

Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	PCM Drop Kalorimeter und Zyklierapparatur
Diplomandin/Diplomand	Zraggen, Tim
Bachelor-Studiengang	Bachelor Maschinentchnik
Semester	FS21
Dozentin/Dozent	Fischer, Ludger
Expertin/Experte	Lieball, Kai

Abstract Deutsch

Die Ansprüche an Speichermöglichkeiten für Energien, vor allem im thermischen Bereich, werden immer grösser. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Phasenwechselmaterialien, auch PCM genannt. Diese Materialien können durch Ausnutzung des Phasenübergangs hohe thermische Energie speichern. Das Kompetenzzentrum der Hochschule Luzern im Bereich thermischer Energiespeicher ist daran interessiert, neue Materialien zu erforschen. Ziel dabei ist es, ein möglichst kostengünstiges und zyklenstabiles Material mit hoher Phasenwechselenthalpie zu entwickeln. Die Zyklusstabilität ist dann gewährleistet, wenn ein Material nach mehreren Erstarrungs- und Schmelzvorgängen immer noch dieselbe Eigenschaft vorweist wie zu Beginn. Um solche Messungen durchzuführen, ist eine gut ausgestattete Laboreinrichtung notwendig.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erweiterung, Optimierung und Entwicklung zweier bestehender Laborerrichtungen. Genauer gesagt, mit der Erweiterung einer Zyklierapparatur mit einem Wärmestromsensor und der Überarbeitung eines Drop Kalorimeters. Diese beiden Einrichtungen gelten als wichtige Ergänzung der bestehenden Laboreinrichtung an der HSLU.

Für die Zyklierapparatur gilt es mittels thermodynamischer Simulationen eine optimale Positionierung für einen Wärmestromsensor zu ermitteln. Diese Erkenntnisse werden in einem Versuchsaufbau validiert und ausgewertet. Nach den erfolgreichen Versuchen wird die Apparatur neu konzeptioniert und mit den Sensoren sowie anderen konstruktiven Anpassungen erweitert.

Für den Drop Kalorimeter wird der bestehende Aufbau durch ein neues Konzept ersetzt. Dieses besteht aus einem Dewar Gefäss und einem verbesserten Mechanismus für das Einführen der Probe.

Aus zeitlichen Gründen konnten beide entwickelten Einrichtungen nicht kalibriert werden. Dazu kommt das die beiden Konzepte nicht mit PCM Messungen getestet und deren Ergebnisse nicht mit der PCM Datenbank verglichen und validiert werden konnte.

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Abstract English

The demands on storage options for energies, especially in the thermal field, are becoming ever greater. One possibility is the use of Phase Change Materials, also called PCM. These materials can store high thermal energy by exploiting the phase transition. The competence center of the Lucerne University of Applied Sciences and Arts in the field of thermal energy storage is interested in researching new materials. The aim is to develop a material with high phase change enthalpy that is as cost-effective and cycle-stable as possible. Cycle stability is ensured when a material still exhibits the same property after several solidification and melting processes as it did at the beginning. For this reason, it is very important to have a well equipped laboratory facility to perform such measurements.

The present work deals with the extension, optimization and development of two existing laboratory equipment. More specifically, with the extension of a cycling apparatus with a heat flow sensor and the revision of a drop calorimeter. These two equipments are considered important additions to the existing laboratory facilities at HSLU.

For the cycling apparatus, thermodynamic simulations are used to determine an optimal positioning for a heat flow sensor. These findings will be validated and evaluated in an experimental setup. After the successful experiments, the apparatus will be redesigned and extended with the sensors as well as other design adjustments.

For the drop calorimeter, the existing setup will be replaced by a new concept. This consists of a Dewar vessel and an improved mechanism for sample insertion.

Due to time constraints, both developed setups could not be calibrated. In addition, the two concepts could not be tested with PCM measurements and their results could not be compared and validated with the PCM database.

