schmelze mit Feststoffanteil ab. Ausgehend von dem Schmelzpunkt des Reinstoffes bewirkt bei eutektischen binären Systemen das Zumischen der zweiten Komponente eine Schmelzpunktniedrigung. Letztlich treffen sich beide Liquiduslinien bei einer bestimmten Zusammensetzung in einem Punkt mit minimaler Schmelztemperatur. [63] Dieser Punkt wird als eutektischer Punkt E bezeichnet. Hier stehen drei Phasen miteinander im Gleichgewicht: reines festes Magnesiumchlorid-Hexahydrat, reines festes Magnesiumnitrat-Hexahydrat und die flüssige Schmelze mit der eutektischen Zusammensetzung. In dem Bereich, welcher sich durch die Fläche mit den Eckpunkten Schmelzpunkt  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ -C-E ergibt, liegen Schmelze und Magnesiumchlorid-Hexahydrat als Reinstoff vor. In dem Bereich der Fläche mit den Eckpunkten Schmelzpunkt  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ -D-E liegen hingegen die Schmelze und Magnesiumnitrat-Hexahydrat als Reinstoff vor. Unterhalb der Soliduslinie liegt die gesamte Mischung im festen Zustand vor. [62]

Je nach Zusammensetzung der Mischung ergeben sich Unterschiede während des Erstarrungsvorgangs. In Abbildung 2-6 sind für zwei Mischungen mit unterschiedlicher Zusammensetzung

1 (nicht eutektische Zusammensetzung) und 2 (eutektische Zusammensetzung) schematisch der Erstarrungsvorgang im Phasendiagramm und entsprechende Abkühlkurven dargestellt, um Unterschiede zwischen der nicht eutektischen und der eutektischen Mischung zu erläutern. Die eutektische Zusammensetzung beträgt 41,3 Massenprozent Magnesiumchlorid-Hexahydrat und 58,7 Massenprozent Magnesiumnitrat-Hexahydrat. Bei der Betrachtung der Abkühlkurven entspricht die Komponente A dem Magnesiumchlorid-Hexahydrat und die Komponente B dem Magnesiumnitrat-Hexahydrat. Wird eine Mischung der Zusammensetzung 1 abgekühlt, so erniedrigt sich die Temperatur der Schmelze bis zum Erreichen des Punktes m auf der Liquiduslinie. Hier beginnt Magnesiumchlorid-Hexahydrat als Reinstoff zu kristallisieren. Dies hat zur Folge, dass die Schmelze stets ärmer an Magnesiumchlorid-Hexahydrat wird, und sich der Erstarrungspunkt der Schmelze entlang der Liquiduslinie nach rechts verschiebt. In der Abkühlkurve zeigt sich eine verringerte Temperaturabnahme. Um das Gleichgewicht des auskristallisierten, reinen Magnesiumchlorid-Hexahydrat und der Schmelze zu erläutern, wird bei entsprechender Temperatur beispielhaft der Punkt n betrachtet. Hier befindet sich die Schmelze mit der Zusammensetzung z im Gleichgewicht mit reinem Magnesiumchlorid-Hexahydrat, wobei aus dem Hebelgesetz nach Gleichung (5) folgt: [62]

$$\frac{\text{Menge der Schmelze}}{\text{Menge des auskristallisierten } \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{Strecke } \overline{yn}}{\text{Strecke } \overline{zn}} \quad (5)$$

Durch weitere Temperaturreduzierung wird Punkt o auf der Soliduslinie erreicht. Hier kristallisiert ausschließlich die noch vorhandene Schmelze mit der eutektischen Zusammensetzung. Das eutektische Gefüge umgibt die zuvor auskristallisierten, festen Partikel des Magnesiumchlorid-Hexahydrats. In der Abkühlkurve ist dieser Vorgang durch eine konstante Temperatur ersichtlich. [62]

Wird eine Mischung mit der Zusammensetzung 2 abgekühlt, so wird der eutektische Punkt E erreicht. Hier besteht ein Gleichgewicht aus den beiden Feststoffen Magnesiumchlorid-Hexahydrat und Magnesiumnitrat-Hexahydrat sowie der vorliegenden Schmelze. Aus der Schmelze kristallisieren hierbei die beiden Reinstoffe Magnesiumchlorid-Hexahydrat und Magnesiumnitrat-Hexahydrat aus und bilden das eutektische Gefüge. Entsprechend bildet sich bei den verwendeten Salzhydraten das Kristallgitter mit der Einlagerung des Kristallwassers aus. Wie bei Mischung 1 zeigt sich auch bei Mischung 2 eine konstante Temperatur in der Abkühlkurve während dieses Vorgangs. Die Abkühlkurve der eutektischen Mischung entspricht der Abkühlkurve eines Reinstoffes. Eine eutektische Mischung besitzt den Vorteil, dass hier die maximale Zeit besteht, in der eine konstante Temperatur in der Abkühlkurve vorliegt. [62]

Wird die Abkühlkurve für die eutektische Mischung (Mischung 2) aus Abbildung 2-6 genauer betrachtet, so tritt auch für Salzhydrate ein Effekt auf, der sich Unterkühlung nennt. [21]

Um diesen Effekt genauer zu erläutern, wird in Abbildung 2-7 der Temperaturverlauf eines PCM während eines Be- und Entladezyklus gezeigt.

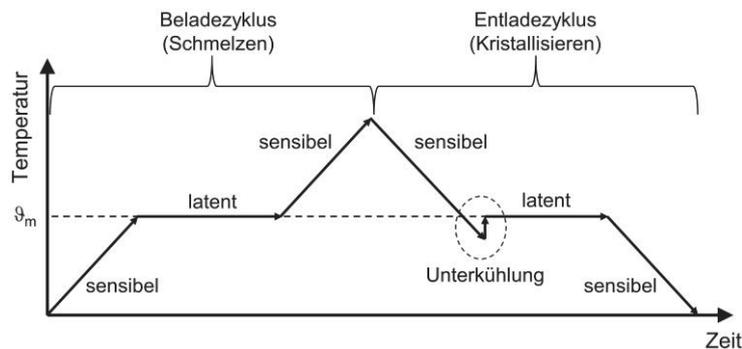


Abbildung 2-7: Be- und Entladezyklus eines PCM; eigene Darstellung nach [21]

Die Unterkühlung kann während der Entladung eines PCM beobachtet werden. Hierbei sinkt die Temperatur des PCM unterhalb der Phasenwechseltemperatur ab. [21] Das PCM verbleibt in einem metastabilen Zustand, da eine Umwandlung in einem thermodynamisch stabilen Zustand nicht oder nur sehr langsam stattfindet. [64], [65] Wie stark die Unterkühlung ausgeprägt ist, hängt von unterschiedlichen Faktoren, wie beispielsweise dem Vorliegen von Verunreinigungen im PCM, ab. Grundsätzlich steigt die Kristallisationswahrscheinlichkeit mit sinkender Temperatur des unterkühlten flüssigen PCM an. [64] Ebenfalls lässt sich die Kristallisation durch den Eintrag von beispielsweise mechanischer Energie auslösen. [57] Setzt dann die Kristallisation ein, bewirkt die Freisetzung der Phasenwechselenthalpie eine Temperaturerhöhung des zuvor unterkühlten PCM bis maximal zur Phasenwechseltemperatur. [66]

### 2.4 Wärmeübertragung

In diesem Abschnitt werden die beiden Wärmeübertragungsmechanismen für die Wärmeübertragung im Direktkontaktlatentwärmespeicher mit einem fest/flüssig-Phasenwechsel erläutert. Die beiden relevanten Wärmeübertragungsmechanismen sind die Wärmeleitung und der konvektive Wärmeübergang. Außerdem werden in dem vorliegenden Abschnitt Grundlagen der Wärmestrahlung erläutert, da das Messprinzip der optischen Temperaturerfassung der WTF- und der PCM-Temperatur auf der Detektion von Wärmestrahlung basiert.

#### 2.4.1 Wärmeleitung

Als Wärmeleitung wird der Energietransport innerhalb eines Materials zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines Temperaturgradienten, welcher im Material vorliegt, beschrieben.

In Metallen können ebenfalls freie Elektronen Energie übertragen. Wärmeleitung kann in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen stattfinden. Des Weiteren setzt der Energietransport in Form von Wärmeleitung keine makroskopische Bewegung voraus. [67]

Verantwortlich für den Energietransport in Form von Wärmeleitung ist der Temperaturgradient  $\text{grad } \vartheta$ . Die Temperatur ist in der Regel orts- und zeitabhängig, wobei die Gesamtheit aller Temperaturen das instationäre Temperaturfeld  $\vartheta = \vartheta(x, t)$  bildet. Liegt ein stationäres Temperaturfeld vor, so ist dieses zeitunabhängig und somit ist  $\vartheta = \vartheta(x)$ . Der Temperaturgradient bildet einen Vektor, der stets in die Richtung des größten Anstiegs der Temperatur innerhalb des Temperaturfeldes zeigt. [68], [69] Der Temperaturgradient berechnet sich nach Gleichung (6). Hier ist der Gradient in kartesischen Koordinaten dargestellt: [69]

$$\text{grad } \vartheta = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (6)$$

Hierbei bilden  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$ ,  $\mathbf{e}_z$  die Einheitsvektoren der Koordinatenrichtungen. Das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung verknüpft nun den spezifischen Wärmestrom  $\dot{q}$  und den Temperaturgradienten  $\text{grad } \vartheta$  wie folgt: [69]

$$\dot{q}(x, t) = -\lambda \text{grad } \vartheta(x, t) \quad (7)$$

Hierbei ist  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeitskonstante und eine stoffspezifische Größe, wobei allgemein gilt  $\lambda = \lambda(\vartheta, p)$ . [69] Die Druckabhängigkeit spielt hier speziell bei Gasen bei Drücken oberhalb 10 bar eine Rolle. [67]

Für die stationäre, eindimensionale Wärmeleitung unter der Annahme von konstanten Stoffeigenschaften hängt das Temperaturfeld lediglich von einer Ortskoordinate ab. Abbildung 2-8 zeigt den Temperaturverlauf für die stationäre, eindimensionale Wärmeleitung innerhalb eines Hohlzylinders mit der Wandstärke  $r_2 - r_1$ , wobei im Inneren des Zylinders ein Medium mit einer Temperatur größer der Umgebungstemperatur fließt. Demnach liegt für die betrachtete wärmeübertragende Fläche  $A$  ein Wärmestrom  $\dot{Q}$  von innen nach außen vor.

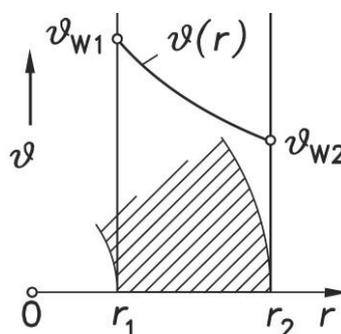


Abbildung 2-8: Temperaturverlauf in einem zylindrischen Hohlzylinder (Rohr) mit  $\vartheta_{W1} > \vartheta_{W2}$  [69]

Für den betrachteten Fall der stationären, eindimensionalen Wärmeleitung unter der Annahme von konstanten Stoffeigenschaften vereinfacht sich Gleichung (7) für einen Zylinder zu: [69]

$$\dot{q}(r) = \frac{\dot{Q}}{A(r)} = -\lambda \cdot A(r) \frac{d\vartheta}{dr} \quad (8)$$

Durch Integration von Gleichung (8) erhält man Gleichung (9), die zur Berechnung des Wärmestroms durch ein Rohr mit der Wandstärke  $r_2 - r_1$  herangezogen wird: [69]

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (\vartheta_{W1} - \vartheta_{W2}) \quad (9)$$

### 2.4.2 Konvektiver Wärmeübergang

Die Konvektion beschreibt den Energietransport in einem strömenden Fluid. Demnach kommt zusätzlich zur Wärmeleitung ein Energietransport durch die makroskopische Bewegung des Fluids hinzu. [67]

Ausschlaggebend für den konvektiven Wärmeübergang ist die wandnahe Fluidschicht. Diese wird als Grenzschicht bezeichnet. Innerhalb der Grenzschicht beträgt die Strömungsgeschwindigkeit, welche parallel zur Wand gerichtet ist, direkt an der Wand null und bildet sich innerhalb einer kurzen Distanz bis fast zum Maximum der Kernströmung aus. Wie bei der Strömung liegt auch bei der Temperatur die größte Änderung von der Wandinnentemperatur  $\vartheta_{W,i}$  bis hin zur Fluidtemperatur  $\vartheta_F$  innerhalb der Grenzschicht. Ist die Fluidtemperatur größer als die Wandtemperatur, geht Wärme von dem Fluid in die Wand über. Eine an der Wand auftretende Wärmestromdichte  $\dot{q}_W$  ist folglich das Resultat, welche nach Gleichung (10) definiert ist. Aufgrund der komplexen Abhängigkeit der Wärmestromdichte  $\dot{q}_W$  von dem Geschwindigkeits- und Temperaturfeld des strömenden Fluids ist der örtliche Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  eingeführt worden: [69]

$$\dot{q}_W = \frac{\dot{Q}_W}{A} = \alpha (\vartheta_F - \vartheta_{W,i}) \quad (10)$$

Innerhalb einer Kanalströmung findet eine Beeinflussung der Temperatur des Fluids  $\vartheta_F$  durch die Kanalinnenwand  $\vartheta_{W,i}$  bzw. den vorliegenden Wärmeübergang statt. Die Fluidtemperatur  $\vartheta_F$  ist daher der Querschnittsmittelwert der Temperatur innerhalb der sich ausgebildeten Rohrströmung. [69]

Wird ein Rohrstück mit der inneren Mantelfläche von  $dA$  betrachtet, durch das ein Fluid mit einer Temperatur  $\vartheta_F$  größer als die Wandinnentemperatur  $\vartheta_{W,i}$  fließt, so geht Wärme von dem Fluid in die Wand über. Entsprechend wird ein Wärmestrom  $\dot{Q}$  von dem Fluid auf die Wand übertragen, wobei sich die Wandtemperatur erhöht und die Fluidtemperatur erniedrigt.

Der von dem Fluid abgegebene Wärmestrom setzt sich aus dem Massenstrom  $\dot{m}_F$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p(\vartheta)$  des Fluids sowie der Temperaturdifferenz des Fluids am Eingang und am Ausgang des Rohrstückes  $d\vartheta_F$  mit der definierten inneren Mantelfläche  $dA$  zusammen: [69]

$$d\dot{Q} = \alpha (\vartheta_F - \vartheta_W) dA = \dot{m}_F \cdot c_p(\vartheta) d\vartheta_F \quad (11)$$

Der örtliche Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ist nach Gleichung (12) wie folgt definiert: [69]

$$\alpha := \frac{\dot{q}_W}{(\vartheta_F - \vartheta_{W,i})} \quad (12)$$

Per Definition wird nun die unbekannte Wärmestromdichte  $\dot{q}_W$  auf den ebenfalls unbekanntem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  zurückgeführt. Um dennoch den Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen, wird berücksichtigt, dass bei Fluiden die Strömungsgeschwindigkeit an der Wand gleich null ist. Die Dicke dieser ruhenden Fluidgrenzschicht entspricht in erster Näherung der Dicke der thermischen Grenzschicht. In dieser ruhenden Schicht wird die Energie lediglich durch Wärmeleitung übertragen, und es gilt das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung: [67], [69]

$$\dot{q}_W = -\lambda \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_W \quad (13)$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = \lambda(\vartheta_{W,i})$  ist hierbei die Wärmeleitfähigkeit des Fluids, wenn das Fluid die Wandinnentemperatur besitzt. Durch Einsetzen der Gleichung (13) in Gleichung (12) folgt für  $\alpha$ :

$$\alpha = -\lambda \frac{\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right)_W}{\vartheta_F - \vartheta_{W,i}} \quad (14)$$

Nach Gleichung (14) lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient als Quotient aus der an der Wand vorliegenden Steigung des Temperaturprofils und der Differenz der Fluid- und der Wandtemperatur berechnen. Zur Berechnung von  $\alpha$  nach Gleichung (14) ist es notwendig, das Temperaturprofil zu kennen, welches vom Geschwindigkeitsfeld beeinflusst wird. In der Regel ist dieses Temperaturprofil allerdings nicht bekannt. Daher werden für eine Vielzahl relevanter Konfigurationen  $\dot{q}$  und  $\vartheta_F - \vartheta_{W,i}$  gemessen und so nach Gleichung (12) entsprechend der Wärmeübergangskoeffizient berechnet. Hieraus werden, unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsgesetzen, dimensionslose Kennzahlen abgeleitet. [67], [69]

Die Nußelt-Zahl  $Nu$  stellt einen dimensionslosen Wärmeübergangskoeffizienten dar. Die Nußelt-Zahl ist wie folgt definiert [67]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_c}{\lambda} \quad (15)$$

Hierbei steht  $\alpha$  für den Wärmeübergangskoeffizienten,  $L_c$  für eine charakteristische Länge und  $\lambda = \lambda(\vartheta_F)$  für die Wärmeleitfähigkeit des Fluids. Je nach Geometrie ist die charakteristische Länge entsprechend zu wählen. Zur Berechnung von Wärmeübergängen in Rohren oder von Kugeln ist beispielsweise der Rohr- bzw. Kugeldurchmesser zu verwenden. Bei der Berechnung der Nußelt-Zahl ist grundlegend zwischen freier und erzwungener Konvektion zu unterscheiden. So wird bei erzwungener Konvektion die vorliegende Strömung durch von außen zugeführte Kräfte, wie zum Beispiel durch eine Pumpe, hervorgerufen. Hingegen wird bei freier Konvektion die entsprechende Strömung durch Kräfte innerhalb des Fluids hervorgerufen. Im vorliegenden Fall liegt der Fokus auf der Betrachtung von erzwungener Konvektion. In diesem Fall ist die Nußelt-Zahl eine Funktion der Reynolds- und der Prandtl-Zahl bzw. eine Funktion der Peclet- und der Prandtl-Zahl. [67], [68] Die Reynolds-Zahl  $Re$  ist nach Gleichung (16) wie folgt definiert: [67]

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot L_c}{\eta} = \frac{v \cdot L_c}{\nu} \quad (16)$$

Die Reynolds-Zahl stellt das Verhältnis aus Trägheits- und Reibungskraft innerhalb des Fluids dar. Hierbei ist  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit,  $\rho = \rho(\vartheta)$  die Dichte des Fluids,  $L_c$  eine charakteristische Länge (analog zur Nußelt-Zahl),  $\eta = \eta(\vartheta)$  die dynamische und  $\nu = \nu(\vartheta)$  die kinematische Viskosität des Fluids. Mit Hilfe der Reynolds-Zahl lässt sich die vorliegende Strömungsart beurteilen. Die Prandtl-Zahl  $Pr$  ist eine charakteristische Stoffgröße, die wie folgt definiert ist: [69]

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (17)$$

Hierbi sind  $\eta = \eta(\vartheta)$  die kinematische Viskosität,  $c_p = c_p(\vartheta)$  die spezifische Wärmekapazität und  $\lambda = \lambda(\vartheta)$  die Wärmeleitfähigkeit des Fluids. Mit der Einführung der Temperaturleitfähigkeit  $a = a(\vartheta)$  des Fluids kann die Prandtl-Zahl aus dem Quotienten der kinematischen Viskosität und der Temperaturleitfähigkeit ermittelt werden. Die Peclet-Zahl  $Pe$  ist das Produkt von Reynold- und Prandtl-Zahl. Die Peclet-Zahl wird zur Berechnung von Wärmeübergängen mittels erzwungener Konvektion verwendet und ist wie folgt definiert: [67]

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (18)$$

Eine weitere Kennzahl, die zur Behandlung von Problemen der erzwungenen Konvektion verwendet wird, ist die Graetz-Zahl  $Gz$ . Für ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt ist die Graetz-Zahl wie folgt definiert: [68]

$$Gz = Pe \frac{d}{L} = Re \cdot Pr \frac{d}{L} \quad (19)$$

Die Graetz-Zahl ist das Produkt aus der Peclet-Zahl und dem Quotienten des Durchmessers  $d$  und der Länge  $L$  des Rohres. [67]

### 2.4.3 Wärmestrahlung

Jeder Körper mit einer positiven thermodynamischen Temperatur gibt Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab. Hierbei wird diese Form der Energieabgabe als Wärmestrahlung oder Infrarotstrahlung bezeichnet, wobei diese Strahlung aus Photonen besteht. Die von einem Körper emittierte Wärmestrahlung ist einerseits von Materialeigenschaften, andererseits von der Temperatur abhängig. [69] Charakteristisch für eine Welle ist ihre Wellenlänge  $\lambda$  und ihre Frequenz  $f$ . Hierbei berechnet sich die Wellenlänge aus dem Quotienten der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der Frequenz der Welle: [68]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (20)$$

Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit beträgt in Luft 299.705.543 m/s und entspricht hierbei der Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium. [68] Abbildung 2-9 zeigt das Spektrum der elektromagnetischen Wellen. Hierbei ist ersichtlich, dass sich die Wärmestrahlung über einen Wellenlängenbereich von  $10^{-1}$  bis  $10^3 \mu\text{m}$  erstreckt.

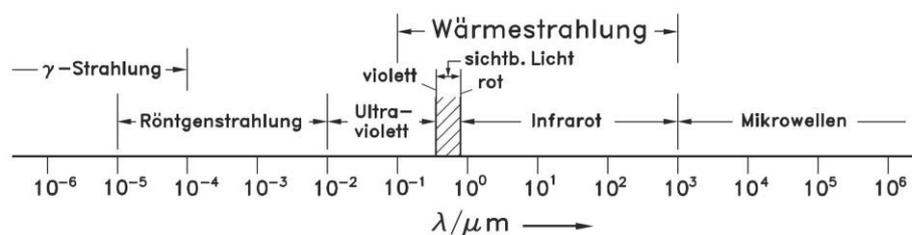


Abbildung 2-9: Spektrum der elektromagnetischen Wellen im Wellenlängenbereich von  $10^{-6}$  bis  $10^6 \mu\text{m}$  [69]

Die Wärmestrahlung kann hierbei in folgende Bereiche weiter unterteilt werden: [68]

- Nahe Infrarotstrahlung: 0,78 bis 1,4  $\mu\text{m}$
- Kurzwellige Infrarotstrahlung: 1,4 bis 3,0  $\mu\text{m}$
- Mittelwellige Infrarotstrahlung: 3,0 bis 8,0  $\mu\text{m}$
- Langwellige Infrarotstrahlung: 8,0 bis 15,0  $\mu\text{m}$
- Ferne Infrarotstrahlung: 15,0 bis 1000  $\mu\text{m}$

Wird eine Strahlungsquelle betrachtet, so ist zwischen einem Schwarzen Strahler und einem realen Strahler zu unterscheiden. Der Schwarze Strahler, auch idealer Strahler genannt, besitzt die maximal mögliche spezifische Ausstrahlung, die maximal durch Strahlung emittierte Wärmestromdichte  $\dot{q}_S$  über den gesamten Wellenlängenbereich, die sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnen lässt: [69]

$$\dot{q}_S = \sigma \cdot T^4 \quad (21)$$

Hierbei ist in Gleichung (21)  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante, die zahlenmäßig den Wert  $(5,670400 \pm 0,00004) \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  besitzt. Außerdem besitzt der Schwarze Strahler die Eigenschaft, die gesamte auftreffende Strahlung zu absorbieren. Für reale Strahler ist zur Berechnung der emittierten Wärmestromdichte  $\dot{q}$  ein Korrekturfaktor, der materialspezifische Emissionsgrad  $\varepsilon(T)$ , eingeführt worden: [69]

$$\dot{q} = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (22)$$

Nach Planck gilt für die spektrale (wellenlängenabhängige) spezifische Ausstrahlung  $M_{\lambda S}(\lambda, T)$ : [69]

$$M_{\lambda S}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (23)$$

Mit:

$$c_1 = (3,74177107 \pm 0,00000029) \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

$$c_2 = (14387,752 \pm 0,024) \mu\text{m K}$$

Hierbei wird die vom Schwarzen Strahler emittierte spektrale spezifische Ausstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge  $\lambda$  und der absoluten Temperatur  $T$  dargestellt. Abbildung 2-10 zeigt für unterschiedliche Temperaturen die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_{\lambda S}(\lambda, T)$  des Schwarzen Strahlers nach Gleichung (23).

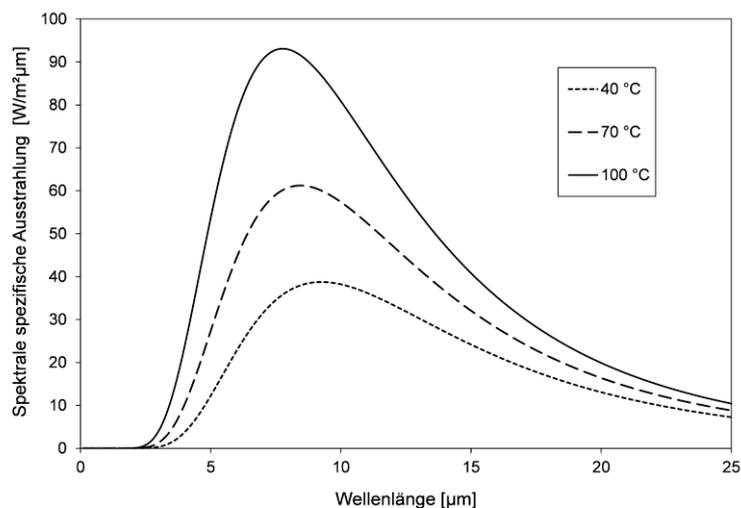


Abbildung 2-10: Spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers mit einer Oberflächentemperatur von 40, 70 und 100 °C nach Gleichung (23); eigene Darstellung

In Abbildung 2-10 ist ersichtlich, dass mit abnehmender Temperatur des Körpers sich das Maximum der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_{\lambda S}(\lambda, T)$  in Richtung ansteigender Wellenlänge verschiebt. Abbildung 2-11 zeigt die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_{\lambda S}(\lambda, T)$  des Schwarzen Strahlers für einen Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  nach Gleichung (23).

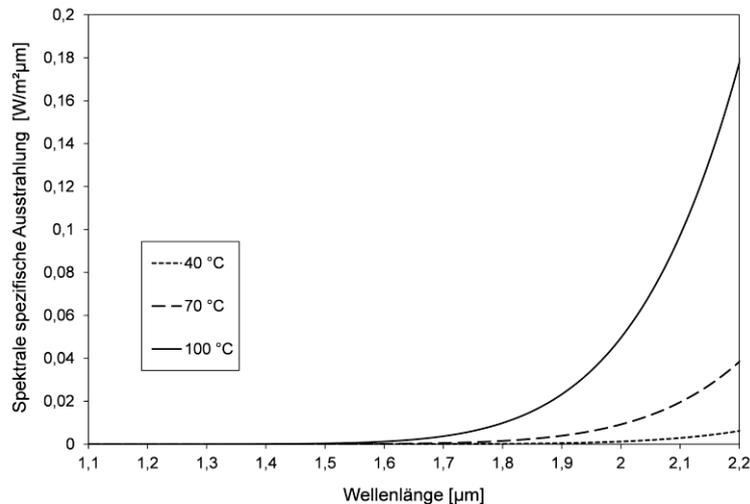


Abbildung 2-11: Spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers mit einer Oberflächentemperatur von 40, 70 und 100 °C nach Gleichung (23) für den Wellenlängenbereich 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$ ; eigene Darstellung

Trifft Strahlung auf einen Körper, so findet eine Interaktion der Strahlung mit dem Körper statt. Hierbei kann die Strahlung von dem Körper absorbiert, reflektiert oder transmittiert werden. Um die jeweiligen Anteile zu charakterisieren, wird der Absorptionsgrad  $a$ , der Reflexionsgrad  $r$  und der Transmissionsgrad  $\tau$  eingeführt. Für den Schwarzen Körper gilt, wie bereits beschrieben,  $\varepsilon = a = 1$ . Für reale Strahler gilt  $\varepsilon = a < 1$ . Allgemein gilt: [67], [69]

$$a + r + \tau = 1 \quad (24)$$

Für den Absorptionsgrad, den Reflexionsgrad und den Transmissionsgrad gilt außerdem: [68]

$$a = \frac{I_{0,a}}{I} \quad (25)$$

$$r = \frac{I_{0,r}}{I} \quad (26)$$

$$\tau = \frac{I_{0,\tau}}{I} \quad (27)$$

Demnach beschreiben  $a$ ,  $r$  und  $\tau$  die jeweiligen Anteile der Strahlung, die das Medium absorbiert  $I_{0,a}$ , reflektiert  $I_{0,r}$  und transmittiert  $I_{0,\tau}$  im Verhältnis zu der gesamt auf das Medium auftreffenden Strahlung  $I$ .

## 2.5 Rohrströmung

In diesem Abschnitt wird speziell die Rohrströmung erläutert, da zur Beschreibung der Wärmeübergänge zwischen PCM und WTF in der Laboranlage zu Beginn in grundlegenden Untersuchungen ein künstlicher Kanal erzeugt wird, welcher letztlich einem Rohr mit kreisrundem Querschnitt entspricht. Bei der Rohrströmung wird zwischen der laminaren und turbulenten Rohrströmung unterschieden. Demnach werden unterschiedliche Nußelt-Korrelationen für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  nach Gleichung (15) verwendet. Bei der Beurteilung, ob eine laminare oder eine turbulente Strömung des Fluids innerhalb eines Kreisrohres vorliegt, wird die Reynolds-Zahl nach Gleichung (16) herangezogen. Hierbei wird ein Wert von 2300 als kritische Reynolds-Zahl  $Re_{krit}$  bezeichnet. Ist die ermittelte Reynolds-Zahl kleiner als die kritische Reynolds-Zahl, so ist von einer laminaren Strömung auszugehen. Bei Reynolds-Zahlen von  $2300 < Re < 10^4$  liegt ein Übergangsbereich vor. Hier ist die laminare Strömung instabil und kleinste Störungen bewirken einen Umschlag hin zu einer turbulenten Rohrströmung. Bei Reynolds-Zahlen größer  $10^4$  liegt eine turbulente Strömung vor. [67], [68]

Ein weiterer Einflussfaktor auf den Wärmeübergangskoeffizienten und entsprechend auf die Nußelt-Zahl ist, ob eine voll ausgebildete thermische und / oder hydrodynamische Rohrströmung vorliegt oder nicht. Strömt ein Fluid in ein Rohr, so muss sich das Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil erst ausbilden. [67] Abbildung 2-12 verdeutlicht den Vorgang der Ausbildung einer voll ausgebildeten thermischen (Abbildung 2-12 A) und hydrodynamischen Rohrströmung (Abbildung 2-12 B).

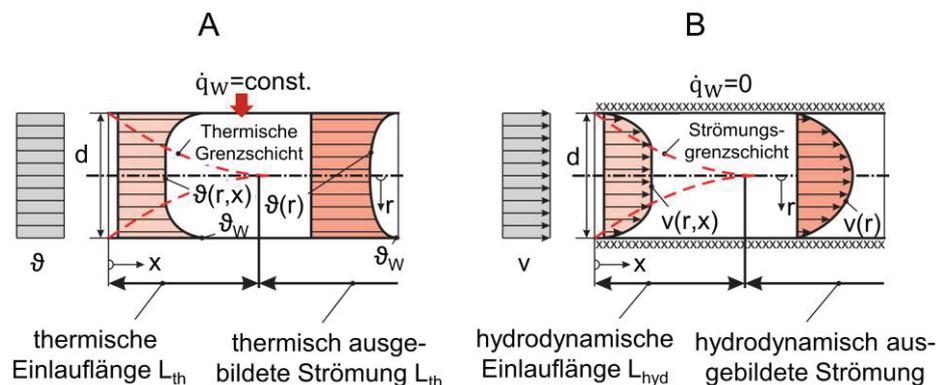


Abbildung 2-12: Thermischer Einlauf (A) und hydrodynamischer Einlauf (B) für eine Rohrströmung; nach [68], modifiziert

Abbildung 2-12 A zeigt ein Fluid, das mit konstanter Temperatur  $\vartheta$  in ein Rohr eintritt. Im gezeigten Beispiel wird das Fluid erwärmt, wobei der zugeführte Wärmestrom  $\dot{q}_W$  über die gesamte Rohrlänge konstant ist. Hierbei bildet sich in Strömungsrichtung eine Temperaturgrenzschicht, welche bis maximal zur Mitte des Rohres anwachsen kann, wobei sich die Nußelt-Zahl einem Endwert nähert. Dieser kann grob abgeschätzt werden und entspricht ca. 2. Es liegt eine vollständig thermisch ausgebildete Rohrströmung vor, wenn die lokale Nußelt-Zahl bis zu einer kleinen Abweichung von z. B. 1 % ihren Endwert erreicht hat. [69] Das Temperaturprofil

ist hier eine Funktion des Radius  $r$ . Ist das Temperaturprofil nicht vollständig ausgebildet, so liegt ein thermischer Einlauf vor. Das Temperaturprofil ist in diesem Fall eine Funktion des Radius  $r$  und der Strecke  $x$ . Die Strecke vom Eintritt der Strömung in das Rohr bis zum Erreichen der vollständig thermisch ausgebildeten Rohrströmung wird als thermische Einlauflänge  $L_{th}$  bezeichnet. [68]

Entsprechend der Randbedingung der konstanten Wandtemperatur der Rohrwand  $\vartheta_{W,i}$  bzw. der konstanten Wärmestromdichte an der Rohrwand  $\dot{q}_W$  berechnet sich die thermische Einlauflänge  $L_{th}$  für laminare Strömung für zähflüssige Öle ( $Pr \rightarrow \infty$ ) wie folgt: [68]

$$L_{th} = 0,0335 \cdot Re \cdot Pr \cdot d \quad \vartheta_{W,i} = \text{const.} \quad (28)$$

$$L_{th} = 0,043 \cdot Re \cdot Pr \cdot d \quad \dot{q}_W = \text{const.} \quad (29)$$

In Abbildung 2-12 B wird ein Fluid betrachtet, welches mit gleichmäßig konstanter Geschwindigkeit  $v$  in ein Rohr eintritt. Durch die Reibung an der Rohrwand wird Flüssigkeit an der Innenwand verzögert, wobei die Kernströmung beschleunigt wird. Hierbei bildet sich in Strömungsrichtung eine wachsende Grenzschicht aus, welche asymptotisch bis hin zur Rohrmitte anwächst. Dabei bildet sich das Strömungsprofil entsprechend bis zum Erreichen des Endprofils aus. Ist das Endprofil erreicht, so liegt eine vollständig hydrodynamisch ausgebildete Rohrströmung vor. Hierbei ist das Geschwindigkeitsprofil eine Funktion des Radius  $r$ . Ist das Geschwindigkeitsprofil nicht vollständig ausgebildet, so liegt ein hydrodynamischer Einlauf vor. Das Geschwindigkeitsprofil ist in diesem Fall eine Funktion des Radius  $r$  und der Strecke  $x$ . Die Strecke vom Eintritt der Strömung in das Rohr bis zum Erreichen der vollständig hydrodynamisch ausgebildeten Rohrströmung wird als hydrodynamische Einlauflänge  $L_{hyd}$  bezeichnet. [69] Die hydrodynamische Einlauflänge berechnet sich bei laminarer Strömung für ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt nach Gleichung (30): [68]

$$L_{hyd} = \left( 0,056 \cdot Re + \frac{0,60}{1 + 0,035 \cdot Re} \right) \cdot d \quad (30)$$

Für laminare Strömungen liegt bereits nach kurzen Einlauflängen das voll ausgebildete Geschwindigkeitsprofil vor, und damit ist die Strömung vollständig hydrodynamisch ausgebildet. Zur Berechnung entsprechender Nußelt-Zahlen wird lediglich eine laminare, vollständig hydrodynamisch ausgebildete Strömung im thermischen Einlauf betrachtet. Für den betrachteten Fall berechnet sich die Nußelt-Zahl entsprechend der Randbedingung der konstanten Wandtemperatur der Rohrwand  $\vartheta_{W,i}$  bzw. der konstanten Wärmestromdichte an der Rohrwand  $\dot{q}_W$  und einem erweiterten Gültigkeitsbereich der Graetz-Zahl von  $0 < Gz < \infty$  wie folgt: [68]

$$Nu_0 = \left[ 49,371 + \left( 1,615 \cdot Gz^{\frac{1}{3}} - 0,7 \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad \vartheta_{W,i} = \text{const.} \quad (31)$$

$$Nu_0 = \left[ 83,326 + \left( 1,953 \cdot Gz^{\frac{1}{3}} - 0,6 \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad \dot{q}_W = \text{const.} \quad (32)$$

Durch die Bedingung, dass die Rohrlänge  $L$  viel größer ist als der Rohrdurchmesser  $d$  und des Weiteren die Stoffwerte temperaturunabhängig sind, ist  $Nu_0 = Nu$ . Wird die Abhängigkeit der Stoffwerte von der Temperatur berücksichtigt, so folgt für die Nußelt-Zahl: [68]

$$Nu = Nu_0 \cdot K_T \quad (33)$$

Hierbei ist  $K_T$  ein Faktor, der die Temperaturunabhängigkeit der Stoffwerte bei Flüssigkeiten berücksichtigt: [68]

$$K_T = \left( \frac{Pr_m}{Pr_W} \right)^{0,11} \quad (34)$$

Hierbei entspricht  $Pr_W = Pr_W(\vartheta_{W,i})$  für die Prandtl-Zahl des Fluids innerhalb des Rohres bei Wandinnentemperatur  $\vartheta_{W,i}$ .  $Pr_m$  entspricht einer mittleren Prandtl-Zahl, die nach Gleichung (35) berechnet wird und sich auf das ein- und ausströmende Fluid bezieht: [68]

$$Pr_m = \left( \frac{Pr(\vartheta_{F,ein}) + Pr(\vartheta_{F,aus})}{2} \right) \quad (35)$$

### 2.6 Umströmter Körper: Kugel

Um den Wärmeübergang zwischen einem im flüssigen PCM aufsteigenden WTF-Tropfen in einer ersten Näherung theoretisch zu beschreiben, wird der Ansatz der laminar umströmten Kugel gewählt. Für den vorliegenden Wärmeübergang kann die Nußelt-Zahl nach Gleichung (36) berechnet werden, wobei eine erzwungene Konvektion zugrunde liegt: [67]

$$Nu = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (36)$$

Für das System flüssiges PCM und flüssiges WTF bildet das WTF die disperse Phase und das flüssige PCM die kontinuierliche Phase. Nach Gleichung (16) lässt sich die Reynolds-Zahl für das vorliegende System berechnen, wobei Gleichung (37) folgt:

$$Re = \frac{v_{WTF-Tropfen} \cdot \rho_{PCM,l} \cdot L_c}{\eta_{PCM}} \quad (37)$$

Hierbei entspricht  $v_{WTF-Tropfen}$  der Strömungsgeschwindigkeit des Tropfens,  $\rho_{PCM}$  der Dichte des flüssigen PCM,  $\eta_{PCM}$  der dynamischen Viskosität des flüssigen PCM und  $L_c$  der charakteristischen Länge, was bei einer Kugel dem Durchmesser entspricht. Nach Gleichung (17) lässt sich für das vorliegende System die Prandtl-Zahl bestimmen. Es folgt Gleichung (38):

$$Pr = \frac{\eta_{PCM} \cdot c_{p,l,PCM}}{\lambda_{PCM,l}} \quad (38)$$

In Gleichung (38) entspricht  $\eta_{PCM}$  der dynamischen Viskosität des flüssigen PCM,  $c_{p,l,PCM}$  der spezifischen Wärmekapazität des flüssigen PCM und  $\lambda_{PCM,l}$  der Wärmeleitfähigkeit des flüssigen PCM. Bei der Betrachtung werden die Stoffwerte des PCM als konstant angenommen.

### 3 Stand des Wissens

Im folgenden Abschnitt werden literaturbekannte Direktkontaktlatentwärmespeicher aufgeführt und grundlegende Ergebnisse zusammengefasst.

#### 3.1 Direktkontaktlatentwärmespeicher

Erstmals wird 1957 von Etherington [56] ein Energiespeicher beschrieben, der trotz bekannter Nachteile von Salzhydraten als PCM wie Unterkühlung, Entmischung und geringe Wärmeleitfähigkeit ein Salzhydrat als Energiespeichermedium verwendet. Hierzu nutzt Etherington das Prinzip der direkten Wärmeübertragung zwischen dem PCM und einem Wärmeträgerfluid, welches sich nicht mit dem PCM mischt. Der Speicher wird verwendet, um die Effektivität von Wärmepumpen zu verbessern. Als PCM wird das Salzhydrat Dinatriumhydrogenphosphat-Dodecahydrat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ) verwendet, welches einen Schmelzpunkt von ca.  $36 \text{ }^\circ\text{C}$  aufweist. Als Wärmeträgerfluid wird ein Mineralöl verwendet. Durch eine Rohrleitung wird das Öl in den unteren Teil des Speichers geleitet. Dort befindet sich ein perforiertes Rohrstück, durch das das Öl in den Speicherbehälter eintritt. Durch die geringere Dichte des Öls im Vergleich zu dem PCM strömt dieses nach oben. Auf diesem Weg finden der Direktkontakt und die Energieübertragung statt. Das Öl sammelt sich im Anschluss oberhalb des PCM und wird mittels einer Pumpe im Kreislauf gefördert. Um dem Öl thermische Energie zu- bzw. abzuführen, ist im Kreislauf ein Wärmeübertrager implementiert. Bei den Untersuchungen beträgt das PCM / Öl Verhältnis näherungsweise 1. Bei den Experimenten werden der Schmelz- und Kristallisationsvorgang sowie die grundlegende Machbarkeit der direkten Wärmeübertragung untersucht. Hierbei ist kein PCM-Mitriss in den Ölkreislauf beschrieben worden, wobei dies an der großen Ölüberdeckung oberhalb des PCM liegt. Die Messungen haben gezeigt, dass die Unterkühlung des PCM fast vollständig durch den Direktkontakt eliminiert werden konnte. Ebenfalls kompensiert der Direktkontakt die geringe Wärmeleitung des PCM.

Es folgen die Untersuchungen von Edie et al. [70], [71] in den Jahren 1976 und 1977. Es wird zum einen, analog zu Etherington [56], untersucht, ob das Prinzip der direkten Wärmeübertragung von Wärmeträgerfluid auf PCM machbar ist, und zum anderen wird ein näheres Verständnis über die im Speicherbehälter vorgehenden Wärme- und Stoffübergangsphänomene erlangt. In [70] sowie in [71] wird als PCM das Salzhydrat Dinatriumhydrogenphosphat-Dodecahydrat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt:  $36 \text{ }^\circ\text{C}$ ) verwendet. Als Wärmeträgerfluid wird in [70] Marcol, ein Weißöl, und in [71] Varsol, ein Testbenzin, eingesetzt. In [70] wird hierbei eine Technikumsanlage dargestellt. Marcol wird durch eine Rohrleitung von oben in den unteren Teil des Speichers geleitet. Dort befindet sich ein Verteilersystem mit sechs Öleintrittsöffnungen, durch die das Marcol in den Speicherbehälter gelangt und somit der Direktkontakt realisiert wird. Hier wird erstmals dargestellt, dass PCM-Mitriss ein großes Problem bei dem Direktkontaktlatentwärmespeicher ist. Während der Messungen ist es teilweise zu einer kompletten Verstopfung des Rohrleitungssystems durch PCM gekommen. Um den Mitriss zu reduzieren, werden 160 unterschiedliche Wärmeträgerfluide auf ihr Vermögen, den PCM-Mitriss zu fördern, unter-

sucht. Als Ergebnis der Analyse wird gezeigt, dass Wärmeträgerfluide mit einer Viskosität größer 4-5 cp den PCM-Mitriss stark fördern. Außerdem wird empfohlen, das Speicherdesign zu ändern, um nachhaltig den Mitriss zu unterbinden bzw. den Mitriss besser tolerieren zu können.

Folgende Vorschläge werden gemacht, um den Mitriss zu reduzieren bzw. besser tolerieren zu können:

1. Erhöhung der Ölüberdeckung oberhalb des PCM
2. Der im System implementierte Wärmeübertrager zur Zu- bzw. Abführung von thermischer Energie soll trotz Salzablagerung durchströmbar bleiben.
3. Optimierung des Verteilersystems und Zuführung des Marcols auf unterschiedlichen Ebenen.

Allgemein zeigen die Messungen, dass durch den Direktkontakt die Entmischung des PCM wirksam unterbunden werden konnte. In [71] werden Ergebnisse zu einer Laboranlage mit nur einer Eintrittsöffnung für das Varsol gezeigt. Diese Öleintrittsöffnung entspricht hierbei einer Art Düse. Abbildung 3-1 zeigt den Aufbau der Varsol-Verteilerdüse. In den Messergebnissen wird der zeitliche Temperaturverlauf des PCM während der Energiezu- und Energieabfuhr dargestellt. Entsprechend wird die Leistung ermittelt. Es wird außerdem berichtet, dass teilweise keine vollständige Beladung des Speichers aufgrund von Totzonen innerhalb des Speicherbehälters stattfindet. Demnach verbleibt bei abgeschlossener Beladung festes PCM in den Randbereichen des Speicherbehälters. Auch hier treten durch den Direktkontakt keine Probleme von Unterkühlung des PCM auf.

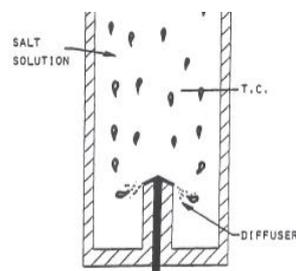


Abbildung 3-1: Aufbau der Varsol-Verteilerdüse [71]

Im Jahr 1978 publizieren Costello et al. [72] ihre Untersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher. Im Unterschied zu Etherington [56] und Edie et al. [70], [71], welche sich mit der Nutzung von Salzhydraten als Energiespeichermedium, der Machbarkeit des Direktkontaktes und ersten grundlegenden Erkenntnissen zum Verhalten eines Direktkontaktlatentwärmespeichers beschäftigen, wird in der Arbeit von Costello et al. [72] erstmals eine Größe eingeführt, um den Wärmeübergang zu quantifizieren. Diese Größe ist der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient  $U_V$ , der wie folgt definiert wird:

$$U_V = \frac{\dot{Q}}{V \cdot (\Delta\theta)_{lm}} \quad (39)$$

In Gleichung (39) entspricht  $\dot{Q}$  dem übertragenen Wärmestrom zwischen PCM und Öl,  $V$  dem gesamt im Speicherbehälter vorliegenden PCM und  $(\Delta\vartheta)_{lm}$  einer mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  wird aus einer Energiebilanz, welche in Gleichung (40) dargestellt ist, ermittelt:

$$\dot{m} \cdot c_p (\vartheta_{F,ein} - \vartheta_{F,aus}) - U_V \cdot V (\Delta\vartheta)_{lm} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{d\vartheta_{aus}}{dt} \quad (40)$$

Wird der Schmelzvorgang betrachtet, so entspricht der Term  $\dot{m} \cdot c_p (\vartheta_{F,ein} - \vartheta_{F,aus})$  dem Wärmestrom, welcher das heiße WTF an das kalte PCM abgibt. Der Term  $U_V \cdot V (\Delta\vartheta)_{lm}$  entspricht dem Wärmestrom, welcher das kalte PCM vom heißen WTF aufnimmt. Im Laufe der Messung erwärmt sich ebenfalls die WTF-Schicht oberhalb des PCM. Der Wärmestrom, welcher zu dieser Erwärmung führt, wird durch den Term  $\rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{d\vartheta_{aus}}{dt}$  beschrieben. Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz  $(\Delta\vartheta)_{lm}$  wird nach Gleichung (41) ermittelt:

$$(\Delta\vartheta)_{lm} = \frac{(\vartheta_{ein} - \vartheta_{PCM}) - (\vartheta_{aus} - \vartheta_{PCM})}{\ln \frac{\vartheta_{ein} - \vartheta_{PCM}}{\vartheta_{aus} - \vartheta_{PCM}}} \quad (41)$$

In Gleichung (41) steht  $\vartheta_{ein}$  und  $\vartheta_{aus}$  für die Ein- und Austrittstemperatur des WTFs sowie  $\vartheta_{PCM}$  für die mittlere PCM-Temperatur im gesamten Speicher.

Bei den Untersuchungen werden der Wärmeträgerfluidstrom, die PCM-Höhe und die Anzahl an Wärmeträgerfluidverteilerdüsen variiert. Es werden drei unterschiedliche PCM unabhängig voneinander untersucht: Calciumchlorid-Hexahydrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt: 30 °C), Dinatriumhydrogenphosphat-Dodecahydrat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt: 35 °C) und Natriumsulfat-Decahydrat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt: 32 °C). Als Wärmeträgerfluid wird Varsol verwendet. Das Varsol wird von unten in den Speicher eingeleitet und tritt aus maximal 4 einzelnen Verteilerdüsen in den Speicherbehälter. Hierbei ist die Düse analog zu [71]. Der Speicherbehälter besitzt einen Innendurchmesser von 0,19 m und ist aus Plexiglas gefertigt, um das Speicherverhalten während des Schmelzens und der Kristallisation beobachten zu können. Da sich während der Kristallisation eine feste, undurchsichtige PCM-Schicht an der Plexiglaswandung des Speicherbehälters bildet und während des Schmelzens generell das PCM in fester Form vorliegt und somit ebenfalls undurchsichtig ist, ist der Wärmeübergangskoeffizient auf das PCM-Volumen bezogen worden, da aufgrund der undurchsichtigen PCM-Schicht, kein Flächenbezug ermittelt werden konnte. Bei den Messungen ergeben sich zwei grundlegende Probleme:

1. Eine Erhöhung des Varsol-Massenstroms führt schnell zu einem erheblichen PCM-Mit-riss. Durch starke Reduzierung des Varsol-Massenstroms konnte der Mit-riss verringert, aber nicht komplett unterbunden werden.

2. Zur Ermittlung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten nach Gleichung (39) ist es erforderlich, die PCM-Temperatur  $\vartheta_{\text{PCM}}$  zu erfassen. Hierbei ist die PCM-Temperatur die mittlere Temperatur des gesamten sich im Speicherbehälter befindenden PCM. Zu Beginn der Kristallisation liegt ein homogenes PCM mit einer homogenen Temperatur vor. Nach bereits wenigen Minuten bildet sich allerdings festes PCM, welches sich teilweise um die Thermolemente anlagert und das Messergebnis stark beeinflusst. Während fortlaufender Kristallisation bilden sich Kanäle und letztlich eine heterogene PCM-Struktur im Speicher mit einer heterogenen Temperaturverteilung. Aufgrund der Bildung der festen undurchsichtigen PCM-Schicht an der Wandung des Speicherbehälters kann nicht abgeschätzt werden, in welchem Aggregatzustand das PCM an welcher Stelle des Speicherbehälters bzw. umliegend der Temperaturfühler vorliegt.

Aufgrund der Probleme beschreiben die Autoren, dass die ermittelten Ergebnisse zu dem volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten den Wärmeübergang des komplexen Systems nicht ausreichend beschreiben. Lediglich für die ersten Minuten während der Kristallisation, wo das gesamte PCM noch im flüssigen Zustand vorliegt und sich noch kein festes PCM im Speicherbehälter gebildet hat, kann eine Angabe zu dem volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten gemacht werden. Dieser beträgt im Mittel 30,6 W/L K (+/- 2,2 W/L K) für die ersten 6 Minuten der Messung mit Calciumchlorid-Hexahydrat als PCM (Masse 13,1 kg) und Varsol als WTF bei einer PCM-Höhe von 30 cm und 4 WTF-Verteilerdüsen. Die Austrittsgeschwindigkeit des Varsols im Speicherbehälter beträgt 0,15 cm/s. Der mittlere volumetrische Wärmeübergangskoeffizient für die gesamte Kristallisation beträgt 11,1 W/L K. Es wird außerdem gezeigt, dass der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient über die Dauer der Messung stark abnimmt.

1979 wird von Hallett et al. [73] ein Direktkontaktlatentwärmespeicher beschrieben, bei dem Natriumacetat-Trihydrat ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt: 58 °C) als PCM und Kerosin als WTF verwendet werden. Bei der gezeigten Pilotanlage besteht der Speicherbehälter aus Acrylglas und besitzt eine Höhe von ca. 0,75 m und einen Innendurchmesser von ca. 0,057 m. Hierbei wird das Kerosin von unten in den Speicherbehälter eingeleitet. Dort befindet sich eine Verteilerdüse, welche drei Öffnungen besitzt, wodurch das Kerosin in den Speicherbehälter gelangt. Zusätzlich ist im Speicherbehälter eine Rohrleitung vorgesehen, durch die heißes Kerosin geleitet werden kann, um das PCM aufschmelzen zu können, falls das PCM im Speicherbehälter ohne Kanalstruktur kristallisiert und somit der Speicherbehälter verstopft ist. Es werden die Kerosinein- und Kerosinaustrittstemperatur als Funktion der Zeit während der Be- und Entladung dargestellt und die entsprechende Leistung ermittelt, um die Machbarkeit des Direktkontaktes zwischen eines Salzhydrates und eines entsprechenden WTF zu zeigen. Außerdem wird der anfängliche Kristallisationsprozess beschrieben. Hier wird erläutert, dass das während der Kristallisation gebildete feste PCM an den Boden des Speicherbehälters sedimentiert.

Im Jahr 1980 wird von Fouda et al. [74] eine theoretische Beschreibung eines Direktkontaktlatentwärmespeichers mit Natriumsulfat-Decahydrat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt: 33 °C) als PCM und einem nichtmischbaren Wärmeträgerfluid vorgestellt.

Im Jahr 1983 wird von Lindner [75] eine erste Bauform eines Direktkontaktlatentwärmespeichers patentiert. Hierbei wird ein horizontal liegender Zylinder als Speicherbehälter vorgeschlagen. Das Wärmeträgermedium, eine Flüssigkeit, wird mittels einer Pumpe im Kreislauf geführt und steht im direkten Kontakt zu dem Speichermedium, beispielsweise einer Glaubersalzlösung. Durch eine Rohrleitung mit Öffnungen wird das Wärmeträgerfluid in den unteren Teil des Speichers eingeleitet und dient als Verteilersystem für das Wärmeträgerfluid. Um dem Wärmeträgerfluid thermische Energie zu entziehen bzw. zuzuführen, ist ein Wärmeübertrager im System verbaut.

Im Jahr 1984 publizieren Fouda et al. [76] Untersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher, bei dem Natriumsulfat-Decahydrat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt:  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ ) als Wärmespeichermedium und Varsol als Wärmeträgerfluid verwendet werden. Zur Unterbindung von Unterkühlung wird dem PCM ca. 1 Massenprozent Borax zugegeben. Es werden zwei unterschiedliche Speicherbehältergeometrien untersucht. Der erste Behälter besitzt einen Innendurchmesser von 12 cm bei einer Höhe von 1,22 m und der zweite einen Innendurchmesser von 0,28 m bei einer Höhe von 1,83 m. Beide Speicherbehälter sind aus Plexiglas gefertigt, um den Schmelz- und Kristallisationsvorgang zu überwachen. Das Varsol wird mittels dreier Leitungen in den unteren Teil des Speichers gefördert, wobei die Leitungen unterschiedliche Längen besitzen und demnach das Varsol in unterschiedlichen Höhen dem Speicherbehälter zugeführt wird. Es ist das Ziel zu zeigen, dass das Speichersystem viele Lastzyklen unter wechselnden Bedingungen ohne Leistungseinbußen betrieben werden kann. Bei den Untersuchungen wird ähnlich zu Costello et al. [72] der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient ermittelt. Wie auch bei Costello et al. [72] besteht während der Kristallisation das Problem der unzureichend genauen Temperaturerfassung des PCM, speziell wenn sich festes PCM im Speicherbehälter gebildet hat. Im Unterschied zu Costello et al. [72] wird in Fouda et al. der Wärmestrom zur Ermittlung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten über die thermische Bilanzierung des Varsols gewonnen. Außerdem wird bei der Berechnung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten zusätzlich zur Berücksichtigung des gesamten PCM-Volumens in einer weiteren Berechnung lediglich das noch flüssige PCM-Volumen während der Kristallisation berücksichtigt. Dadurch ist das Abnehmen des Wärmeübergangskoeffizienten über die gesamte Kristallisation nicht so stark ausgeprägt wie bei Costello et al. [72]. Für den Bereich, indem das PCM ausschließlich flüssig vorliegt, lassen sich folgende volumetrische Wärmeübergangskoeffizienten aus der grafischen Darstellung der Ergebnisse für den Kristallisationsvorgang ablesen. Für den kleinen Speicherbehälter beträgt der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient ca.  $21,0 \text{ W/L K}$  ( $\pm 1,2 \text{ W/L K}$ ) bei einer Aufstiegsgeschwindigkeit des Varsols im Speicher von  $0,61 \text{ cm/s}$  und einer Varsol-Eintrittstemperatur von  $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 4,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Für den großen Speicherbehälter beträgt der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient ca.  $9,3 \text{ W/L K}$  ( $\pm 2,7 \text{ W/L K}$ ) bei einer Aufstiegsgeschwindigkeit des Varsols im Speicher von  $0,30 \text{ cm/s}$  und einer Varsol-Eintrittstemperatur von  $17,8 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 2,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Im Jahr 1989 veröffentlichen Farid et al. [77] Untersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher, bei dem als PCM die drei Salzhydrate Natriumcarbonat-Decahydrat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt:  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Natriumsulfat-Decahydrat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt:  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und Dinatriumhydrogenphosphat-Dodecahydrat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ ;

Schmelzpunkt: 36 °C) unabhängig voneinander verwendet werden. Als Wärmeträgerfluid wird Kerosin eingesetzt. Ziel der Untersuchung ist es, neben Messungen hauptsächlich eine Vorhersage der Speicherleistung machen zu können. Hierfür ist eine theoretische Betrachtung und Beschreibung des Speichers bzw. der vorliegenden Wärmeübergänge notwendig. Als Speicherbehälter wird ein aufrecht stehender Glaszylinder mit einer Höhe von 1,5 m und einem Innendurchmesser von 0,2 m verwendet. Das Kerosin wird durch ein Glasrohr von oben in den Speicher geleitet, wobei sich im unteren Teil des Speichers ein Verteiler befindet. Dieser besitzt wiederum 8 kleinere Glasrohre, die radial angeordnet sind. Die Kerosineintrittsöffnungen besitzen einen Durchmesser von 3 bzw. 5 mm. Zur Beschreibung der Wärmeübergänge wird der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient herangezogen, welcher analog nach Costello et. al. [72] ermittelt wird. Die ermittelten volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten sind den grafischen Darstellungen der Ergebnisse entnommen und in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die Ergebnisse aus Tabelle 3-1 zeigen für das jeweils untersuchte PCM den volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten während des Abkühlvorgangs des PCM, wenn ausschließlich flüssiges PCM vorliegt und als Mittelwert für die gesamte Kristallisation. Außerdem wird noch zwischen einer langsamen ( $v_{\text{Varsol}} = 0,12 \text{ cm/s}$ ) und einer schnellen Aufstiegs geschwindigkeit ( $v_{\text{Varsol}} = 0,37 \text{ cm/s}$ ) des Varsols innerhalb des PCM unterschieden. Die PCM-Höhe beträgt 0,65 m.

Tabelle 3-1: volumetrische Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche PCM und unterschiedliche Messbedingungen

	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$
Vol. Wärmeübergangskoeff. nur flüssiges PCM [W/L K], $v_{\text{Varsol}} = 0,12 \text{ cm/s}$	2	5	9
Mittlerer vol. Wärmeübergangskoeff. [W/L K] $v_{\text{Varsol}} = 0,12 \text{ cm/s}$	2	5	6
Vol. Wärmeübergangskoeff. nur flüssiges PCM [W/L K] $v_{\text{Varsol}} = 0,37 \text{ cm/s}$	14	14	14
Mittlerer vol. Wärmeübergangskoeff. [W/L K] $v_{\text{Varsol}} = 0,37 \text{ cm/s}$	10	11	12

Es wird beschrieben, dass durch eine Erhöhung des Varsol-Massenstroms sich kleinere Varsol-Tropfen bilden, welche zu einer größeren wärmeübertragenden Oberfläche im gesamten Speichersystem beitragen. Dadurch erhöht sich die übertragende Leistung und entsprechend der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient.

Ein in der Umsetzung neuartiges Konzept eines Direktkontaktlatentwärmespeichers wird 1997 von Inaba et al. [78] beschrieben. Als PCM und Wärmeträgerfluid wird Tetradecan ( $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ ;

Schmelzpunkt:  $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) verwendet, welches in flüssiger Form in den unteren Teil eines Speicherbehälters, gefüllt mit einer Wasser/Glykol-Mischung, eingeleitet wird. Da das Tetradecan eine geringere Dichte als das Wasser/Glykol-Gemisch aufweist, strömt das Tetradecan durch das Wasser/Glykol-Gemisch und sammelt sich oberhalb des Wasser/Glykol-Gemisches an. Hierbei kristallisiert das Tetradecan teilweise oder vollständig. Der hier betrachtete Ansatz, das PCM zu fördern, wird in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet und daher wird der Ansatz an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

In [79] stellen Kiatsiriroat et al. im Jahr 2000 ihr Konzept zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher dar. Als PCM wird Natriumthiosulfat-Pentahydrat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{ H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt:  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und als Wärmeträgerfluid wird ein Öl verwendet. Bei dem experimentellen Aufbau besteht der Speicherbehälter aus Acrylglas mit einem Durchmesser von  $0,12\text{ m}$  und einer gesamten Höhe von  $0,7\text{ m}$ . Das Öl wird von oben in den unteren Teil des Speichers zu einem verzweigten Öl-Verteilersystem geleitet. Es ist die Leistung des Speichersystems während der Entladung untersucht worden. Hierzu ist die PCM-Temperatur als Funktion der Zeit dargestellt und entsprechend der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient analog zu Fouada et. al. [76] ermittelt worden. Aufgrund des guten Wärmeübergangs ist während der Entladung des Speichers im gesamten PCM eine gleichmäßige Reduzierung der PCM-Temperatur ermittelt worden. Für den Bereich  $\vartheta_{\text{PCM}} > \vartheta_{\text{m}}$  wird ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient mit einem Wert von ca.  $22\text{ W/L K}$  ermittelt. Hierbei befindet sich  $12\text{ kg}$  PCM im Speicherbehälter (entspricht einer PCM-Höhe von  $45\text{ cm}$ ), und der Ölmassenstrom beträgt  $2,15\text{ L/min}$  bei einer Eintrittstemperatur von  $37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Im Bereich  $\vartheta_{\text{PCM}} < \vartheta_{\text{m}}$  ist ein starkes Schwanken aufgrund verstärkter Bildung von festem PCM zu erkennen.

In [80] stellen Kaizawa et al. im Jahr 2008 einen transportablen Direktkontaktlatentwärmespeicher vor. Hintergrund ist es, Abwärmequellen und thermische Energiesenken miteinander zu verbinden. Hierfür wird als PCM Erythritol ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_4$ ; Schmelzpunkt:  $118\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und als Wärmeträgerfluid ein Öl verwendet. Als Speicherbehälter wird ein horizontal liegender Zylinder mit einem Durchmesser von  $0,84\text{ m}$  und einer Länge von  $0,15\text{ m}$  verwendet. Eine Seite des Zylinders ist aus Glas gefertigt, sodass der Be- und Entladevorgang beobachtet werden kann. Das Öl wird durch zwei Rohrleitungen mit insgesamt 6 Öleintrittsöffnungen von hinten in den unteren Teil des Speicherbehälters geleitet. Bei den Untersuchungen wird grundlegend das Verhalten des PCM während der Be- und Entladung beobachtet. Es wird die Temperaturverteilung des PCM innerhalb des Speichers gemessen und der Wirkungsgrad ermittelt. Es wird eine Kanalbildung innerhalb des PCM beschrieben. Die Kanäle entstehen während der Kristallisation des PCM. Im Laufe des Schmelzvorgangs bilden sich breitere Hauptkanäle aus, wobei der mittlere Bereich des PCM zuerst aufschmilzt. Ein Wechsel im Wärmeübergangsmechanismus wird beschrieben. Hierbei liegt zu Beginn ein konvektiver Wärmeübergang vor, wobei das Öl durch Kanäle fließt. Im weiteren Verlauf wird das noch in fester Form vorliegende PCM durch Wärmeleitung des umliegenden flüssigen PCM aufgeschmolzen. Gegen Ende des Schmelzvorgangs wird von einer sehr kleinen Beladeleistung berichtet. Hierbei ist zu sehen, dass Totzonen im Speicherbehälter vorliegen, wo festes PCM verbleibt und eben durch die vorliegende Wärmeleitung sehr langsam aufschmilzt. Beim Kristallisieren ist von einem abnehmenden Ölmassenstrom berichtet worden. Dies liegt daran, dass das feste PCM teilweise die Öleintrittsöffnungen

verschließt, wobei bei einigen Experimenten der Ölmassenstrom komplett zum Erliegen gekommen ist. Kurze Zeit nach Beginn der Kristallisation wird von einer Art Schaumbildung an der Phasengrenze PCM / Öl berichtet. Hierbei besteht dieser Schaum aus einer Ansammlung aus Öltröpfen, welche eine PCM-Hülle besitzen.

In [81] beschreiben Martin et al. im Jahr 2010 einen Direktkontaktlatentwärmespeicher, welcher zur Klimatisierung genutzt werden soll. Hierzu wird als PCM ein Paraffin mit einer Schmelztemperatur von 7 °C und als Wärmeträgermedium Wasser verwendet. Der Speicherbehälter ist aus Acrylglas gefertigt, um die Be- und Entladung des Speichers zu visualisieren. Aufgrund der größeren Dichte des Wassers im Vergleich zu dem Paraffin wird das Wasser von oben in den Speicher geleitet. Mittels einer Verteilerplatte wird der Wassereintrag in den Speicherbehälter geregelt. Das Wasser durchströmt im Anschluss das Paraffin und sammelt sich im unteren Bereich des Speicherbehälters wieder an. In der Arbeit werden theoretische Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt und eine modellhafte Auslegung für einen Großspeicher gemacht. Für die Auslegung wird ein Modellfall dargestellt und hierfür entsprechend eine Speicherkapazität (55 kWh) und eine Speicherleistung (25 kW) festgelegt. Bei dem gewählten PCM ergibt sich aus der Speicherkapazität ein reines PCM-Volumen von 2,75 m<sup>3</sup>. Parameter wie die Wassereintrittstemperatur und die Übertragungsflächen werden willkürlich gewählt. Hieraus werden im Anschluss ein Wärmeübergangskoeffizient und der Wassermassenstrom berechnet. Die Auslegung wird durch Messungen im Kleinmaßstab ( $V_{\text{PCM}}: 0,003 \text{ m}^3$ ) validiert. Die Messungen haben gezeigt, dass eine Speicherleistung zwischen 30 und 80 kW/m<sup>3</sup> erreichbar ist. Allerdings konnten diese Leistungen nur dadurch erzielt werden, dass ein PCM-Mitris in die Anlage toleriert worden ist. Dies ist gerade bei großer Leistungsentnahme, welche hohe Wassermassenströme voraussetzt, beobachtet worden. Gleichzeitig wird beschrieben, dass dies in Großanlagen zu großen Problemen führt. Durch die schnelle Abkühlung aufgrund der geringen Wassereintrittstemperatur bilden sich schnell feste PCM-Bereiche, welche flüssiges PCM einschließen. Hierdurch geht zeitspezifische Speicherkapazität in Form von flüssigem PCM verloren. Die sich während der Kristallisation ausbildende PCM-Schicht weist keine ausreichende Porosität auf. Das Wasser durchströmt das PCM nur durch wenige Hauptkanäle. Dies bedeutet einen Verlust an wärmeübertragender Fläche. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass Wasser in PCM eingeschlossen worden ist. Hierdurch ergibt sich eine Änderung im Wassermassenstrom, da mehr Wasser zu- als abgeführt wird. Letztlich lässt sich sagen, dass die Auslegung nicht funktioniert hat und ein scale-up um den Faktor 1000 als kritisch zu bewerten ist.

In [82] werden von Nogami et al. im Jahr 2010 Untersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher vorgestellt, wobei das Strömungsverhalten des Wärmeträgerfluids im Speicherbehälter am Beispielsystem Wasser / Öl dargestellt wird. Des Weiteren wird für die Untersuchungen Natriumacetat-Trihydrat ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$ ; Schmelzpunkt: 58 °C) als PCM verwendet und ein Öl als Wärmeträgerfluid. Der Speicherbehälter ist aus einem durchsichtigen Kunststoff gefertigt und besitzt eine Höhe von 0,4 m. Der Innendurchmesser beträgt 0,05 m. Im Boden des Speicherbehälters ist eine Öleintrittsöffnung, die im Laufe der Messungen im Durchmesser variiert wird. Bei den Untersuchungen wird das Strömungsverhalten des Wärmeträgerfluids bei unterschiedlichen Durchmessern der Öleintrittsöffnungen und unterschiedlichen Öl-

massenströmen beschrieben. Steigt der Ölmassestrom an bzw. wird bei konstantem Ölmassestrom die Öleintrittsöffnung verkleinert, so können der Reihe nach folgende Tropfengeometrien des Öls im Speicherbehälter beobachtet werden, welche in Abbildung 3-2 dargestellt sind.

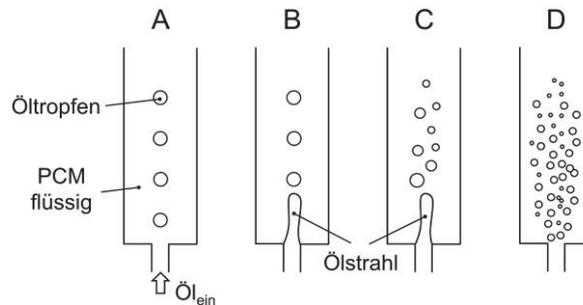


Abbildung 3-2: Strömungsverhalten des Wärmeträgerfluids im Speicherbehälter in Abhängigkeit des Ölmassestroms; eigene Darstellung nach [82]

Abbildung 3-2 zeigt folgende Zustände:

- A) Bildung von Einzeltröpfen aus der Öleintrittsöffnung
- B) Bildung eines Ölstrahls mit anschließendem Abriss des Strahls und anschließender Bildung von Einzeltröpfen
- C) Bildung eines Ölstrahls mit anschließendem Abriss des Strahls und anschließender Bildung von mehreren Einzeltröpfen
- D) Zerstäubung des Öls an der Eintrittsöffnung und Bildung einer Emulsion aus Wärmeübertragungsmedium und Wärmeträgerfluid

Wird bei konstanter Öleintrittsöffnung der Ölmassestrom sehr stark erhöht, bildet sich Zustand D) aus. Dieser Zustand ist zu vermeiden. Durch die Bildung der Emulsion findet keine ausreichende Trennung der beiden Phasen statt, was zu einem Wassermitriss in den Ölkreislauf führt. Zustand C) ist anzustreben. Hier liegt der größte Ölmassestrom (bei konstantem Durchmesser der Öleintrittsöffnung) vor. Es bildet sich die maximal mögliche Wärmeübertragungsfläche zwischen Öl und PCM aus. Des Weiteren wird die Phasengrenze PCM / Öl oberhalb der PCM-Schicht betrachtet. Hierbei ist ersichtlich, dass sich eine Schicht aus Öltropfen mit Wasserfilm bildet. Die einzelnen Tropfen koaleszieren teilweise und bilden größere Tropfen. Diese Schicht wächst mit steigendem Ölmassestrom an und kann letztlich ebenfalls zu einem Mittriss von Wasser in den Ölkreislauf führen. Im Anschluss wird mit Natriumacetat-Trihydrat als PCM anhand der Ölein- und Ölaustrittstemperatur sowie der PCM-Temperatur der Speicher thermisch bilanziert. Hierbei fällt auf, dass während der Messungen kein isothermes Verhalten der Ölaustrittstemperatur ersichtlich ist.

In [83] bis [85] stellen Nomura et al. im Jahr 2013 ihre Untersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher vor, bei dem als PCM Erythritol ( $C_4H_{10}O_4$ ; Schmelzpunkt:  $118\text{ }^\circ\text{C}$ ) und als Wärmeträgerfluid ein Öl verwendet wird.

In [83] wird das Öl seitlich mittels einer Rohrleitung in den Speicherbehälter geleitet. Im Speicherbehälter an sich mündet die Rohrleitung in ein ringförmiges Rohr mit neun Öleintrittsöffnungen, durch die das Öl in den Speicher und letztlich dem PCM zugeführt wird. Der Speicherbehälter ist 1,0 m hoch und besitzt einen Innendurchmesser von 0,2 m. Um das Schmelzen des PCM beobachten zu können, sind zwei Schaugläser in der Speicherwandung implementiert. Grundlegend wird das Verhalten des Direktkontaktlatentwärmespeichers während des Schmelzens dargestellt und ein Schmelzmechanismus abgeleitet. Zu Beginn der Beladung strömt das Öl durch Kanäle innerhalb des PCM. Diese sind linear und durchziehen das komplette PCM von unten nach oben. Eine große wärmeübertragende Fläche liegt vor. Beginnt das PCM zu schmelzen, so verbreitern sich die Kanäle, was zu einer Reduzierung des Gegendrucks und zu einer bevorzugten Durchströmung einzelner verbreiteter Kanäle führt. Dies hat zum Nachteil, dass sich die wärmeübertragende Fläche reduziert. Letztlich ändert sich der wärmeübertragende Mechanismus. Zu Beginn ist das Öl im direkten Kontakt zu dem PCM. Mit fortlaufendem Schmelzen des PCM wird Energie vom Öl auf das sich im Speicher gebildete flüssige PCM übertragen und von dort auf das feste PCM. Dies geschieht so lange, bis das gesamte PCM aufgeschmolzen ist. Allerdings ist ersichtlich, dass die Messwerte und der dargestellte Schmelzvorgang nicht zusammenpassen. Die Messwerte der Temperatur innerhalb des PCM zeigen Totzonen, die auch als solche beschrieben werden. Im Modell sind diese Totzonen nicht ersichtlich. Außerdem wird untersucht, ob der Ölmassenstrom und die Eintrittstemperatur des Öls einen Einfluss auf die Speicherleistung besitzen.

In [84] wird der Einfluss der Höhe der PCM-Schicht auf die Speicherleistung während der Beladung untersucht. Der Speicherbehälter besitzt hierzu eine gesamte Höhe von 1,4 m und einen Innendurchmesser von 0,2 m. Die Ölzuführung wird von unten in den Speicherbehälter vorgenommen. Der Ölverteiler ist hierbei aus einem verzweigten Rohrsystem mit 18 Öleintrittsöffnungen gefertigt. Durch die Erhöhung der PCM-Schicht wird die Verweilzeit des Öls im PCM erhöht, was wiederum die Leistung des Speichers nur marginal verbessert.

In [85] wird die Kristallisation des verwendeten PCM untersucht und der Kristallisationsvorgang bildlich dargestellt. Außerdem wird der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient analog zu Fouda [76] während der Entladung ermittelt. Der Messaufbau ist analog zu [83]. Bei der Kristallisation führt das kalte, in den Speicherbehälter eingeleitete Öl zu einer Abkühlung des PCM. Im Anschluss bildet sich festes PCM um die Öltropfen, die dann platzen. Das feste PCM sinkt teilweise aufgrund der höheren Dichte im Vergleich zu dem flüssigen PCM auf den Boden des Speicherbehälters und teilweise verbleiben feste PCM-Partikel im flüssigen PCM und werden durch die vorliegende Strömung in einer Suspension gehalten. Die Schicht aus festen PCM-Partikeln am Boden des Speicherbehälters wächst im Anschluss von unten nach oben an, und es bildet sich eine Schicht mit vielen gleichmäßigen Kanälen. Die Darstellung des Schmelz- wie auch des Kristallisationsvorgangs ist allerdings zu hinterfragen, da sowohl in [83] als auch in [85] die Beobachtungen durch zwei kleine Öffnungen getätigt werden. Des Weiteren wird der Effekt des Volumenstroms und der PCM-Höhe auf die Leistung der Entladung untersucht und ein volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient ermittelt.

Die Ergebnisse zum ermittelten volumetrischen Wärmeübergangsbereich sind in Tabelle 3-2 in Abhängigkeit der Versuchsparameter der PCM-Höhe und des Ölvolumenstroms dargestellt und besitzen die Einheit W/L K.

Tabelle 3-2: volumetrische Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche PCM-Höhen bei unterschiedlichen Ölvolumenströmen

	PCM-Höhe 0,2 m	PCM-Höhe 0,4 m	PCM-Höhe 0,6 m
Ölvolumenstrom $2,50 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	6	3	2
Ölvolumenstrom $4,71 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	10	5	3
Ölvolumenstrom $5,83 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$	14	7	5

Bei den Messergebnissen ist ersichtlich, dass mit steigendem Ölvolumenstrom der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient ebenfalls ansteigt. Außerdem ist ersichtlich, dass der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient mit steigender PCM-Höhe abnimmt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass aufgrund der guten Wärmeübertragung zwischen Öl und PCM im Direktkontaktlatentwärmespeicher sich das eingeleitete kalte Öl schnell erwärmt und nach kurzer Strecke innerhalb des PCM näherungsweise die PCM-Temperatur erreicht. Es wird gezeigt, dass hierfür bereits eine PCM-Höhe von 0,2m ausreichend ist. Wird nun die PCM-Höhe beispielsweise auf 0,4 m vergrößert, so stellt die zusätzliche PCM-Schicht von 0,2 m eine „nutzlose“ PCM-Schicht dar. Wird der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient nach Gleichung (39) berechnet, führt die Verdopplung der PCM-Höhe zu einer Verdopplung des PCM-Volumens und dadurch zu einer Halbierung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten.

Im Jahr 2014 publizieren Wang et al. [30] ihre Untersuchungen zu einem transportablen Direktkontaktlatentwärmespeicher analog zu Kaizawa et al. [80]. Ebenfalls wird Erythritol ( $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}_4$ ; Schmelzpunkt:  $118 \text{ }^\circ\text{C}$ ) als PCM und ein Öl als Wärmeträgerfluid eingesetzt. Als Speicherbehälter ist ein liegender Zylinder mit einem Durchmesser von 0,8 m und einer Länge von 0,2 m ausgewählt worden. Zur Observierung des Schmelz- und des Kristallisationsvorgangs des PCM ist die Front des Zylinders aus einem durchsichtigen Kunststoff gefertigt. Die Zuführung des Öls wird über zwei Leitungen im unteren und eine Leitung im mittleren Teil des Speichers sichergestellt. Hierbei besitzen die beiden unteren Ölzuführungen je fünf und die mittig platzierte Ölzuführung drei nach unten gerichtete Öleintrittsöffnungen. Um den Vorteil des Direktkontaktverfahrens darzustellen, ist zusätzlich ein Speicherbehälter aufgebaut worden, bei dem das PCM im indirekten Kontakt mit dem Wärmeträgerfluid steht. Hierbei besitzt der liegende Zylinder einen Durchmesser von 0,38 m und eine Länge von 0,65 m. Innerhalb des PCM befinden sich 9 Kupferrohre mit einem Außendurchmesser von 25 mm und einer Wandstärke von 1,5 mm. Im Vergleich zeigt der Direktkontaktlatentwärmespeicher gegenüber einem Latentwärmespeicher im indirekten Kontakt deutlich schnellere Be- und Entladezeiten, was auf

eine höhere Be- bzw. Entladeleistung und eine größere wärmeübertragende Fläche zurückzuführen ist. Gleichzeitig zeigen sich starke Leistungseinbußen im Direktkontaktlatentwärmespeicher aufgrund von Bereichen innerhalb des PCM, welche nicht von Öl durchströmt werden (analog zu [80]). Ebenfalls wird ein Blockieren der Öleintrittsöffnungen von PCM berichtet, was zu Beginn der Beladung die Leistung stark reduziert. Die Ergebnisse sind ebenfalls analog zu [80].

In [86] wird von Guo et al. im Jahr 2015 ein Lösungsansatz vorgestellt, um die Bildung von Totzonen im PCM, wie in [30] beschrieben, zu unterbinden und somit die Speicherleistung zu erhöhen. Hierbei wird vorgeschlagen, innerhalb des Speichers aus [30] eine elektrische Zusatzheizung in Form von metallischen Stabheizelementen zu implementieren. Diese sollen zu Beginn des Schmelzvorgangs schnell Kanäle erzeugen, welche von Öl durchflossen werden.

In [87] und [88] veröffentlichen Horibe et al. 2015 bzw. Naing et al. 2017 ihre Untersuchungen zu Direktkontaktlatentwärmespeichern, welche optimiert sind, den PCM-Mitriss zu reduzieren. Als PCM wird in [87] Erythritol ( $C_4H_{10}O_4$ ; Schmelzpunkt:  $118\text{ °C}$ ) und als Wärmeträgerfluid ein Silikonöl verwendet. In [88] wird eine Mischung bestehend aus Mannit ( $C_6H_{14}O_6$ ; Schmelzpunkt:  $168\text{ °C}$ ) und Erythritol ( $C_4H_{10}O_4$ ; Schmelzpunkt:  $118\text{ °C}$ ) mit zwei Schmelzpunkten von  $103\text{ °C}$  bzw.  $151\text{ °C}$  als PCM und ein Öl als Wärmeträgerfluid verwendet. Es werden in den Speicherbehälter Metallgitter oder Metallschwämme implementiert. Der Mitriss wird dadurch erzeugt, dass sich an der Grenzfläche PCM / Öl oberhalb der PCM-Schicht eine Zwischenschicht aus Öltröpfen mit einer PCM-Hülle bildet, welche im Verlauf der Messung ansteigt. Diese Schicht kann letztlich so weit ansteigen, dass das Öl mit PCM-Hülle aus dem Speicherbehälter gefördert wird. Es wird die Auswirkung der Gitter und Schwämme auf den Wärmeübergang untersucht und entsprechend die Be- und Entladeleistung ermittelt. In [87] und [88] kann gezeigt werden, dass das Anwachsen der Zwischenschicht aus Öltröpfen mit einer PCM-Hülle durch die Metallgitter bzw. Metallschwämme reduziert wird. Außerdem bewirkt das Einbringen der metallischen Struktur in den Speicherbehälter eine verbesserte Wärmeleitung innerhalb des PCM. Dadurch schmilzt das PCM schneller.

Tabelle 3-3 zeigt eine Zusammenfassung der aufgeführten Literatur zu Direktkontaktlatentwärmespeichern. Neben dem Autor und dem Publikationsjahr werden weitere Informationen zu dem PCM mit seinem Schmelzpunkt (Smp.) und dem Wärmeträgerfluid angegeben. Außerdem werden eine Kurzbeschreibung der durchgeführten Untersuchung bzw. wichtige Zusatzinformationen angegeben.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Literatur zu Direktkontaktlatentwärmespeichern

Lit. Nr.	Autor / Jahr	PCM (Smp.)	WTF	Bemerkung
[56]	Etherington, Schenectady / 1957	$Na_2HPO_4 \cdot 12 H_2O$ ( $36\text{ °C}$ )	Mineralöl	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Erstes Direktkontaktverfahren.

[70]	Edie, et. al. / 1976	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ (36 °C)	Marcol (Weißöl)	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Große Studie zu geeigneten WTF's. Quantifizierung des PCM-Mittriss.
[71]	Edie, et. al. /1977	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ (36 °C)	Varsol (Benzin)	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten.
[72]	Costello, et. al. /1978	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (32 °C), $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ (35 °C), $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ (30 °C)	Varsol (Benzin)	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten bei unterschiedlichen Speicherkonfigurationen. Einführung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten.
[73]	Hallett / 1979	$\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ (58 °C)	Kerosin	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten.
[74]	Fouda, et. al / 1980	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (32 °C)	Nicht mit PCM mischbares Fluid	Theoretische Beschreibung des Direktkontaktverfahrens.
[75]	Lindner, Scheunemann / 1983	PCM mit fest/flüssig-Phasenwechsel	Eine Flüssigkeit	Erste patentierte Bauformen eines Direktkontaktlatentwärmespeichers.
[76]	Fouda, et. al / 1984	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (33 °C)	Varsol (Benzin)	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten bei unterschiedlichen Speicherkonfigurationen. Quantifizierung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten.
[77]	Farid, Yacoub / 1989	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (32 °C), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (33 °C), $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ (36 °C)	Kerosin	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Quantifizierung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten.
[78]	Inaba, Sato / 1996	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ (5,8 °C)	Tetradecan (5,8 °C)	Direktkontaktverfahren, wo das WTF in kaltes Wasser eingeleitet wird und dann kristallisiert. Grundlegende Untersuchung zur Machbarkeit dieses Verfahrens.
[79]	Kiatsiriroat, et. al. / 2000	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ (48 °C)	Öl	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Quantifizierung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten.