Ort, Datum

Greppen, 11 Juni

© Tim Zraggen, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung	1
1.2. Vorgehen	1
2. Anforderungen	2
2.1. Zyklrierapparat	2
2.2. Drop Kalorimeter	2
3. Stand der Technik	3
3.1. Zyklrierapparat	3
3.2. Drop Kalorimeter	4
4. Grundlagen	5
4.1. Recherche	5
4.1.1. PCM	5
4.1.2. Kalorimetrie	6
4.1.3. Drop Kalorimeter	6
4.1.4. Wärmestromsensor	7
4.1.5. DSC Analyse	8
4.2. CAD	8
4.3. Simulation	8
4.4. Datenaufnahme	8
4.5. Datenauswertung	8
5. Zyklrierapparat	9
5.1. Konzept Zyklrierapparat	9
5.1.1. Simulation Wärmestromsensor	9
5.1.2. Versuchsaufbau mit Wärmestromsensor	10
5.1.3. Messauswertung des Versuchsaufbaus	11
5.1.4. Implementierung Wärmestromsensor	14
5.1.5. Grundlegende Anpassungen der Konstruktion	14
5.1.6. Geschlossener Kühlkreislauf mit Wärmepumpe	15
5.2. Kalibrierung Zyklrierapparat	15
6. Drop Kalorimeter	16
6.1. Konzept Drop Kalorimeter	16
6.2. Inbetriebnahme Drop Kalorimeter	16
6.3. Kalibrierung Drop Kalorimeter	17
6.3.1. Verlustmessung	17
6.3.2. C_p Bestimmung	18
7. Diskussion	19
7.1. Abhandlung der Aufgabenstellung	19
7.2. Erreichen der Anforderungen	19
7.2.1. Zyklrierapparat	19
7.2.2. Drop Kalorimeter	19
7.3. Vergleich der Simulation mit dem Versuchsaufbau	19
7.4. Untersuchung der Messauswertung des Versuchsaufbaus	19
7.5. Alternativen zu einem Drop Kalorimeter	20
7.5.1. Überströmter Körper	20
7.5.2. Stufenweises Erwärmen	20
8. Schlusswort	21
8.1. Fazit	21
8.2. Ausblick	21

9. Danksagung	22
A. Anhang	25
A.1. Aufgabenstellung	25
A.2. Projektplan	29
A.3. Anforderungsliste Zyklierapparatur	30
A.4. Anforderungsliste Drop Kalorimeter	31
A.5. Kostenzusammenstellung Zyklierapparatur	32
A.6. Kostenzusammenstellung Drop Kalorimeter	32
A.7. Messresultate Versuchsaufbau mit Wärmestromsensor	33
A.8. Datenblatt Wärmestromsensor	34
A.9. Montagezeichnung Zyklierapparatur	35
A.10. Montagezeichnung Drop Kalorimeter	36

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Fläche eines Wärmeübertragers	m^2
c	Geschwindigkeit	m/s
c_p	spezifische Wärmekapazität (isobar)	$J/(kg \cdot K)$
c_v	spezifische Wärmekapazität (isochor)	$J/(kg \cdot K)$
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Enthalpie	J/kg
I	Strom	A
k	Wärmedurchgangswert	$W/(m^2 \cdot K)$
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
P	Leistung	W
p	Druck	bar
Q	Wärmemenge	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	elektrischer Widerstand	Ω
Se	Seeberger-Koeffizient	V/K
T	absolute Temperatur	K
t	Zeit	h
U	Spannung	V
V	Volumen	m^3
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s

Griechische Buchstaben

Δ	Differenz	—
η	Wirkungsgrad	—
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$
ρ	Dichte	kg/m^3

Indizes

0	Umgebung
c	cold
el	elektrisch
h	hot
i	Eingang
j	Laufvariable
l	liquid
$loss$	Verluste
PC	phase change
s	solid

Abkürzungen

COP	coefficient of performance
CPU	central processing unit (Computer Hardware)
PCM	phase change material
WSL	Wärmespeicher latent
WSS	Wärmespeicher sensibel

1. Einleitung

Die Notwendigkeit Wärme speichern zu können, ist in der heutigen Zeit nicht mehr wegzudenken. Eine Möglichkeit ist, die thermische Energie in Form von latenter Wärme zu speichern. Dabei wird beim Erstarren Wärme abgegeben und beim Schmelzen Wärme zugeführt.