[80]	Kaizawa, et. al. / 2008	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Öl	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Speicherbehälter ist ein liegender Zylinder. Speicher als Aufbau für einen LKW.
[81]	Martin, et. al. / 2010	Paraffin (7 °C)	Wasser	Direktkontaktverfahren, wo das PCM eine geringere Dichte als das WTF aufweist. Daher Einleitung des WTFs von oben. Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten.
[82]	Nogami et. al. / 2010	$C_2H_3NaO_2 \cdot 3 H_2O$ (58 °C), Wasser (0 °C)	Öl	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Untersuchungen zum Strömungsverhalten des WTFs
[83]	Nomura, et. al. / 2013	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Öl	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten.
[84]	Nomura, et. al. / 2013	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Öl	Untersuchungen zum Schmelzverhalten bei unterschiedlichen PCM-Höhen.
[85]	Nomura, et. al. / 2013	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Öl	Untersuchungen zum Kristallisationsverhalten bei unterschiedlichen PCM-Höhen. Quantifizierung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten.
[30]	Wang, et. al. / 2014	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Öl	Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten. Speicherbehälter ist ein liegender Zylinder. Speicher als Aufbau für einen LKW. Vergleich mit indirektem Verfahren.
[86]	Guo, et. al. / 2015	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Öl	Optimierung des Direktkontaktverfahrens: Lösungsansätze um Verstopfen des Speicherbehälters zu unterbinden.
[87]	Horibe, et. al. / 2015	$C_4H_{10}O_4$ (118 °C)	Siliconöl	Direktkontaktverfahren mit Einbauten im Speicherbehälter zur Reduzierung von PCM-Mittriss. Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten.
[88]	Naing et. al. / 2017	Mischung aus $C_4H_{10}O_4$ und $C_6H_{14}O_6$ (103 °C und 151 °C)	Öl	Direktkontaktverfahren mit Einbauten im Speicherbehälter zur Reduzierung von PCM-Mittriss. Untersuchungen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten.

---

#### 3.2 Differenzierung des Standes des Wissens zu der vorliegenden Arbeit

In der Literatur wird gezeigt, dass das Direktkontaktverfahren grundlegend geeignet ist, um ein Salzhydrat als PCM als Speichermedium zur Speicherung von thermischer Energie trotz bekannter Nachteile zu verwenden. Speziell zur Auslegung eines Direktkontaktlatentwärmespeichers ist es erforderlich, im Speicherbehälter Wärmeübergangskoeffizienten und wärmeübertragende Flächen zu ermitteln bzw. zu kennen. Außerdem ist es erforderlich, ein Kenntnis über den vorliegenden Schmelz- und Kristallisationsvorgang zu besitzen, um ein tiefergehendes Verständnis von der direkten Wärmeübertragung zu erhalten. Eine Auslegung wie in [81] hat gezeigt, dass angenommene Übertragungsflächen und flächenbezogene Wärmeübergangskoeffizienten nicht zu einer erfolgreichen Auslegung eines solchen Speichertyps dienen. Starker PCM-Mittriss aus dem Speicherbehälter in den Wärmeträgerfluidkreislauf war die Folge. In [72], [76], [77], [79] und [85] wird der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient experimentell während des Schmelz- und / oder des Kristallisationsvorgangs ermittelt. Dieser wird herangezogen, da aufgrund der Bildung einer festen PCM-Schicht an der Speicherwandung die Ermittlung einer Übertragungsfläche nicht möglich ist. Allerdings wird in [72] ausführlich beschrieben, dass die ermittelten volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten nicht ausreichend den Wärmeübergang während des gesamten Kristallisationsvorgangs aufgrund der dargestellten Messproblematik während der Bildung von festen PCM-Partikeln beschreiben. Lediglich in den ersten Minuten des Kristallisationsvorgangs, wenn noch kein festes PCM vorliegt, kann der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient zur Beschreibung der Wärmeübergänge zwischen flüssigem PCM und Wärmeträgerfluid herangezogen werden. Letztlich sind die ermittelten volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten daher nicht für eine Auslegung eines solchen Speichersystems geeignet. Die gesamte Literatur beschäftigt sich zum einen mit der Machbarkeit des Direktkontaktverfahrens, und zum anderen werden unterschiedliche Einflussfaktoren wie z.B. der Wärmeträgerfluidmassenstrom herausgearbeitet und ihr Einfluss auf gewählte Zielgrößen wie z.B. die Speicherleistung untersucht. Eine Ermittlung von wärmeübertragenden Flächen sowohl beim Schmelz- als auch beim Kristallisationsvorgang sowie eine Ermittlung von flächenbezogenen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen PCM und Wärmeträgerfluid sind in der Literatur nicht bekannt. Außerdem gibt es in der Literatur nur rudimentäre Beschreibungen zum Schmelz-[83] und Kristallisationsvorgang [85] des PCM in einem Direktkontaktlatentwärmespeicher.

Um den Kenntnisstand über Direktkontaktlatentwärmespeicher zu erweitern, wird eine Laboranlage mit einem Speicherbehälter, welche lediglich eine WTF-Eintrittsöffnung besitzt, betrachtet und eine komplette Aufklärung der im System vorliegenden wärmeübertragenden Flächen dargestellt. Außerdem werden die Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche Speicherzustände ermittelt. Hierzu wird eine auf diesem Gebiet neuartige Messtechnik zur optischen Temperaturmessung eingesetzt, welche es erlaubt, mit hoher Messrate Temperaturen zu erfassen. [89] Hierbei wird die vom Öl emittierte Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  detektiert. Dies ist besonders bei der Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten von Bedeutung, bei der die Oberflächentemperatur eines aufsteigenden Öltropfens im flüssigen PCM vermessen werden muss. Im Anschluss wird eine Technikumsanlage aufgebaut, bei

der der Speicherbehälter 18 WTF-Eintrittsöffnungen besitzt, um anhand der bis dato gewonnenen Daten aus der Laboranlage eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zu untersuchen und mögliche Randeinflüsse zu identifizieren.

Des Weiteren wird in der vorliegenden Arbeit eine, in der Literatur bisher nicht bekannte, detaillierte Beschreibung des PCM während des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs durch Beobachtungen dargestellt und mit den Messdaten aus allen Messverfahren wie z. B. der Computertomographie ergänzt. Dadurch ergeben sich zusätzliche Informationen zu Wärmeübergang und wärmeübertragenden Flächen.

Durch die detaillierte Beschreibung des PCM während des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs vereint mit entsprechenden charakteristischen Daten wie den wärmeübertragenden Flächen und der Wärmeübergangskoeffizienten wird ein tiefergehendes Verständnis des direkten Wärmeübergangs angestrebt, um somit die Auslegung beliebig großer Speicher zu vereinfachen.

## 4 Versuchsaufbau und Messmethode

Im vorliegenden Abschnitt werden der Versuchsaufbau und entsprechende Messmethoden zur experimentellen Ermittlung der im Direktkontaktlatentwärmespeicher vorliegenden wärmeübertragenden Flächen und der Wärmeübergangskoeffizienten aufgezeigt.

### 4.1 Teststand

In Abbildung 4-1 ist das Fließschema des verwendeten experimentellen Aufbaus dargestellt. Die Anlage besteht aus einem Ölvorlagebehälter (A), einer elektrischen Zahnradpumpe (B), zwei Wärmeübertragern (C), (D) und dem Speicherbehälter (E). Ebenfalls ist ein Bypass (F) zur Temperierung der Anlage vorhanden. Der Speicherbehälter besteht aus Polycarbonat und besitzt eine Höhe von 350 mm und einen Innendurchmesser von 40 mm bei einer Wandstärke von 5 mm. Bei einer Füllhöhe des PCM von ca. 300 mm (PCM flüssig) befindet sich demnach eine PCM-Masse von 0,598 kg innerhalb des Speicherbehälters. Zusätzlich ist es möglich, einen Kanal mit definiertem Durchmesser innerhalb des PCM zu erzeugen.

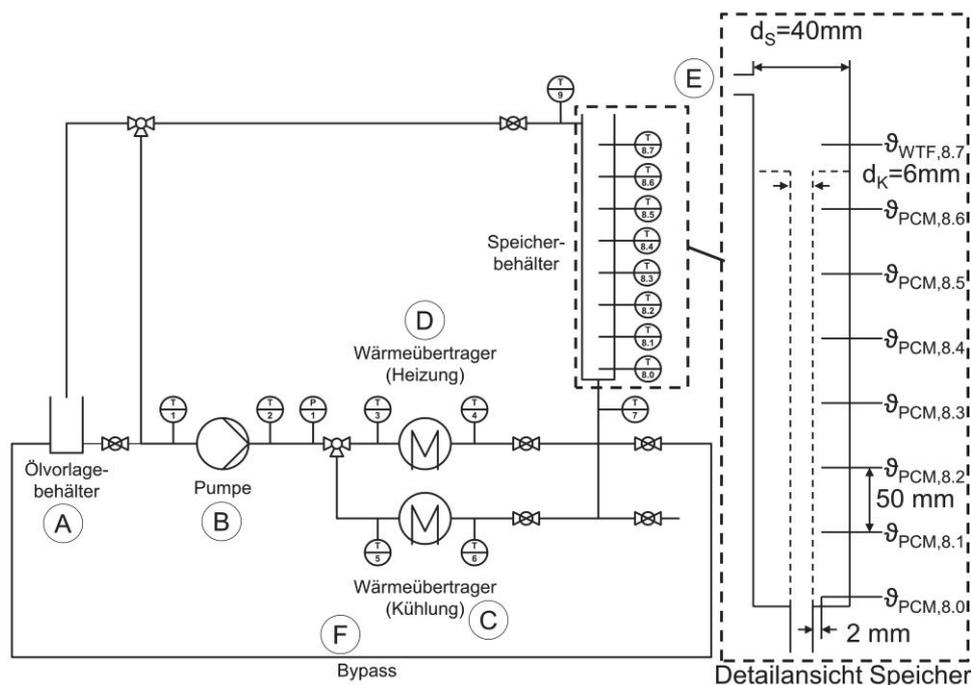


Abbildung 4-1: Fließschema des verwendeten experimentellen Aufbaus mit Ölvorlagebehälter (A), Zahnradpumpe (B), Wärmeübertrager (C), (D), Speicherbehälter (E), Bypass (F). Im Detail ist in einer Vergrößerung der Speicherbehälter dargestellt (gestrichelter Kasten)

Das erwärmte oder gekühlte WTF wird von der Pumpe in den unteren Teil des Speicherbehälters geleitet. Dort befindet sich eine WTF-Austrittsöffnung. Hierbei ist der Durchmesser entsprechend von Vorversuchen und der Literatur gewählt worden, um eine maximale Leistungs-

fähigkeit des Speichers zu erlangen. Wie in [82] dargestellt, entsteht bei kleinen WTF-Austrittsöffnungen (1 und 2 mm) bereits bei geringen und mittleren Volumenströmen des WTFs ( $1,97 \cdot 10^{-6}$  bzw.  $2,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ) eine Emulsion (siehe Abbildung 3-2 D) zwischen WTF und PCM. Diese Emulsion besitzt eine ausreichende Stabilität, sodass das PCM aus dem Speicherbehälter gefördert wird. Eine Trennung von WTF und PCM ist nicht mehr gegeben. Mit der Laboranlage werden auch Untersuchungen an einzelnen WTF-Tropfen aufsteigend im flüssigen PCM durchgeführt. Diese Einzeltropfen lassen sich dadurch erzeugen, dass der WTF-Massenstrom entsprechend reduziert wird. [82] Bei einer zu großen WTF-Eintrittsöffnung besteht hier allerdings die Gefahr des Zurücklaufens des flüssigen PCM in die Zuleitung des WTFs bzw. in die gesamte Anlage. Der optimale Durchmesser der Austrittsöffnung beträgt 6 mm. Bei diesem Durchmesser können sowohl geringe WTF-Massenströme, welche Einzeltropfen zur Folge haben (siehe Abbildung 3-2 A), als auch hohe WTF-Massenströme gefahren werden, die zu großen Be- bzw. Entladeleistungen des Speichers führen, ohne dass sich eine Emulsion zwischen PCM und WTF, sondern der angestrebte Zustand aus Abbildung 3-2 C bildet. Zur Erfassung der PCM-Temperaturen sind sieben Thermoelemente (Typ K, Genauigkeitsklasse 2) im Speicherbehälter implementiert.

Die genaue Anordnung der Thermoelemente innerhalb des Speicherbehälters ist in Abbildung 4-1 dargestellt und entsprechend von 8.0 bis 8.6 nummeriert. Die Temperaturmessungen des PCM an den Stellen 8.0 und 8.6 werden nicht für eine Auswertung der Messdaten in Betracht gezogen, da hier die umgebenden thermischen Einflüsse zu groß sind. Des Weiteren ist ein Thermoelement (Typ K) zur Erfassung der WTF-Temperatur im Speicherbehälter verbaut. Zur Erfassung des WTF-Massenstroms wird der bekannte Zusammenhang zwischen Pumpendrehzahl und Massenstrom herangezogen. Hierfür ist unter Messbedingungen die entsprechende Abhängigkeit zwischen pumpenspezifischer Geschwindigkeitsangabe und WTF-Massenstrom aufgenommen worden. Zur Vortemperierung der Anlage kann der WTF-Strom über einen Bypass (F) im Kreis gefördert werden. Hierbei wird der WTF-Strom nicht durch den Speicherbehälter gefördert. Um die Temperaturmessdaten zu erfassen, ist hierfür ein Labview-Programm erstellt worden.

### 4.2 Material

Grundlegend für einen Direktkontaktlatentwärmespeicher ist es, dass ein ausreichender Dichteunterschied zwischen PCM und WTF besteht. Außerdem ist es erforderlich, dass das WTF und das PCM nicht mischbar sind. [81] Wird ein Salzhydrat als PCM verwendet, so eignet sich als WTF ein Öl. [23] Als PCM wird, wie bereits beschrieben, eine eutektische Mischung aus den beiden Salzhydraten Magnesiumnitrat-Hexahydrat und Magnesiumchlorid-Hexahydrat verwendet, wobei die Zusammensetzung aus 58,7 Massenprozent Magnesiumnitrat-Hexahydrat und 41,3 Massenprozent Magnesiumchlorid-Hexahydrat besteht und einen Schmelzpunkt von  $59 \text{ }^\circ\text{C}$  aufweist. [22] Die Einzelstoffe der PCM-Mischung sind für Mensch und Umwelt unbedenklich [90], [91] und die Mischung ist preisgünstig in technischer Qualität für  $0,62 \text{ €/kg}$  zu erhalten. [92] Als WTF wird das Mineralöl Fragoltherm Q-7 der Firma Fragol verwendet, welches speziell für Heiz- und Kühlanwendung verfahrenstechnischer Anlagen konzipiert ist.

Ein wichtiges Auswahlkriterium für das Öl ist außerdem die dynamische Viskosität bei der Temperatur, bei der das Öl während der Kristallisation eingeleitet wird, da nach [70] eine dynamische Viskosität größer 4 bis 5 cp den Mittriss von PCM stark fördert. Die dynamische Viskosität des gewählten Mineralöls beträgt während des Schmelzens 2,83 mPa s ( $\vartheta_{\text{Öl,ein}} = 70 \text{ °C}$ ) und bei der Kristallisation 4,51 mPa s ( $\vartheta_{\text{Öl,ein}} = 50 \text{ °C}$ ). Daher ist davon auszugehen, dass das verwendete Öl den PCM-Mittriss nicht fördert. Auch das verwendete Öl ist für Mensch und Umwelt unbedenklich. [93]

Tabelle 4-1 zeigt charakteristische Stoffdaten des verwendeten Mineralöls und des PCM. Die temperaturabhängigen Stoffdaten zu dem Mineralöl finden sich im Anhang 1.

Tabelle 4-1: Charakteristische Kenndaten des PCM und des Mineralöls

	PCM	Mineralöl
Schmelzpunkt [°C]	59 [94]	<-40 °C [95]
Enthalpie [kJ/kg]	132,2 [94]	nicht relevant
Wärmekapazität, fest [kJ/kg K]	1,86 (40 °C) [94]	nicht relevant
Wärmekapazität, flüssig [kJ/kg K]	2,42 (70 °C) [94]	2,221 (60 °C) [95]
Wärmeleitfähigkeit, fest [W/m K]	0,678 (53 °C) [94]	nicht relevant
Wärmeleitfähigkeit, flüssig [W/m K]	0,510 (65 °C) [94]	0,124 (60 °C) [95]
Dichte, flüssig [kg/m <sup>3</sup> ]	1550 [94]	803 (60 °C) [95]
Dichte, fest [kg/m <sup>3</sup> ]	1630 [94]	nicht relevant
dynamische Viskosität, flüssig [mPa s]	35,0 (62,5 °C) [96]	4,51 (50 °C) [95]

Das PCM eignet sich mit seinem Schmelzpunkt von 59 °C sehr gut als Wärmespeichermedium zur Speicherung von thermischer Energie aus Solarthermie [27] und zur Speicherung von industrieller Abwärme [97].

Um eine bessere Kontrastierung des Öls zu erhalten und damit die Phasengrenze zwischen flüssigem PCM und Öl zu verdeutlichen, wird ein öllöslicher Farbstoff verwendet. Hierfür ist der Sudanfarbstoff Sudanrot G verwendet worden, welcher der Klasse der Azo-Farbstoffe zuzuordnen ist. Anwendung finden die Sudanrotfarbstoffe beim Einfärben von Mineralölprodukten, speziell Sudan I. Da sowohl die Farbstoffe Sudan I-IV als auch der Farbstoff Sudanrot 7B als Cancerogene der Kategorie 3 eingestuft sind, ist der unbedenkliche Sudanfarbstoff Sudanrot G gewählt worden. [98], [99]

Abbildung 4-2 A zeigt flüssiges PCM und aufschwimmend das Öl. In Abbildung 4-2 B sind das flüssige PCM und das eingefärbte Öl dargestellt.

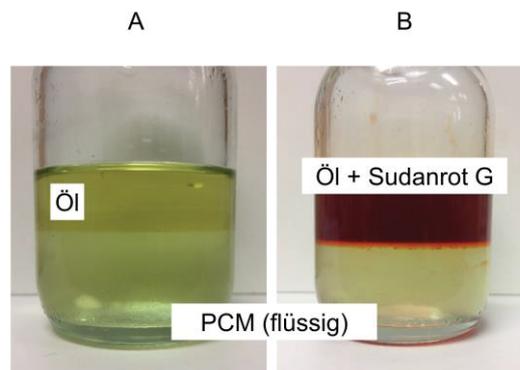


Abbildung 4-2: Öl nicht eingefärbt (A) und Öl mit Sudanrot G eingefärbt (B) im Vergleich zu flüssigem PCM

Um Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln, ist es erforderlich, die Temperatur der Ölphase zu messen. Hierzu wird die emittierte Strahlung des Öls in einem Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  gemessen. Hierbei ist es wichtig, die Transmission des Öls und des PCM für den betrachteten Wellenlängenbereich zu kennen. Hierdurch wird geklärt, ob und wie stark Umgebungsstrahlung das eigentliche Messsignal beeinflusst. Abbildung 4-3 A zeigt für unterschiedliche Schichtdicken des Öls die Transmission in Abhängigkeit der Wellenlänge ohne Farbstoff, und in Abbildung 4-3 B ist die Transmission in Abhängigkeit der Wellenlänge mit Farbstoff zu sehen. Die Farbstoffkonzentration beträgt hierbei 0,57 mg Sudanrot G / g Öl. Diese Konzentration ist beliebig gewählt und gewährleistet eine gute Kontrastierung der beiden Phasen PCM und Öl.

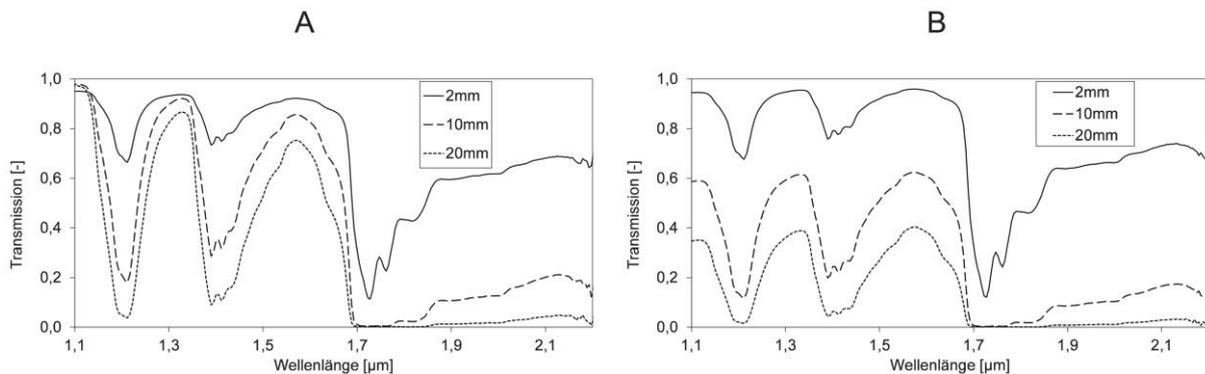


Abbildung 4-3: Transmissionsspektren von Öl (A) und Öl + Farbstoff (B) für unterschiedliche Schichtdicken in Abhängigkeit der Wellenlänge

In Abbildung 4-3 A und B ist zu sehen, dass je geringer die Schichtdicke des Öls ist, desto größer ist die Transmission. Außerdem ist ersichtlich, dass der Farbstoff speziell im Wellenlängenbereich zwischen 1,1 und 1,7  $\mu\text{m}$  die Transmissionseigenschaften des Öls verändert. Im Wellenlängenbereich von 1,7 bis 2,2  $\mu\text{m}$  ist keine nennenswerte Abweichung der Transmission mit und ohne Farbstoff zu erkennen. Der Einfluss des Farbstoffs sowie die hohen Transmissionen im Wellenlängenbereich von 1,1 bis 1,7  $\mu\text{m}$  sind vernachlässigbar, da nach Gleichung (23) der Strahlungsanteil der vom Öl emittierten spezifischen Ausstrahlung im Wellenlängenbereich von 1,1  $\mu\text{m}$  bis 1,7  $\mu\text{m}$  lediglich 0,46 % bei einer Temperatur von 40 °C und 0,66 % bei einer Temperatur von 70 °C von der gesamt emittierten spezifischen Ausstrahlung im Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  beträgt. Hierbei wird das Öl als Schwarzer Strahler betrachtet, da der Emissionsgrad im kurzwelligen Infrarotbereich 0,87 [100] beträgt und somit näherungsweise gleich 1 ist und demnach dem des Schwarzen Strahlers entspricht. Bei kleinen Ölschichtdicken ist zu beachten, dass die Transmission im relevanten Wellenlängenbereich von 1,7 bis 2,2  $\mu\text{m}$  größer null ist.

Abbildung 4-4 zeigt die Transmission des PCM im flüssigen und festen Zustand für eine Schichtdicke von 20 mm in Abhängigkeit der Wellenlänge.

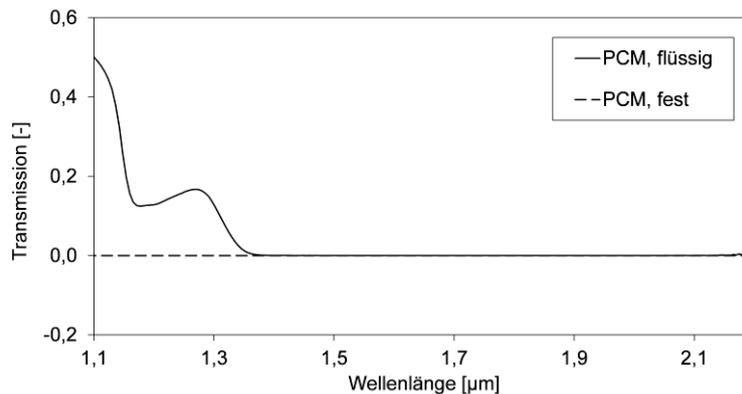


Abbildung 4-4: Transmissionsspektren von PCM (flüssig, fest) für eine Schichtdicke von 20 mm in Abhängigkeit der Wellenlänge

Abbildung 4-4 zeigt, dass bei einer Schichtdicke von 20 mm das feste PCM für die Strahlung im betrachteten Wellenlängenbereich keinerlei Durchlässigkeit aufweist (Transmission gleich null). Das flüssige PCM besitzt für die identische Schichtdicke von 20 mm ab einer Wellenlänge von ca. 1,35  $\mu\text{m}$  ebenfalls eine Transmission von null.

### 4.3 Messmethode

#### 4.3.1 Infrarot-Messtechnik zur Temperaturmessung

Zur Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten ist eine Temperaturmessung der im PCM aufsteigenden Ölphase und des PCM erforderlich. Es ist eine Messtechnik mit hoher Messrate

nötig, um auch beim Aufsteigen von einzelnen Öltropfen im flüssigen PCM ein Temperaturprofil des Öltropfens in Strömungsrichtung bzw. einen Temperaturgradienten zwischen Oberflächentemperatur des Öltropfens und des PCM zu erhalten und so Wärmeübergangskoeffizienten berechnen zu können. Hierzu wird die Öl- und PCM-Temperatur über die vom Öl bzw. dem PCM emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  ermittelt. Die Strahlung bzw. die Photonen werden mittels einer Glasfaser (FG910LEC-0.22 NA, 910  $\mu\text{m}$  Core Multimode Optical Fiber, Low-OH for 400-2200 nm, TECS Double Clad, Thorlabs) mit einem Durchmesser von 910  $\mu\text{m}$  zu dem Detektor geleitet. Als Detektor wird eine Indiumgalliumarsenid (InGaAs) extended Photodiode der Firma Laser Components GmbH (IG22-Serie) verwendet.

Die auf den Detektor auftreffenden Photonen werden entsprechend in eine Spannung umgewandelt. Es folgt ein Operationsverstärker, der das Signal um den Faktor 20 verstärkt. Der D/A-Wandler setzt das analoge Signal in ein digitales um und leitet dieses im Anschluss an den PC. Hier wird die zeitliche Emission [Counts] aufgezeichnet. In Abbildung 4-5 ist der Aufbau des am Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme entwickelten Messgerätes dargestellt. Mittels des gezeigten Aufbaus ist es möglich, 2000 unabhängige Temperaturmesswerte pro Sekunde zu detektieren, was eine ausreichend hohe Geschwindigkeit darstellt, um auch bei aufsteigenden Öltropfen ausreichende Informationen über das vorliegende Temperaturprofil des Tropfens in Strömungsrichtung bzw. des Temperaturgradienten zwischen Oberflächentemperatur des Öltropfens und des PCM zu erhalten.

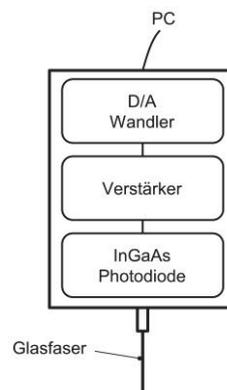


Abbildung 4-5: Aufbau des Messgeräts zur Erfassung von Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$

Zur Erfassung der Öl- und der PCM-Temperatur ist es erforderlich, das verwendete Messsystem zu kalibrieren bzw. die gemessene Emission der vom Öl bzw. dem PCM emittierten Strahlung als Funktion der Temperatur darzustellen. Hierfür werden die Glasfaser und ein Thermoelement gekoppelt und in den Ölkanal in den Speicherbehälter geführt. Schrittweise wird die Öltemperatur im Kanal erhöht und die Temperatur und die entsprechende Emission erfasst. Für PCM wird die identische Messung in einem separaten Behältnis durchgeführt, wobei die Glasfaser sich innerhalb des PCM befindet. Abbildung 4-6 zeigt die Emission der vom Öl und PCM emit-

tierten Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 1,1 und 2,2  $\mu\text{m}$  als Funktion der Temperatur. Hierbei ist die Ölschichtdicke mit ca. 50 mm ausreichend groß, sodass lediglich die Öltemperatur ermittelt wird, da die Transmission der vorliegenden Ölschicht bei null liegt. Bei dem PCM beträgt die Schichtdicke ca. 20 mm. Auch hier ist die PCM-Schicht so groß, dass lediglich die vom PCM emittierte Strahlung, aufgrund der Transmission von null, detektiert wird.

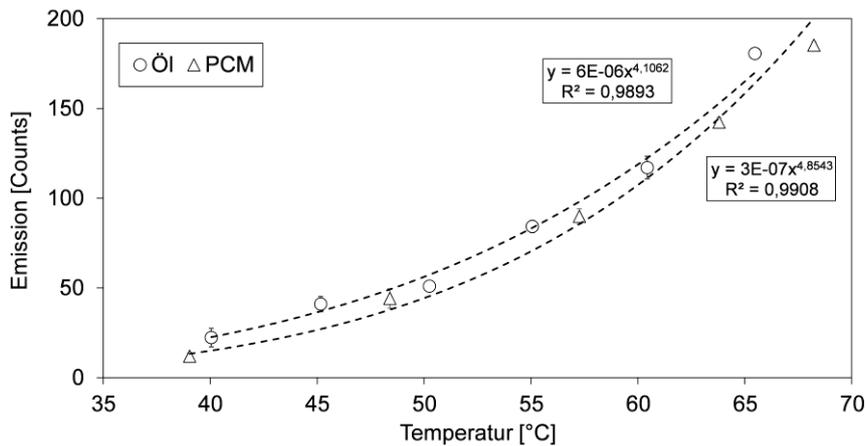


Abbildung 4-6: Emission der vom Öl / PCM emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  in Abhängigkeit der Temperatur

Die in Abbildung 4-6 dargestellte Funktion erlaubt es, jeder gemessenen Emission einen entsprechenden Temperaturwert zuzuordnen. Auch hier ist zu untersuchen, ob und in welcher Weise der dem Öl zugesetzte Farbstoff Sudanrot G die Emission der Wärmestrahlung im betrachteten Wellenlängenbereich beeinflusst. Abbildung 4-7 zeigt die Emission der emittierten Strahlung des Öls im Wellenlängenbereich zwischen 1,1 und 2,2  $\mu\text{m}$  als Funktion der Öltemperatur mit und ohne Farbstoff.

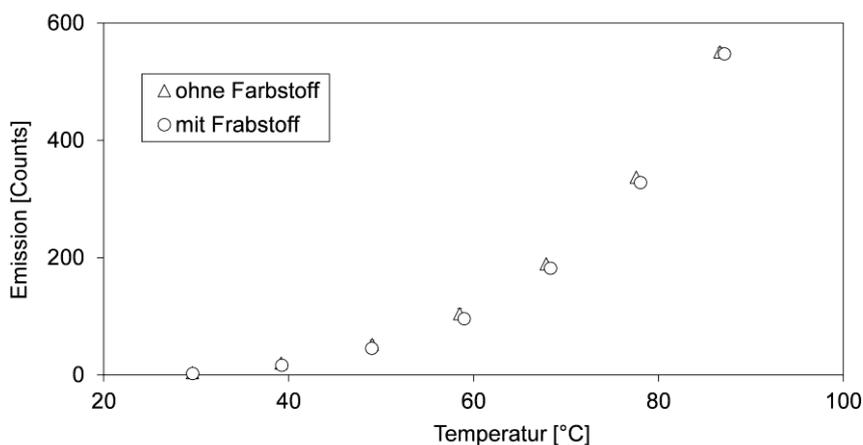


Abbildung 4-7: Emission der vom Öl emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2  $\mu\text{m}$  in Abhängigkeit der Temperatur, Vergleich mit und ohne Farbstoff Sudanrot G

Wie Abbildung 4-7 zeigt, wird die Emission der vom Öl emittierten Strahlung im Messbereich zwischen 1,1 und 2,2  $\mu\text{m}$  nicht durch den Farbstoff beeinflusst.

### 4.3.2 Computertomographie (CT)

Um im kristallisierten Zustand des PCM eine Aussage über die Struktur und letztlich über die wärmeübertragende Fläche des gebildeten Kanals machen zu können, wird hierzu der gesamte Speicherbehälter mittels Röntgen-Computertomographie untersucht. Dies ist erforderlich, da sich im Inneren des PCM eine Kanalstruktur während der Kristallisation ausbildet, welche im komplett auskristallisierten PCM von außen nicht ersichtlich ist. Hierzu wird der Computertomograf XT H 225 ST der Firma Nikon verwendet. Die Röntgenstrahlung wird hierbei mittels einer Drehanodenröhre mit einer maximalen Beschleunigungsspannung von 225 kV erzeugt. Für die Messung des Speichersystems wird eine Beschleunigungsspannung von 120 kV und ein Röhrenstrom von 550  $\mu\text{A}$  verwendet. Die Röntgenquelle und der Detektor sind fest montiert. Der Speicher hingegen wird gedreht. Aufgrund seiner Abmessungen wird der Speicher in zwei Segmenten vermessen. Um den Speicher dreidimensional darzustellen, wird eine Reihe von zweidimensionalen Röntgenaufnahmen des sich um 360° drehenden Speichers gemacht. Um die dreidimensionale Ansicht des Speichers zu erhalten, werden im Anschluss die Bilder mit der Nikon-Rekonstruktionssoftware nach dem Feldkamp-Davis-Kress-Algorithmus rekonstruiert. [101] Aufgrund der Größe des Speichers ergibt sich eine bildliche Auflösung von 93  $\mu\text{m}$ . Abbildung 4-8 zeigt den Aufbau des CTs und entsprechend den Speicherbehälter als Probenkörper.

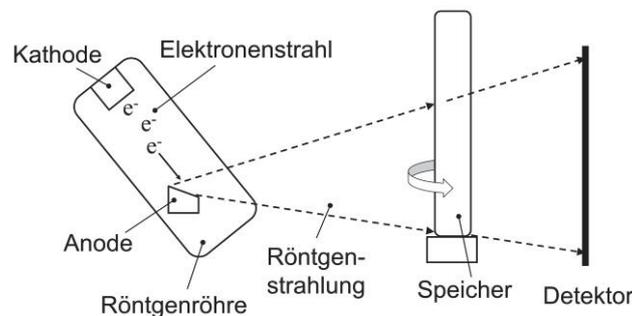


Abbildung 4-8: Aufbau Computertomograf XT H 225 ST mit Probenkörper

An der Kathode wird ein Elektronenstrahl erzeugt, welcher im Anschluss gerichtet und auf die Anode gelenkt wird. Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Anode werden die einzelnen Elektronen abrupt abgebremst, wobei Röntgenstrahlung entsteht. Die erzeugte Röntgenstrahlung tritt aus der Röntgenröhre aus und trifft auf den rotierenden Probenkörper, den Speicherbehälter. Hier findet eine Interaktion der Strahlung und des Speicherbehälters und des sich darin befindenden PCM bzw. Öls statt. Je nach Transmission der Röntgenstrahlung trifft im Anschluss ein entsprechend abgeschwächter Anteil der Strahlung auf den Detektor. Durch die-

ses Verfahren lassen sich die unterschiedlichen Bereiche im Speicher darstellen und eine Unterscheidung zwischen festem PCM und den im PCM vorliegenden Kanal, welcher mit Öl gefüllt ist, vornehmen. Die optische Auswertung erlaubt es letztlich, den Kanal darzustellen und die Oberfläche zu ermitteln. Diese entspricht der wärmeübertragenden Oberfläche beim Beginn des Aufschmelzens des PCM.

### 4.3.3 VIS-Messtechnik zur Bestimmung charakteristischer Größen der Öltropfen

Zur Oberflächenbestimmung der im flüssigen PCM aufsteigenden Öltropfen werden die VIS-Kamera Canon EOS 60 D verwendet und die Bilder mittels der Software Gimp 2 graphisch ausgewertet. Außerdem wird aus den Videoaufnahmen eine Strömungsgeschwindigkeit der Tropfen abgeleitet.

## 4.4 Messfehler

In diesem Abschnitt werden die Messfehler zu der Temperaturmessung mittels Thermoelement (Typ K, Genauigkeitsklasse 2) und der optischen Temperaturmessung mittels InGaAs-Photodiode und Glasfaser dargestellt. Für Thermoelemente ist die sogenannte Grenzabweichung die maximal zulässige Abweichung in Grad Celsius von dem genormten Grundwert. Diese Abweichung lässt sich im Temperaturbereich von -40 bis 1200 °C mit der Gleichung  $0,0075 \cdot \vartheta$  ermitteln. [102] Für die bei den Messungen maximal auftretende PCM-Temperatur von 68,5 °C ergibt sich eine Grenzabweichung von +/- 0,51 °C. Die optische Temperaturmessung ergibt dagegen eine maximale Abweichung von +/- 0,80 °C. Um den Einfluss der Messfehler zu reduzieren ist die Abweichung aller Thermoelemente sowie der optischen Temperaturmessung zu demselben Referenzfühler ermittelt worden, was einer Kalibrierung auf ein Thermoelement entspricht. Diese Kalibrierung berücksichtigt auch die Messfehler, welche durch die Signalumwandlung und die Messdatenerfassung entstehen. Im Anschluss zeigen alle Sensoren dieselbe Absoluttemperatur. Da lediglich Differenztemperaturen in die Auswertung eingehen, ist der Einfluss der Messfehler der einzelnen Temperaturmessinstrumente ausgeglichen, wobei der Messfehler der einzelnen Sensoren vorhanden bleibt.

Da die Thermoelemente fest verbaut sind, ist ein zufälliger Fehler aufgrund einer Positionsveränderung der Sensoren nicht möglich. Im Gegenzug dessen wird die Glasfaser in der flüssigen Öl- / PCM-Phase bewegt. Entsprechende Abweichungen werden durch Mehrfachmessungen dargestellt, wobei eine Angabe des Mittelwertes und der entsprechenden Standardabweichung den Messfehler zu der entsprechenden Messung zeigt. Ebenso ist entsprechend eine Fehlerfortpflanzung berücksichtigt worden, wenn in einer Berechnung unterschiedliche Größen mit jeweils einem separaten Fehler behaftet sind. Die Größe der einzelnen Messfehler ist für jede Auswertung aus Abschnitt 6 separat angegeben.

### 5 Versuchsdurchführung und Auswertemethode

Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Messungen sind bei einer PCM-Höhe von ca. 30 cm durchgeführt worden. In [85] wird gezeigt, dass während der Entladung, unabhängig von der PCM-Höhe, die wirksame Temperaturdifferenz als dimensionslose Kennzahl für die Leistung des Speichers für alle PCM-Höhen von 20 bis 60 cm konstant ist. Dies zeigt, dass unabhängig von der PCM-Höhe und demnach der Verweilzeit des Öls im PCM eine sehr gute Durchmischung mit entsprechend gutem Wärmeübergang im Speicherbehälter vorliegt. Große PCM-Höhen stellen daher ein wirkungsloses PCM-Volumen dar. Bei der Betrachtung des volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten in [85] ist zu sehen, dass sich dieser bei zunehmender PCM-Höhe stark reduziert. Wird beispielsweise die PCM-Höhe von 20 cm auf 40 cm verdoppelt, so halbiert sich der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient, da die Erhöhung des PCM um 20 cm eben dieses wirkungslose PCM-Volumen darstellt.

In [84] wird von einem positiven Effekt der Erhöhung der PCM-Höhe auf die Wärmeübertragung während der Beladung berichtet. Dieser ist allerdings minimal ausgeprägt. Bei der Betrachtung der Messwerte fällt auf, dass eine Erhöhung der PCM-Höhe von 60 cm auf 100 cm lediglich zu einer Erhöhung der Leistung von ca. 8 bis 10 % führt.

In der vorliegenden Arbeit wird daher das PCM in der Laboranlage bei einer konstanten Höhe gehalten und in der Technikumsanlage nur der Durchmesser und damit die Anzahl an Öleintrittsöffnungen bei gleicher PCM-Höhe wie in der Laboranlage vergrößert. Um ein effektives Speichersystem zu erhalten, ist es notwendig, bei geringer PCM-Höhe den Durchmesser des Speicherbehälters zu vergrößern, um so die Speicherkapazität zu erhöhen.

Zur Ermittlung charakteristischer Kenndaten des Direktkontaktlatentwärmespeichers wie wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten wird der Schmelz- und Kristallisationsvorgang des Speichers bzw. des PCM in drei Bereiche unterteilt:

- Bereich 1: Das PCM liegt im festen und das WTF im flüssigen Aggregatzustand vor: Bereich 1 liegt zu Beginn des Schmelz- und zum Ende des Kristallisationsvorgangs vor. Das PCM wird erwärmt bzw. abgekühlt.
- Bereich 2: Das PCM befindet sich im Phasenwechsel und das WTF verbleibt im flüssigen Aggregatzustand. Im Bereich 2 wird das PCM geschmolzen bzw. kristallisiert.
- Bereich 3: Das PCM wie auch das WTF liegen im flüssigen Aggregatzustand vor: Bereich 3 liegt zu Beginn des Kristallisations- und zum Ende des Schmelzvorgangs vor. Das PCM wird abgekühlt bzw. erwärmt.

Im Bereich 1 und 3 liegen hierbei eindeutige wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten vor, wobei im vorliegenden Abschnitt die Durchführung zur Ermittlung der wärmeübertragenden Flächen und der Wärmeübergangskoeffizienten für die beiden Bereiche dargestellt wird. Im Bereich 2, dem Phasenwechsel, verändern sich die wärmeübertragenden Flächen wie auch die vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten stetig. Beispielhaft wird im vorliegenden Abschnitt das Schmelzen des PCM betrachtet und die Durchführung zur Ermittlung der wärmeübertragenden Flächen und der vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten in

Abhängigkeit der Zeit bzw. des Aggregatzustandes des PCM für einen künstlich erzeugten zylindrischen Kanal dargestellt.

### 5.1 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an festem / schmelzendem PCM

Bei der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem (Bereich 1) und schmelzendem PCM (Bereich 2) liegt eine grundlegende Unterscheidung im Wärmeübertragungsmechanismus vor. Abbildung 5-1 A zeigt den Speicherbehälter und den Kanal innerhalb des PCM während der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem PCM. Der Kanal ist komplett mit Öl gefüllt. Da die Temperatur des eingeleiteten Öls geringer als die Phasenwechseltemperatur des PCM ist, bleibt die Kanalstruktur im PCM entsprechend vorhanden. Es liegt ein konvektiver Wärmeübergang zwischen Öl und PCM vor, wobei der Wärmestrom  $\dot{Q}_K$  zwischen dem Öl und dem PCM fließt.

Wird der Wärmeübergangskoeffizient an schmelzendem PCM untersucht, so besitzt das eingeleitete Öl eine Temperatur größer der Phasenwechseltemperatur des PCM. Zu Beginn der Messung liegt der Kanal aus Abbildung 5-1 A vor. Auch hier findet ein konvektiver Wärmeübergang zwischen Öl und PCM mit dem Wärmestrom  $\dot{Q}_K$  statt, und der Kanal ist ebenfalls komplett mit Öl gefüllt. Im Laufe der Messung schmilzt das PCM an der Kanalinnenwand, und der Kanal verbreitert sich. Das flüssige PCM verbleibt teilweise im Kanal und wird teilweise aus dem Kanal herausgefördert, wobei es sich am Kanalaustritt sammelt. Besitzt der Kanal einen entsprechenden Durchmesser, so fließt das flüssige PCM von oberhalb des Kanals in den Kanal zurück. Der Kanal ist nun komplett mit flüssigem PCM gefüllt und das Öl steigt tropfenförmig im flüssigen PCM auf. Das flüssige PCM wird von dem heißen Öl temperiert, wobei ein konvektiver Wärmeübergang  $\dot{Q}_K$  zwischen dem Öl und dem flüssigen PCM vorliegt. Mittels Wärmeleitung wird folgend Energie vom flüssigen auf das feste PCM übertragen und so der Schmelzvorgang des noch festen PCM fortgeführt. Dieser Vorgang ist in Abbildung 5-1 B dargestellt. Der Wechsel des Wärmeübergangsmechanismus von Konvektion zu Konvektion + Wärmeleitung während des Schmelzvorgangs des PCM wird ebenfalls in [80] und [83] beschrieben.