Phasenwechselmaterialien, auch PCM genannt, werden in vielen Anwendungen verwendet, wie zum Beispiel der Klimatechnik oder Verfahrenstechnik. Der Anwendungsbereich eines PCM wird in seine Phasenübergangstemperatur und Phasenwechselenthalpie eingeteilt. Es gibt unzählige Materialien für verschiedene Anwendungen [1]. In Abbildung 1.1 ist eine Grafik der verschiedenen PCM mit der Einteilung ihrer Phasenwechselenthalpie und Phasenübergangstemperatur ersichtlich.

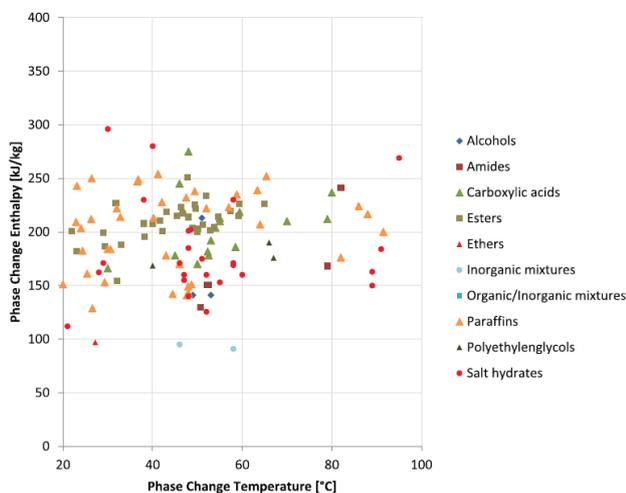


Abbildung 1.1: Einteilung von PCM [2]

Bei Anwendungen, bei denen ein reiner Stoff nicht als Medium verwendet werden kann, muss eine Zusammensetzung aus verschiedenen Stoffen angewendet werden. Diese Gemische müssen viele Kriterien erfüllen, unter anderem, dass sie über eine lange Zeit, sprich nach mehreren Phasendurchläufen, immer noch durchmischt sind und bei derselben Temperatur einen Phasendurchgang sowie eine konstante Schmelzenthalpie aufweisen. Weist ein PCM diese Eigenschaft auf, spricht man von Zyklen- oder Langzeit-Stabilität.

Um neu entwickelte PCM auf die Zyklenstabilität zu prüfen, muss das Material eine bestimmte Anzahl Phasenübergänge durchlaufen. Für diese Überprüfung wird eine Einrichtung benötigt, welche Materialproben temperieren kann. Ein weiterer Aufbau wird benötigt, um die thermischen Eigenschaften des Materials bestimmen zu können.

1.1. Aufgabenstellung

Die von Prof. Dr. Ludger Fischer erstellte Aufgabenstellung (siehe Anhang A.1) hat das übergeordnete Ziel, zwei Einrichtungen, welche in einer Vorarbeit entstanden sind, zu optimieren, zu erweitern, in Betrieb zu nehmen und zu kalibrieren. Anschliessend sollen diese Apparaturen für Messungen verschiedener PCM verwendet und die Resultate mit bestehenden Laboreinrichtungen verifiziert werden. Bei den zwei Einrichtungen handelt es sich um eine Zyklierapparat und einen Drop Kalorimeter.

Dabei gilt es, bei der Zyklierapparat, nebst Optimierungen, den Einbau und die Kalibrierung eines Wärmestromsensors zu realisieren. Beim Drop Kalorimeter ist das Ziel, diesen zu analysieren und allfällige Abänderungen vorzunehmen oder ein komplett neues Konzept zu erarbeiten. Das Grundkonzept der Zyklierapparat wurde in einer Vorarbeit zum Thema 'Konzeption einer Zyklierapparat für Speichermaterialien' entwickelt [3]. Der Drop Kalorimeter aus der Vorarbeit, wurde von einem Zivildienstleistenden erarbeitet.

1.2. Vorgehen

In einem ersten Schritt gilt es, sich mithilfe der Erstellung eines Projektplanes (siehe Anhang A.2) zeitlich zu orientieren und eine effiziente Arbeitseinteilung zu definieren. Mit einer Literaturrecherche wird sich in die Thematiken der Phasenwechselmaterialien, Zyklierapparaturen und der Kalorimetrie eingearbeitet.

Beim Konzept der Zyklierapparat wird durch Simulationen der Einbau von Wärmestromsensoren in die Apparatur evaluiert und in einem Versuchsaufbau validiert. Die Erkenntnisse der Versuche fließen direkt in die Konzeptionierung der Apparatur. Anschliessend werden die Komponenten bestellt, montiert, in Betrieb genommen und kalibriert.

Für das Konzept des Drop Kalorimeters gilt es, die bestehende Apparatur zu bewerten und allenfalls Optimierungen durchzuführen oder ein neues Konzept zu erstellen. Die Komponenten des erstellten Konzeptes werden bestellt, montiert, in Betrieb genommen und anschliessend kalibriert.

Beide Konzepte werden anschliessend durch PCM Messungen getestet. Mithilfe der Einrichtungen im Labor und bestehender PCM Datenbanken, werden die Messresultate auf ihre Genauigkeit verglichen.

2. Anforderungen

Die Anforderungen an das Konzept der Zyklrierapparat und des Drop Kalorimeters werden in einer Liste festgehalten (siehe Anhang A.3 und A.4). Diese Anforderungen werden in die Bereiche Konstruktion, Thermodynamik, Steuerung/Regelung, Bedienung, Datenausgabe und Energieversorgung unterteilt. Auf die elementarsten Anforderungen der beiden Konzepte wird nachfolgend eingegangen.

2.1. Zyklrierapparat

Ein Grossteil der Anforderungen an die Zyklrierapparat wurde von der bestehenden Apparatur übernommen.

Thermodynamik

Kernpunkt der Anforderungen an die Thermodynamik ist die Wärmeabfuhr und Wärmezufuhr der Apparatur mittels Peltierelementen. Dabei gilt es, Temperaturen von -50°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ zu erreichen und eine vollständige Zyklrierung der Proben durchzuführen.

Mechanik

Eine Anforderung der Mechanik besteht darin, eine kompakte Apparatur zu konzeptionieren, welche mindestens 4 Proben à ca. 30ml PCM gleichzeitig zyklrieren kann. Zusätzlich soll die Sensorpositionierung und Kabelführung benutzerfreundlich gestaltet werden.

Datenausgabe

Bei der Datenausgabe gilt es, die Temperaturverläufe aller PCM Proben anzugeben und die Phasenwechselenthalpie der Proben zu bestimmen. Dabei soll die Temperatur sowie der Wärmestrom im Messintervall von mindestens 2s aufgezeichnet werden.

2.2. Drop Kalorimeter

Die Anforderungen für den Drop Kalorimeter wurden basierend auf der bestehenden Einrichtung erstellt und mit zusätzlichen Aspekten ergänzt. Diese Ergänzungen basieren auf Befragungen von Nutzern der bestehenden Apparatur.

Thermodynamik

Für den thermodynamischen Bereich der Anforderungen gilt es, die Arbeitsflüssigkeit im Gefäss auf die gewünschte Temperatur zu bringen.

Zusätzlich muss die Arbeitsflüssigkeit und die PCM Probe mit einer Genauigkeit von $\pm 0.1\text{g}$ ausgewogen werden können.

Mechanik

Das Einbringen der Probe in das Gefäss muss reproduzierbar und benutzerfreundlich gestaltet werden. Zusätzlich soll die Arbeitsflüssigkeit während der Messung mit einem Magnetrührer durchmischt werden.

Datenausgabe

Die Anforderungen zur Datenausgabe basieren auf denselben wie beim Konzept der Zyklrierapparat. Dabei sollen die Temperaturen der Arbeitsflüssigkeit, Probe und Umgebung in einem Messintervall von mindestens 2s aufgezeichnet werden.

3. Stand der Technik

In den nachfolgenden Kapiteln wird zu den bestehenden Laboreinrichtungen in Bezug auf die zu konzeptionierenden Einrichtungen Stellung genommen. Die bestehenden Laboreinrichtungen sind im Besitz des CCTES der Hochschule Luzern.

3.1. Zyklrierapparatur

Um Phasenwechselmaterialien zyklieren zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Hochschule Luzern besitzt drei Apparaturen für Zyklierungen, welche Temperaturen von -40°C oder tiefer erreichen können.