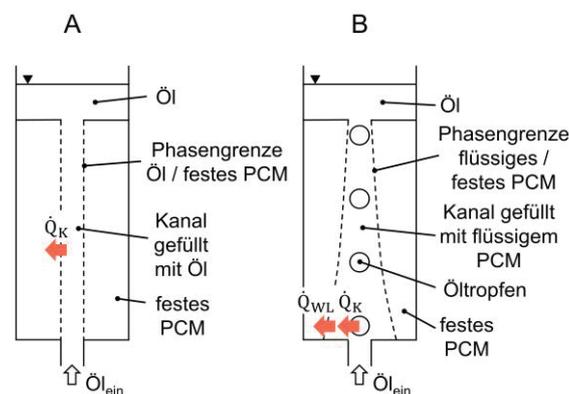


Abbildung 5-1: Wärmeübertragung zwischen festem PCM und Öl (A) sowie zwischen schmelzendem PCM und Öl (B) nach dem Wechsel des Wärmeübergangsmechanismus

Zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an festem und aufschmelzendem PCM wird ein künstlich erzeugter zylindrischer Kanal innerhalb des PCM betrachtet. Dieser Kanal besitzt einen Innendurchmesser von 6 mm. Innerhalb des Kanals ist es möglich, die Glasfaser einzuführen, um so Temperaturmessungen des von unten nach oben aufsteigenden Öls zu machen. Um den Kanal zu erzeugen, wird das PCM im Speicherbehälter komplett aufgeschmolzen und in das flüssige PCM ein Edelstahlrohr mit einem Außendurchmesser von 6 mm in der Öleintrittsöffnung adaptiert. Abbildung 5-2 zeigt den Speicherbehälter und das in die Öleintrittsöffnung adaptierte Edelstahlrohr. Um einen senkrechten Kanal zu erzeugen, wird im oberen Teil des Speicherbehälters das Rohr mittels einer Zentrierung fixiert.

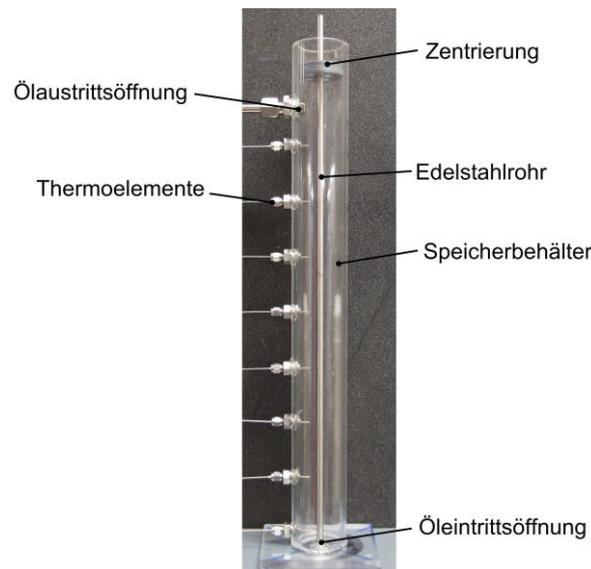


Abbildung 5-2: Speicherbehälter (Innendurchmesser: 40 mm) und Edelstahlrohr zur Erzeugung eines künstlichen zylindrischen Kanals innerhalb des PCM

Im Anschluss wird kaltes Öl durch die Rohrleitung gefördert, sodass das PCM rund um das Rohr kristallisiert. Durch den Energieentzug an der Rohraußenwand kristallisiert das PCM in radialer Richtung bis zur Speicherbehälterinnenwand. Im Anschluss wird das PCM durch Einleiten von heißem Öl an der Rohraußenwand leicht aufgeschmolzen und das Rohr entfernt. Durch erneutes Einleiten von kaltem Öl wird die angeschmolzene Schicht wieder fest und ein gleichmäßiger zylindrischer Kanal verbleibt im PCM.

Abbildung 5-3 zeigt die Temperturmessstellen zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an festem und aufschmelzendem PCM im PCM (schwarze Punkte) und entsprechend im Öl (graue Punkte). Der Abstand der Thermoelementspitze zu der Kanalinnenwand beträgt für alle Thermoelemente 2 mm. Der Abstand der einzelnen Thermoelemente beträgt jeweils 50 mm.

Die Thermoelemente an den Messstellen 8.0 und 8.6 werden nicht zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt, um thermische Einflüsse der Randbereiche als Fehlerquelle auszuschließen.

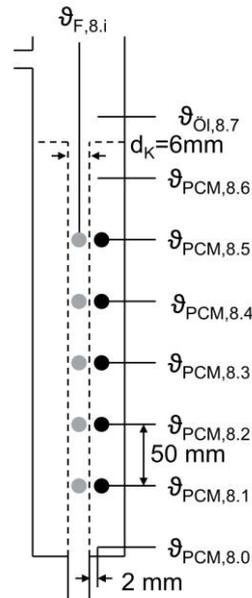


Abbildung 5-3: Temperaturmessstellen im Speicherbehälter zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem und aufschmelzendem PCM

Zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten wird an der jeweiligen grauen und schwarzen Markierung die Öl- bzw. die PCM-Temperatur ermittelt. Hierzu wird an jeder Messposition eine 5-fach Bestimmung der aktuell vorliegenden Temperatur durchgeführt. Für jede Einzelmessung wird eine Zeit von ca. 1 s benötigt (entspricht 2000 Temperaturmesswerten der Öltemperatur). Entsprechend werden in dieser Zeit ca. 40 PCM-Temperaturen erfasst.

Der Wärmeübergangskoeffizient wird im gesamten Kanal in 3 Abschnitten erfasst. Abbildung 5-4 zeigt beispielhaft, wie anhand der gemessenen Öl- und PCM-Temperaturen der Wärmeübergangskoeffizient für einen Abschnitt berechnet wird.

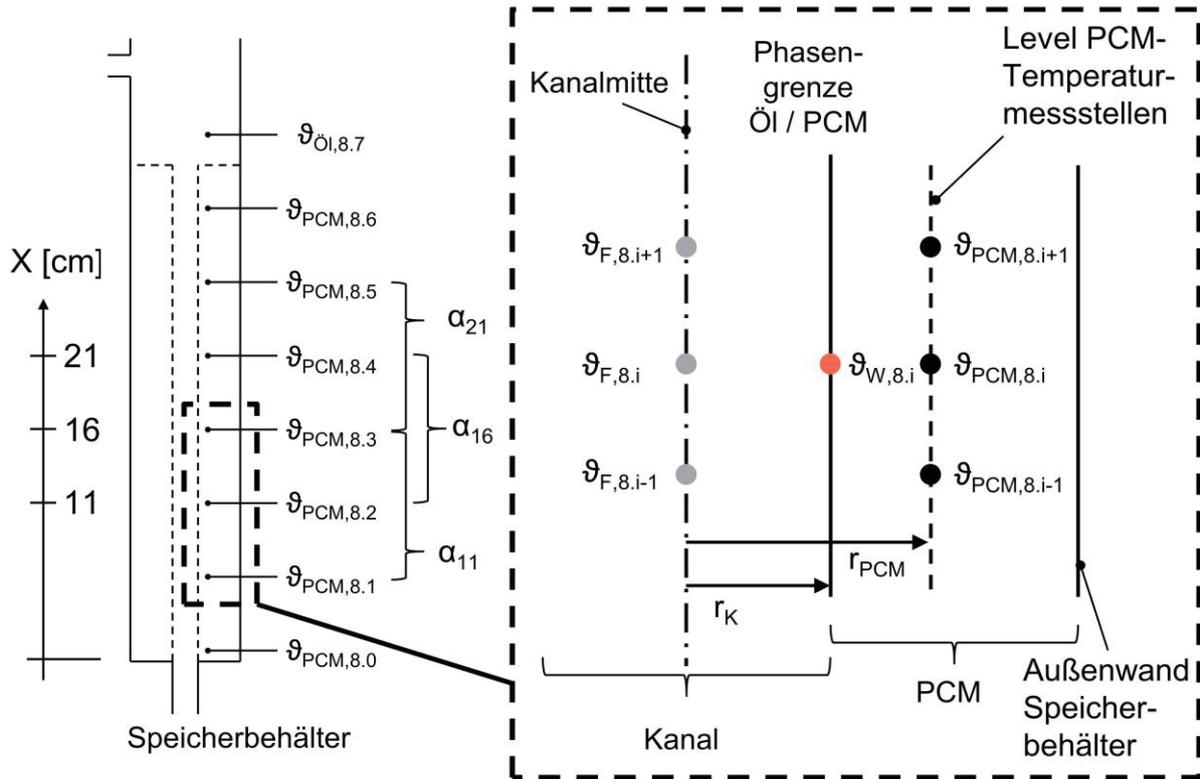


Abbildung 5-4: Erläuterung zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem und aufschmelzendem PCM

Die Oberflächentemperatur des Kanals  $\vartheta_{W,8,i}$  (roter Punkt in Abbildung 5-4) lässt sich mit Hilfe der gemessenen PCM-Temperatur am Punkt  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$ , der bekannten Wärmeleitfähigkeit des festen PCM  $\lambda_{\text{PCM},s}$  und der PCM-Schichtdicke bzw. dem Abstand zwischen Kanalwand und der Messstelle  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  nach Gleichung (9) berechnen:

$$\vartheta_{W,8,i} = \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{r_{\text{PCM}}}{r_K}}{\lambda_{\text{PCM},s} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} + \vartheta_{\text{PCM},8,i} \quad (42)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  lässt sich nach Gleichung (10) durch die optische Bestimmung der Öltemperatur an der Stelle  $\vartheta_{F,8,i}$  berechnen. Die Oberfläche ist für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem PCM bekannt. Hierbei entspricht diese einem Abschnitt des zylindrischen Kanals:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (\vartheta_{F,8,i} - \vartheta_{W,8,i})} \quad (43)$$

Zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten beim Aufschmelzen des PCM verändert sich der Durchmesser des Kanals. Dieser vergrößert sich. Um dies zu berücksichtigen, wird aus den Messdaten der PCM-Temperatur eine Schmelzgeschwindigkeit  $v_{\text{schmelz}}$  in radiale Richtung für jede Temperaturmessstelle innerhalb des PCM  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  errechnet. Dabei wird die Zeitdifferenz  $\Delta t$  ermittelt, welche benötigt wird, um die definierte PCM-Schicht  $r_{\text{PCM}} - r_{\text{K}}$  zwischen der Spitze der Temperaturfühler  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  und der Kanalinnenwand mit einer Schichtdicke von 2 mm aufzuschmelzen. Die Schicht ist aufgeschmolzen, wenn der betrachtete Temperaturfühler eine Temperatur von  $59\text{ }^{\circ}\text{C}$  überschreitet. Abbildung 5-5 zeigt hierfür beispielhaft den Temperaturverlauf eines Temperaturfühlers  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}(t)$  während des Schmelzens.

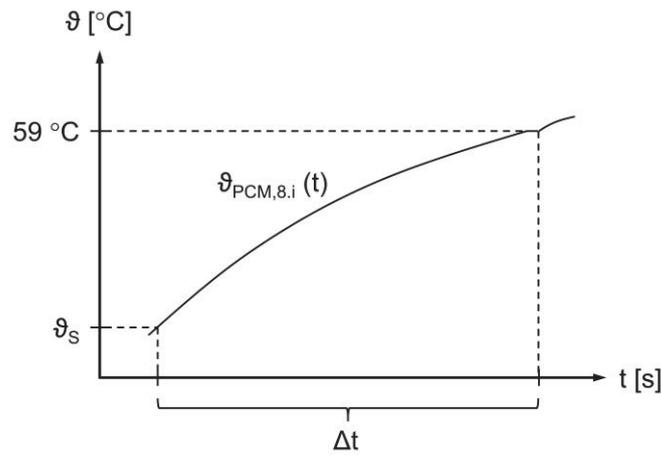


Abbildung 5-5: Zeitlicher Verlauf der PCM-Temperatur während des Schmelzens des PCM

Die Aufschmelzgeschwindigkeit wird anschließend wie folgt berechnet:

$$v_{\text{schmelz}} = \frac{r_{\text{PCM}} - r_{\text{K}}}{\Delta t} \quad (44)$$

Maßgeblich für die Ermittlung von  $v_{\text{schmelz}}$  ist, dass an mindestens einer Messposition  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  eine vollständig aufgeschmolzene Schicht  $r_{\text{PCM}} - r_{\text{K}}$  erreicht wird, bevor durch das Aufschmelzen ein Wechsel des Wärmeübergangsmechanismus stattfindet. Aus der nach Gleichung (44) ermittelten Aufschmelzgeschwindigkeit kann für jede Messstelle  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  eine Aufschmelzgeschwindigkeit in radiale Richtung berechnet werden. Hieraus lässt sich der Kanalradius  $r_{\text{K}}$  als Funktion der Zeit und der Kanalhöhe darstellen, was eine Berechnung der wärmeübertragenden Fläche während des Schmelzens des PCM (Bereich 2) zulässt.

Durch die optische Erfassung der Öltemperatur an der Stelle  $\vartheta_{\text{F},8,i-1}$  und  $\vartheta_{\text{F},8,i+1}$ , den bekannten Ölmassenstrom  $\dot{m}_{\text{öl}}$  und die Wärmekapazität des Öls  $c_{\text{p},\text{öl}}(\vartheta)$  lässt sich nach Gleichung (11) der vom Öl auf das PCM übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}$  berechnen:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{öl}} \cdot c_{\text{p},\text{öl}}(\vartheta) \cdot \Delta\vartheta \quad \text{mit} \quad \Delta\vartheta = \vartheta_{\text{F},8,i+1} - \vartheta_{\text{F},8,i-1} \quad (45)$$

Der im Abschnitt  $\vartheta_{F,8,i-1}$  und  $\vartheta_{F,8,i+1}$  ermittelte Wärmestrom führt zu einer gleichmäßigen Erwärmung des PCM. Hierfür wird die PCM-Temperatur an der Stelle  $\vartheta_{PCM,8,i}$  erfasst und für den Abschnitt als konstant angenommen. Somit ist die Wandtemperatur, welche nach Gleichung (42) ermittelt wird, ebenfalls als konstant für den Abschnitt  $\vartheta_{F,8,i-1}$  bis  $\vartheta_{F,8,i+1}$  zu betrachten.

Bei den Messungen wird der Wärmeübergangskoeffizient bei unterschiedlichen Ölmassenströmen untersucht. Der Ölmassenstrom ist eine wichtige Größe, um die Speicherbe- und Entladeleistung zu maximieren. Diesen gilt es zu ermitteln. Beim Einleiten des WTFs in das flüssige PCM werden in [82] 4 unterschiedliche Tropfengeometrien beschrieben, die in Abbildung 3-2 schematisch dargestellt sind. Der Zustand aus Abbildung 3-2 C stellt hierbei den angestrebten Zustand der Tropfengeometrie dar, da hier die maximale wärmeübertragende Fläche vorliegt. Der Zustand aus Abbildung 3-2 D ist hingegen zu vermeiden, da hier ein PCM-Mitriss aufgrund der Bildung einer Emulsion aus WTF und PCM auftritt.

Bei Direktkontaktlatentwärmespeichern kann es allerdings noch zu einer zweiten, in der Literatur nicht beschriebenen Form des PCM-Mitrisses kommen. Liegt ein komplett auskristallisiertes PCM mit Kanalstruktur vor, so kann beim Schmelzen des PCM ein zu großer WTF-Massenstrom zu lokal sehr großen Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund von Engstellen innerhalb des Kanals führen. Dies führt dazu, dass PCM in Form von kleinen Tropfen in den Ölkreislauf mitgerissen wird. Durch Variation des WTF-Massenstroms ist entsprechend der maximal mögliche WTF-Massenstrom ermittelt worden, bei dem gerade kein PCM-Mitriss auftritt. Dieser beträgt  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s. Hier ist der PCM-Mitriss beim Aufschmelzen sowie im aufgeschmolzenen Zustand gerade unterbunden. Es bildet sich im flüssigen PCM ein Ölstrahl mit Strahlzerfall und Bildung kleiner Öltropfen entsprechend Abbildung 3-2 C aus.

Letztlich sind bei den Untersuchungen vier unterschiedliche Messungen durchgeführt worden (Messung Nr. 1 bis 4). Bei Messung 1 bis 3 ist der Wärmeübergangskoeffizient an festem PCM in Abhängigkeit des Ölmassenstroms untersucht worden, um letztlich unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Kanals zu erzeugen. Dies soll zeigen, wie sich in realen, eventuell engeren Kanälen der Wärmeübergangskoeffizient verhält. Der Ölmassenstrom wird stetig von Messung 1 bis Messung 3 von 4,03 auf 7,11 und letztlich auf  $11,5 \cdot 10^{-4}$  kg/s erhöht. Hierbei beträgt die Öleintrittstemperatur  $48$  °C und die PCM-Temperatur zu Beginn der Messung  $20$  °C. Bei Messung Nr. 4 beträgt die Öleintrittstemperatur  $70$  °C und der Ölmassenstrom  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s. Während dieser Messung schmilzt das PCM. Diese Messung soll die Auswirkung einer zusätzlichen flüssigen PCM-Phase auf den Wärmeübergangskoeffizienten zeigen. Die Messung ist beendet, wenn es zu einem Wechsel im Wärmeübergangsmechanismus von Konvektion zu Konvektion + Wärmeleitung gekommen ist.

Tabelle 5-1 zeigt zusammengefasst die Parameter Ölmassenstrom und Öleintrittstemperatur zu den jeweiligen Messungen.

Tabelle 5-1: Messparameter zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem und schmelzendem PCM

Messung Nr.	Ölmassenstrom $\times 10^{-4}$ [kg/s]	Ölaustrittstemperatur [°C]	Re [-]
1	4,03	48	19
2	7,11	48	34
3	11,5	48	55
4	6,50	70	31

## 5.2 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an flüssigem PCM

Es folgt die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Öl und flüssigem PCM (Bereich 3). Hierzu wird ebenfalls die optische Temperaturmessung, wie in Abschnitt 5.1, eingesetzt. Um den Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln, ist die Temperaturdifferenz zwischen dem flüssigen PCM und der Öltropfenoberfläche während einer Entladung des Speichers bzw. des PCM zu ermitteln. Hierbei wird das Öl bei einer Temperatur von ca. 49 °C in den Speicher eingeleitet, wo sich das flüssige PCM mit einer Temperatur von ca. 70 °C befindet. Der Ölmassenstrom ist so gewählt, dass lediglich Einzeltropfen aus der Öleintrittsöffnung aufsteigen. Der Ölmassenstrom beträgt  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s. Hierzu wird der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  nach Gleichung (10) berechnet, wobei  $\dot{Q}$  den übertragenden Wärmestrom zwischen Öl und PCM,  $A$  die wärmeübertragende Fläche,  $\vartheta_{\text{PCM}}$  die PCM-Temperatur und  $\vartheta_{\text{A,Tr}}$  die Tropfenoberflächentemperatur darstellt:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (\vartheta_{\text{PCM}} - \vartheta_{\text{A,Tr}})} \quad (46)$$

Hierbei lässt sich die Oberfläche  $A$  der Tropfen aus VIS-Aufnahmen der einzelnen Öltropfen ableiten. Der lokale Wärmestrom  $\dot{Q}$  lässt sich grundlegend aus der Erwärmung des Öltropfens bzw. der Temperaturerhöhung des Tropfens  $\Delta\vartheta$  vom Eintritt des Öls in den Speicher bis hin zur Messstelle (der Glasfaser Spitze) nach Gleichung (47) berechnen:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_{\text{Öl,Tr}} \cdot c_{p,\text{Öl}} \cdot \Delta\vartheta}{\Delta t} \quad (47)$$

Aus der Strömungsgeschwindigkeit des Tropfens und der bekannten Strecke zwischen Eintritt des Öls in den Speicher bis hin zur Glasfaser Spitze, lässt sich die Zeitdifferenz  $\Delta t$ , welcher der Tropfen zur Durchströmung dieser Strecke benötigt, berechnen.

Bei der Temperaturdifferenz  $\vartheta_{\text{PCM}} - \vartheta_{\text{A,Tr}}$  gilt es zu beachten, dass für dünne Schichtdicken des Öls (Größenordnung 2 bis 10 mm) das Öl im relevanten Wellenlängenbereich zwischen 1,7

bis 2,2  $\mu\text{m}$  eine Transmission größer null besitzt (siehe Abbildung 4-3). Aufgrund der Transmission der Ölschicht des Tropfens  $\tau$  wird neben der Strahlung, welche vom Tropfen emittiert wird, zusätzlich Strahlung des umliegenden PCM detektiert. Da das PCM eine höhere Temperatur als das Öl besitzt, wird an der Tropfenoberfläche eine zu hohe Temperatur erfasst. Demnach ist die Oberflächentemperatur des Tropfens zu korrigieren. Die an der Oberfläche gemessene Temperatur am Tropfen  $\vartheta_{A,Tr,mess}$  setzt sich wie folgt zusammen:

$$\vartheta_{A,Tr,mess} = \overline{\tau^{Tr}} \cdot \vartheta_{PCM} + (1 - \overline{\tau^{Tr}}) \cdot \vartheta_{A,Tr} \quad (48)$$

Hierbei entspricht  $\overline{\tau^{Tr}}$  dem mittleren Transmissionskoeffizienten der Schichtdicke des Öltropfens im Wellenlängenbereich zwischen 1,7 und 2,2  $\mu\text{m}$ .  $\vartheta_{A,Tr}$  ist die korrigierte Oberflächentemperatur des Tropfens. Diese lässt sich nach Gleichung (48) berechnen:

$$\vartheta_{A,Tr} = \frac{\vartheta_{A,Tr,mess} - (\overline{\tau^{Tr}} \cdot \vartheta_{PCM})}{(1 - \overline{\tau^{Tr}})} \quad (49)$$

Grundlegend für die Ermittlung des mittleren Transmissionskoeffizienten ist es, die Schichtdicke des Tropfens zu kennen. Diese wird durch VIS-Aufnahmen ermittelt. Im Anschluss wird aus dem Transmissionskoeffizienten  $\tau^{10}(\lambda)$  für die Ölschichtdicke von 10 mm (siehe Abbildung 4-3 B) nach Gleichung (50) die Extinktion  $E^{10}(\lambda)$  ermittelt: [103]

$$E^{10}(\lambda) = -\log_{10}(\tau^{10}(\lambda)) \quad (50)$$

Nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz ist die Extinktion  $E(\lambda)$  proportional zu der Schichtdicke. [103] Aus den Daten der Extinktion  $E^{10}(\lambda)$  und der bekannten Schichtdicke des Öltropfens lässt sich im Anschluss die entsprechende Extinktion  $E^{Tr}(\lambda)$  für die Schichtdicke des Öltropfens berechnen. Es folgt die Umrechnung der Extinktion  $E^{Tr}(\lambda)$  zu dem Transmissionskoeffizienten  $\tau^{Tr}(\lambda)$ .

Die Strahlung, welche von dem Öltropfen mit entsprechender Schichtdicke transmittiert wird, wird von dem umliegenden PCM emittiert. Zur Ermittlung von  $\overline{\tau^{Tr}}$  ist deshalb zu beachten, dass die spektrale spezifische Ausstrahlung des PCM mit der Wellenlänge zunimmt (siehe Abbildung 2-11). Demnach findet bei der Ermittlung von  $\overline{\tau^{Tr}}$  eine Gewichtung statt, wobei die Transmissionskoeffizienten  $\tau^{Tr}(\lambda)$  für kleinere Wellenlängen der vom PCM emittierten Strahlung mit geringerem Anteil und für große Wellenlängen mit größerem Anteil in  $\overline{\tau^{Tr}}$  einfließen.

Während der Messdauer von ca. 200 s werden ca. 800 Tropfen von der Glasfaser erfasst und ca. 400.000 Temperaturmessdaten aufgezeichnet. Die optische Temperaturmessung besitzt hier eine maximale Abweichung von +/- 0,09 °C.

### 5.3 Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche an festem PCM

#### 5.3.1 Flächenermittlung mittels Computertomographie

Zur Ermittlung der wärmeübertragenden Oberfläche des auskristallisierten PCM (Bereich 1) wird ein unter realen Betriebsbedingungen gebildeter Kanal erzeugt und mittels der in

Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Computertomografie untersucht. Unter realen Betriebsbedingungen wird verstanden, dass lediglich durch das Einleiten von Öl mit einer Temperatur unterhalb der Phasenwechseltemperatur die Kristallisation des PCM und damit verbunden die Kanalbildung innerhalb des PCM stattfindet. Hierzu wird das flüssige PCM bei einer Öleintrittstemperatur von ca. 45 °C und dem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s gekühlt, wobei sich das PCM abkühlt und folglich kristallisiert. Die erhaltene Kanalstruktur bildet eine Oberfläche aus, welche z. B. beim Start der Beladung des Speichers als wärmeübertragende Oberfläche dient. Außerdem wird als Referenz ein künstlich erzeugter zylindrischer Kanal mit einem Durchmesser von 6 mm aus Abschnitt 5.1 vermessen, entsprechend die Zylinderoberfläche ermittelt und mit der errechneten Zylinderfläche verglichen. Mittels dieser Methode können weitere Aufklärungen der Oberflächenstruktur der Kanalinnenwand getätigt werden. Für die Messungen wird das Prüfsystem XT H 225 ST der Universität Zürich verwendet. Hierzu ist der Speicherbehälter auf dem Proben Tisch fixiert worden. Aufgrund der geometrischen Abmessungen des Speicherbehälters ist es nicht möglich, den gesamten Speicherbehälter komplett zu vermessen. Für die Messungen wird daher erst die untere und anschließend die obere Hälfte des Speicherbehälters untersucht. Um die genaue Positionierung des Speichers im Messfeld und ebenfalls die Rekonstruktion der einzelnen CT-Aufnahmen zu erleichtern, wird mittig am Speicherbehälter ein Marker angebracht. Abbildung 5-6 zeigt den fixierten Speicherbehälter auf dem Proben Tisch des CTs und den entsprechenden Marker.

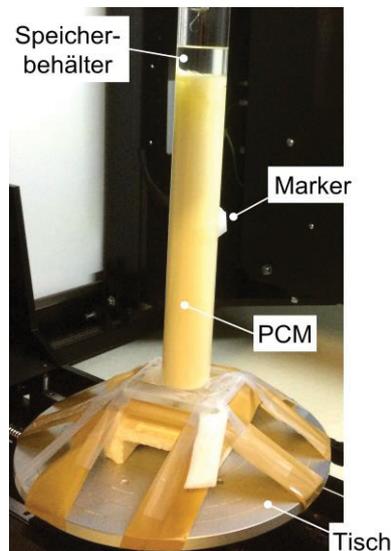


Abbildung 5-6: Speicherbehälter fixiert auf dem CT-Tisch

Nach der Platzierung des Speicherbehälters im CT kann die Messung gestartet werden. Nach einer Messzeit von insgesamt 38 Minuten ist der gesamte Speicherbehälter vermessen. Im Anschluss werden die Bilder von einer Rekonstruktionssoftware der Firma Nikon nach dem Feldkamp-Davis-Kress-Algorithmus rekonstruiert, um eine dreidimensionale Ansicht des Speicherbehälters aus den aufgenommenen 2D-Bildern zu erhalten. [101] Um die beiden Hälften des

Speichers wieder zusammen zu setzen, wird die Software Fiji von ImageJ verwendet. Zur Visualisierung des Kanals wie auch zur Analyse der wärmeübertragenden Oberfläche ist das Programm Volume Graphics Studio Max 3.1.2 von Volume Graphics verwendet worden. Zur Vermessung und Darstellung einzelner kanalspezifischer Gegebenheiten, wie lokaler Durchmesser des Kanals, ist das Programm myVGL von Volume Graphics verwendet worden. In einer Doppelbestimmung wird die Oberfläche des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals bestimmt. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 6.2.1 dargestellt.

### 5.3.2 Flächenermittlung mittels Temperaturmessung

Im vorliegenden Abschnitt wird eine vereinfachte Variante dargestellt, um die wärmeübertragende Fläche für den Bereich 1 zu ermitteln. Aus der Beobachtung, dass es bei dem künstlich erzeugten zylindrischen Kanal mit einem Durchmesser von 6 mm (vergleiche Abschnitt 5.1) wie auch bei dem unter realen Bedingungen erzeugten Kanal bei näherungsweise gleichem Ölmassestrom zu PCM-Mittriss kommt, werden folgende Annahmen abgeleitet:

- Im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal sind die im PCM vorliegenden Kanalstrukturen feiner und weisen einen geringeren Durchmesser als im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal auf. Dies führt zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit des Öls im Kanal. Durch die Verzweigung der Kanalstruktur teilt sich allerdings der gesamt vorliegende Ölmassestrom auf viele einzelne Kanäle auf, was wiederum die Strömungsgeschwindigkeit im jeweiligen Kanalabschnitt reduziert.
- Strömungsart und Strömungsgeschwindigkeit und somit Reynolds-Zahl sind im Mittel betrachtet für den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal und dem unter realen Bedingungen erzeugten Kanal identisch. Das führt zu einem identischen mittleren Temperaturgradienten zwischen der fluiden Phase Öl und der PCM-Wand. Hieraus folgt, dass der mittlere Wärmeübergangskoeffizient im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal  $\bar{\alpha}_{\text{Zylinder}}$  dem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal  $\bar{\alpha}_{\text{real}}$  entspricht.

Wenn die Annahmen gelten, ist die wärmeübertragende Fläche im kristallisierten PCM berechenbar. Nach Gleichung (10) lässt sich für eine Beladung der mittlere Wärmeübergangskoeffizient für den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal  $\bar{\alpha}_{\text{Zylinder}}$  berechnen:

$$\bar{\alpha}_{\text{Zylinder}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Zylinder}}}{A_{\text{Zylinder}} (\vartheta_{\text{F}} - \vartheta_{\text{W},1})_{\text{Zylinder}}} \quad (51)$$

In Gleichung (51) entspricht  $A_{\text{Zylinder}}$  der gesamten im Kanal vorliegenden wärmeübertragenden Fläche und die Temperaturdifferenz  $(\vartheta_{\text{F}} - \vartheta_{\text{W},1})_{\text{Zylinder}}$  der mittleren Differenz zwischen der Fluidtemperatur und der Innenwandtemperatur.  $\dot{Q}_{\text{Zylinder}}$  entspricht dem vom Öl auf das PCM übertragenen Wärmestrom, wobei sich dieser nach Gleichung (11) berechnen lässt.

Analog lässt sich für den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal ein mittlerer Wärmeübergangskoeffizient  $\bar{\alpha}_{\text{real}}$  berechnen:

$$\bar{\alpha}_{\text{real}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{A_{\text{real}} \cdot (\vartheta_{\text{F}} - \vartheta_{\text{W},1})_{\text{real}}} \quad (52)$$

Aus der Annahme  $\bar{\alpha}_{\text{Zylinder}} = \bar{\alpha}_{\text{real}}$  folgt das Gleichsetzen von Gleichung (51) und Gleichung (52). Es ergibt sich Gleichung (53):

$$\frac{\dot{Q}_{\text{Zylinder}}}{A_{\text{Zylinder}} \cdot (\vartheta_{\text{F}} - \vartheta_{\text{W}})_{\text{Zylinder}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{A_{\text{real}} \cdot (\vartheta_{\text{F}} - \vartheta_{\text{W}})_{\text{real}}} \quad (53)$$

Aufgrund näherungsweise identischer Strömungsbedingungen stellt sich letztlich auch eine identische mittlere Temperaturdifferenz zwischen der Fluidtemperatur und der Wandtemperatur der Kanalinnenwand ein. Wodurch sich Gleichung (53) zu Gleichung (54) vereinfacht:

$$A_{\text{real}} = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\text{Zylinder}}} \cdot A_{\text{Zylinder}} \quad (54)$$

Nach Gleichung (54) ist ersichtlich, dass sich die Fläche des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals  $A_{\text{real}}$  aus dem Quotienten der Erwärmungsleistung des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals  $\dot{Q}_{\text{real}}$  und des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals  $\dot{Q}_{\text{Zylinder}}$  und anschließender Multiplikation mit der bekannten Oberfläche des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals  $A_{\text{Zylinder}}$  berechnet. Um Fehler bei der Berechnung zu minimieren, wird für  $A_{\text{Zylinder}}$  die wärmeübertragende Fläche aus den CT-Messungen verwendet. Zur Bestimmung der Erwärmungsleistung  $\dot{Q}_{\text{real}}$  und  $\dot{Q}_{\text{Zylinder}}$  ist eine Temperaturmessung der Ölein- und Ölaustrittstemperatur erforderlich, wobei die Erwärmungsleistung nach Gleichung (11) berechnet wird:

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{\text{öl}} \cdot c_{p,\text{öl}} \cdot (\vartheta_{\text{öl,ein}} - \vartheta_{\text{öl,aus}})_i \quad (55)$$

Abbildung 5-7 zeigt für den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal und den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal die Anordnung der Glasfaser (grauer Punkt) zur optischen Bestimmung der Öltemperatur.

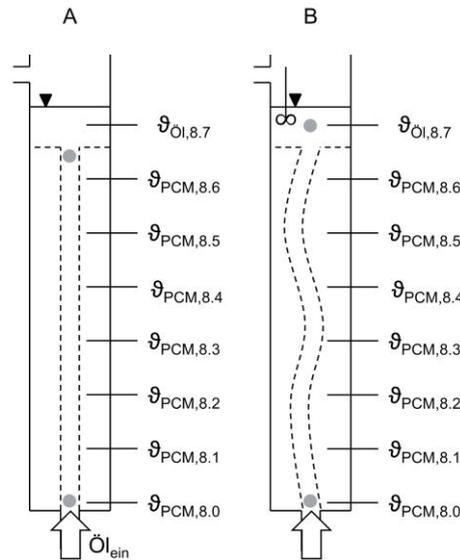


Abbildung 5-7: Messposition der Glasfaser zur Bestimmung der Erwärmungsleistung für den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal (A) und den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal (B)

Hierbei wird die Ölein- wie auch die Ölaustrittstemperatur in jeweils einer separaten Messung bestimmt. Dies ist notwendig, da lediglich ein optischer Detektor vorhanden ist und demnach nicht zeitgleich die beiden Öltemperaturen an Ein- und Ausgang erfasst werden können. Außerdem besteht bei dem unter realen Bedingungen erzeugten Kanal das Problem, dass es aufgrund der Kanalstruktur nicht möglich ist, mit der Glasfaser zu dem Öleintritt durch das PCM zu gelangen. Hier ist es ebenfalls erforderlich, die beiden Temperaturen getrennt zu messen. Bei der Erfassung der Austrittstemperatur des Öls aus dem PCM bei dem unter realen Bedingungen erzeugten Kanal kommt es zu einer inhomogenen Temperaturverteilung in der Ölschicht oberhalb des PCM. Diese inhomogene Temperaturverteilung ist dadurch zu erklären, dass das Öl an einer zufälligen Stelle aus dem PCM austritt und von dort, aufgrund geringer Durchmischung, nach oben zu dem Überlauf strömt. Ein Temperaturanstieg im Öl ist nur an der Stelle des Ölaustritts zu messen. Da diese Stelle nicht sichtbar ist, ist ein Rührinstrument kurz oberhalb der festen PCM-Schicht angebracht worden, welches für eine Homogenisierung der Temperatur sorgt. Im Anschluss folgt die optische Temperaturerfassung mittels der Glasfaser.

Zur Überprüfung der zuvor gemachten Annahmen wird die nach Gleichung (54) ermittelte wärmeübertragende Fläche des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals mit derjenigen aus den Messergebnissen aus der Computertomographie verglichen.

#### 5.4 Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche am Öltropfen / der Ölphase

Im Bereich 3 liegt das PCM in flüssiger Form vor. Zur Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche in diesem Bereich werden zu Beginn einzelne Öltropfen in flüssigem PCM durch optische Aufnahmen mittels der digitalen Spiegelreflexkamera Canon EOS 60 D untersucht und eine wärmeübertragende Fläche bestimmt. Hierzu wird das PCM komplett aufgeschmolzen und das Öl mit einer Farbstoffkonzentration von 0,57 mg Sudanrot G / g Öl zur besseren Kontrastierung von Öl und PCM eingefärbt. Die Beeinflussung der physikalischen Eigenschaften des Öls wird ausgeschlossen. Des Weiteren ist die Beeinflussung der vom Öl emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 1,1 und 2,2  $\mu\text{m}$  ausgeschlossen (siehe Abbildung 4-7).

Wie beschrieben, ist der Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s so gewählt worden, dass die maximale wärmeübertragende Oberfläche im flüssigen PCM bei maximalem Ölmassenstrom bei gegebenem Durchmesser der Öleintrittsöffnung vorliegt. Hierbei bildet sich ein Ölstrahl im Eintrittsbereich des Speichers, der im Anschluss zerfällt, und es bilden sich viele kleine Öltropfen. In diesem Zustand ist die optische Ermittlung der gesamten vorliegenden wärmeübertragenden Fläche nur sehr schwer möglich, da es bei der Aufnahme zur Überlagerung unterschiedlicher Tropfen kommen kann. Um dennoch die wärmeübertragende Fläche für den Bereich 3 abschätzen zu können, werden Ölmassenströme untersucht, bei denen es zu keiner Strahlbildung kommt und eindeutig die Geometrie optisch zu bestimmen ist. In [82] ist dargestellt, dass bei geringem WTF-Massenstrom einzelne Tropfen aus der Öleintrittsöffnung austreten. Für diesen Fall ist die optische Bestimmung der Tropfengeometrie leicht möglich. Daher werden für drei unterschiedliche Ölmassenströme (1,73, 2,07 und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s) die entsprechende Tropfengeometrie sowie der Abstand von Tropfenmitte zu Tropfenmitte (siehe Abbildung 6-17) bestimmt und auf den Ölmassenstrom mit Ölstrahl ( $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s) übertragen. Zur Vermessung der Tropfen wird die Software Gimp 2 verwendet. Des Weiteren werden aus den Aufzeichnungen das Strömungsverhalten der aufsteigenden Öltropfen sowie die Aufstiegs- geschwindigkeit ermittelt. Mit Hilfe dieser Daten wird der resultierende Ölmassenstrom ermittelt und mit dem tatsächlichen Ölmassenstrom verglichen. Dieser Vergleich dient als Validierung für eine korrekte Ermittlung der Geometrie der Tropfen und der abgeleiteten Größen wie der Oberfläche des elliptischen Tropfens sowie der Ableitung des Tropfendurchmessers eines kugeläquivalenten Tropfens. Tabelle 5-2 zeigt die Parameter zu den vier Messungen.

Tabelle 5-2: Parameter zur Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche bei Einzeltropfen und der gesamt im PCM vorliegenden wärmeübertragenden Fläche

Messung Nr.	Ölmassenstrom $\times 10^{-4}$ [kg/s]	Öleintrittstemperatur [°C]
1	1,73	49
2	2,07	49
3	2,60	49
4	6,50	49

Aus dem Zusammenhang der Ölmassenströme  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s und der jeweiligen ermittelten wärmeübertragenden Fläche wird für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s eine entsprechende wärmeübertragende Fläche abgeleitet. Aufgrund der linearen Pumpenkennlinie der eingesetzten Zahnradpumpe führt eine Erhöhung des Ölmassenstroms zu einem linearen Anstieg der Tropfenanzahl der eingeleiteten Tropfen in den Speicher (bei den Ölmassenströmen  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s). Demnach ergibt sich ein linearer Anstieg der wärmeübertragenden Fläche. Im Anschluss wird in erster Näherung durch lineare Extrapolation für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s eine wärmeübertragende Fläche ermittelt.

Um die Richtigkeit der abgeleiteten Fläche zu prüfen, wird das eingeleitete Öl gekühlt und die Temperaturreduzierung des PCM zeitlich erfasst, um so, analog zu Gleichung (47), die Entladeleistung  $\dot{Q}$  über PCM-Messdaten zu ermittelt. Im Anschluss wird für alle Ölmassenströme ein Quotient  $f$  aus der Entladeleistung  $\dot{Q}$  des PCM und der ermittelten wärmeübertragenden Fläche  $A$  nach Gleichung (56) gebildet:

$$f = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (56)$$

Ein Vergleich von  $f$  unter den unterschiedlichen Ölmassenströmen soll Aufschluss über die im System vorliegende wärmeübertragende Fläche zwischen Öl und flüssigem PCM bei einem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s geben. Außerdem lässt sich qualitativ der Wärmeübergang beurteilen. Bei einem linearen Zusammenhang zwischen  $\dot{Q}$  und  $A$  entspricht der Quotient einer Konstanten.

Zum Vergleich wird aus den optischen Aufnahmen eine wärmeübertragende Fläche für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s unter der Vernachlässigung von Überlagerung von einzelnen Öltropfen berechnet. Des Weiteren werden als Vereinfachung für diese Berechnung der entstehende Ölstrahl am Öleintritt in den Speicherbehälter als Zylinder und die einzelnen Öltropfen als Kugel betrachtet.

## 6 Experimentelle Ergebnisse und Diskussion

Im vorliegenden Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse zu dem Direktkontaktlatentwärmespeicher im Labormaßstab dargestellt und entsprechend diskutiert.

### 6.1 Beschreibung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs

#### 6.1.1 Schmelzvorgang des PCM im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal

Im vorliegenden Abschnitt wird der Schmelzvorgang für den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal beschrieben. Abbildung 6-1 zeigt hierfür schematisch die Änderung des Kanals während des Schmelzens über der Zeit.