Im thermodynamischen Labor steht eine Apparatur, welche mit einer Wasser-Öl Wärmepumpe Temperaturen von -50°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ erreichen kann (siehe Abbildung 3.1). Die Wärmepumpe wird über einen sekundären Kühlkreislauf dazu verwendet, um Thermoöl in einem Bad zu temperieren. Durch das Ölbad hat man die Möglichkeit, Proben in verschiedener Anzahl und Grösse gleichzeitig zu zyklieren.



Abbildung 3.1: Zyklrierapparatur im thermodynamischen Labor

Die zweite Apparatur befindet sich im Analytik-Labor (siehe Abbildung 3.2). Diese Anlage der Firma Mettler Toledo wird für allgemeine Temperierung von Materialien verwendet. Dadurch kann sie auch für PCM Proben verwendet werden. Diese Anlage kann Temperaturen von -40°C bis $+180^{\circ}\text{C}$ erreichen. Jedoch reicht die Leistung bei -40°C nicht mehr aus, um eine erfolgreiche Zyklierung durchzuführen. Zusätzlich ist die Anlage durch ihr geringes Probevolumen von 0.5ml bis 100ml begrenzt und kann auch nicht erweitert werden.

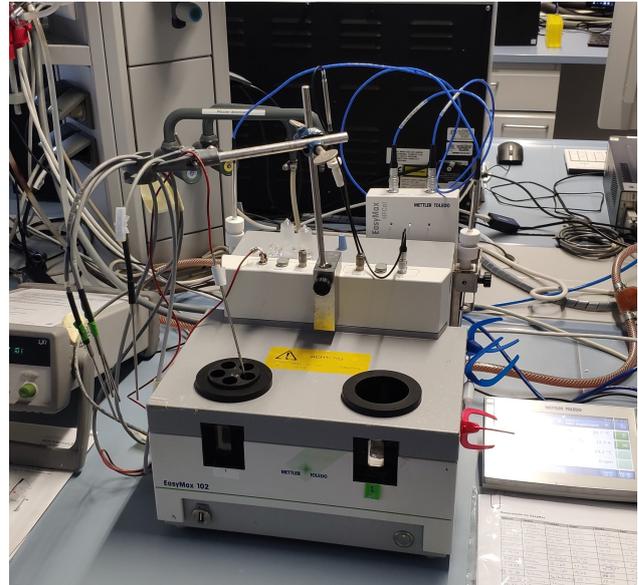


Abbildung 3.2: Mettler Toledo Easy Max 102

Die dritte Apparatur wurde in einer Vorarbeit entwickelt. Sie ermöglicht es, 4 Proben à ca. 30g Probeninhalt gleichzeitig zu zyklieren. Dabei können Temperaturen von -50°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ erreicht werden. Die Wärmezufuhr und Abfuhr der Probenflaschen wird mittels Peltierelementen realisiert. Dabei wird die Wärme, welche an den Peltierelementen anfällt, mit einem Wasser-Wärmeübertrager aus dem Computerbereich abgeführt.

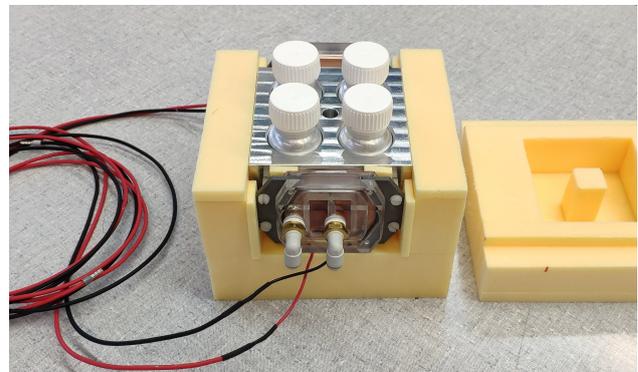


Abbildung 3.3: Zyklrierapparatur aus Vorarbeit

3.2. Drop Kalorimeter

Aus einer Vorarbeit an der Hochschule Luzern entstand ein Aufbau eines Drop Kalorimeters, welcher aus wenigen Komponenten erstellt worden ist. Der Aufbau besteht aus einem isolierten Gefäß mit Deckel, Temperaturlaufzeichnung, magnetischem Rührwerk, Waage und Wasserkocher. Dabei wird die Arbeitsflüssigkeit im Kalorimeter, in diesem Fall Wasser, separat in einem Wasserkocher auf die gewünschte Temperatur gebracht. Die in einem Gefrierschrank erstarrte Probe wird in das Gefäß eingebracht. Die Temperaturen werden während des gesamten Vorgangs aufgezeichnet.