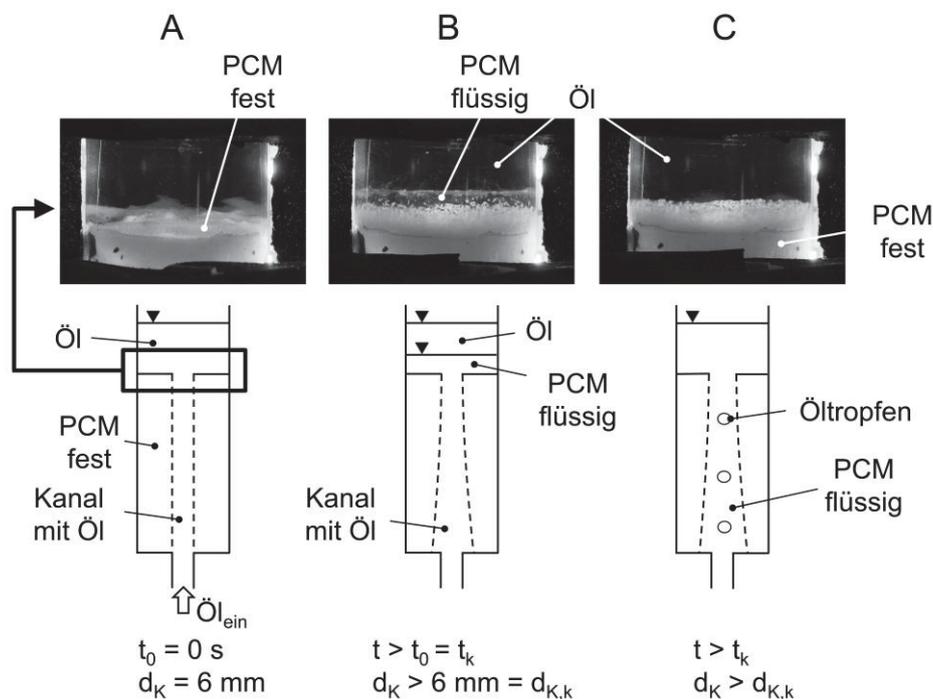


Abbildung 6-1: Änderung des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals während des Schmelzens, A) PCM fest, Start des Schmelzvorgangs, Kanal komplett mit Öl gefüllt, B) Schmelzvorgang führt zu einer Kanalvergrößerung und der Bildung einer flüssigen PCM-Schicht am Ölaustritt aus dem Kanal bis  $t > t_0 = t_k$ . Im Anschluss bei  $t > t_0 > t_k$  läuft das flüssige PCM in den Kanal zurück, C) Geänderter Wärmeübergangsmechanismus. Kanal ist mit flüssigem PCM gefüllt, Tropfen steigen im flüssigen PCM auf; schematische Darstellung

Zu Beginn des Schmelzens liegt, wie in Abbildung 6-1 A zu sehen, der künstlich erzeugte zylindrische Kanal mit einem Durchmesser  $d_K$  von 6 mm innerhalb des PCM vor. Durch das Einleiten von Öl mit einer Temperatur oberhalb der Phasenwechseltemperatur des PCM beginnt sich das PCM zu erwärmen und folglich zu schmelzen. Der Kanal ist hierbei komplett mit Öl geflutet. Wie Abbildung 6-1 B zeigt, bildet sich durch das Einleiten des heißen Öls eine trichterförmige Aufweitung des Kanals, wobei das flüssige PCM teilweise im Kanal verbleibt und teilweise durch den Ölstrom an die Phasengrenze PCM / Öl am Ölaustritt aus dem Kanal

mitgerissen wird. Dies entspricht einer vereinfachten Betrachtung, da das zum Kanalaustritt mitgerissene PCM teilweise an der Kanalinnenwand kristallisiert, wenn die Temperatur der Innenwand kleiner der Phasenwechseltemperatur ist. Der Schmelzvorgang bzw. die Kanalverbreiterung hat zur Folge, dass vereinzelt die Sensoren  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  (siehe Abbildung 4-1) nicht mehr die PCM-, sondern die Öltemperatur anzeigen. Auf dem Weg zum Ölaustritt aus dem Kanal kühlt das PCM ab, wobei es teilweise kristallisiert und teilweise sich am Kanalaustritt ansammelt, wo sich eine flüssige PCM-Schicht bildet. Die entsprechende Fotografie zeigt die Phasengrenze PCM / Öl am Kanalaustritt und entsprechend die flüssige PCM-Schicht. Weiterhin ist in Abbildung 6-1 B zu sehen, dass die Vergrößerung des Kanaldurchmessers  $d_K$  nach einer kritischen Zeit  $t_k$  einen kritischen Kanaldurchmesser  $d_{K,k}$  erreicht. Dies ist der Zeitpunkt, wo der Kanal noch komplett mit Öl geflutet vorliegt. Dieser kritische Zustand ist von außen nicht zu sehen. Allerdings ist die Ermittlung der kritischen Zeit  $t_k$  gut möglich. Bei einer Zeit  $t > t_k$  ist, wie in Abbildung 6-1 C ersichtlich, der Kanaldurchmesser  $d_K$  größer  $d_{K,k}$ , was zur Folge hat, dass das flüssige PCM, welches sich an der Phasengrenze PCM / Öl am Kanalaustritt angesammelt hat, schlagartig in den Kanal zurück strömt. Da das flüssige PCM eine geringere Temperatur als das Öl aufweist, ist das Zurücklaufen gut an den bereits freiliegenden Sensoren zur Messung der PCM-Temperatur  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  durch eine schlagartige Temperaturreduzierung erkennbar. Das Öl tritt nun tropfenförmig aus der Öleintrittsöffnung aus. Eine Änderung des Wärmeübergangsmechanismus liegt vor. Zu Beginn liegt ein konvektiver Wärmeübergang zwischen festem PCM und Öl vor. Durch den Wechsel im Wärmeübergangsmechanismus findet eine konvektive Wärmeübertragung von Öl auf flüssiges PCM statt, wobei das noch feste PCM durch Wärmeleitung zwischen flüssigem und festem PCM aufgeschmolzen wird. Eine solche Änderung des Wärmeübergangsmechanismus wird ebenfalls in [80] und [83] beschrieben. Die Beschreibung des Erstarrungsvorgangs ist für den zylindrischen Kanal hinfällig, da dieser in der vorliegenden Form nur künstlich erzeugt werden kann.

### 6.1.2 Schmelz- und Kristallisationsvorgang des PCM im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal

Nach dem zylindrischen Kanal wird nun der Schmelz- und Kristallisationsvorgang für den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal erläutert. In Abbildung 6-2 ist entsprechend der Schmelzvorgang in sechs Schritten (A bis F) schematisch über der Zeit dargestellt.

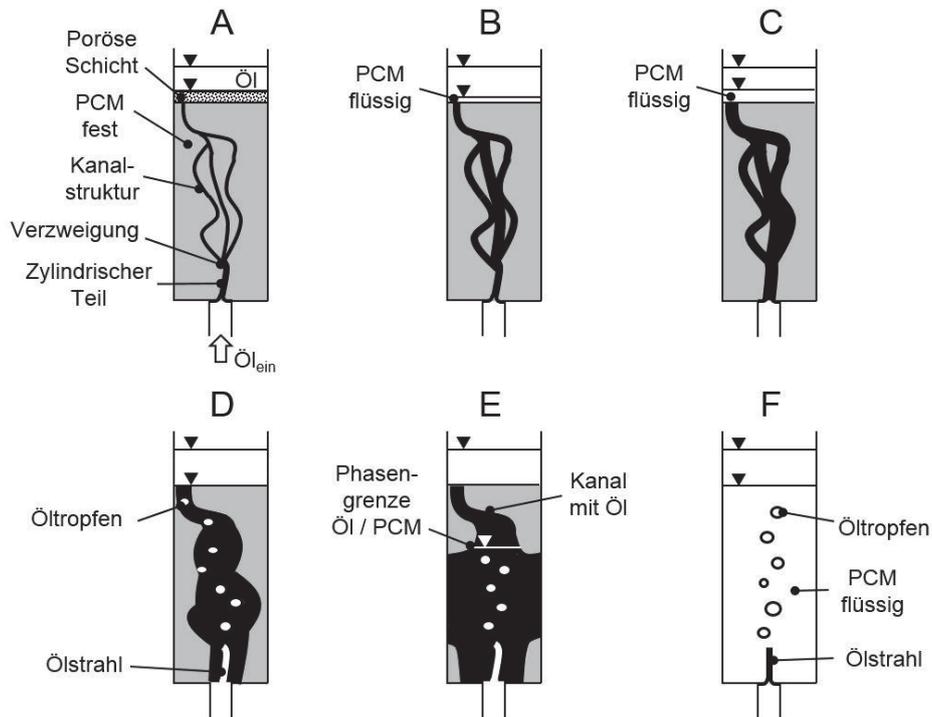


Abbildung 6-2: Schmelzvorgang des realen Kanals, A) Start des Schmelzvorgangs, PCM fest und Kanalstruktur vorhanden, B) Kanalverbreiterung und Bildung einer flüssigen PCM-Schicht am Kanalaustritt, C) weitere Kanalverbreiterung und Vergrößerung der flüssigen PCM-Schicht am Kanalaustritt, D) Rückfluss des flüssigen PCM in das Kanalsystem, E) Aufschmelzen des noch festen PCM, E) PCM komplett aufgeschmolzen; schematische Darstellung

Der Schmelzvorgang wird ausgehend von Abbildung 6-2 A betrachtet. Die Kanalstruktur ist hierbei komplett mit Öl geflutet. Von oben ist lediglich eine poröse Struktur des PCM ersichtlich. Wird Öl mit einer größeren Temperatur als der Phasenwechseltemperatur des PCM in den Speicher geleitet, so erwärmt sich das PCM und beginnt bei Erreichen der Phasenwechseltemperatur zu schmelzen. Wie Abbildung 6-2 B zeigt, beginnt die poröse PCM-Schicht an der Phasengrenze PCM / Öl zuerst zu schmelzen. Außerdem verbreitert sich der Kanal innerhalb des PCM. Das geschmolzene PCM verbleibt teilweise im Kanal und wird teilweise mit dem Ölstrom an die Phasengrenze PCM / Öl am Ölaustritt aus dem Kanal mitgerissen und sammelt sich dort an (analog zum Schmelzvorgang beim zylindrischen Kanal aus Abbildung 6-1). Auf dem Weg zum Kanalaustritt findet teilweise eine Kristallisation des zuvor geschmolzenen PCM an kühleren Stellen im Kanal statt. Es bildet sich bereits hier ein Hauptkanal aus, welcher be-

vorzugt durchströmt wird. Das weitere Schmelzen führt zu einer Zunahme des Kanaldurchmessers bis dahin, dass, wie in Abbildung 6-2 C dargestellt, ein mittlerer kritischer Kanaldurchmesser erreicht wird, wo der Kanal gerade so noch komplett mit PCM geflutet vorliegt. Hierbei ist die Schicht aus flüssigem PCM oberhalb des Kanalaustritts maximal. Im nächsten Schritt, siehe Abbildung 6-2 D, ist der mittlere kritische Kanaldurchmesser überschritten worden. Das flüssige PCM am Kanalaustritt fließt zurück in das Kanalsystem. Dieser Vorgang ist ebenfalls analog zu dem zylindrischen Kanal aus Abbildung 6-1. Auch hier geht das Zurückfließen des PCM mit einem Wechsel im Wärmeübergangsmechanismus einher. Allerdings gilt dies nur für einen gewissen Bereich im PCM. Durch die weitere Zuführung von thermischer Energie verbreitert sich stetig, wie Abbildung 6-2 E zeigt, der Kanaldurchmesser bis dahin, dass im mittleren Teil des Speichers ein Bereich vorliegt, bei dem das PCM vollständig aufgeschmolzen ist. Im unteren Bereich des Behälters sowie im oberen Bereich verbleiben vorerst Gebiete, in denen das PCM noch im festen Zustand vorliegt. Hier ist von einer geringeren wärmeübertragenden Fläche auszugehen, aufgrund einer geringeren Verzweigung der Kanalstruktur innerhalb des PCM. Auffällig ist hierbei, dass die Phasengrenze PCM / Öl in den Speicher zurückfällt und sich im PCM erneut ein Kanal bildet, der komplett mit Öl geflutet ist. Im weiteren Verlauf schmelzen auch diese Bereiche auf, wobei dies in einem vollständig aufgeschmolzenen PCM endet. Dies ist in Abbildung 6-2 F dargestellt. Abbildung 6-3 zeigt den Zustand, der in Abbildung 6-2 E schematisch zu sehen ist. Letztlich liegt im mittleren Teil des Speichers ein Bereich mit einer vergrößerten wärmeübertragenden Fläche vor. Dies ist mit einer zunehmenden Verzweigung der Kanalstruktur zu erklären. Im oberen Teil des PCM ist die Verzweigung geringer ausgeprägt. Teilweise laufen die Kanäle komplett zu einem Kanal zusammen, wie Abbildung 6-3 zeigt.

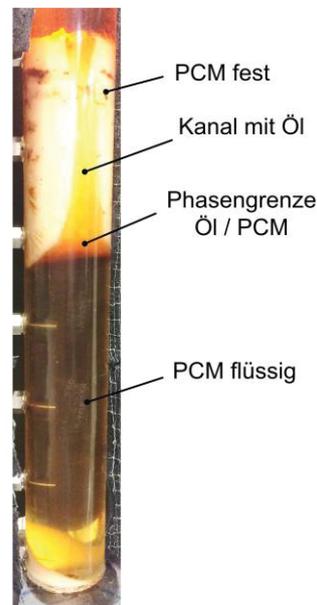


Abbildung 6-3: PCM während des Schmelzens; Fotografie zu Abbildung 6-2 E

Abbildung 6-4 zeigt den Kristallisationsvorgang bzw. die Kanalbildung eines unter realen Bedingungen erzeugten Kanals, wobei der Vorgang in drei Schritten (A bis C) ausreichend beschrieben werden kann.

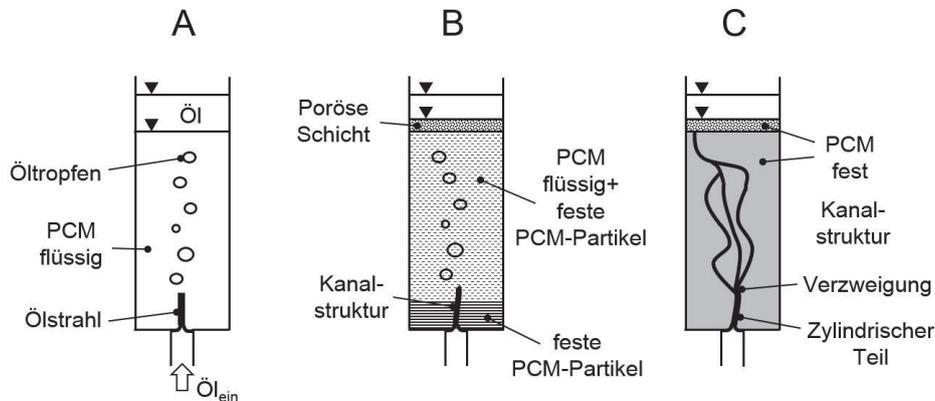


Abbildung 6-4: Kristallisationsvorgang des PCM und Kanalbildung eines realen Kanals, A) Start des Erstarungsvorgangs, PCM komplett flüssig, B) Bildung von festen PCM-Partikeln, die teilweise zum Speicherboden sedimentieren und teilweise als Suspension im flüssigen PCM gehalten werden, C) PCM ist komplett auskristallisiert; schematische Darstellung

Zu Beginn liegt das gesamte PCM im flüssigen Zustand vor, wie in Abbildung 6-4 A (entspricht Abbildung 6-2 F) ersichtlich. Durch den eingestellten Ölmassenstrom tritt das Öl in einem Strahl in den Speicherbehälter. Es folgen ein Strahlzerfall und eine anschließende Tropfenbildung. Durch Einleiten von Öl mit einer Temperatur unterhalb der Phasenwechseltemperatur beginnt sich das PCM abzukühlen und zu kristallisieren. In Abbildung 6-4 B ist ersichtlich, dass erste feste PCM-Partikel entstehen und sich durch den Ölstrahl eine anwachsende zylindrische Kanalstruktur im unteren Bereich des Speicherbehälters ausbildet. Außerdem beginnt sich eine feste poröse Schicht an der Phasengrenze PCM / Öl zu bilden. Diese entsteht durch Anlagerungen von festem PCM an den Öltropfen. Dieses feste PCM sammelt sich an der Phasengrenze oberhalb des PCM. Des Weiteren wird die Bildung dieser festen Schicht durch den Energieentzug von der kalten Ölschicht oberhalb des PCM begünstigt. An der Phasengrenze Öltropfen / PCM bilden sich feste PCM-Partikel, die aufgrund der höheren Dichte im Vergleich zu flüssigem PCM teilweise an den Behälterboden sedimentieren und teilweise, aufgrund der Strömung, im flüssigen PCM in der Schwebelage gehalten werden. Dieser Prozess ist ebenfalls in [85] dargestellt.

Abbildung 6-5 zeigt den Zustand, der in Abbildung 6-4 B schematisch zu sehen ist.

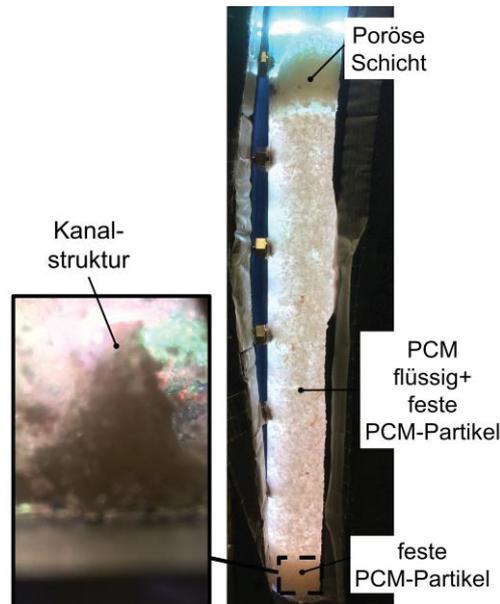


Abbildung 6-5: PCM während der Kristallisation; Fotografie zu Abbildung 6-4 B

Durch weiteren Energieentzug bildet sich im gesamten Speicher ein Kanalsystem aus. Dieses System ist langzeitstabil und in Abbildung 6-4 C schematisch dargestellt. Beim Schmelzen gewährleistet dieses Kanalsystem, dass das PCM mit Öl durchflossen werden kann. Das feste PCM ist im Anschluss im sichtbaren Bereich komplett undurchsichtig. Daher ist von außen keine Kanalstruktur ersichtlich. Lediglich mittels Computertomographie kann die Kanalstruktur im Inneren des PCM, wie in Abbildung 6-11 zu sehen, dargestellt werden.

### 6.1.3 PCM-Mitriss

In den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.2 wird der Schmelz- und Kristallisationsvorgang des PCM bei unterschiedlichen Kanalgeometrien dargestellt. Ist beispielsweise der WTF-Massenstrom zu groß eingestellt, so kann es während des Schmelz- oder Kristallisationsvorgangs zu PCM-Mitriss kommen. Beim PCM-Mitriss handelt es sich um den Austrag von PCM aus dem Speicherbehälter in den WTF-Kreislauf. Hierbei kann sich das PCM im Rohrleitungssystem der Anlage ansammeln und kann zu Verstopfungen des WTF-Kreislaufs führen. Im vorliegenden Abschnitt wird erläutert, in welcher Form dieser Mitriss auftritt, sodass dieser rechtzeitig unterbunden werden kann.

In der Literatur ist bisher nur eine Art des PCM-Mitrisses beschrieben, die während des Erstarungsvorgangs des PCM auftritt. [80], [81], [82] Hierbei liegt die in Abbildung 6-4 A dargestellte Strömungsform vor. Um die kalten WTF-Tropfen bildet sich eine Hülle aus festem PCM. Diese Schicht sammelt sich an der Phasengrenze WTF / PCM oberhalb der PCM-Schicht und wächst während der Messung stetig. Abbildung 6-6 zeigt die WTF-Tropfen mit einer PCM-

Hülle an der Phasengrenze WTF / PCM. Zur Verdeutlichung ist die Phasengrenze (gestrichelte schwarze Linie in Abbildung 6-6) sowie die Speicherinnenwand (durchgezogene schwarze Linie in Abbildung 6-6) nachträglich in die Abbildung aus [82] eingefügt worden.

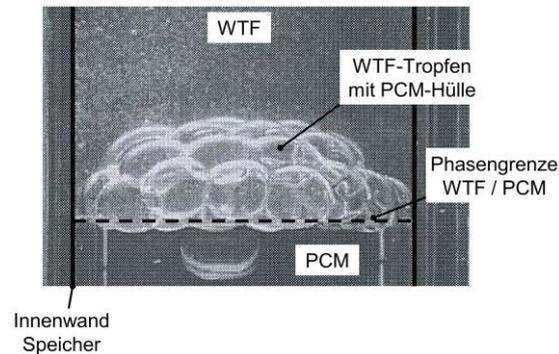


Abbildung 6-6: PCM-Mitriss durch Anlagerung von PCM am WTF; nach [82], modifiziert

Eine zweite Art des PCM-Mitrisses, welche in der Literatur nicht beschrieben ist, ist während des Aufschmelzens des PCM detektiert worden. Hierbei durchströmt das Öl den Kanal und schmilzt das PCM entsprechend auf. Es liegt die Strömungsform aus Abbildung 6-2 A / B vor. Beim Schmelzen des PCM kommt es dazu, dass flüssiges PCM mit dem Öl aus dem Kanal herausgefördert wird und sich am Kanalaustritt ansammelt. Durch eine zu große Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Kanals, verursacht durch einen zu großen Ölmassenstrom, wird das flüssige PCM allerdings regelrecht aus dem Kanal herauskatapultiert wie in Abbildung 6-7 zu sehen. Hierbei bildet sich eine Vielzahl von kleinen flüssigen PCM-Tropfen, welche, je nach Ölüberdeckung, in den Ölkreislauf gelangen bzw. eingesaugt werden oder aufgrund der größeren Dichte im Vergleich zu dem Öl zurück auf die feste PCM-Schicht an der Phasengrenze PCM / Öl absinken. Abbildung 6-7 zeigt die flüssigen PCM-Partikel in der Ölphase oberhalb des festen PCM während des Schmelzvorgangs.

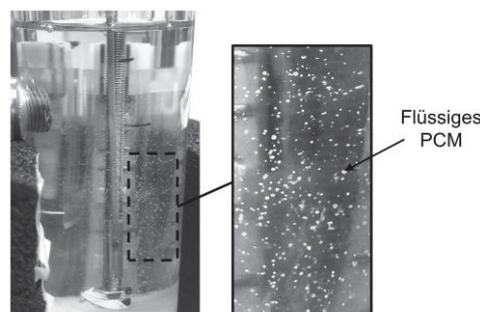


Abbildung 6-7: Flüssige PCM-Partikel in der Ölphase oberhalb des festen PCM während des Schmelzvorgangs eines realen Kanals

Durch eine Reduzierung des Ölmassenstroms wird ebenfalls der PCM-Mitriss reduziert.

### 6.2 Wärmeübertragende Flächen

Im vorliegenden Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse zu den im Speichersystem vorliegenden wärmeübertragenden Flächen sowohl bei kristallisiertem (Bereich 1) als auch bei flüssigem (Bereich 3) PCM dargestellt.

#### 6.2.1 Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche im erstarrten PCM (Computertomographie)

Abbildung 6-8 zeigt die Aufnahme des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals (blau eingefärbt) innerhalb des PCM, welcher mit Hilfe der Computertomographie dargestellt werden kann.

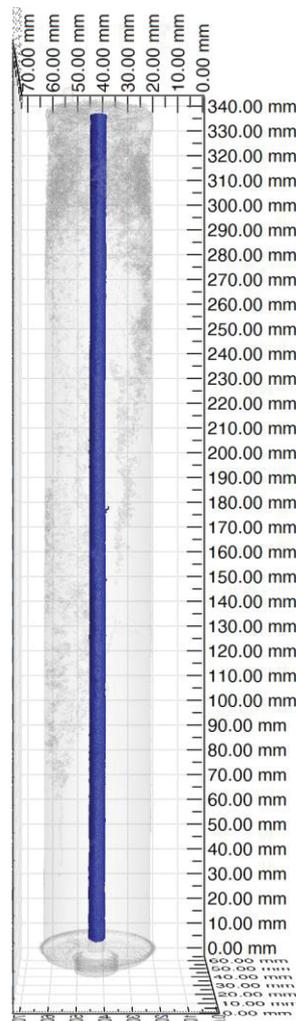


Abbildung 6-8: CT-Aufnahme des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals mit einem Durchmesser von 6 mm

Der künstlich erzeugte Kanal weist eine gleichmäßige zylindrische Form über die gesamte Kanalhöhe auf. Der mittlere Durchmesser des Kanals beträgt 6,20 mm (+/- 0,08 mm). Die Erzeugung dieses Kanals ist in Abschnitt 5.1 dargestellt.

Abbildung 6-9 zeigt auf der rechten Seite den Speicherbehälter mit den Temperaturmessstellen zur Erfassung der jeweiligen PCM-Temperatur. Auf der linken Seite in Abbildung 6-9 sind, entsprechend zu der Höhe der Temperaturfühler, CT-Aufnahmen des Kanals dargestellt. Die CT-Aufnahmen zeigen den Speicherbehälter von der Draufsicht. Hierbei ist mittig der blau eingefärbte Kanal umgeben von PCM (hellgrau) zu sehen. In dunkelgrau ist die Wandung des Speicherbehälters zu erkennen. Des Weiteren ist für jede CT-Aufnahme der Kanaldurchmesser ersichtlich. Der Kanaldurchmesser wird hier ermittelt, um eine Mantelfläche des zylindrischen Kanals zu berechnen, welche der wärmeübertragenden Fläche entspricht.

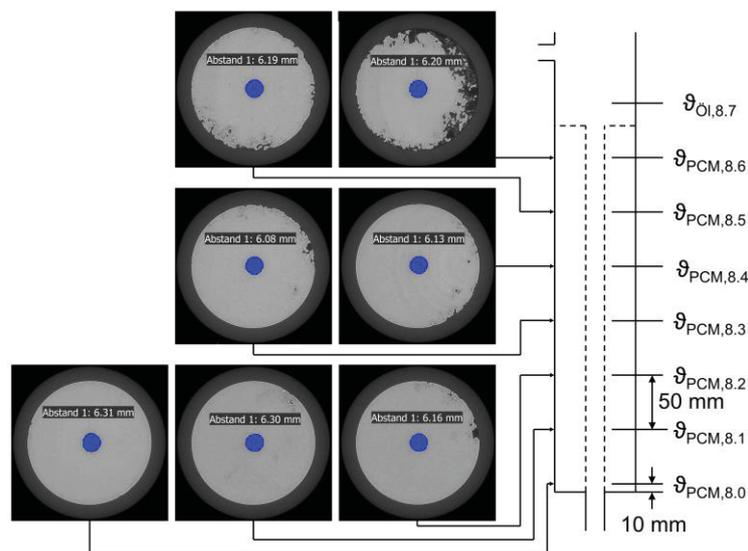


Abbildung 6-9: Struktur und Durchmesser des zylindrischen Kanals bei unterschiedlichen Höhen im PCM

Die gesamte im Kanal vorliegende Oberfläche beträgt aus den Messdaten der Computertomographie 93,65 cm<sup>2</sup>. Bei der Kanalhöhe von 319 mm ergibt sich für einen Kanal mit einer glatten Wandung rechnerisch eine Oberfläche von 62,23 cm<sup>2</sup>. Der künstlich erzeugte zylindrische Kanal besitzt eine um 31,42 cm<sup>2</sup> vergrößerte Oberfläche. Diese vergrößerte Oberfläche lässt sich durch die Oberflächenstruktur innerhalb des Kanals erklären.

Abbildung 6-10 zeigt einen Ausschnitt des Kanals und die vorliegende Oberflächenstruktur des untersuchten Kanals.

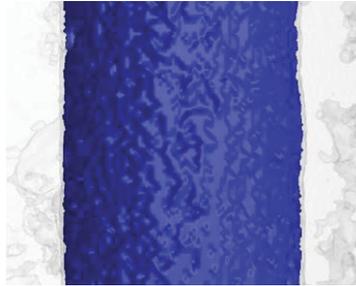


Abbildung 6-10: Oberflächenstruktur der PCM-Wand im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal

Bei der Darstellung aus Abbildung 6-10 ist ersichtlich, dass der Kanal etliche Vertiefungen besitzt und keine, wie zuvor angenommen, glatte Oberfläche. Bei laminarer Strömung besteht die Möglichkeit, dass diese Oberflächenstruktur allerdings keinen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten oder die wärmeübertragende Fläche besitzt, da der makroskopische Querschnitt nicht vorhanden ist. Die vorliegende laminare Schichtströmung erzeugt durch Abdeckung der Oberflächenstruktur selbst eine glatte Wand. [104]

Abbildung 6-11 zeigt die Aufnahme des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals (rot eingefärbt) innerhalb des PCM mittels der Computertomographie.

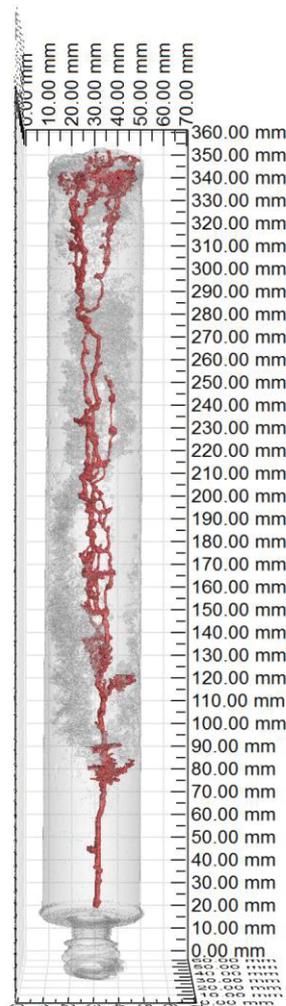


Abbildung 6-11: CT-Aufnahme des realen Kanals

Die in der Abbildung 6-11 ersichtlichen dunkelgrauen porösen Bereiche entstehen während der Kristallisation. Es bilden sich Räume im PCM aus, in denen flüssiges PCM von festem PCM eingeschlossen wird. Erstarrt auch das PCM in diesen Räumen, so kommt es durch die Volumenkontraktion zu einer Ausbildung von Hohlräumen, welche in den CT-Aufnahmen ersichtlich sind und eine poröse Struktur ausbilden.

Abbildung 6-12 zeigt im Detail den Kanal (rot eingefärbt) und zusätzlich einzelne Hohlräume sowie auch am Randbereich des Speicherbehälters größere poröse Flächen. Hierbei ist die Blickrichtung von oben in den Speicher, wobei sich der Betrachter innerhalb des PCM befindet und sowohl den Kanal als auch die Speicherwandung sieht. Unten, am Boden des Behälters, ist die Verschraubung der Öleintrittsöffnung ersichtlich.

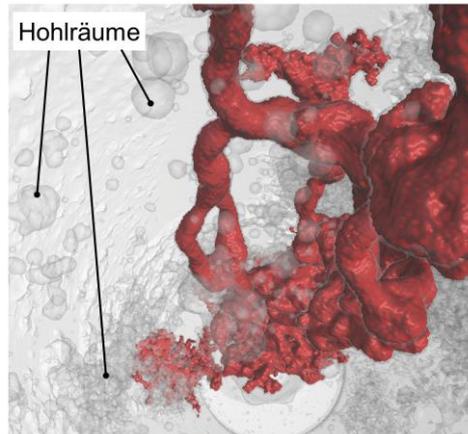


Abbildung 6-12: Kanal (rot) und eingeschlossene Hohlräume im PCM  
(Sicht von oben in den Speicher, Standpunkt innerhalb des PCM)

In Abbildung 6-11 bzw. Abbildung 6-13 ist zu erkennen, dass sich der Kanal in unterschiedliche Bereiche unterteilt. Nach ca. 60 mm ist ein näherungsweise zylindrisches Kanalstück mit einem Innendurchmesser von ca. 2,40 mm ( $\pm 0,17$  mm) zu erkennen, welches durch den eintretenden Ölstrahl gebildet wird.

Abbildung 6-13 zeigt neben dem gesamten Kanal das näherungsweise zylindrische Kanalstück im Detail und entsprechend für unterschiedliche Höhen CT-Aufnahmen des Kanalstücks von der Draufsicht für den gesamten Speicherbehälter und im Detail lediglich die Geometrie des Kanalquerschnitts. Hierbei ist zu erkennen, dass in erster Näherung eine zylindrische Geometrie des Kanals vorliegt.

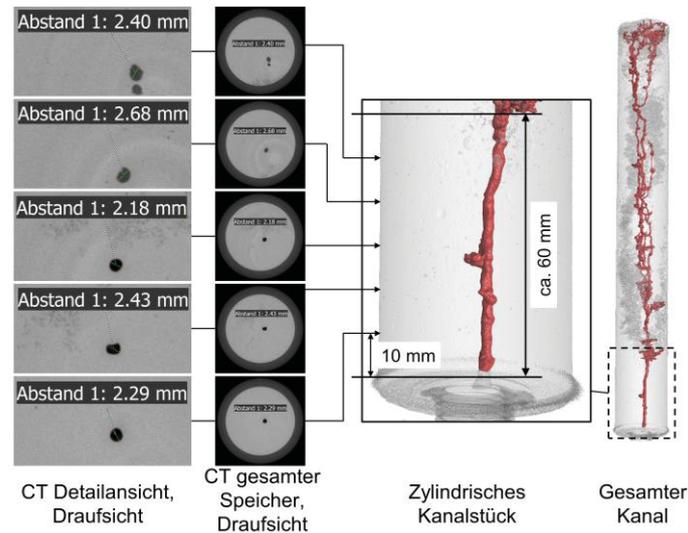


Abbildung 6-13: Struktur und Durchmesser des zylindrischen Kanalabschnitts des realen Kanals bei unterschiedlichen Höhen im PCM

Abbildung 6-14 zeigt die Oberfläche des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals. Wie auch bei dem künstlichen zylindrischen Kanal (vgl. Abbildung 6-10) liegt eine Oberflächenstruktur mit Vertiefungen und Unebenheiten vor.

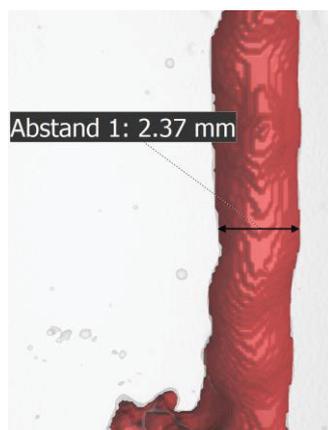


Abbildung 6-14: Oberflächenstruktur der PCM-Wand im realen Kanal

Im Anschluss an den ersten näherungsweise zylindrischen Kanalabschnitt folgt eine schwammartige Ausprägung. Es folgt erneut ein näherungsweise zylindrischer Kanalabschnitt sowie eine zweite schwammartige Ausprägung, wobei nach ca. 112 mm eine erste Verzweigung des Hauptkanals stattfindet, wie die CT-Aufnahme aus Abbildung 6-15 zeigt. Der Strahlzerfall sorgt letztlich für die Änderung der Geometrie des Kanals und für eine entsprechende Verzweigung.

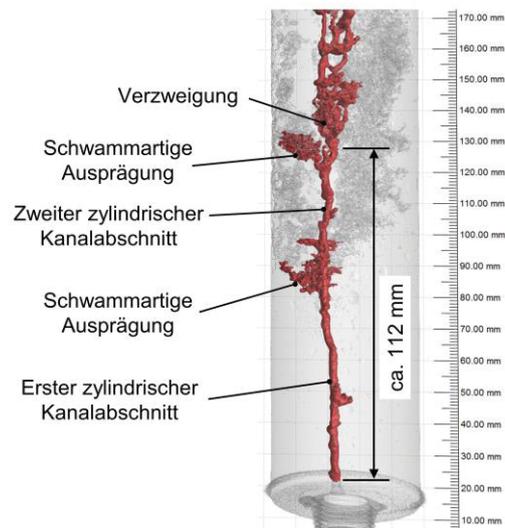


Abbildung 6-15: Zylindrischer Abschnitt im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal und erste Verzweigung des Kanals

Die Analyse der Mantelfläche hat ergeben, dass die wärmeübertragende Oberfläche im Speicherbehälter für den Bereich 1 zum Beispiel beim Start der Beladung  $168,1 \text{ cm}^2$  beträgt. Außerdem ist ersichtlich, dass die erhöhte Verzweigung im mittleren Abschnitt des Kanals zu einer erhöhten wärmeübertragenden Fläche führt, was sich letztlich z. B. in einer verkürzten Aufschmelzzeit dieses Bereiches äußert. Dies ist ebenfalls in Abschnitt 6.1.2 beschrieben und speziell in Abbildung 6-3 ersichtlich.

### 6.2.2 Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche im erstarrten PCM (Temperaturmessung)

Zur Ermittlung der wärmeübertragenden Flächen an erstarrtem PCM ist nach Gleichung (54) eine Temperaturmessung des Öls am Eintritt und am Austritt des Speichers bzw. des PCM durchzuführen, um letztlich die Leistung  $\dot{Q}$  während der Erwärmung des PCM zu ermitteln. Abbildung 6-16 zeigt für den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal (A) und den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal (B) den jeweiligen Temperaturverlauf der Ölein- und der Ölaustrittstemperatur. Die Temperaturschwankungen in Abbildung 6-16 A und B sind durch die Schwankungen der optischen Temperaturmessung zu begründen.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass durch das Rührinstrument eine Homogenisierung der Temperatur in der Ölphase am Austritt des PCM erreicht wird und somit die Temperatur, welche optisch und per Thermoelement (Messstelle  $\vartheta_{\text{Öl},8,7}$  in Abbildung 5-7) gemessen wird, identisch ist. Um den Messaufwand zu reduzieren, ist aus diesem Grund die Ölaustrittstemperatur bei der Messung am unter realen Bedingungen erzeugten Kanal mittels des Thermoelements durchgeführt und auf die aufwendigere optische Messmethode verzichtet worden.

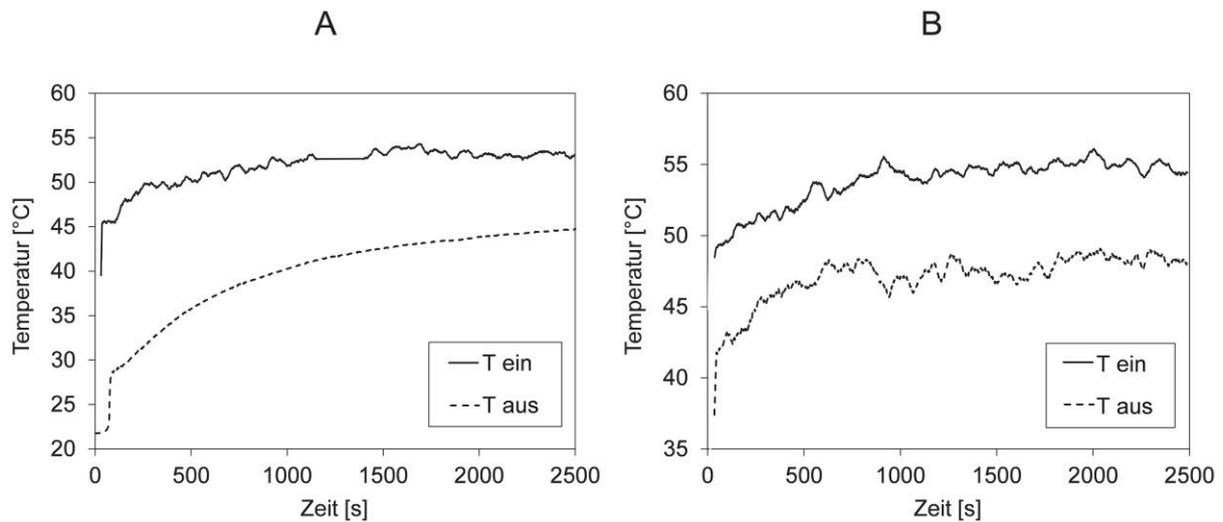


Abbildung 6-16: Temperaturverlauf der Ein- und Austrittstemperatur für den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal (A) und den künstlichen zylindrischen Kanal (B) bei einem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s

Zur Berechnung des Wärmestroms  $\dot{Q}$  nach Gleichung (11) wird der erforderliche Temperaturgradient  $\Delta\vartheta$  während der Anstiegsphase der Ölaustrittstemperatur ermittelt. Abbildung 6-16 A zeigt, dass aufgrund der größeren wärmeübertragenden Oberfläche des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals eine größere Temperaturdifferenz in dem Anstiegsbereich vorliegt. Für diesen Kanal erstreckt sich die Anstiegsphase in einem Zeitintervall von 80 bis 1250 s. Bei dem künstlich erzeugten zylindrischen Kanal liegt das Zeitintervall hierbei bei 10 bis 910 s. Tabelle 6-1 fasst die Ergebnisse zur Ermittlung der Wärmeströme zusammen.

Tabelle 6-1: Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Ölein- und Ölaustrittstemperatur und Beladeleistung für den unter realen Bedingungen erzeugten und den künstlichen zylindrischen Kanal

	Realer Kanal	Zylindrischer Kanal
Mittlere Temperaturdifferenz [K]	13,62 (+/- 0,61)	6,76 (+/- 0,38)
Beladeleistung [W]	20,01 (+/- 0,91)	10,62 (+/- 0,71)

Zur Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals wird nach Gleichung (54) der Quotient aus der Erwärmungsleistung des PCM des unter realen Bedingungen erzeugten Kanals und der Erwärmungsleistung des PCM des künstlichen zylindrischen Kanals gebildet und mit der wärmeübertragenden Fläche des künstlichen zylindrischen Kanals multipliziert. Der künstlich erzeugte zylindrische Kanal besitzt eine Höhe von 297 mm. Aus den CT-Aufnahmen ergibt sich, dass eine Oberfläche von  $0,294 \text{ cm}^2$  pro mm Kanalhöhe vorliegt. Demnach besitzt der untersuchte künstlich erzeugte zylindrische Kanal eine Oberfläche von  $87,32 \text{ cm}^2$ .

Mittels der Temperaturmessung wird für den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal eine wärmeübertragende Fläche von  $165,0 \text{ cm}^2$  ( $\pm 10,9 \text{ cm}^2$ ) ermittelt. Im Vergleich hierzu ist mittels der Computertomographie eine Fläche von  $168,1 \text{ cm}^2$  ermittelt worden. Demnach kann durch eine Temperaturmessung der Ölein- und Ölaustrittstemperatur in guter Näherung die wärmeübertragende Fläche eines unter realen Bedingungen erzeugten Kanals für den Bereich 1, in dem das PCM in fester Form vorliegt, bestimmt werden. Der Vorteil dieser Temperaturmessung ist, dass sie sowohl zeitsparend ist, als auch deutlich geringere Kosten aufweist.

Die Messergebnisse zeigen, dass die getroffenen Annahmen aufgrund der vorliegenden Beobachtungen korrekt waren. Demnach liegt im Mittel gesehen im künstlich erzeugten zylindrischen wie auch im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal eine Ähnlichkeit bezüglich der Strömungsform innerhalb des Kanals vor. Wie bereits die CT-Aufnahmen zeigen, sind die im PCM vorliegenden Kanalstrukturen feiner und weisen einen geringeren Durchmesser als im künstlichen zylindrischen Kanal auf. Dies führt zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit des Öls im Kanal. Durch die Verzweigung der Kanalstruktur verteilt sich allerdings der gesamt vorliegende Ölmassestrom auf viele einzelne Kanäle, was wiederum die Strömungsgeschwindigkeit im einzelnen Kanalabschnitt reduziert.

### 6.2.3 Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche bei geschmolzenem PCM

Ist das PCM komplett aufgeschmolzen, so liegt es in flüssiger Form und entsprechend der Bereich 3 vor. Um, wie beschrieben, eine maximale Be- und Entladeleistung zu erzielen, ist ein großer WTF-Massenstrom erforderlich. Dieser darf allerdings nicht so groß sein, dass es, wie in [82] beschrieben zu einer Emulsion zwischen WTF und PCM kommt. Durch den maximal möglichen WTF-Massenstrom soll sich ein WTF-Strahl im ersten Abschnitt des Speicherbehälters ausbilden, gefolgt von einem Strahlzerfall. Durch den Zerfall kommt es zu einer Bildung von einer Vielzahl von Einzeltropfen. Optisch ist die Erfassung solch einer sich ergebenden wärmeübertragenden Oberfläche (entspricht der gesamten Grenzfläche zwischen Öl und PCM) schwer möglich, da sich überlagernde Tropfen mit teilweise kleinen Durchmessern von ca. 1 mm im System bilden.

Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, wird daher für drei geringere Ölmasseströme ( $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$ ) die entsprechende Tropfengröße und die gesamt resultierende wärmeübertragende Fläche ermittelt. Hier liegt kein Ölstrahl vor. Die Tropfen treten lediglich als Einzeltropfen in den Speicherbehälter. Im Anschluss wird aus dem Ölmassestrom und der gesamt

im PCM vorliegenden wärmeübertragenden Fläche ein Zusammenhang ermittelt und auf den Massenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s übertragen. Durch das Einleiten des kalten Öls wird dem PCM Energie entzogen. Es kann der Faktor  $f$  aus der Entladeleistung  $\dot{Q}$  und der ermittelten wärmeübertragenden Fläche  $A$  nach Gleichung (56) aus Abschnitt 5.4 ermittelt werden. Mittels  $f$  wird die ermittelte wärmeübertragende Fläche  $A$  für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s überprüft.

Abbildung 6-17 A zeigt die Form der Ölphase bei dem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s. Wird das Öl in dieser Form eingeleitet, so wird dies als Strahlmodell bezeichnet. In Abbildung 6-17 B ist die Form der Ölphase bei dem Ölmassenstrom von  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s und im Detail die sich ergebende Tropfenform in einer schematischen Darstellung zu sehen. Steigt das eingeleitete Öl lediglich in Einzeltropfen auf, so wird dies als Tropfenmodell bezeichnet.

In Abbildung 6-17 ist das PCM gelblich und die Ölphase rot (eingefärbt mit dem Farbstoff Sudanrot G) dargestellt.

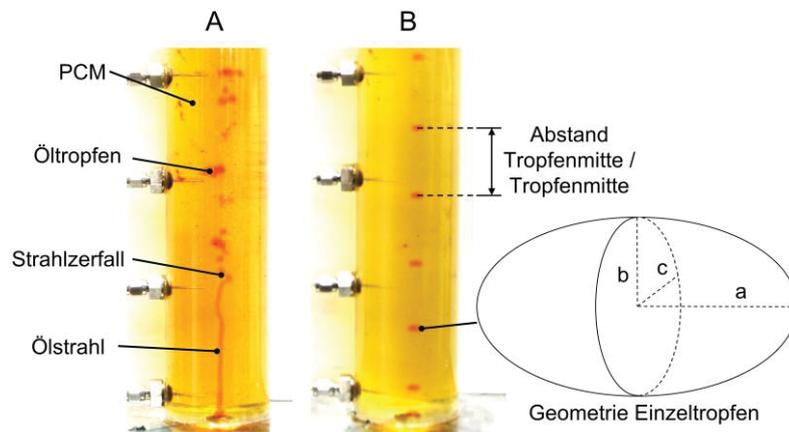


Abbildung 6-17: Eintritt der Ölphase in den Speicherbehälter bei einem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s (A) und bei einem Ölmassenstrom von  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s (B)

In Abbildung 6-17 A ist eindeutig ein Ölstrahl im unteren Teil des Speicherbehälters zu erkennen. Gefolgt von einem Strahlzerfall und der Ausbildung von einzelnen Öltropfen unterschiedlicher Größe. Wie zu erwarten und entsprechend in [82] beschrieben, steigt das Öl bei Reduzierung des Ölmassenstroms in Einzeltropfen durch das PCM (siehe Abbildung 6-17 B). Außerdem ist in Abbildung 6-17 B zu sehen, dass die Tropfen eine elliptische Form aufweisen. Hierbei entspricht das Längenmaß  $a = c$ .

Die Auswertung der geometrischen Daten sowie der Aufstiegsgeschwindigkeit sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Entspricht die Standardabweichung einer relativen Abweichung von kleiner 2 % vom Mittelwert eines Messwertes, so wird die Standardabweichung nicht angegeben.

Tabelle 6-2: Geometrische und strömungscharakteristische Kenndaten der Tropfen bei den Ölmassenströmen  $1,73, 2,07, 2,60$  und  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s

	Ölmassenstrom x $10^{-4}$ [kg/s]			
	1,73	2,07	2,60	6,50
Tropfengröße [mm]	a: 2,6 b: 2,0	a: 2,5 b: 1,9	a: 2,5 b: 1,9	a: - b: -
Durchmesser kugeläquivalent [mm]	4,7	4,6	4,6	-
Volumen pro Tropfen [cm <sup>3</sup> ]	0,054 (+/- 0,002)	0,051 (+/- 0,003)	0,051 (+/- 0,001)	-
Oberfläche pro Tropfen [cm <sup>2</sup> ]	0,69	0,67	0,67	-
Tropfenanzahl pro s [Tropfen/s]	4,19	5,03	5,77	-
Aufstiegsgeschwindigkeit [cm/s]	10,82	11,30	10,70	-
Resultierender Ölmassenstrom x $10^{-4}$ [kg/s]	1,85	2,16	2,51	-
Abstand Tropfen zu Tropfen [mm]	34,3	27,2	21,5	-
Anzahl Tropfen im PCM (gesamt) [-]	8,96	11,3	14,3	-
Wärmeübertragende Fläche (gesamt) [cm <sup>2</sup> ]	6,19 (+/- 0,16)	7,52 (+/- 0,26)	9,55 (+/- 0,24)	24,61 (+/- 0,57)

Es ist zu sehen, dass die Tropfengeometrie und die Aufstiegsgeschwindigkeit bei den Ölmassenströmen von  $1,73, 2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s näherungsweise identisch sind. Lediglich der Abstand der Einzeltropfen von Tropfenmittelpunkt zu Tropfenmittelpunkt reduziert sich bei größer werdendem Ölmassenstrom entsprechend. Dadurch erhöht sich bei steigendem Ölmassenstrom die Anzahl an Tropfen innerhalb des gesamten PCM und dementsprechend auch die gesamt im PCM vorliegende Phasengrenzfläche zwischen PCM und Öl, was der wärmeübertragenden Fläche entspricht. Es ist zu sehen, dass die Ermittlung des Ölmassenstroms über die Geometrie der Tropfen und der vorliegenden Strömung eine gute Übereinstimmung mit dem real vorliegenden Ölmassenstrom ergibt.

Abbildung 6-18 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Ölmassenstrom und der gesamten im System vorliegenden wärmeübertragenden Fläche.

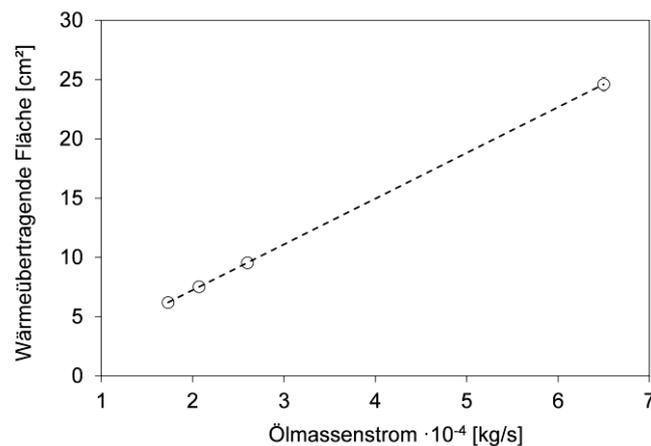


Abbildung 6-18: Wärmeübertragende Fläche in Abhängigkeit des Ölmassenstroms bei den Ölmassenströmen  $1,73$ ,  $2,07$ ,  $2,60$  und  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s

Da bei den Ölmassenströmen  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s die Tropfengeometrie und die Aufstiegs geschwindigkeit näherungsweise konstant sind, liegt für diese Massenströme ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient vor. Lediglich durch die erhöhte wärmeübertragende Fläche ist ein Ansteigen des übertragenen Wärmestroms bei den Massenströmen  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s erklärbar. Wird das Tropfenmodell auf das Strahlmodell übertragen, so lässt sich durch lineare Extrapolation für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s eine wärmeübertragende Fläche von  $24,61 \text{ cm}^2$  ( $\pm 0,57 \text{ cm}^2$ ) ermitteln. Dies würde einer gesamten Anzahl an Öltröpfen im PCM von  $35,50$  entsprechen. Um die Richtigkeit der ermittelten Fläche für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s zu beurteilen, wird durch Vermessen des Ölstrahls und der Tropfen die wärmeübertragende Fläche abgeschätzt. Hierbei werden der Strahl als Zylinder angenommen und die Tropfen als Kugeln. Sich überlagernde Tropfen können hier nicht berücksichtigt werden. Der untersuchte Ölstrahl / die Tropfen sind in der Abbildung in Anhang 2 zu sehen. Die Mantelfläche des Ölstrahls beträgt  $10,6 \text{ cm}^2$  und die Oberfläche der Tropfen beträgt  $11,9 \text{ cm}^2$ . In Summe ergibt sich eine gesamte Oberfläche von  $22,5 \text{ cm}^2$ , die der wärmeübertragenden Fläche entspricht. Demnach ist die ermittelte wärmeübertragende Fläche für den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s aus den Ölmassenströmen  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s in der gleichen Größenordnung wie die graphisch ermittelte wärmeübertragende Fläche aus Anhang 2.

Allgemein gilt die Annahme, dass weiterhin eine Zunahme im übertragenen Wärmestrom durch die erhöhte wärmeübertragende Fläche zu erklären ist, unabhängig ob das Strahl- oder das Tropfenmodell vorliegt. Um dies zu prüfen, wird nach Gleichung (56) der Quotient aus übertragendem Wärmestrom  $\dot{Q}$  und der wärmeübertragenden Fläche  $A$  gebildet, welcher als

Faktor  $f$  bezeichnet wird. Ist die Bedingung gegeben, so ist  $f$  für alle Ölmassenströme eine Konstante. Zur Ermittlung von  $\dot{Q}$  wird das PCM durch Einleiten von Öl mit einer Temperatur von  $49\text{ °C}$  gekühlt.

Abbildung 6-19 zeigt die Messdaten zur Temperaturreduzierung des PCM als Funktion der Zeit während der Abkühlung des PCM durch das eingeleitete kalte Öl. Hierbei entspricht jede Kurve der mittleren Temperatur innerhalb des gesamten PCM.

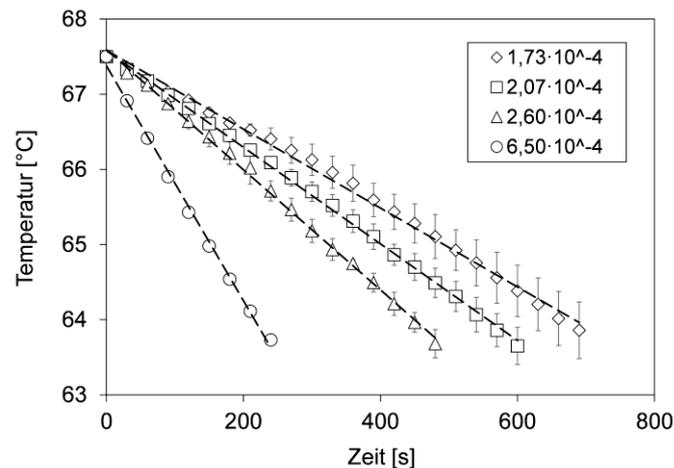


Abbildung 6-19: Abkühlgeschwindigkeit des PCM in Abhängigkeit der Zeit bei den Ölmassenströmen  $1,73$ ,  $2,07$ ,  $2,60$  und  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s

Abbildung 6-19 zeigt, dass je größer der Ölmassenstrom, desto schneller wird das PCM abgekühlt und desto größer ist die Entladeleistung. Analog lässt sich so für das PCM nach Gleichung (47) aus den Temperaturmessdaten entsprechend die Entladeleistung ermitteln.

Durch das Abkühlen des PCM ist ein Wärmestrom erforderlich, der die Energie auf das Öl konvektiv überträgt. Den Zusammenhang zwischen der Wärmeübertragung zeigt Gleichung (57):

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_{\text{PCM}} \cdot c_{p,l,\text{PCM}} (\vartheta_S - \vartheta_E)}{\Delta t} = \alpha \cdot A (\overline{\vartheta_{\text{PCM}} - \vartheta_{\vartheta_{A,\text{Tr}}}}) \quad (57)$$

In Abbildung 6-20 ist für die 4 Ölmassenströme die Entladeleistung in Abhängigkeit des Ölmassenstroms dargestellt.

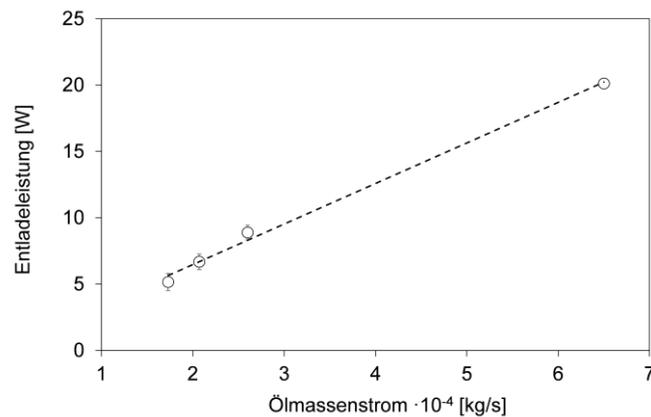


Abbildung 6-20: Entladeleistung in Abhängigkeit des Ölmassenstroms bei den Ölmassenströmen 1,73, 2,07, 2,60 und 6,50  $\cdot 10^{-4}$  kg/s

In Abbildung 6-20 ist, wie erwartet, ein linearer Zusammenhang zwischen Entladeleistung und des Ölmassenstroms für die Ölmassenströme 1,73, 2,07 und 2,60  $\cdot 10^{-4}$  kg/s zu sehen, welcher sich aus der zunehmenden wärmeübertragenden Fläche  $A$  ergibt, da durch die Erhöhung des Ölmassenstroms entsprechend mehr Tropfen im flüssigen PCM aufsteigen (vgl. Tabelle 6-2). Der lineare Zusammenhang erstreckt sich auch über den Ölmassenstrom von 6,50  $\cdot 10^{-4}$  kg/s. Der Faktor  $f$  aus Gleichung (56) soll nun zeigen, ob die lineare Extrapolation zur Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche aus dem Tropfenmodell auf das Strahlmodell übertragbar ist.

Tabelle 6-3 zeigt die Messergebnisse der Entladung des PCM und den resultierenden Faktor  $f$ . Entspricht die Standardabweichung einer relativen Abweichung von kleiner 2 % vom Mittelwert eines Messwertes, so wird die Standardabweichung nicht angegeben.

Tabelle 6-3: Messergebnisse der Entladung für die Ölmassenströme 1,73, 2,07, 2,60 und 6,50  $\cdot 10^{-4}$  kg/s

	Ölmassenstrom $\times 10^{-4}$ [kg/s]			
	1,73	2,07	2,60	6,50
Temperaturdifferenz [K]	4,02	4,03	4,03	4,03
Zeit [s]	755	629,5	508	256,5
	(+/- 62)	(+/- 40,5)	(+/- 24)	
Entzogene Energiemenge [kJ]	5,82	5,83	5,83	5,83
Resultierender Wärmestrom [W]	5,17	6,69	8,85	20,12
	(+/- 0,65)	(+/- 0,59)	(+/- 0,56)	
$f$ [W/cm <sup>2</sup> ]	0,83	0,87	0,92	0,82
	(+/- 0,10)	(+/- 0,09)	(+/- 0,07)	(+/- 0,01)

Für die drei Ölmassenströme  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s ist der Faktor  $f$ , wie erwartet, in erster Näherung eine Konstante mit einem Mittelwert von  $0,88$  ( $\pm 0,03$ ). Für einen Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s besitzt  $f$  einen Wert von  $0,82$ . Demnach wird bei der linearen Extrapolation zur Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche für das Strahlmodell die Fläche im Vergleich zum Tropfenmodell leicht überschätzt, da  $f$  für die Ölmassenströme  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s größer ist als für den Massenstrom  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s. Wird die Definition des Faktors  $f$  aus Gleichung (56) entsprechend mit Gleichung (57) erweitert, so folgt Gleichung (58):

$$f = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\frac{m_{\text{PCM}} \cdot c_{p,l,\text{PCM}} (\vartheta_S - \vartheta_E)}{t}}{A} = \frac{\alpha \cdot A (\vartheta_{\text{PCM}} - \vartheta_{\text{öl}})}{A} \quad (58)$$

Gleichung (58) zeigt, dass die Erniedrigung der leicht überschätzten Fläche  $A$  für den Ölmassenstrom  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s dazu führt, dass, um den gemessenen Wärmestrom  $\dot{Q}$  aus der Messung konstant zu halten, der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  im Vergleich zu den Ölmassenströmen aus dem Tropfenmodell leicht erhöht sein muss. Bei dem Ölmassenstrom  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s ist im Vergleich zu den Ölmassenströmen  $1,73$ ,  $2,07$  und  $2,60 \cdot 10^{-4}$  kg/s eine erhöhte PCM-Bewegung im Speicherbehälter aufgetreten, was zu einem erhöhten Wärmeübergang führen kann.

### 6.3 Wärmeübergangskoeffizienten

Im vorliegenden Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse zur Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an festem (Bereich 1) und flüssigem (Bereich 3) PCM und während des Schmelzens des PCM (Bereich 2) dargestellt.

#### 6.3.1 Wärmeübergangskoeffizienten an festem PCM

Abbildung 6-21 zeigt den Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche Ölmassenströme im zeitlichen Verlauf, wobei das PCM im festen Aggregatzustand vorliegt und auch verbleibt und demnach dem Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich 1 entspricht. Es soll die Abhängigkeit des Ölmassenstroms bzw. der Strömungsgeschwindigkeit des Öls auf den Wärmeübergangskoeffizienten gezeigt werden. Hintergrund ist, dass im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal letztlich Kanäle mit geringeren Durchmessern vorliegen (vergleiche Abbildung 6-11). Um eine Aussage über lokal erhöhte Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal machen zu können, ist entsprechend bei konstantem zylindrischem Kanaldurchmesser der Ölmassenstrom erhöht worden. Mittels der bekannten wärmeübertragenden Fläche im Kanal kann nach Gleichung (43) der Wärmeübergangskoeffizient berechnet werden.

In Abbildung 6-21 steht jeder Messpunkt für einen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten über die gesamte PCM-Höhe.

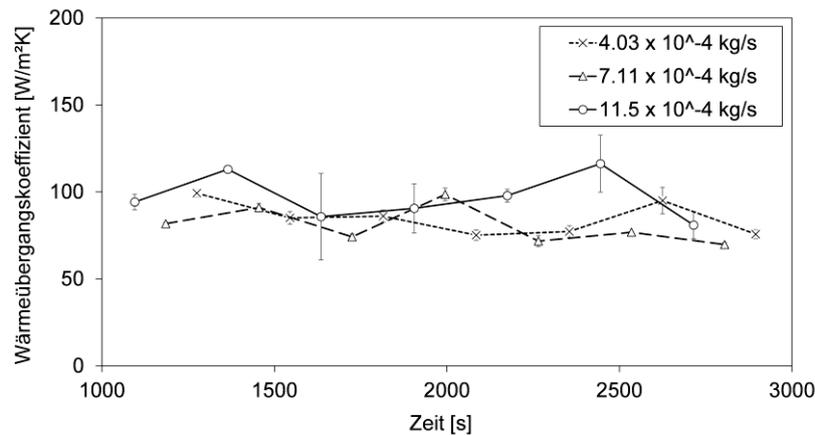


Abbildung 6-21: Wärmeübergangskoeffizient zwischen festem PCM und Öl bei einem Ölmassenstrom von  $4,03$ ,  $7,11$  und  $11,5 \cdot 10^{-4}$  kg/s und einer Öleintrittstemperatur von  $48$  °C

Über die gesamte Messzeit ergibt sich für einen Ölmassenstrom von  $4,03 \cdot 10^{-4}$  kg/s ein mittlerer Wärmeübergangskoeffizient von  $85 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 9,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Für die Ölmassenströme  $7,11$  und  $11,5 \cdot 10^{-4}$  kg/s beträgt der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $80$  ( $\pm 9,7$ ) und  $97 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 12,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ). Die Messergebnisse aus Abbildung 6-21 zeigen zudem, dass keine eindeutige Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom Ölmassenstrom bzw. der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Reynolds-Zahl vorliegt. Die Reynolds-Zahlen betragen für die Ölmassenströme  $4,03$ ,  $7,11$  und  $11,5 \cdot 10^{-4}$  kg/s  $19$ ,  $34$  und  $55$ . Demnach liegt eine laminare Rohrströmung vor.

Um einen theoretischen Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen, ist es erforderlich zu klären, welche thermischen und hydrodynamischen Einlaufbedingungen während der Messungen vorliegen, um entsprechende Nußelt-Korrelationen auszuwählen. Hierzu lässt sich die thermische und hydrodynamische Einlaufänge in Abhängigkeit des Ölmassenstroms nach Gleichung (28) bzw. (30) berechnen. Tabelle 6-4 zeigt die Ergebnisse der Berechnung der thermischen und hydrodynamischen Einlaufängen für den jeweiligen Ölmassenstrom.

Tabelle 6-4: Thermische und hydrodynamische Einlaufängen für die Ölmassenströme  $4,03$ ,  $7,11$  und  $11,5 \cdot 10^{-4}$  kg/s

	Ölmassenstrom x $10^{-4}$ [kg/s]		
	4,03	7,11	11,5
Thermische Einlaufänge [mm]	387	689	1112
Hydrodynamische Einlaufänge [mm]	9	13	20

Es ist zu sehen, dass im betrachteten Kanalabschnitt, indem die Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden, eine hydrodynamisch voll ausgebildete laminare Strömung im thermischen Einlauf vorliegt. Der thermische Einlauf liegt vor, wenn das Temperaturprofil innerhalb des Kanals nicht voll ausgebildet ist, da für die vorliegende Rohrströmung die Kanallänge zu kurz ist. Entsprechend wird nach Gleichung (15) ein mittlerer Wärmeübergangskoeffizient berechnet, wobei die Nußelt-Korrelation aus Gleichung (31) verwendet wird. Für die Ölmassenströme  $4,03$ ,  $7,11$  und  $11,5 \cdot 10^{-4}$  kg/s betragen die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten  $101$ ,  $116$  und  $135$  W/m<sup>2</sup> K.

Abbildung 6-22 zeigt einen Vergleich zwischen den über die gesamte Messdauer gemittelten und den theoretisch berechneten Wärmeübergangskoeffizienten im vorliegenden Kanal.

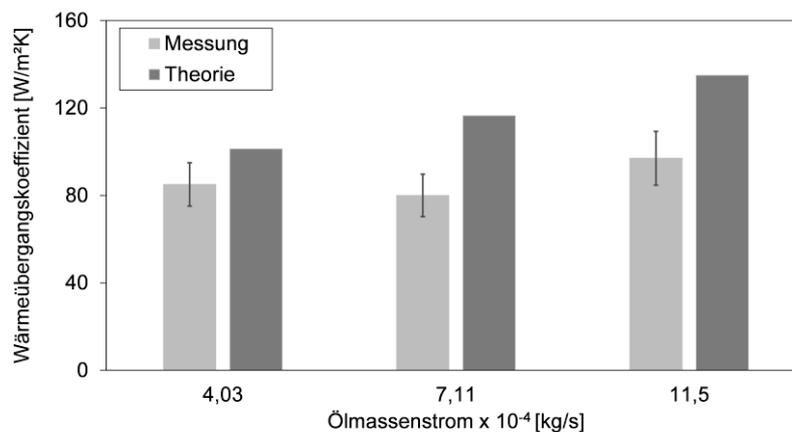


Abbildung 6-22: Vergleich der gemessenen und der theoretisch ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten bei der Messung an festem PCM

In dem Vergleich ist zu sehen, dass die gemessenen und theoretischen Wärmeübergangskoeffizienten in ihrer Größenordnung übereinstimmen.

### 6.3.2 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten an schmelzendem PCM

Im Bereich 2 befindet sich das PCM im Phasenwechsel, wobei hier das Schmelzen betrachtet wird. Im Gegensatz zu den Messungen des Wärmeübergangskoeffizienten an festem PCM liegt während des Schmelzens eine Vergrößerung des Kanaldurchmessers vor. Um dies entsprechend zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten nach Gleichung (43) zu berücksichtigen, ist an jeder Messposition  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  die radiale Aufschmelzgeschwindigkeit  $v_{\text{schmelz}}$  nach Gleichung (44) ermittelt worden. Mittels dieser Geschwindigkeit lässt sich der Kanalradius als Funktion der Zeit und der Kanalhöhe darstellen.

Abbildung 6-23 zeigt modellhaft, wie sich während des Schmelzens für unterschiedliche Zeiten der Kanalradius über die Höhe ändert. Dies entspricht einer vereinfachten Betrachtung, da nicht

berücksichtigt wird, ob und an welcher Stelle das flüssige PCM, welches mit dem Öl zum Kanalaustritt gefördert wird, während des Aufsteigens an der Kanalwandung mit einer Temperatur kleiner der Phasenwechseltemperatur kristallisiert.

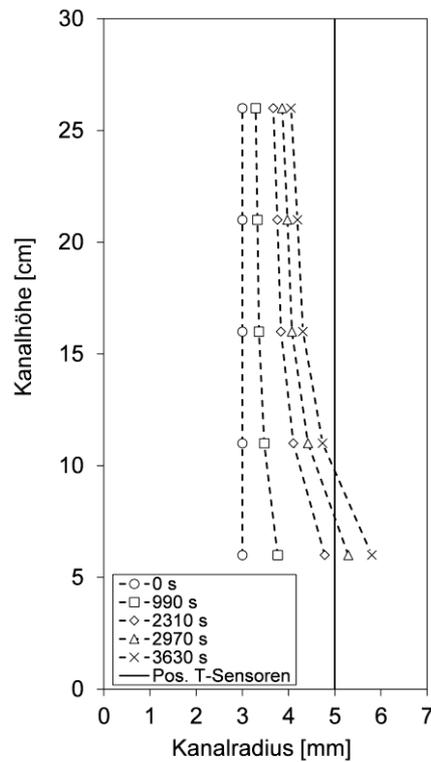


Abbildung 6-23: Kanalradius als Funktion der Zeit und der Kanalhöhe während des Schmelzens des PCM

Abbildung 6-23 zeigt, dass sich der Kanal wie erwartet vergrößert. Aufgrund der hohen Eintrittstemperatur schmilzt der Kanal zuerst in den unteren Bereichen auf. Es bildet sich eine trichterförmige Aufweitung des Kanals vom Öleintritt in den Speicher aus.

Wird der Wärmeübergangskoeffizient nach Gleichung (43) berechnet, so wird, wie bei der Berechnung an festem PCM, die Wandtemperatur benötigt. Diese wird für eine erste Näherung ebenfalls nach Gleichung (42) berechnet und nicht konstant gleich der Phasenwechseltemperatur des PCM gesetzt. Obwohl das PCM schmilzt, wird in gleicher Größenordnung die thermische Energie, welche vom Öl abgegeben wird, zum Schmelzen des PCM und für die Wärmeleitung durch die definierte PCM-Schicht zwischen Kanalinnenwand und Temperaturfühler  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  verwendet, weshalb trotz Schmelzens des PCM ein Temperaturanstieg der PCM-Temperatur an den Stellen  $\vartheta_{\text{PCM},8,i}$  detektiert wird. Außerdem ist der lokale Schmelzvorgang des PCM stets von einem lokalen Kristallisationsvorgang des PCM überlagert. Da das geschmolzene PCM beim Aufsteigen im Kanal an Abschnitten der Kanalwand mit geringer Temperatur kristallisieren kann.

In Abbildung 6-24 ist für jede Messzeit der lokale Wärmeübergangskoeffizient zur entsprechenden Kanalhöhe dargestellt. Ziel der Messung ist es, während einer Beladung des Speichers

den Wärmeübergang zu charakterisieren bzw. zu verdeutlichen, welche Auswirkung eine zusätzliche anschmelzende bzw. flüssige PCM-Schicht auf den Wärmeübergang im Speichersystem besitzt. Hierfür wird der zuvor maximal mögliche Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s verwendet.

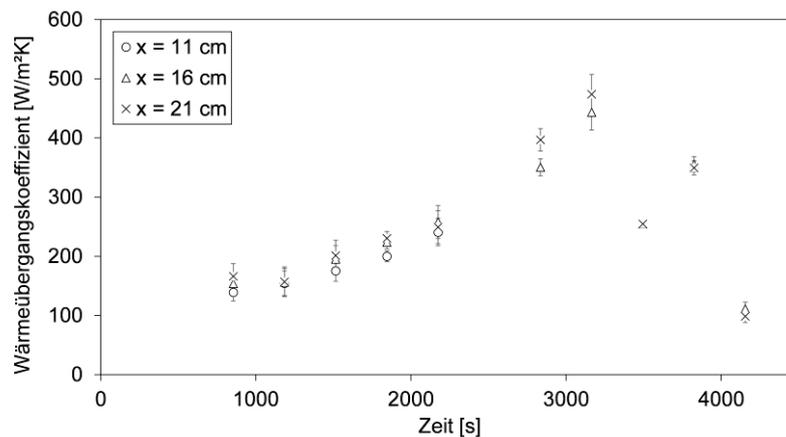


Abbildung 6-24: Lokaler Wärmeübergangskoeffizient im Kanal während des Schmelzens des PCM bei einem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s und einer Öleintrittstemperatur von  $70$  °C

In Abbildung 6-24 ist ersichtlich, dass sich der lokale Wärmeübergangskoeffizient über die Kanalhöhe für jeden Zeitschritt kaum unterscheidet. Insgesamt zeigen die Messergebnisse aus Abbildung 6-24, dass der Wärmeübergangskoeffizient mit der Zeit und entsprechend steigendem Anteil an flüssigem PCM bis zu einer Zeit von 3150 s ansteigt und anschließend abfällt. Das Ansteigen des Wärmeübergangskoeffizienten ist dadurch zu begründen, dass durch das flüssige PCM eine bessere Durchmischung der Öl- und PCM-Phase möglich ist, was zu einer besseren Wärmeübertragung führt. Außerdem ist ersichtlich, dass es nach einer Zeit von 3150 s (maximaler Wärmeübergangskoeffizient) zu einem Einbruch des Wärmeübergangskoeffizienten kommt, wobei diese Messung nach einer gesamten Zeit von 3300 s abgeschlossen ist. Dies ist damit zu erklären, dass hier eine Änderung des wärmeübertragenden Mechanismus stattfindet, wie in [80] und [83] beschrieben. Hier wechselt der Wärmeübergangsmechanismus beim Aufschmelzen des noch festen PCM von Konvektion zu Konvektion + Wärmeleitung. Dies geschieht, da, wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben und in Abbildung 6-1 ersichtlich, der Kanal nicht mehr komplett mit Öl, sondern mit flüssigem PCM gefüllt ist.

Das durch das Aufschmelzen flüssige PCM verbleibt teilweise im Kanal und steigt teilweise mit dem Öl bis zum Ölaustritt aus dem Kanal. Hier sammelt sich das flüssige PCM an und bildet eine zusätzliche flüssige Schicht oberhalb des festen PCM. Innerhalb des Kanals befindet sich nach wie vor Öl, welches den Kanal größtenteils ausfüllt. Der hier dominierende Wärmeübergangsmechanismus ist die Konvektion. Durch das Aufschmelzen und die folgende Vergrößerung des Kanaldurchmessers kommt es zu einer kritischen Kanalvergrößerung, wo gerade so ein vollständig mit Öl gefüllter Kanal vorliegt. Im nächsten Zeitschritt ist der Kanaldurchmesser

größer als der kritische Kanaldurchmesser, was dazu führt, dass das flüssige PCM am Kanalausstritt in den Kanal zurückfließt, wobei der Kanal nun mit flüssigem PCM gefüllt ist. Das in den Speicherbehälter einströmende Öl strömt in Tropfenform auf. Hierbei ist zwischen dem festen PCM und dem Öl eine Schicht aus flüssigem PCM. Das flüssige PCM bildet eine näherungsweise stehende Schicht am festen PCM, wobei das weitere Aufschmelzen und die Wärmeübertragung auf das feste PCM durch Wärmeleitung vom flüssigen PCM geschieht. Graphisch ist der Schmelzvorgang am zylindrischen Kanal in Abbildung 6-1 zu sehen. Um zu klären, ob tatsächlich der Wechsel des Wärmeübergangsmechanismus der Grund für den Einbruch des Wärmeübergangskoeffizienten während des Schmelzvorgangs des PCM aus Abbildung 6-24 ist, wird in Abbildung 6-25 der Temperaturverlauf des Sensors  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  betrachtet.

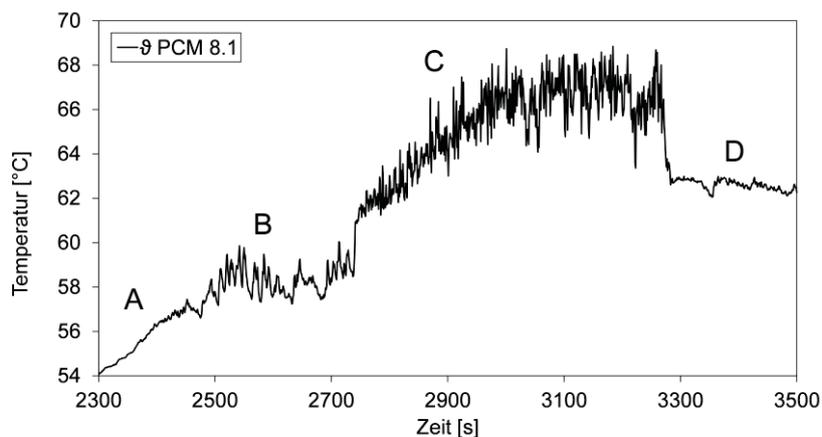


Abbildung 6-25: Temperatur als Funktion der Zeit für die Messstelle  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  während des Schmelzvorgangs bei einem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s und einer Öleintrittstemperatur von  $70$  °C, A) sensible Erwärmung des PCM, B) Phasenwechsel des PCM, C) Messstelle  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  befindet sich im Öl, D) Messstelle  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  befindet sich im in den Kanal zurückgelaufenen flüssigen PCM

Im Abschnitt A aus Abbildung 6-25 ist zu sehen, dass sich das PCM sensibel erwärmt. In diesem Bereich ist ein näherungsweise linearer Anstieg der Temperatur erkennbar. Nach einer Zeit von ca. 2500 s ist eine Stagnation der Temperatur erkennbar. Es folgt der Abschnitt B aus Abbildung 6-25, wobei hier der Phasenwechsel des PCM um die Messstelle  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  stattfindet. Die Temperatur schwankt hierbei um die Phasenwechseltemperatur. Ist das gesamte PCM um den messaktiven Teil des Temperaturfühlers aufgeschmolzen, so steigt, wie im Abschnitt C aus Abbildung 6-25 dargestellt, die Temperatur weiter an. Der Temperatursensor  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  befindet sich nun im flüssigen Öl. Bei einer Zeit von 3270 s ist der Kanaldurchmesser größer als der kritische Kanaldurchmesser. Dies hat zur Folge, dass das flüssige PCM oberhalb des festen PCM zurück in den Kanal fließt. Da im oberen Bereich des Speichers eine geringere Temperatur vorliegt, ist das Zurückfließen des PCM deutlich an der schlagartig gesunkenen Temperatur am Messfühler  $\vartheta_{\text{PCM},8.1}$  zu sehen. Der Temperaturfühler zeigt nun die Temperatur des flüssigen PCM an, was im Abschnitt D der Abbildung 6-25 zu erkennen ist. Wie in Abbildung 6-25

dargestellt, korreliert die Zeit, nachdem das PCM in den Kanal zurückläuft, gut mit dem zeitlichen Verlauf des Einbruchs des Wärmeübergangskoeffizienten aus Abbildung 6-24.

### 6.3.3 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten am Öltropfen

Um den Wärmeübergang für den Bereich 3 zwischen Öltropfen und flüssigem PCM zu quantifizieren, ist es erforderlich, unter anderem die Oberflächentemperatur des im PCM aufsteigenden Tropfens zu bestimmen. Dies wird ebenfalls mittels der optischen Temperaturerfassung realisiert. Bei dieser Messung ist die hohe Messrate des optischen Messsystems von 2000 Temperaturmesswerten pro Sekunde eine wichtige Größe, um das Messsystem nutzen zu können. Nur so wird gewährleistet, dass eine Auflösung der Temperatur des Tropfens in Strömungsrichtung erreicht wird.

Um die entsprechende Öltemperatur mittels der optischen Messtechnik erfassen zu können, ist es erforderlich, dass die Öltropfen eindeutig von der Glasfaser erfasst werden und eine bekannte Tropfengeometrie vorliegt. Aus diesen Gründen ist die Messung bei einem Ölmassenstrom von  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s durchgeführt worden. Hier liegt eine bekannte Tropfengeometrie vor, wobei die aus dem Ölmassenstrom resultierende Tropfengeometrie in Abbildung 6-17 und Tabelle 6-2 ersichtlich ist.

Aufgrund ähnlicher im System vorliegender Wärmeübergänge zwischen Öl und PCM bei den Ölmassenströmen  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s und  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s (vgl. Abschnitt 6.2.3) ist die Ermittlung des Wärmeübergangs bei einem Ölmassenstrom von  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s und die anschließende Übertragung auf den Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s zulässig.

Abbildung 6-26 zeigt einen Öltropfen und die Glasfaser. In Abbildung 6-26 A ist der Tropfen aus der Öleintrittsöffnung in den Speicherbehälter eingetreten und bewegt sich auf die Faser zu. Abbildung 6-26 B zeigt den Tropfen, wobei die Faser die Oberfläche des Tropfens berührt. In Abbildung 6-26 C wird der Tropfen von der Glasfaser durchstoßen. Bei der Messung ist die Spitze der Glasfaser ca. 25 mm von der Öleintrittsöffnung entfernt.

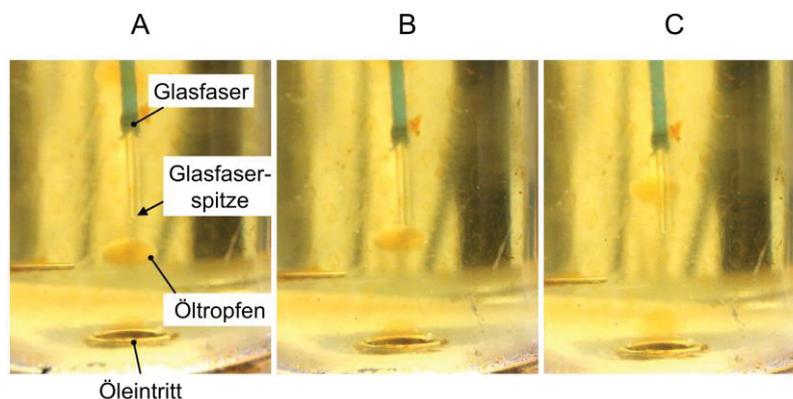


Abbildung 6-26: Im flüssigen PCM aufsteigender Öltropfen und Messung der Öltemperatur mittels der Glasfaser bei einem Ölmassenstrom von  $1,73 \cdot 10^{-4}$  kg/s, A) Tropfen tritt aus der Öleintrittsöffnung in den Speicherbehälter, B) Glasfaser berührt den Öltropfen, C) Glasfaser durchsticht den Öltropfen

Nach Gleichung (46) lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  zwischen Öltropfen und PCM berechnen. Um einen Wärmestrom zwischen PCM und Öltropfen zu generieren, ist es erforderlich, dass ein Temperaturgradient zwischen den beiden Medien vorliegt. Daher ist das eingeleitete Öl auf eine Temperatur von 49 °C gekühlt worden. Das PCM besitzt hingegen eine Temperatur von ca. 63,5 °C.

Abbildung 6-27 zeigt das Rohsignal der vom Öl und PCM emittierten Wärmestrahlung in einem Zeitintervall von 1 s. Innerhalb dieser Sekunde werden 2000 Temperaturmessungen durchgeführt, wobei jeder Punkt für eine einzelne Messung steht.

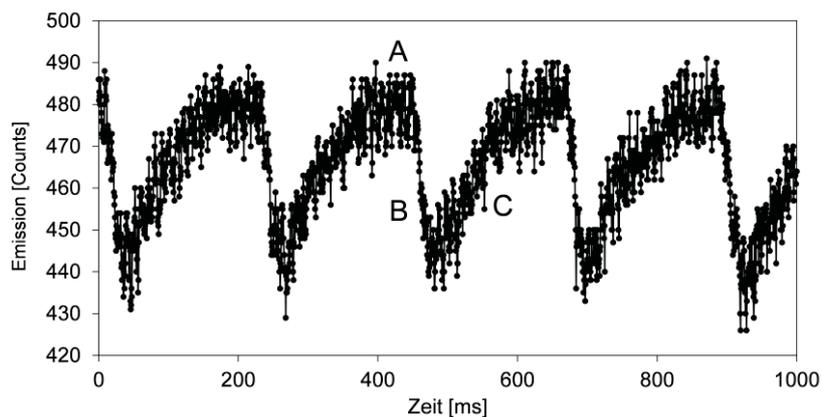


Abbildung 6-27: Rohsignal der Emission der vom Öl und PCM emittierten Strahlung in einem Zeitintervall von 1 s

Aus den Rohdaten aus Abbildung 6-27 lassen sich folgende Informationen ableiten. Das flüssige PCM besitzt eine größere Temperatur als das Öl, was zu einer erhöhten Emission der Strahlung im detektierten Wellenlängenbereich führt. Wird der PCM zwischen zwei Tropfen erfasst, so entspricht dies dem Messsignal aus dem Bereich A aus Abbildung 6-27. Hier ist für eine Zeit von ca. 75 ms eine konstante Emission ersichtlich. Nähert sich ein Öltropfen der Glasfaserspitze bzw. berührt die Spitze den Öltropfen, so fällt das Messsignal schlagartig ab, was im Bereich B in Abbildung 6-27 zu sehen ist. Folglich durchsticht die Glasfaser den Tropfen. Tritt die Glasfaser aus dem Tropfen aus, folgt eine Erhöhung des Messsignals (Bereich C in Abbildung 6-27), wobei diese nicht schlagartig, sondern, durch eine Wirbelbildung hinter dem Tropfen, langsamer von Statten geht. Im Anschluss wird erneut die Emission der vom PCM emittierten Strahlung erfasst.

Zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Öl und PCM ist es erforderlich, eine Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächentemperatur des Öltropfens und der PCM-Temperatur zu ermitteln. Um das Messsignal aus Abbildung 6-27 in eine Temperatur umzurechnen, wird die jeweilige Kalibrierfunktion aus Abbildung 4-6 verwendet. Grundlegend hierbei ist es, die Phasengrenze zwischen dem PCM und dem Öltropfen zu kennen, um die entsprechend richtige Kalibrierungsfunktion auszuwählen. Der Eintritt der Glasfaser in den Öltropfen entspricht der kältesten Stelle der Messung und somit der gemessenen Oberflächentemperatur

des Tropfens  $\vartheta_{A,Tr,mess}$ . Aufgrund der Tropfengeometrie und der entsprechenden Aufstiegs- geschwindigkeit ergibt sich, dass sich jeder Tropfen für eine Zeit von 36 ms vor der Glasfaser- spitze befindet, wenn die Glasfaser mittig den Tropfen durchdringt. Demnach sind die beiden Bereiche PCM und Öltropfen identifiziert. Entsprechend lassen sich die Rohdaten aus Abbil- dung 6-27 in eine Temperatur umrechnen, wobei dies für einen Tropfen in Abbildung 6-28 dargestellt ist. Außerdem ist in Abbildung 6-28 die Phasengrenze zwischen Öl und PCM dar- gestellt.

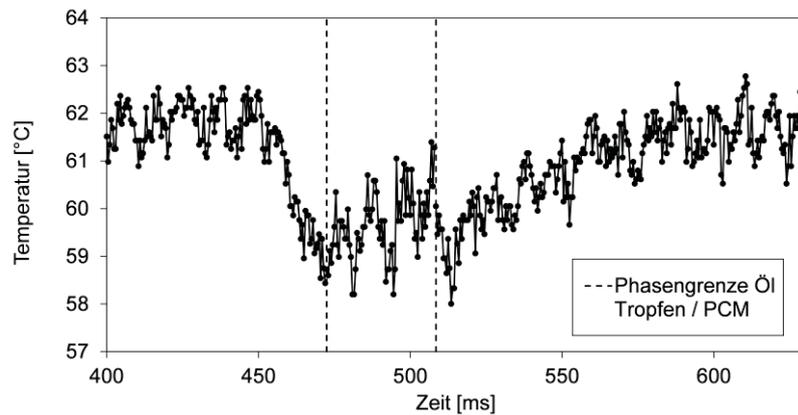


Abbildung 6-28: Temperaturverlauf bei der Erfassung der PCM- und der Öltemperatur bei dem Durchstechen eines Öltropfens im flüssigen PCM

Abbildung 6-28 zeigt, dass das PCM eine Temperatur von ca. 62 °C besitzt. Tritt die Glasfaser in den Tropfen ein, so sinkt die Temperatur schlagartig bis auf ca. 59 °C ab. Nach 36 ms tritt die Glasfaser aus dem Tropfen aus. Hier ist bei einer Zeit von 509,5 ms ein Versatz in der Temperatur ersichtlich. Dies liegt daran, dass die Glasfaser den Tropfen nicht exakt mittig durchdringt. Für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten nach Gleichung (46), zwischen Öltropfen und PCM, ist lediglich die Eintrittsstelle der Glasfaser in den Tropfen von Interesse. Die hier ermittelte Temperatur  $\vartheta_{A,Tr,mess}$  entspricht der Oberflächentemperatur des Öltropfens. Um die Transmissionseigenschaften des Öltropfens zu berücksichtigen wird, nach Gleichung (49) entsprechend die Oberflächentemperatur des Tropfens  $\vartheta_{A,Tr}$  berechnet und somit die gemessene Oberflächentemperatur  $\vartheta_{A,Tr,mess}$  korrigiert. Hierbei beträgt der mittlere Transmissionskoeffizient des Tropfens  $\overline{\tau^{Tr}}$  im Wellenlängenbereich zwischen 1,7 und 2,2  $\mu\text{m}$  0,46.

Tabelle 6-5 zeigt die für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten relevanten Temperaturmessdaten.

Tabelle 6-5: Messergebnisse der Temperaturmessung der Oberflächentemperatur des Öltropfens und der PCM-Temperatur zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten

	PCM	Öl
Temperaturmesssignal [Counts]	479,6 (+/- 0,98)	440,8 (+/- 0,83)
Offsetsignal [Counts]	330	330
Temperatur gemessen [°C]	62,1 (+/- 0,07)	58,8 (+/- 0,1)
Temperatur $\vartheta_{A,Tr}$ [°C]	-	56,1 (+/- 0,2)

Der lokale Wärmestrom lässt sich nach Gleichung (47) berechnen und beträgt 0,76 W (+/- 0,07 W). Hierbei erwärmt sich der Öltropfen auf einer Strecke von 25 mm um 1,91 K (+/- 0,2 K).

Aus den Messergebnissen lässt sich nun nach Gleichung (46) entsprechend der Wärmeübergangskoeffizient berechnen. Dieser beträgt 1845 W/m<sup>2</sup> K (+/- 231 W/m<sup>2</sup> K). Für das vorliegende Problem lässt sich ein theoretischer Wärmeübergangskoeffizient nach Gleichung (15) mit entsprechender Nußelt-Korrelation nach Gleichung (36) berechnen. Dieser beträgt 1880 W/m<sup>2</sup> K.

Abbildung 6-29 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenem und theoretisch ermitteltem Wärmeübergangskoeffizienten.

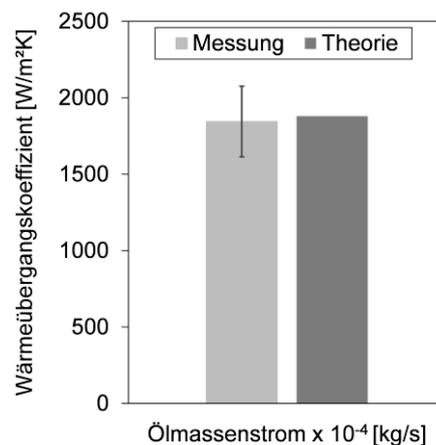


Abbildung 6-29: Vergleich des gemessenen und des theoretisch ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten bei der Messung an Öltropfen, welche im flüssigen PCM aufsteigen

Aus den Messdaten lässt sich nach Gleichung (39) ebenfalls ein volumetrischer Wärmeübergangskoeffizient berechnen und mit volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten für den Bereich flüssiges PCM / flüssiges Öl mit den entsprechenden Werten aus der Literatur vergleichen. Dieser beträgt 2,2 W/L K.

In [72] beträgt der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient 30,6 W/L K bei einer Strömungsgeschwindigkeit der WTF-Tropfen von 0,15 cm/s und einer PCM-Höhe von 0,3 m. Aufgrund einer zu hohen Strömungsgeschwindigkeit ist es hier zu einem PCM-Mittriss gekommen. In [76] beträgt der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient 21,0 W/L K bei einer WTF-Strömungsgeschwindigkeit von 0,61 cm/s bzw. 9,3 W/L K bei einer WTF-Strömungsgeschwindigkeit von 0,30 cm/s. In [77] besitzt der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient eine Größe von 2, 5 und 9 W/L K (je nach PCM) bei einer WTF-Strömungsgeschwindigkeit von 0,12 cm/s und einer PCM-Höhe von 0,65 cm. In [79] ist der volumetrische Wärmeübergangskoeffizient 22 W/L K bei einem WTF-Massenstrom pro WTF-Eintrittsöffnung von  $6,15 \cdot 10^{-3}$  kg/s und einer PCM-Höhe von 0,45 m. Unabhängig von den in der Literatur untersuchten Stoffsystemen und den Prozessbedingungen beträgt der mittlere volumetrische Wärmeübergangskoeffizient für das Aufsteigen einer flüssigen WTF-Phase in flüssigem PCM 14 W/L K (+/- 10 W/L K). Demnach kann gesagt werden, dass der gemessene volumetrische Wärmeübergangskoeffizient und die in der Literatur beschriebenen volumetrischen Wärmeübergangskoeffizienten in ihrer Größenordnung übereinstimmen.

### 6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Messungen aus der Laboranlage

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen des Direktkontaktlatentwärmespeichers der Laboranlage zusammengefasst.

Neben der detaillierten Darstellung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs aus den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.2, welche zu einem verbesserten Verständnis der direkten Wärmeübertragung im vorliegenden Speichersystem führen, sind in Tabelle 6-6 die ermittelten wärmeübertragenden Flächen wie auch die Wärmeübergangskoeffizienten für die Bereiche 1 bis 3 zusammengefasst dargestellt.

Die in Tabelle 6-6 dargestellten Daten sind bei dem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s ermittelt bzw. auf diesen Massenstrom übertragen worden.

Tabelle 6-6: Experimentell ermittelte charakteristische Kenndaten zu den wärmeübertragenden Flächen und den Wärmeübergangskoeffizienten zu dem Direktkontaktlatentwärmespeicher der Laboranlage für den Ölmassenstrom  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s

	Bereich 1 PCM fest / Öl flüssig	Bereich 2 PCM im Phasen- wechsel / Öl flüssig	Bereich 3 PCM flüssig / Öl flüssig
Wärmeübertragende Fläche A [cm <sup>2</sup> ]	168,1	Kanalradius zur Ermittlung von A ist Funktion der Zeit und der Kanalhöhe nach Abbildung 6-23	24,61 (+/- 0,57)
Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	87 (+/- 7) Mittelwert aus den Ölmassenströmen 4,03, 7,11 und $11,5 \cdot 10^{-4}$ kg/s	anfänglich 152 (+/- 11,1) steigt bis 459 (+/- 15,2) an. Es folgt ein starkes Abfallen.	1845 (+/- 231)

## 7 Direktkontaktlatentwärmespeicher – Scale-up

Um die Messergebnisse der Laboranlage mit lediglich einer Öleintrittsöffnung auf Anlagen mit mehr als einer Öleintrittsöffnung zu übertragen, ist es notwendig, einen möglichen Randeinfluss des Speicherbehälters der Laboranlage auszuschließen. Hierzu wird eine Technikumsanlage aufgebaut. In Abbildung 7-1 ist das Fließschema der Technikumsanlage dargestellt. Die Anlage besteht aus einer elektrischen Zahnradpumpe (A), zwei Wärmeübertrager (B), (C), einem Ölvorlagebehälter (D) und einem Speicherbehälter (E) mit dem Ölverteiler (F). Der Speicherbehälter besteht aus Edelstahl (1.4571), besitzt eine Höhe von 0,70 m und einen Innendurchmesser von 0,185 m bei einer Wandstärke von 5 mm.

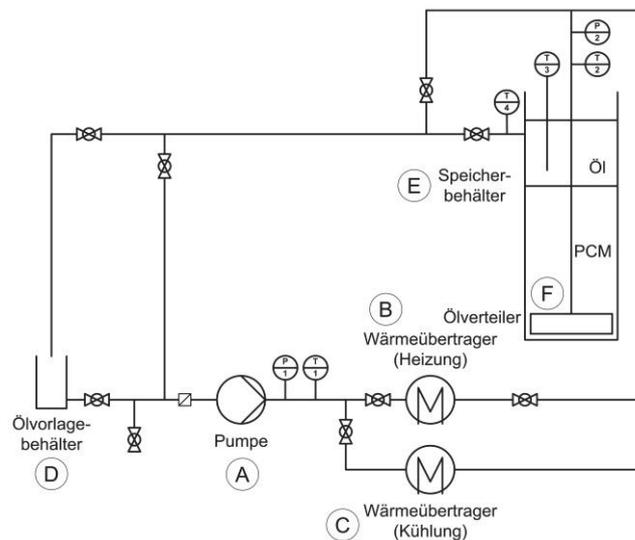


Abbildung 7-1: Fließschema der Technikumsanlage mit Zahnradpumpe (A), Wärmeübertrager (B), (C), Ölvorlagebehälter (D), Speicherbehälter (E), Ölverteiler (F)

Abbildung 7-1 zeigt eine Fotografie der Technikumsanlage.

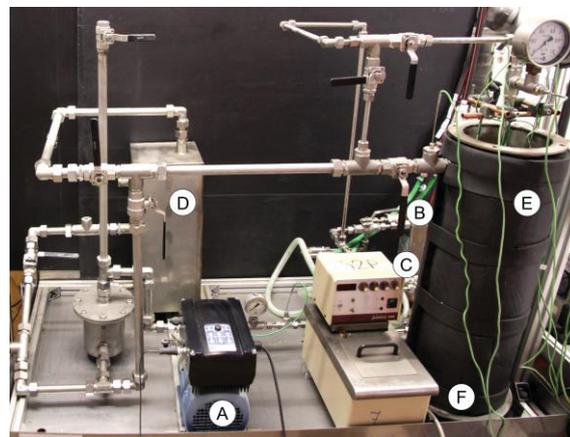


Abbildung 7-2: Technikumsanlage, Fotografie

Um den Öleintritt in den Speicher zu realisieren, wird ein Verteilerboden gefertigt. Dieser besteht aus einem zylindrischen Teil mit einer Bodenplatte und einem Deckel, welcher als Lochboden gefertigt ist. Die Bohrungen des Lochbodens stellen hierbei die Öleintrittsöffnungen dar und besitzen, wie bei der Laboranlage, einen Durchmesser von 6 mm. Der Abstand von Öleintrittsöffnung zu Öleintrittsöffnung ergibt sich aus der Geometrie des Speichers der Laboranlage. Aus Abbildung 4-1 ist ersichtlich, dass der Innendurchmesser des Speichers 40 mm beträgt und mittig die Öleintrittsöffnung mit einem Durchmesser von 6 mm vorliegt. Hieraus ergibt sich das Bohrmuster für den Lochboden. Abbildung 7-3 zeigt den Lochboden von der Draufsicht.

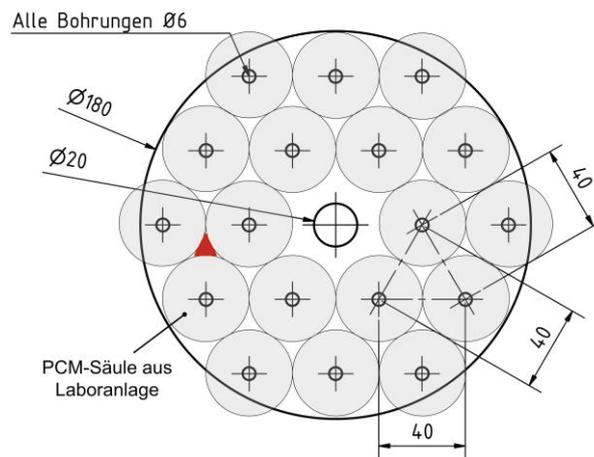


Abbildung 7-3: Lochboden der Technikumsanlage; Draufsicht

Der Lochboden besitzt einen Durchmesser von 180 mm. Die grau dargestellten Flächen in Abbildung 7-3 entsprechen jeweils einer PCM-Säule aus der Laboranlage, wobei der kleinere Kreis innerhalb der grauen Fläche der 6 mm Bohrung der Öleintrittsöffnung entspricht. Es ist zu erkennen, dass sechs PCM-Säulen über den äußeren Rand des Lochbodens herausragen. Hier ist die PCM-Säule nicht identisch mit der der Laboranlage, wobei die Öleintrittsöffnung von einer geringeren PCM-Masse umgeben ist. Mittig im Lochboden ist die Ölzuführung in den Verteiler durch eine Rohrleitung mit einem Außendurchmesser von 12 mm realisiert (20 mm Bohrung für Muffe und Anschluss der 12 mm Rohrleitung) und somit keine Öleintrittsöffnung. Außerdem sind jeweils zwischen drei PCM-Säulen (rotes Dreieck in Abbildung 7-3) und am Rand Bereiche, in denen ein PCM-Überschuss pro Öleintrittsöffnung vorliegt. Von der gesamten Fläche des Lochbodens von 254 cm<sup>2</sup> wird eine Fläche von ca. 207 cm<sup>2</sup> durch die 18 PCM-Säulen abgedeckt. Etwa 30 cm<sup>2</sup> entsprechen den freien Flächen, welche nicht von einer der 18 PCM-Säulen abgedeckt werden. Die überlappende Fläche der sechs PCM-Säulen entspricht ca. 19 cm<sup>2</sup>. Für den Lochboden folgt, dass die 18 Öleintrittsöffnungen eine zusätzliche PCM-Masse von einer Fläche von 11 cm<sup>2</sup> aufschmelzen müssen im Vergleich zu der Öleintrittsöffnung der Laboranlage (entspricht 0,62 cm<sup>2</sup> pro Öleintrittsöffnung).

Zur Untersuchung der Randeinflüsse des Speicherbehälters der Laboranlage werden der Speicherbehälter der Labor- und der Technikumsanlage mit der identischen flächenbezogenen PCM-Masse befüllt, was zur Folge hat, dass in beiden Anlagen die PCM-Säule dieselbe Höhe

besitzt. Diese beträgt 31,5 cm. Außerdem ist der Ölmassenstrom so eingestellt worden, dass dieser für die Technikumsanlage 18 mal größer als bei der Laboranlage ist, um den spezifischen Ölmassenstrom pro Öleintrittsöffnung konstant zu halten. Für die Untersuchung wird eine Entladung des Speichers bzw. des PCM durchgeführt und die Öltemperatur 5 cm oberhalb des PCM betrachtet, wobei diese Temperatur als Ölaustrittstemperatur bezeichnet wird. Hier liegt in beiden Speichern die identische Ausgangssituation vor. Das PCM ist geschmolzen und somit flüssig. Die Starttemperatur des flüssigen PCM bei der Entladung beträgt 68 °C. Der Energieentzug durch das Einleiten von Öl mit einer Temperatur von ca. 49 °C führt zu einem Abkühlen des PCM, zu einer folgenden Bildung von festen PCM-Partikeln bis hin zu einer Bildung einer Kanalstruktur. Ein möglicher Randeinfluss kann ausgeschlossen werden, wenn in beiden Speichern der zeitliche Verlauf der Ölaustrittstemperatur identisch ist. Hierbei gilt das Hauptaugenmerk dem zeitlichen Verlauf der Ölaustrittstemperatur während des sensiblen Abkühlens des PCM bis zum Erreichen der Phasenwechseltemperatur. Hier liegt keine Beeinflussung der Wärmeübertragung und folglich der Ölaustrittstemperatur durch die gebildete Kanalstruktur vor. Speziell bei der Technikumsanlage kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich einzelne Kanäle zu größeren Hauptkanälen verbinden und so der Wärmeübergang beeinflusst wird.

Abbildung 7-4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Öleintritts- und der Ölaustrittstemperatur während der Entladung für den Speicher der Technikums- und der Laboranlage.

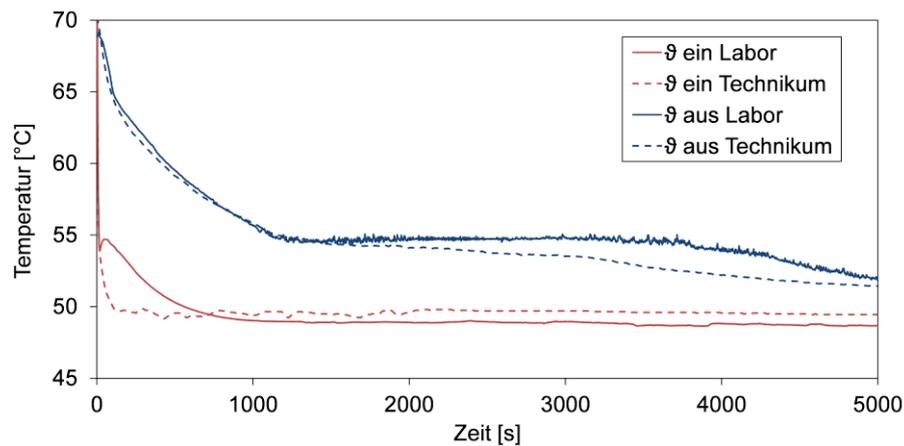


Abbildung 7-4: Zeitlicher Verlauf der Öleintritts- und der Ölaustrittstemperatur während der Entladung für den Speicher der Technikums- und der Laboranlage bei einem Ölmassenstrom von  $1,17 \cdot 10^{-4}$  kg/s (Technikumsanlage) bzw.  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s (Laboranlage)

Abbildung 7-4 zeigt, dass bei der Labor- und der Technikumsanlage der nahezu identische zeitliche Verlauf der Ölaustrittstemperatur während der sensiblen Energieentnahme aus dem flüssigen PCM detektiert wird. Hier ist bei dem Speicherbehälter der Laboranlage kein Randeinfluss während der sensiblen Energieentnahme aus dem Speicherbehälter bzw. aus dem PCM zu erkennen. Im Anschluss folgt der Phasenwechsel, der in beiden Speicherbehältern zeitgleich und bei gleicher Ölaustrittstemperatur einsetzt. Dieser ist im Ölaustritt durch eine näherungsweise konstante Temperatur ersichtlich. Das Ende des Phasenwechsels ist durch das erneute

deutliche Absinken der Ölaustrittstemperatur zu erkennen. Dies geschieht bei der Technikumsanlage nach ca. 3180 s und bei der Laboranlage nach ca. 3750 s. Obwohl hier bereits eine Beeinflussung der Ölaustrittstemperatur durch die Bildung einer Kanalstruktur stattfindet, ist der Zeitpunkt des Endes des Phasenwechsels näherungsweise gleich. Des Weiteren ist ersichtlich, dass bei der Technikumsanlage während des Phasenwechsels ein Temperaturgradient von ca. 1,4 K vorliegt. Dies kann auf das Zusammenlaufen einzelner Kanäle zu Hauptkanälen zurückgeführt werden. Dadurch entstehen im Speicherbehälter größere nicht von Öl durchströmte Bereiche, die noch flüssiges PCM enthalten. Die näherungsweise gleichen Temperaturdifferenzen zwischen der Ölein- und der Ölaustrittstemperatur der beiden Speicher zeigen außerdem, dass auch gleiche Wärmeübertragungsleistungen im System vorliegen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei dem Speicher der Laboranlage die Speichergeometrie bzw. der Rand des Speicherbehälters die Wärmeübergänge im Speicherbehälter nicht beeinflusst und eine Übertragung der Ergebnisse aus der Laboranlage auf beliebig im Durchmesser skalierbare Speicherbehälter zulässig ist.

Abbildung 7-5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Öleintritts- und der Ölaustrittstemperatur während der Entladung für den Speicher der Technikumsanlage, wobei die Entladung in die drei unterschiedlichen Bereiche unterteilt ist.

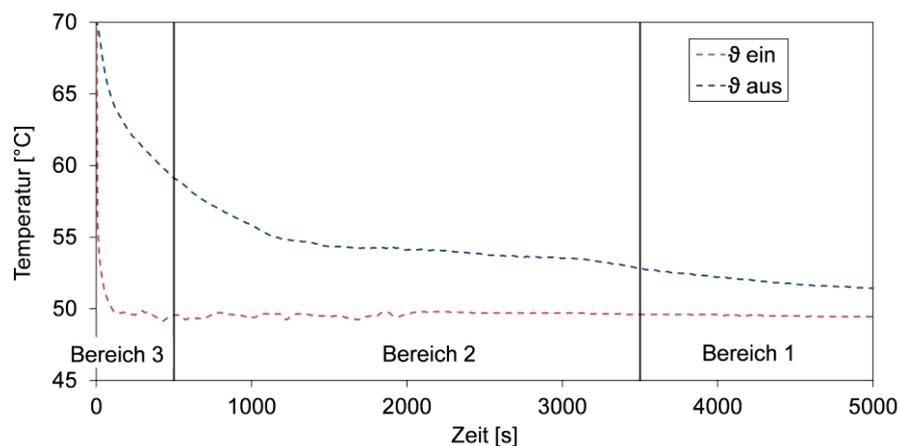


Abbildung 7-5: Zeitlicher Verlauf der Öleintritts- und der Ölaustrittstemperatur während der Entladung für den Speicher der Technikumsanlage, Bereich 1) PCM liegt im festen Zustand vor, Bereich 2) PCM befindet sich im Phasenwechsel, Bereich 3) PCM liegt im flüssigem Zustand vor

In Bereich 3 wird dem PCM rein sensibel thermische Energie entzogen, wobei das PCM in flüssiger Form vorliegt. Es folgt mit Bereich 2 der Phasenwechsel. Nach dem Phasenwechsel folgt der Bereich 1, wobei dem PCM erneut sensibel thermische Energie entzogen wird und das PCM in fester Form vorliegt. Aus den Messwerten lassen sich die einzelnen Bereiche thermisch bilanzieren, wobei der übertragene Wärmestrom zwischen PCM und Öl betrachtet wird.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Übertragender Wärmestrom während der Entladung des PCM aus der Technikumsanlage

	Bereich		
	3	2	1
Zeitintervall [s]	500	3000	1500
Mittlerer Wärmestrom [W]	437 (+/- 39)	165 (+/- 16)	83 (+/- 9)

Im Anschluss werden die Leistungen aus den einzelnen Bereichen der Technikumsanlage (siehe Tabelle 7-1) aus den ermittelten charakteristischen Daten der Laboranlage wie den wärmeübertragenden Flächen und den Wärmeübergangskoeffizienten nachgerechnet und verglichen. In Bereich 3 tritt das Öl, wie in Abbildung 6-17 dargestellt, aus jeder einzelnen Öleintrittsöffnung aus. In Abschnitt 6.2.3 ist hierbei eine wärmeübertragende Fläche von  $24,61 \text{ cm}^2$  (+/-  $0,57 \text{ cm}^2$ ) ermittelt worden. Bei 18 Öleintrittsöffnungen ergibt sich eine gesamte wärmeübertragende Fläche von  $0,444 \text{ m}^2$ . Bei dem in Abschnitt 6.3.3 ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten von  $1845 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (+/-  $231 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) und einer ermittelten mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz zwischen Öltröpfchen und PCM von  $5,7 \text{ K}$  (+/-  $0,6 \text{ K}$ ) ergibt sich rechnerisch eine Entladeleistung für den Bereich 3 von  $459 \text{ W}$  (+/-  $48 \text{ W}$ ).

Im Bereich 1 ist das PCM komplett auskristallisiert, wobei eine Kanalstruktur vorliegt. Wird die wärmeübertragende Fläche aus Abschnitt 6.2.1 pro Öleintrittsöffnung von  $168,1 \text{ cm}^2$  zugrunde gelegt, ergibt dies für 18 Öleintrittsöffnungen eine gesamte Oberfläche von  $0,30 \text{ m}^2$ . Der Wärmeübergangskoeffizient aus Abschnitt 6.3.1 beträgt  $87 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (+/-  $7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ), wobei hier der Wärmeübergangskoeffizient für alle drei gemessenen Ölmassenströme gemittelt worden ist. Bei einer mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz zwischen PCM und Öl von  $5,0 \text{ K}$  ergibt sich rechnerisch eine Entladeleistung von  $131 \text{ W}$  (+/-  $9 \text{ W}$ ).

Für den Bereich 2, den Phasenwechsel, kann eine mittlere Leistung aus den Messdaten der Laboranlage angegeben werden, da eine Ermittlung der zeitabhängigen wärmeübertragenden Flächen und der zeitabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten während des Phasenwechsels und somit der Bildung eines Kanals unter realen Bedingungen nicht durchgeführt werden kann. Diese beträgt  $10,7 \text{ W}$  (+/-  $1,4 \text{ W}$ ) je Öleintrittsöffnung und entsprechend für 18 Öleintrittsöffnungen  $192 \text{ W}$  (+/-  $20 \text{ W}$ ).

Mit den Messdaten zu den wärmeübertragenden Flächen und den Wärmeübergangskoeffizienten der Bereiche 1 und 3 sowie der Leistung während des Phasenwechsels (Bereich 2) aus der Laboranlage lassen sich gut die Leistungen der Technikumsanlage berechnen.

Abbildung 7-6 zeigt die gemessenen mittleren Leistungen für die Bereiche 1 bis 3 der Technikumsanlage (Technikumsanlage / gemessen) im Vergleich mit den berechneten mittleren Leistungen für die Technikumsanlage aus den charakteristischen Kenndaten der Laboranlage wie den wärmeübertragenden Flächen, Wärmeübergangskoeffizienten sowie der mittleren Leistung im Phasenwechsel (Technikumsanlage / berechnet).

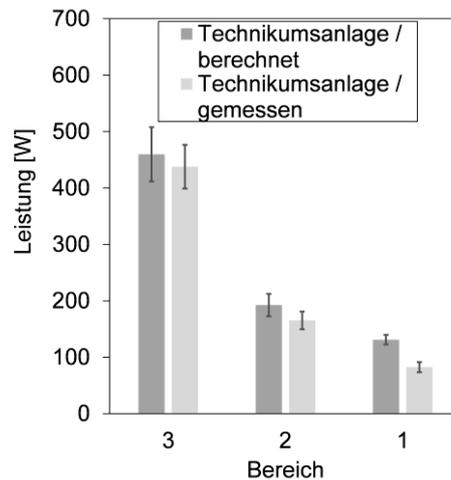


Abbildung 7-6: Gemessene und aus den Daten der Laboranlage berechnete Leistungen für die Technikumsanlage für die Bereiche 1 bis 3

Abbildung 7-6 zeigt, dass eine gute Übereinstimmung der gemessenen und der aus der Laboranlage berechneten Leistungen für die Technikumsanlage für die drei Bereiche vorliegt. Der Vergleich zeigt außerdem, dass eine Skalierung der ermittelten wärmeübertragenden Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten möglich ist.

Für ein Scale-up ist grundlegend zu beachten, dass der Lochboden für die Ölverteilung nach den Abmessungen des Speicherbehälters aus der Laboranlage gefertigt werden muss. Aus dem Durchmesser der Öleintrittsöffnung von 6 mm und dem Abstand der jeweiligen Öleintrittsöffnungen von 40 mm (Öffnungsmitte zu Öffnungsmitte) ergibt sich bei einer festgelegten PCM-Höhe von 0,3 m das entsprechende Verhältnis aus PCM-Volumen pro Öleintrittsöffnung des Speicherbehälters aus der Laboranlage. Ein entsprechendes Lochmuster für einen Verteilerboden mit 18 Öleintrittsöffnungen zeigt Abbildung 7-3. Außerdem ist zu beachten, dass das Temperaturniveau entsprechend der Messung zu wählen ist.

Aus der Laboranlage konnten für die Bereiche 1 bis 3 charakteristische Werte für die wärmeübertragenden Flächen (Bereich 1 und 3) und die Wärmeübergangskoeffizienten (Bereich 1 und 3) sowie eine übertragene Leistung (Bereich 2) ermittelt werden (siehe Abschnitt 6.4). Diese Werte gelten, wie bei der Laboranlage ermittelt, für eine Öleintrittsöffnung unter dem ermittelten Ölmassenstrom. Je nach geforderter Zielgröße eines auszulegenden größeren Speichers, wie z. B. der Entladeleistung oder der Speicherkapazität, können die ermittelten Daten aus der Laboranlage, welche eben für eine Öleintrittsöffnung gelten, herangezogen und entsprechend durch die Anzahl an Öleintrittsöffnungen skaliert werden.

### 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Energiewende in Deutschland ist in vollem Gange. Kernpunkte hierzu sind der Weggang von nuklearen und fossilen Brennstoffen und der Ausbau der erneuerbaren Energien. Außerdem soll Energie effizienter genutzt werden. Um die Ziele der Wende durch die verstärkte Nutzung der fluktuierenden Energiequellen Sonne und Wind zu erreichen sowie Abwärme wiederzuverwenden, kommt dem Energiespeicher eine Schlüsselfunktion bei der nachhaltigen Energieversorgung zu. In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen dieser Arbeit ein in seiner Konstruktion neuartiger Direktkontaktlatentwärmespeicher weiterentwickelt und im Labor- und Technikummaßstab am Institut für Prozessmesstechnik und innovative Energiesysteme der Hochschule Mannheim aufgebaut. Bei diesem Speichertyp steht das Speichermedium, ein Phasenwechselmaterial (PCM), im direkten Kontakt mit dem Wärmeträgerfluid (WTF), einem Mineralöl. Bei dem PCM wird eine eutektische Mischung aus den beiden Salzhydraten Magnesiumchlorid- und Magnesiumnitrat-Hexahydrat mit einem Schmelzpunkt von 59 °C verwendet.

Ziel der Arbeit ist es, durch Grundlagenuntersuchungen zu einem Direktkontaktlatentwärmespeicher charakteristische Kenndaten wie wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln. Außerdem ist das Speicherverhalten während des Schmelzvorgangs, der Beladung des Speichersystems und des Kristallisationsvorgangs sowie der Entladung des Speichersystems dargestellt worden. Hierzu sind zwei Speichersysteme aufgebaut worden. Die Grundlagenuntersuchungen sind an einer Laboranlage durchgeführt worden, wobei der Speicherbehälter lediglich eine Öleintrittsöffnung im Boden des Speicherbehälters besitzt. Zur Untersuchung von möglichen Randeinflüssen und letztlich um die Ergebnisse aus der Laboranlage auf Speichersysteme mit mehreren Öleintrittsöffnungen übertragen zu können, ist eine Technikumanlage aufgebaut worden. Hier ist ein Ölverteilersystem implementiert, welches 18 Öleintrittsöffnungen besitzt. Die Anordnung der Öleintrittsöffnungen ist so realisiert worden, dass jede Öleintrittsöffnung von einer volumengleichen PCM-Masse bei gleicher PCM-Höhe wie bei der Laboranlage umgeben ist.

Zum grundlegenden und tiefergehenden Verständnis der direkten Wärmeübertragung ist in der vorliegenden Arbeit eine nicht in der Literatur bekannte detaillierte schematische Beschreibung des Schmelz- und Kristallisationsvorgangs des PCM dargestellt. Zur Charakterisierung des vorliegenden Direktkontaktlatentwärmespeichers wird der Schmelz- und Kristallisationsvorgang des Speichers bzw. des PCM in drei Bereiche unterteilt:

- Bereich 1: Das PCM liegt im festen und das WTF im flüssigen Aggregatzustand vor: Bereich 1 liegt zu Beginn des Schmelz- und zum Ende des Kristallisationsvorgangs vor. Das PCM wird erwärmt bzw. abgekühlt.
- Bereich 2: Das PCM befindet sich im Phasenwechsel und das WTF verbleibt im flüssigen Aggregatzustand. Im Bereich 2 wird das PCM geschmolzen bzw. kristallisiert.
- Bereich 3: Das PCM wie auch das WTF liegen im flüssigen Aggregatzustand vor: Bereich 3 liegt zu Beginn des Kristallisations- und zum Ende des Schmelzvorgangs vor. Das PCM wird abgekühlt bzw. erwärmt.

Im Bereich 1 und 3 liegen eindeutige wärmeübertragende Flächen und Wärmeübergangskoeffizienten vor. Im Bereich 2, dem Phasenwechsel, verändern sich die wärmeübertragenden Flächen wie auch die vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten stetig.

Die neuen, in der Literatur nicht bekannten wissenschaftlichen Erkenntnisse und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können für eine Laboranlage mit einer Öleintrittsöffnung wie folgt zusammengefasst und zur Charakterisierung den drei Bereichen zugeordnet werden:

- Im Bereich 1 liegt eine Kanalstruktur im PCM vor, durch die das Öl strömt. Die wärmeübertragende Fläche, welche mittels Computertomographie pro Öleintrittsöffnung im festen PCM ermittelt worden ist, beträgt  $168,1 \text{ cm}^2$ .
- Der Wärmeübergangskoeffizient im festen PCM (Bereich 1) beträgt für die Ölmassenströme  $4,03$ ,  $7,11$  und  $11,5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$   $85 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 9,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ),  $80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 9,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ) und  $97 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 12,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ).
- Für den Bereich 3 steigt das flüssige Öl in einem Strahl im flüssigen PCM auf. Es folgen ein Strahlzerfall und eine Bildung von einzelnen Öltröpfen. Die wärmeübertragende Fläche pro Öleintrittsöffnung im flüssigen PCM beträgt bei dem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$   $24,61 \text{ cm}^2$  ( $\pm 0,57 \text{ cm}^2$ ).
- Der entsprechende Wärmeübergangskoeffizient im flüssigen PCM (Bereich 3) beträgt im betrachteten Fall  $1845 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 231 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ).
- Für den Bereich 2 liegt das PCM im Phasenwechsel vor. Für einen zylindrischen Kanal mit einem Durchmesser von  $6 \text{ mm}$  steigt während des Schmelzvorgangs der Wärmeübergangskoeffizient von anfänglich  $152 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 11,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) bis auf  $459 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ( $\pm 15,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) an und fällt im Anschluss stark ab, da ein Wechsel im Wärmeübergangsmechanismus vorliegt.
- Für einen realen Kanal wird der Phasenwechsel (Bereich 2) in der Laboranlage mit einer mittleren Leistung charakterisiert. Beim Kristallisationsvorgang beträgt die mittlere Leistung im Phasenwechsel  $10,7 \text{ W}$  ( $\pm 1,4 \text{ W}$ ) pro Öleintrittsöffnung.

Im Anschluss an die Messungen der Laboranlage folgen die Messungen mit der Technikumsanlage. Die in dieser Arbeit vorgenommene Skalierung des Speicherbehälters von der Labor- zur Technikumsanlage ist durch eine Erhöhung der Anzahl an Öleintrittsöffnungen durchgeführt worden. Hierdurch ist bei gleicher PCM-Höhe der Durchmesser des Speicherbehälters vergrößert worden. Für die effektive Nutzung ist dies sinnvoll, da, wie in [84] und [85] beschrieben, eine Erhöhung der PCM-Höhe und damit eine Erhöhung der Verweilzeit des Öls innerhalb des PCM das Speichersystem uneffektiver macht. Der Vergleich der Entladung der Labor- mit der Technikumsanlage zeigt, dass für beide Anlagen ein näherungsweise identischer zeitlicher Verlauf der Ölaustrittstemperatur vorliegt. Dadurch lassen sich die Ergebnisse von der Labor- auf die Technikumsanlage übertragen, und eine Skalierung ist möglich.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Labor- und der Technikumsanlage dienen letztlich dazu, zukünftig die Auslegung beliebig großer Speicher (mit beliebigem Durchmesser) zu vereinfachen und ein tiefergehendes Verständnis des direkten Wärmeübergangs zu erhalten.

## Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/energiewende.html?> (Stand:07.06.2018)
- [2] [https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1\\_Allgemeines/6\\_energiewende-klimawandel/\\_node.html](https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Fragen-Antworten/1_Allgemeines/6_energiewende-klimawandel/_node.html) (Stand:08.06.2018)
- [3] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-03.html> (Stand:07.06.2018)
- [4] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html?> (Stand: 08.06.2018)
- [5] Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2016, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin 2017; [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=16](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=16) (Stand: 07.06.2018)
- [6] M. Sterner, I. Stadler: Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, 2. korrigierte und ergänzte Auflage, Springer Verlag, Berlin 2017
- [7] M. Plenz: Potenzialanalyse Überschussstrom für Power-to-Heat und Power-to-Gas, Gebäude-Energiewende Arbeitspapier 5, Senftenberg 2016; [https://www.gebaeude-energiewende.de/data/gebEner/user\\_upload/Bilder/Dateien/GEW\\_Arbeitspapier\\_5\\_\\_Nutzung\\_%C3%9Cberschussstrom\\_Plenz.pdf](https://www.gebaeude-energiewende.de/data/gebEner/user_upload/Bilder/Dateien/GEW_Arbeitspapier_5__Nutzung_%C3%9Cberschussstrom_Plenz.pdf) (Stand: 07.06.2018)
- [8] <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-09.html> (Stand:07.06.2018)
- [9] Änderung der Richtlinie für die Förderung der Abwärmevermeidung und Abwärmenutzung in gewerblichen Unternehmen, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin 2017; [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abwaermerichtlinie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=16](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abwaermerichtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=16) (Stand: 07.06.2018)
- [10] P. Hoffmann, B. Groß, S. Heib: Industrielle Abwärme zur Stromerzeugung: Potenziale und Forschungsbedarf, FVEE Themen 2017; [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2017/th2017\\_04\\_02.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2017/th2017_04_02.pdf) (Stand: 07.06.2018)
- [11] Technologien der Abwärmenutzung, 2. Auflage, Sächsische Energieagentur - Saena GmbH, Dresden 2016; [http://www.saena.de/download/Broschueren/BU\\_Technologien\\_der\\_Abwaermenutzung.pdf](http://www.saena.de/download/Broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf) (Stand: 07.06.2018)

- [12] H. Schäfer, Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie, In: W. Fratzscher, K. Stephan, (Hrsg.): Abfallenergienutzung. Technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte. Forschungsberichte / Interdisziplinäre Arbeitsgruppen, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, 2, 1995, Berlin, S. 42-60
- [13] R. Tamme, A. Jossen, H.-M. Henning: Speichertechnologien für erneuerbare Energien – Voraussetzung für eine nachhaltige Energieversorgung, FVS Themen 2006; [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2006/th2006\\_03\\_03.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2006/th2006_03_03.pdf) (Stand: 07.06.2018)
- [14] H.-J. Steinbächer, J. Tedy, S. Kunkel, M. Rädle, J.-U. Repke, A. Nguyen, T. Schumacher, G. Brösigke, Latentwärmespeicher, Patentschrift: DE 10 2014 103 108 A1, Veröffentlichungsdatum: 3.09.2015.
- [15] S. Kunkel, F. Kübel-Heising, P. Dornhöfer, I. Medina, J. Weis, R. Stabler, J.-U. Repke, M. Rädle, Direktkontakt-Latentwärmespeicher zur Effizienzsteigerung von Wärmepumpen, Chemie Ingenieur Technik 90 (2018) 234-240
- [16] <https://www.fenes.net/forschung/energiespeicher/themengebiete/thermische-energiespeicher/> (Stand: 10.06.2018)
- [17] P. Pardo, A. Deydier, Z. Anxionnaz-Minvielle, S. Rougé, M. Cabassud, P. Cognet, A review on high temperature thermochemical heat energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews 32 (2014) 591-610
- [18] P. Zhang, X. Xiao, Z.W. Ma, A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement, Applied Energy 165 (2016) 472-510
- [19] S. Riffat, B. Mempo, W. Fang, Phase change material developments: a review, International Journal of Ambient Energy 36 (2013) 102-115
- [20] T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application: A Review, ISIJ International 50 (2010) 1229-1239
- [21] H. Mehling, L. F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM, Springer Verlag, Berlin 2008
- [22] G. A. Lane, Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Volume 1: Background and Scientific Principles, CRC Press, Florida 1983
- [23] A. Fallahi, G. Guldentops, M. Tao, S. Granados-Focil, S. Van Dessel, Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties, Applied Thermal Engineering 127 (2017) 1427–1441
- [24] K. Ghaib, Latentwärmespeicher: Speichermaterialien, Wärmeübertragung und Anwendungen, Chemie Ingenieur Technik 89 (2017) 1115-1125

- [25] S. Zhang, L. Zhang, X. Yang, X. Yu, F. Duan, L. Jin, X. Meng, Experimental investigation of a spiral tube embedded latent thermal energy storage tank using paraffin as PCM, *Energy Procedia* 105 (2017) 4543-4548
- [26] N.H.S. Tay, M. Belusko, F. Bruno, Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system, *Applied Energy* 90 (2012) 288-297
- [27] L. F. Cabeza, M. Ibáñez, C. Solé, J. Roca, M. Nogués, Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 1273-1282
- [28] S. D. Sharma, T. Iwata, H. Kitano, K. Sagara, Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit, *Solar Energy* 78 (2005) 416-426
- [29] K. Nagano, S. Takeda, T. Mochida, K. Shimakura, Thermal characteristics of a direct heat exchange system between granules with phase change material and air, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 2131-2144
- [30] W. Wang, S. Guo, H. Li, J. Yan, J. Zhao, X. Li, J. Ding, Experimental study on the direct/indirect contact energy storage container in mobilized thermal energy system (M-TES), *Applied Energy* 119 (2014) 181-189
- [31] <http://forschung-energiespeicher.info/aktuelles/quickinfo-einzelansicht/Latentwaerme-speicher-1/kapitel/2/> (Stand: 10.06.2018)  
nach [https://web.archive.org/web/20120131131807/http://www.zae-bayern.de/files/pcm\\_gu.pdf](https://web.archive.org/web/20120131131807/http://www.zae-bayern.de/files/pcm_gu.pdf) (Stand: 10.06.2018)
- [32] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, S. Al-Hallaj, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 1597-1615
- [33] A. M. Khudhair, M. M. Farid, A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, *Energy Conversion and Management* 45 (2004) 263-275
- [34] V. V. Tyagi, D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: A state of art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1146-1166
- [35] B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251-283
- [36] A. Solé, L. Miró, C. Barreneche, I. Martorell, L. F. Cabeza, Corrosion test of salt hydrates and vessel metals for thermochemical energy storage, *Energy Procedia* 48 (2014) 431-435

- [37] A. J. Farrell, B. Norton, D. M. Kennedy, Corrosive effects of salt hydrate phase change materials used with aluminium and copper, *Journal of Materials Processing Technology* 175 (2006) 198-205
- [38] A. F. Lele, K. E. N'Tsoukpoe, T. Osterland, F. Kuznik, W. K. L. Ruck, Thermal conductivity measurement of thermochemical storage materials, *Applied Thermal Engineering* 89 (2015) 916-926
- [39] M. Telekes, Composition of matter for the storage of heat, Patentschrift: US21159351A, Veröffentlichungsdatum: 19.02.1951.
- [40] M. Telkes, Nucleation of Supersaturated Inorganic Salt Solution, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 44 (1952) 1308-1310
- [41] H. K. Shin, M. Park, H.-Y. Kim, S.-J. Park, Thermal property and latent heat energy storage behavior of sodium acetate trihydrate composites containing expanded graphite and carboxymethyl cellulose for phase change materials, *Applied Thermal Engineering* 75 (2015) 978-983
- [42] Y. Li, S. Yu, P. Chen, R. Rojas, A. Hajian, L. Berglund, Cellulose nanofibers enable paraffin encapsulation and the formation of stable thermal regulation nanocomposites, *Nano Energy* 34 (2017) 541-548
- [43] X. Hu, Z. Huang, X. Yu, B. Li, Preparation and Thermal Energy Storage of Carboxymethyl Cellulose-Modified Nanocapsules, *BioEnergy Research* 6 (2013) 1135-1141
- [44] A. Gutierrez, S. Ushak, H. Galleguillos, A. Fernandez, L. F. Cabeza, M. Grágeda, Use of polyethylene glycol for the improvement of the cycling stability of bischofite as thermal energy storage material, *Applied Energy* 154 (2015) 616-621
- [45] Z. Kazemi, S. M. Mortazavi, A new method of application of hydrated salts on textiles to achieve thermoregulating properties, *Thermochimica Acta* 589 (2014) 56-62
- [46] Z.-j. Duan, H.-z. Zhang, L.-x. Sun, Z. Cao, F. Xu, Y.-j. Zou, H.-l. Chu, S.-j. Qiu, C.-l. Xiang, H.-y. Zhou,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ /Expanded graphite composite as form-stable phase change materials for thermal energy storage, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115 (2014) 111-117
- [47] N. H. S. Tay, M. Liu, M. Belusko, F. Bruno, Review on transportable phase change material in thermal energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 (2017) 264-277
- [48] Y. Zhang, A. Faghri, Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39 (1996) 3165-3173

- [49] R. Velraj, R.V. Seeniraj, B. Hafner, C. Faber, K. Schwarzer, Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy* 65 (1999) 171-180
- [50] O. Mesalhy, K. Lafdi, A. Elgafy, K. Bowman, Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix, *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 847-867
- [51] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, M. Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 615-628
- [52] E.-B. S. Mettawee, G. M. R. Assassa, Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy* 81 (2007) 839-845
- [53] F. Agyenim, P. Eames, M. Smyth, Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array, *Renewable Energy* 35 (2010) 198-207
- [54] M. N. A. Hawlader, M. S. Uddin, M. M. Khin, Microencapsulated PCM thermal-energy storage system, *Applied Energy* 74 (2003) 195-202
- [55] S. Jegadheeswaran, S. D. Pohekar, Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2225-2244
- [56] T. L. Etherington, *A Dynamic Heat Storage System, Heating Piping and Air Conditioning*, 1957
- [57] R. Benedix, *Bauchemie - Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*, 6., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden 2015
- [58] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link, J. Fischer, *Handbuch Regenerative Energietechnik*, 3. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin 2017
- [59] Q. Zhou, X. Yin, Q. Wang, C. Wang, Phase diagram prediction of the system  $Mg(NO_3)_2$ - $MgCl_2$ - $H_2O$  as phase change materials, *Acta Chimica Sinica* 69 (2011) 1725-1730
- [60] G. A. Lane, *Solar Heat Storage: Latent Heat Material*, Volume II: Technology, CRC Press, Florida 1986
- [61] N. Yoneda, S. Takanashi, Eutectic mixtures for solar heat storage, *Solar Energy* 21 (1978) 61-63
- [62] W. Schreiter, *Chemische Thermodynamik – Grundlagen, Übungen, Lösungen*, 3. überarbeitete und ergänzte Auflage, De Gruyter Verlag, Berlin 2013

- [63] S. Rittner und R. Steiner, Die Schmelzkristallisation von organischen Stoffen und ihre großtechnische Anwendung, *Chemie Ingenieur Technik* 57 (1985) 91-102
- [64] L. J. Fischer Phasenwechselmaterialien (PCM) für Latent-Wärmespeicher. In: P. Stephan, D. Mewes, S. Kabelac, M. Kind, K. Schaber, T. Wetzel (eds) *VDI-Wärmeatlas*, Springer Reference Technik, Springer Vieweg Verlag, Berlin 2019
- [65] W. Bechmann, I. Bald, *Einstieg in die Physikalische Chemie für Naturwissenschaftler*, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2017
- [66] W. Beckmann, *Crystallization: Basic Concepts and Industrial Applications*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2013
- [67] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), *VDI-Wärmeatlas*, Kapitel A2, B1, B2, F2, D1, 11., bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 2013
- [68] R. Marek, K. Nitsche, *Praxis der Wärmeübertragung, Grundlagen - Anwendungen - Übungsaufgaben*, Carl Hanser Verlag, München 2007
- [69] H. D. Baehr, K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 7., neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin 2010
- [70] D. D. Edie, S. S. Melsheimer, J. C. Mullins, An Immiscible Fluid - Heat of Fusion Heat Storage System, *Sharing the sun: Solar technology in the seventies*, Proceedings of the Joint Conference, 391-399, Winnipeg 1976
- [71] D. D. Edie, C. G. Sandell, L. E. Kizer, J. C. Mullins, Fundamental studies of direct contact latent heat energy storage, *Proceeding of the Annual Meeting - American Section of International Solar Energy Society* (1977) 26-30
- [72] V. A. Costello, S. S. Melsheimer, D. D. Edie, Heat transfer and calorimetric studies of a direct contact latent heat energy storage system, Presented at the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, 51-60, San Francisco 1978
- [73] J. Hallet, G. Keyser, Power Characteristics of a Continuous Crystallization Latent Heat Recovery System, *International Gas Turbine Conference and Exhibit and Solar Energy Conference*, the American Society of Mechanical Engineers, Paper No. 79-SOL-21, San Diego 1979
- [74] A. E. Fouda, G. J. G. Despault, J. B. Taylor, C. E Capes, Solar storage systems using salt hydrate latent heat and direct contact heat exchange – I Characteristics of pilot system operating with sodium sulphate solution, *Solar Energy* 25 (1980) 437-444
- [75] F. Lindner, K. Scheunemann: Latent heat accumulator, Patentschrift: US 4371029 A. Veröffentlichungsdatum: 1.02.1983.

- [76] A. E. Fouda, G. J. G. Despault, J. B. Taylor, C. E. Capes, Solar storage systems using salt hydrate latent heat and direct contact heat exchange – II Characteristics of pilot system operating with sodium sulphate solution, *Solar Energy* 32 (1984) 57-65
- [77] M. Farid, K. Yacoub, Performance of direct contact latent heat storage unit, *Solar Energy* 43 (1989) 237-251
- [78] H. Inaba, K. Sato, Latent cold heat energy storage characteristics by means of direct-contact-freezing between oil droplets and cold water solution, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40 (1997) 3189-3200
- [79] T. Kiatsiriroata, J. Tiansuwan, T. Suparos, K. N. Thalang, Performance analysis of a direct-contact thermal energy storage-solidification, *Renewable Energy* 20 (2000) 195-206
- [80] A. Kaizawa, H. Kamano, A. Kawai, T. Jozuka, T. Senda, N. Maruoka, T. Akiyama, Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material, *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 698-706
- [81] V. Martin, B. He, F. Setterwall, Direct contact PCM–water cold storage, *Applied Energy* 87 (2010) 2652–2659
- [82] H. Nogami, K. Ikeuchi, K. Sato, Fundamental Flow Characteristics in a Small Columnar Latent Heat Storage Bath, *ISIJ International* 50 (2010) 1270-1275
- [83] T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, T. Akiyama, Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material, *Applied Thermal Engineering* 50 (2013) 26-34.
- [84] T. Nomura, M. Tsubota, A. Sagara, N. Okinaka, T. Akiyama, Performance analysis of heat storage of direct-contact heat exchanger with phase-change material, *Applied Thermal Engineering* 58 (2013) 108-113.
- [85] T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, T. Akiyama, Heat release performance of direct-contact heat exchanger with erythritol as phase change material, *Applied Thermal Engineering* 61 (2013) 28-35
- [86] S. Guo, J. Zhao, W. Wang, G. Jin, X. Wang, Q. An, W. Gao, Experimental study on solving the blocking for the direct contact mobilized thermal energy storage container, *Applied Thermal Engineering* 78 (2015) 556-564
- [87] A. Horibe, H. Jang, N. Haruki, Y. Sano, H. Kanbara, K. Takahashi, Melting and solidification heat transfer characteristics of phase change material in a latent heat storage vessel: Effect of perforated partition plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 82 (2015) 259–266

- [88] T. T. Naing, A. Horibe, N. Haruki, Y. Yamada, Melting and Solidification Heat Transfer Characteristics of a Phase-Change Material in a Latent Heat Storage Vessel: Effects of a Perforated Partition Plate and Metal Fiber, *Journal of Power and Energy Engineering* 5 (2017) 13-29
- [89] S. Kunkel, T. Teumer, P. Dörnhofer, K. Schlachter, Y. Weldeleslasie, M. Kühr, M. Rädle, J.-U. Repke, Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems, *Applied Thermal Engineering* 145 (2018) 71-79
- [90] Sicherheitsdatenblatt Magnesiumnitrat-Hexahydrat  $\geq 98\%$ , p.a., ACS, Carl Roth GmbH + Co. KG, 23.02.2017
- [91] Sicherheitsdatenblatt Magnesiumchlorid-Hexahydrat  $\geq 99\%$ , p.a., ACS, Carl Roth GmbH + Co. KG, 23.02.2017
- [92] Schriftliches Angebot für Magnesiumnitrat -Hexahydrat (2250 kg) und Magnesiumchlorid-Hexahydrat (825 kg), Raiffeisen Waren-Zentrale Rhein-Main eG, 31.08.2014
- [93] Sicherheitsdatenblatt Fragoltherm Q-7, Fragol GmbH + Co. KG, 9.12.2013
- [94] G. A. Lane, Low temperature heat storage with phase change materials, *The International Journal of Ambient Energy* 1 (1980) 155-168
- [95] Produktinformation Fragoltherm Q-7, Fragol GmbH + Co. KG, Mühlheim
- [96] Y. Galazutdinova, M. Grágeda, L. F. Cabeza, S. Ushak, Novel inorganic binary mixture for low-temperature heat storage applications, *International Journal of Energy Research* 41 (2017) 2356-2364
- [97] K. Nagano, K. Ogawa, T. Mochida, K. Hayashi, H. Ogoshi, Thermal characteristics of magnesium nitrate hexahydrate and magnesium chloride hexahydrate mixture as a phase change material for effective utilization of urban waste heat, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 221–232
- [98] W. Baltes, R. Matissek, *Lebensmittelchemie*, 8. Auflage, Springer Verlag, Köln 2015
- [99] Sicherheitsdatenblatt Sudanrot G, AppliChem GmbH, 5.09.2015
- [100] <https://www.thermografie-xtra.de/tipps-tricks/emissionsgrad-tabelle> (Stand: 26.02.2019)
- [101] L. Feldkamp, L. Davis, J. Kress, Practical cone-beam algorithm, *Journal of the Optical Society of America* 1 (1984) 612–619

- [102] DIN EN 60584-1, Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1:2013); Deutsche Fassung EN 60584-1:2013, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin 2014
  
- [103] M. H. Gey, Instrumentelle Analytik und Bioanalytik, Biosubstanzen, Trennmethoden, Strukturanalytik, Applikationen, 3. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 1998
  
- [104] J. Zierep, K. Bühler, Grundzüge der Strömungslehre, Grundlagen, Statik und Dynamik der Fluide, 11. Auflage, Springer Verlag, Wiesbaden 2017

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Verteilung der jeweiligen Energieträger am Primärenergieverbrauch für das Jahr 2017 [3].....	1
Abbildung 1-2: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen in Deutschland im Jahr 2016 [8] .....	2
Abbildung 2-1: Klassifizierung thermischer Energiespeicher; eigene Darstellung nach [16] * Wasserspeicher, $\Delta\vartheta = 10$ K; ** PCM mit Phasenwechsel fest/flüssig, $\Delta h = 132,2$ kJ/kg, $c_{p,s} = 1,86$ kJ/kg K, $c_{p,l} = 2,42$ kJ/kg K, $\Delta\vartheta = 10$ K; *** nach [17] .....	5
Abbildung 2-2: Unterschied zwischen einem sensiblen Wärmespeicher und einem Latentwärmespeicher bei der Zuführung von thermischer Energie; eigene Darstellung nach [21] .....	6
Abbildung 2-3: unterschiedliche Ausführungen von Latentwärmespeichern schematisch, A) indirekter Latentwärmespeicher: WTF in Rohrschlange, B) indirekter Latentwärmespeicher: PCM in Elementen, C) Direktkontaktlatentwärmespeicher, D) indirekter Latentwärmespeicher: Mantelspeicher; eigene Darstellung nach [15] [26] - [28].....	8
Abbildung 2-4: Stoffklassen, welche als PCM mit einem fest/flüssig-Phasenwechsel Verwendung finden [31] .....	10
Abbildung 2-5: Kristallgitter von Magnesiumchlorid-Hexahydrat [21] .....	13
Abbildung 2-6 Schematische Darstellung des Phasendiagramms für das System $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ - $Mg(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$ (links) und entsprechende Abkühlkurven zweier Beispielmischungen (rechts); eigene Darstellung nach [59], [60], [61] .....	14
Abbildung 2-7: Be- und Entladezyklus eines PCM; eigene Darstellung nach [21].....	16
Abbildung 2-8: Temperaturverlauf in einem zylindrischen Hohlzylinder (Rohr) mit $\vartheta_{w1} > \vartheta_{w2}$ [69] .....	17
Abbildung 2-9: Spektrum der elektromagnetischen Wellen im Wellenlängenbereich von $10^{-6}$ bis $10^6$ $\mu m$ [69] .....	21
Abbildung 2-10: Spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers mit einer Oberflächentemperatur von 40, 70 und 100 °C nach Gleichung (23); eigene Darstellung .....	22
Abbildung 2-11: Spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzen Strahlers mit einer Oberflächentemperatur von 40, 70 und 100 °C nach Gleichung (23) für den Wellenlängenbereich 1,1 bis 2,2 $\mu m$ ; eigene Darstellung.....	23
Abbildung 2-12: Thermischer Einlauf (A) und hydrodynamischer Einlauf (B) für eine Rohrströmung; nach [68], modifiziert.....	24
Abbildung 3-1: Aufbau der Varsol-Verteilerdüse [71] .....	28
Abbildung 3-2: Strömungsverhalten des Wärmeträgerfluids im Speicherbehälter in Abhängigkeit des Ölmassenstroms; eigene Darstellung nach [82].....	35
Abbildung 4-1: Fließschema des verwendeten experimentellen Aufbaus mit Ölvorlagebehälter (A), Zahnradpumpe (B), Wärmeübertrager (C), (D), Speicherbehälter (E), Bypass (F). Im Detail ist in einer Vergrößerung der Speicherbehälter dargestellt (gestrichelter Kasten).....	43
Abbildung 4-2: Öl nicht eingefärbt (A) und Öl mit Sudanrot G eingefärbt (B) im Vergleich zu flüssigem PCM.....	46
Abbildung 4-3: Transmissionspektren von Öl (A) und Öl + Farbstoff (B) für unterschiedliche Schichtdicken in Abhängigkeit der Wellenlänge .....	46

Abbildung 4-4: Transmissionsspektren von PCM (flüssig, fest) für eine Schichtdicke von 20 mm in Abhängigkeit der Wellenlänge .....	47
Abbildung 4-5: Aufbau des Messgeräts zur Erfassung von Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2 $\mu\text{m}$ .....	48
Abbildung 4-6: Emission der vom Öl / PCM emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2 $\mu\text{m}$ in Abhängigkeit der Temperatur .....	49
Abbildung 4-7: Emission der vom Öl emittierten Strahlung im Wellenlängenbereich von 1,1 bis 2,2 $\mu\text{m}$ in Abhängigkeit der Temperatur, Vergleich mit und ohne Farbstoff Sudanrot G .	49
Abbildung 4-8: Aufbau Computertomograf XT H 225 ST mit Probenkörper.....	50
Abbildung 5-1: Wärmeübertragung zwischen festem PCM und Öl (A) sowie zwischen schmelzendem PCM und Öl (B) nach dem Wechsel des Wärmeübergangsmechanismus.....	53
Abbildung 5-2: Speicherbehälter (Innendurchmesser: 40 mm) und Edelstahlrohr zur Erzeugung eines künstlichen zylindrischen Kanals innerhalb des PCM .....	54
Abbildung 5-3: Temperaturmessstellen im Speicherbehälter zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem und aufschmelzendem PCM.....	55
Abbildung 5-4: Erläuterung zur Ermittlung des Wärmübergangskoeffizienten an festem und aufschmelzendem PCM.....	56
Abbildung 5-5: Zeitlicher Verlauf der PCM-Temperatur während des Schmelzens des PCM	57
Abbildung 5-6: Speicherbehälter fixiert auf dem CT-Tisch .....	61
Abbildung 5-7: Messposition der Glasfaser zur Bestimmung der Erwärmungsleistung für den künstlich erzeugten zylindrischen Kanal (A) und den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal (B).....	64
Abbildung 6-1: Änderung des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals während des Schmelzens, A) PCM fest, Start des Schmelzvorgangs, Kanal komplett mit Öl gefüllt, B) Schmelzvorgang führt zu einer Kanalvergrößerung und der Bildung einer flüssigen PCM-Schicht am Ölaustritt aus dem Kanal bis $t > t_0 = t_k$ . Im Anschluss bei $t > t_0 > t_k$ läuft das flüssige PCM in den Kanal zurück, C) Geänderter Wärmeübergangsmechanismus. Kanal ist mit flüssigem PCM gefüllt, Tropfen steigen im flüssigen PCM auf; schematische Darstellung .....	67
Abbildung 6-2: Schmelzvorgang des realen Kanals, A) Start des Schmelzvorgangs, PCM fest und Kanalstruktur vorhanden, B) Kanalverbreiterung und Bildung einer flüssigen PCM-Schicht am Kanalaustritt, C) weitere Kanalverbreiterung und Vergrößerung der flüssigen PCM-Schicht am Kanalaustritt, D) Rückfluss des flüssigen PCM in das Kanalsystem, E) Aufschmelzen des noch festen PCM, E) PCM komplett aufgeschmolzen; schematische Darstellung .....	69
Abbildung 6-3: PCM während des Schmelzens; Fotografie zu Abbildung 6-2 E .....	70
Abbildung 6-4: Kristallisationsvorgang des PCM und Kanalbildung eines realen Kanals, A) Start des Erstarrungsvorgangs, PCM komplett flüssig, B) Bildung von festen PCM-Partikeln, die teilweise zum Speicherboden sedimentieren und teilweise als Suspension im flüssigen PCM gehalten werden, C) PCM ist komplett auskristallisiert; schematische Darstellung .....	71
Abbildung 6-5: PCM während der Kristallisation; Fotografie zu Abbildung 6-4 B.....	72
Abbildung 6-6: PCM-Mitris durch Anlagerung von PCM am WTF; nach [82], modifiziert	73
Abbildung 6-7: Flüssige PCM-Partikel in der Ölphase oberhalb des festen PCM während des Schmelzvorgangs eines realen Kanals .....	73
Abbildung 6-8: CT-Aufnahme des künstlich erzeugten zylindrischen Kanals mit einem Durchmesser von 6 mm.....	74

Abbildung 6-9: Struktur und Durchmesser des zylindrischen Kanals bei unterschiedlichen Höhen im PCM.....	75
Abbildung 6-10: Oberflächenstruktur der PCM-Wand im künstlich erzeugten zylindrischen Kanal .....	76
Abbildung 6-11: CT-Aufnahme des realen Kanals.....	77
Abbildung 6-12: Kanal (rot) und eingeschlossene Hohlräume im PCM (Sicht von oben in den Speicher, Standpunkt innerhalb des PCM) .....	78
Abbildung 6-13: Struktur und Durchmesser des zylindrischen Kanalabschnitts des realen Kanals bei unterschiedlichen Höhen im PCM .....	79
Abbildung 6-14: Oberflächenstruktur der PCM-Wand im realen Kanal .....	79
Abbildung 6-15: Zylindrischer Abschnitt im unter realen Bedingungen erzeugten Kanal und erste Verzweigung des Kanals .....	80
Abbildung 6-16: Temperaturverlauf der Ein- und Austrittstemperatur für den unter realen Bedingungen erzeugten Kanal (A) und den künstlichen zylindrischen Kanal (B) bei einem Ölmassenstrom von $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s.....	81
Abbildung 6-17: Eintritt der Ölphase in den Speicherbehälter bei einem Ölmassenstrom von $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s (A) und bei einem Ölmassenstrom von $1,73 \cdot 10^{-4}$ kg/s (B).....	83
Abbildung 6-18: Wärmeübertragende Fläche in Abhängigkeit des Ölmassenstroms bei den Ölmassenströmen 1,73, 2,07, 2,60 und $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s .....	85
Abbildung 6-19: Abkühlgeschwindigkeit des PCM in Abhängigkeit der Zeit bei den Ölmassenströmen 1,73, 2,07, 2,60 und $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s .....	86
Abbildung 6-20: Entladeleistung in Abhängigkeit des Ölmassenstroms bei den Ölmassenströmen 1,73, 2,012,60 und $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s .....	87
Abbildung 6-21: Wärmeübergangskoeffizient zwischen festem PCM und Öl bei einem Ölmassenstrom von 4,03, 7,11 und $11,5 \cdot 10^{-4}$ kg/s und einer Öleintrittstemperatur von 48 °C.....	89
Abbildung 6-22: Vergleich der gemessenen und der theoretisch ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten bei der Messung an festem PCM .....	90
Abbildung 6-23: Kanalradius als Funktion der Zeit und der Kanalhöhe während des Schmelzens des PCM.....	91
Abbildung 6-24: Lokaler Wärmeübergangskoeffizient im Kanal während des Schmelzens des PCM bei einem Ölmassenstrom von $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s und einer Öleintrittstemperatur von 70 °C .....	92
Abbildung 6-25: Temperatur als Funktion der Zeit für die Messstelle $\vartheta_{PCM,8.1}$ während des Schmelzvorgangs bei einem Ölmassenstrom von $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s und einer Öleintrittstemperatur von 70 °C, A) sensible Erwärmung des PCM, B) Phasenwechsel des PCM, C) Messstelle $\vartheta_{PCM,8.1}$ befindet sich im Öl, D) Messstelle $\vartheta_{PCM,8.1}$ befindet sich im in den Kanal zurückgelaufenen flüssigen PCM .....	93
Abbildung 6-26: Im flüssigen PCM aufsteigender Öltropfen und Messung der Öltemperatur mittels der Glasfaser bei einem Ölmassenstrom von $1,73 \cdot 10^{-4}$ kg/s, A) Tropfen tritt aus der Öleintrittsöffnung in den Speicherbehälter, B) Glasfaser berührt den Öltropfen, C) Glasfaser durchsticht den Öltropfen.....	94
Abbildung 6-27: Rohsignal der Emission der vom Öl und PCM emittierten Strahlung in einem Zeitintervall von 1 s .....	95
Abbildung 6-28: Temperaturverlauf bei der Erfassung der PCM- und der Öltemperatur bei dem Durchstechen eines Öltropfens im flüssigen PCM.....	96

Abbildung 6-29: Vergleich des gemessenen und des theoretisch ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten bei der Messung an Öltropfen, welche im flüssigen PCM aufsteigen .....	97
Abbildung 7-1: Fließschema der Technikumsanlage mit Zahnradpumpe (A), Wärmeübertrager (B), (C), Ölvorlagebehälter (D), Speicherbehälter (E), Ölverteiler (F) ....	100
Abbildung 7-2: Technikumsanlage, Fotografie .....	100
Abbildung 7-3: Lochboden der Technikumsanlage; Draufsicht .....	101
Abbildung 7-4: Zeitlicher Verlauf der Öleintritts- und der Ölaustrittstemperatur während der Entladung für den Speicher der Technikums- und der Laboranlage bei einem Ölmassenstrom von $1,17 \cdot 10^{-4}$ kg/s (Technikumsanlage) bzw. $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s (Laboranlage) .....	102
Abbildung 7-5: Zeitlicher Verlauf der Öleintritts- und der Ölaustrittstemperatur während der Entladung für den Speicher der Technikumsanlage, Bereich 1) PCM liegt im festen Zustand vor, Bereich 2) PCM befindet sich im Phasenwechsel, Bereich 3) PCM liegt im flüssigem Zustand vor.....	103
Abbildung 7-6: Gemessene und aus den Daten der Laboranlage berechnete Leistungen für die Technikumsanlage für die Bereiche 1 bis 3 .....	105

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht für die Anforderungen eines PCM zur Nutzung als Energiespeichermedium .....	11
Tabelle 3-1: volumetrische Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche PCM und unterschiedliche Messbedingungen.....	32
Tabelle 3-2: volumetrische Wärmeübergangskoeffizienten für unterschiedliche PCM-Höhen bei unterschiedlichen Ölvolumenströmen .....	37
Tabelle 3-3: Zusammenfassung der Literatur zu Direktkontaktlatentwärmespeichern .....	38
Tabelle 4-1: Charakteristische Kenndaten des PCM und des Mineralöls .....	45
Tabelle 5-1: Messparameter zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten an festem und schmelzendem PCM.....	59
Tabelle 5-2: Parameter zur Ermittlung der wärmeübertragenden Fläche bei Einzeltropfen und der gesamt im PCM vorliegenden wärmeübertragenden Fläche .....	65
Tabelle 6-1: Mittlere Temperaturdifferenz zwischen Ölein- und Ölaustrittstemperatur und Beladeleistung für den unter realen Bedingungen erzeugten und den künstlichen zylindrischen Kanal .....	81
Tabelle 6-2: Geometrische und strömungscharakteristische Kenndaten der Tropfen bei den Ölmassenströmen $1,73$ , $2,07$ , $2,60$ und $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s .....	84
Tabelle 6-3: Messergebnisse der Entladung für die Ölmassenströme $1,73$ , $2,07$ , $2,60$ und $6,50 \cdot 10^{-4}$ kg/s.....	87
Tabelle 6-4: Thermische und hydrodynamische Einlaufängen für die Ölmassenströme $4,03$ , $7,11$ und $11,5 \cdot 10^{-4}$ kg/s.....	89
Tabelle 6-5: Messergebnisse der Temperaturmessung der Oberflächentemperatur des Öltropfens und der PCM-Temperatur zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten .....	97

Tabelle 6-6: Experimentell ermittelte charakteristische Kenndaten zu den  
wärmeübertragenden Flächen und den Wärmeübergangskoeffizienten zu dem  
Direktkontaktlatentwärmespeicher der Laboranlage für den Ölmassenstrom  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s.. 99

Tabelle 7-1: Übertragender Wärmestrom während der Entladung des PCM aus der  
Technikumsanlage..... 104

# Anhang

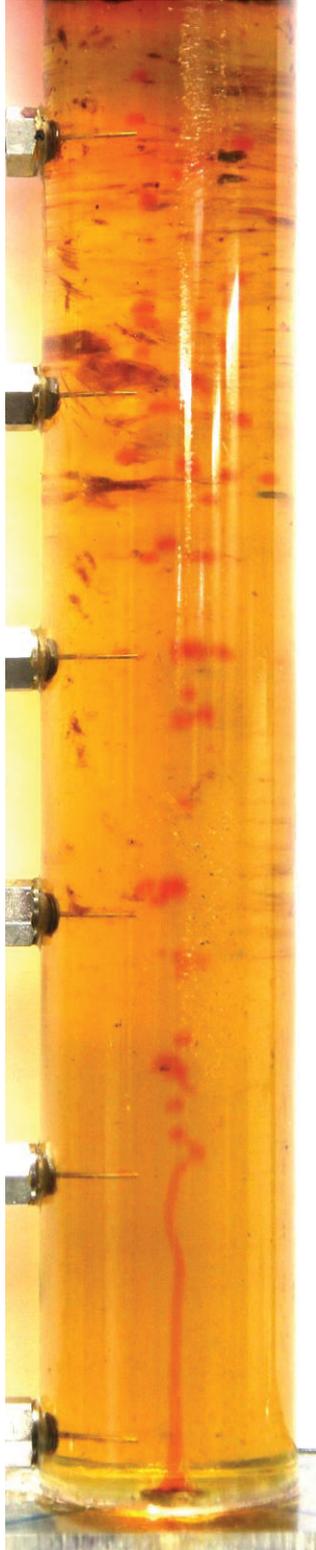
## Anhang 1)

### Stoffdaten des Mineralöls Fragoltherm Q-7

Temp. [°C]	Dampfdr. [bar]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Spez. WK [kJ/kg K]	Wärmeleitf. [W/ m K]	Visk. (kin.) [mm <sup>2</sup> /s]	Visk. (dyn.) [mPas]	Prandtl- Zahl [-]
-45	0,00	872	1,847	0,136	1572,77	1371,79	18632,6
-40	0,00	869	1,864	0,135	815,66	708,75	9786,2
-30	0,00	862	1,9	0,134	277,07	238,94	3388,4
-20	0,00	856	1,936	0,133	118,32	101,26	1473,7
-10	0,00	849	1,971	0,132	59,48	50,51	754,2
0	0,00	843	2,007	0,131	33,72	28,42	435,3
10	0,00	836	2,043	0,13	20,94	17,51	275,1
20	0,00	830	2,078	0,129	13,96	11,58	186,5
30	0,00	823	2,114	0,127	9,85	8,11	134,9
40	0,00	816	2,15	0,126	7,27	5,93	101,3
50	0,00	810	2,185	0,125	5,56	4,51	78,7
60	0,00	803	2,221	0,124	4,39	3,53	63,2
70	0,00	797	2,257	0,123	3,56	2,83	52
80	0,00	790	2,292	0,122	2,95	2,33	43,8
90	0,00	783	2,328	0,12	2,48	1,95	37,7
100	0,00	777	2,364	0,119	2,13	1,65	32,9

Anhang 2)

Flüssiges Öl eingeleitet in flüssiges PCM bei einem Ölmassenstrom von  $6,50 \cdot 10^{-4}$  kg/s (rot eingefärbt: Öl; gelblich: PCM)



### **Artikel in Fachzeitschriften / Peer-Review**

1. J. Tedy, M. Rädle, S. Kunkel, R. Ulbrich, Heat capacity enhancement of water tanks by use of phase change materials for domestic purposes, *Instal* 3 (2015) 23-27
2. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, P. Dörnhöfer, I. Medina, J. Weis, R. Stabler, J.-U. Repke, M. Rädle, Direktkontakt-Latentwärmespeicher zur Effizienzsteigerung von Wärmepumpen, *Chemie Ingenieur Technik* 90, No. 1-2 (2018) 234-240
3. F. Kübel-Heising, S. Kunkel, I. Medina, A. Hien, L. Schmitt, S. Scholl, J.-U. Repke, M. Rädle, Nahinfrarot-Bildanalyse als Werkzeug zur Verfolgung verfahrenstechnischer Vorgänge, *Chemie Ingenieur Technik* 90, No. 6 (2018) 842-851
4. F. Kübel-Heising, S. Kunkel, I. Medina, A. Hien, L. Schmitt, S. Scholl, J.-U. Repke, M. Rädle, Near-Infrared Image Analysis as Tool for Monitoring Process Activities, *ChemBioEng Reviews* 5, No. 5 (2018) 334-342
5. S. Kunkel, T. Teumer, P. Dörnhöfer, K. Schlachter, Y. Weldeyasie, M. Kühr, M. Rädle, J.-U. Repke, Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems, *Applied Thermal Engineering* 145 (2018) 71-79
6. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, F. Wunder, P. Schreiner, M. Medina, J. Weis, R. Stabler, J.-U. Repke, M. Rädle, Vergleich dreier Latentwärmespeicherkonzepte zur effizienten Nutzung von Niedertemperaturwärme, *Chemie Ingenieur Technik* 91, No. 1-2 (2019) 74-84

### **Artikel in Fachzeitschriften und Tagungsbänden / nicht Peer-Review**

1. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, J. Tedy, M. Rädle, Infrarotstrahlungsverteilung von Dunkelstrahlern mittels Reflektorsystemen, *F+E Profil – Forschungsbericht Hochschule Mannheim* (2014) 77-81
2. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, T. Mai, M. Rädle, H.-J. Steinbächer, J.-U. Repke, Neuartiges Konzept zur Gewinnung und Speicherung thermischer Energie in Privathaushalten, *Tagungsband 21. Internationale Passivhaustagung 2017*, 527-532, Wien, Österreich, ISBN: 978-3-00-055811-5
3. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, T. Mai, M. Rädle, H.-J. Steinbächer, J.-U. Repke, New concept for the production and storage of thermal energy in private households, *Conference Proceedings 21<sup>st</sup> International Passive House Conference 2017*, 511-516, Wien, Österreich, ISBN: 978-3-00-055812-2

## Tagungsbeiträge

1. S. Kunkel, J. Tedy, M. Rädle, H.-J. Steinbächer, G. Brösigke, J.-U. Repke, Untersuchung von Be- und Entladevorgängen in heterogenphasigen Latentwärmespeichern, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Fulda 2014 (Posterbeitrag)
2. S. Kunkel, J. Tedy, A. Nguyen, M. Rädle, H.-J. Steinbächer, G. Brösigke, J.-U. Repke, Untersuchung der Transportkoeffizienten und -flächen beim Wärmeübergang in heterogenen Latentwärmespeichern, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Leipzig 2015 (Präsentationsbeitrag)
3. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, M. Rädle, J.-U. Repke, Direkte Ermittlung von Wärmeübertragungsflächen in heterogenen Latentwärmespeichern – Grundlage für ein System-Scale-up, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Kassel 2016 (Präsentationsbeitrag)
4. F. Kübel-Heising, I. Medina, S. Kunkel, J. Tedy, M. Rädle, J.-U. Repke, Saugverhalten bei der Verwendung spezieller Treibmittel in Dampfstrahlprozessen, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Kassel 2016 (Posterbeitrag)
5. F. Kübel-Heising, S. Kunkel, D. Geörg, A. Hien, I. Medina, S. Scholl, J.-U. Repke, M. Rädle, Anwendungspotenzial der Nah-Infrarot-Bildanalyse in der Fluidverfahrenstechnik, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Fluidverfahrenstechnik, Garmisch-Partenkirchen 2016 (Präsentationsbeitrag)
6. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, T. Mai, L. Erlbeck, S. Sonnack, P. Schreiner, J. Strischakov, M. Rädle, Wärmespeicher – lange verkannte Technologie mit innovativen Ansätzen für neue Potentiale, Thementag Umwelttechnik Baden-Württemberg, Stuttgart 2016 (Posterbeitrag I)
7. S. Sonnack, E. Erlbeck, J. Strischakov, P. Schreiner, T. Mai, S. Kunkel, F. Kübel-Heising, M. Rädle, Wärmespeicher – lange verkannte Technologie mit innovativen Ansätzen für neue Potentiale, Thementag Umwelttechnik Baden-Württemberg, Stuttgart 2016 (Posterbeitrag II)
8. M. Rädle, S. Kunkel, L. Erlbeck, F. Kübel-Heising, S. Sonnack, New Possibilities of Heat Storage in Combination with Heat Pumps, Build and Connect, Straßburg, Frankreich 2016 (Präsentationsbeitrag)
9. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, T. Mai, L. Erlbeck, S. Sonnack, P. Schreiner, J. Strischakov, M. Rädle, PCM Heat Storage – Applications in Combination with Heat Pumps, Build and Connect, Straßburg, Frankreich 2016 (Posterbeitrag)
10. S. Sonnack, E. Erlbeck, J. Strischakov, P. Schreiner, T. Mai, S. Kunkel, F. Kübel-Heising, M. Rädle, PCM Heat Storage – A Widely Usable Technology in Buildings, Build and Connect, Straßburg, Frankreich 2016 (Posterbeitrag)

11. S. Kunkel, T. Teumer, F. Kübel-Heising, M. Rädle, J.-U. Repke, Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten in heterogenen Latentwärmespeichern mittels optischer Temperaturmessung, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Bruchsal 2017 (Präsentationsbeitrag)
12. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, T. Mai, M. Rädle, H.-J. Steinbächer, J.-U. Repke, Neuartiges Konzept zur Gewinnung und Speicherung thermischer Energie in Privathaushalten, Internationale Passivhaustagung, Wien, Österreich 2017 (Präsentationsbeitrag)
13. M. Rädle, S. Kunkel, Fast loadable phase change heat storages for multiple applications, 5<sup>th</sup> Swiss Symposium Thermal Energy Storage, Luzern, Schweiz 2018 (Präsentationsbeitrag)
14. S. Kunkel, F. Kübel-Heising, F. Wunder, S. Sonnicks, L. Erlbeck, A. Nguyen, P. Schreiner, M. Rädle, J.-U. Repke, Vergleich unterschiedlicher Latentwärmespeicher-Konzepte mit hoher Speicherdichte, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, Frankfurt am Main 2018 (Präsentationsbeitrag)
15. L. Erlbeck, S. Sonnicks, F. Wunder, F. Kübel-Heising, S. Kunkel, A. Nguyen, M. Rädle, Konzeptstudie einer Insellösung zur autarken Versorgung mit Strom, Wärme (Kälte) und Wasser mittels erneuerbarer Energien, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, Frankfurt am Main 2018 (Posterbeitrag)
16. F. Kübel-Heising, F. Wunder, S. Sonnicks, I. Medina, S. Kunkel, J.-U. Repke, M. Rädle, Effizienzsteigerung einer Dampfstrahlkälteanlage durch den Einsatz von n-Octan als Treibmedium, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, Frankfurt am Main 2018 (Präsentationsbeitrag)
17. F. Wunder, A. Nguyen, L. Erlbeck, S. Kunkel, M. Rädle, J.-U. Repke, Mehrphasen-Salzhydrat-Dispersionen mit hoher Beladungsdichte für Kühl- und Heizanwendungen, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Bremen 2018 (Posterbeitrag)
18. S. Kunkel, T. Teumer, F. Wunder, F. Kübel-Heising, A. Nguyen, M. Rädle, J.-U. Repke, Ermittlung charakteristischer Kenndaten eines Direktkontaktlatentwärmespeichers und Ableitung eines empirischen Modells, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Bremen 2018 (Präsentationsbeitrag)
19. M. Rädle, S. Kunkel, L. Erlbeck, S. Sonnicks, F. Wunder, K. Schlachter, Coming Photovoltaik Driven Heat Pump Systems with Thermal Latent Heat Storage, X Ogólnopolskiego Festiwalu Ekoenergetyki w Opolu, Opole, Polen 2018 (Präsentationsbeitrag)
20. F. Wunder, S. Kunkel, T. Hufnagel, M. Rädle, G. Brösigke, J.-U. Repke, Wärmeübertragungseigenschaften von PCM-Dispersionen am Schmelzpunkt, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Essen 2019 (Präsentationsbeitrag)

21. S. Kunkel, F. Wunder, P. Schütz, J. Worlitschek, J.-U. Repke, M. Rädle, Untersuchung von wärmeübertragenden Flächen in Direktkontaktlatentwärmespeicher mittels Computertomographie und System-Scale-up, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Essen 2019 (Posterbeitrag)

## **Patente**

1. Latentwärmespeicher: DE102014103108A1, Erfinder: H.-J. Steinbächer, J. Tedy, S. Kunkel, M. Rädle, J.-U. Repke, A. Nguyen Thi Ngoc, T. Schumacher, G. Brösigke, Anmeldung: 03.03.2014
2. Energiebereitstellungssystem für Lagertechnik: DE102016005296A1, Erfinder: J. Weis, K. Jost, M. Rädle, S. Kunkel, F. Kübel-Heising, A. Herter, I. Medina, S. Sonnick, Anmeldung: 29.04.2016