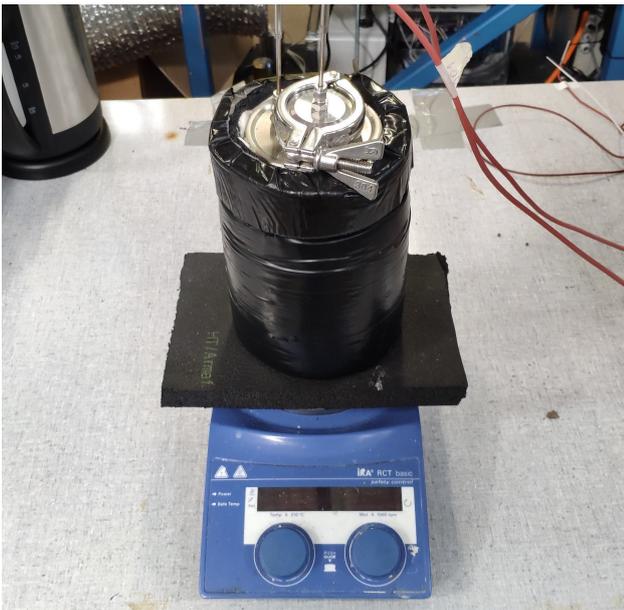


Abbildung 3.4: Drop Kalorimeter aus Vorarbeit

4. Grundlagen

4.1. Recherche

Für das genauere Verständnis der Grundlagen und eine optimale Einarbeit wurden Recherchen für die wichtigsten Bestandteile der Konzeptionierung der Zyklierapparatur und des Drop Kalorimeters erarbeitet. Dies beinhaltet die Themen PCM, Drop Kalorimeter, Differential Scanning Calorimetry und Wärmestromsensor.

Im Bereich PCM wurde bereits in der Vorarbeit der Zyklierapparatur eine Recherche durchgeführt [3]. Diese Recherche wird in diesem Kapitel übernommen und mit weiteren Erkenntnissen und Recherchen erweitert.

4.1.1. PCM

PCM kann zum Speichern von thermischer Energie verwendet werden, dabei kann die zur Phasenänderung benötigte Energie nutzbar gemacht werden. Zu Beginn des Schmelzprozesses ist das PCM in festem Zustand. Während der Erwärmung wird dem PCM thermische Energie zugeführt, wodurch die Temperatur des PCM ansteigt. Dies nennt sich sensibler Vorgang. Sobald die Schmelztemperatur erreicht ist, wird sich bei weiterer Wärmezufuhr die Temperatur des PCM nicht mehr ändern, bis dieses vollständig geschmolzen ist. Die Energie wird während dieses Vorganges in latenter Form gespeichert. Sobald das PCM vollständig geschmolzen ist, führt nun jede weitere Wärmezufuhr wieder zu einer Erhöhung der Temperatur [4].

Diese Materialien finden in vielen verschiedenen Bereichen Anwendung. Mögliche Anwendungsbereiche sind die Klimatechnik und die Verfahrenstechnik. Dabei ist für die Auswahl eines PCM die Phasenwechseltemperatur sowie die Phasenwechselenthalpie entscheidend. Prinzipiell können alle Materialien als PCM verwendet werden, jedoch finden nur jene eine Anwendung, welche eine hohe Phasenwechselenthalpie besitzen. Dabei können die PCM in zwei Stoffklassen unterteilt werden, nämlich Reinstoffe und Mischungen (Siehe Abbildung 4.1). Diese werden wiederum in zwei Bereiche unterteilt. Dabei sind die meist verwendeten und erforschten PCM: Paraffine, Fettsäuren, Ester, Alkohole, Zuckeralkohole und Salzhydrate [1].

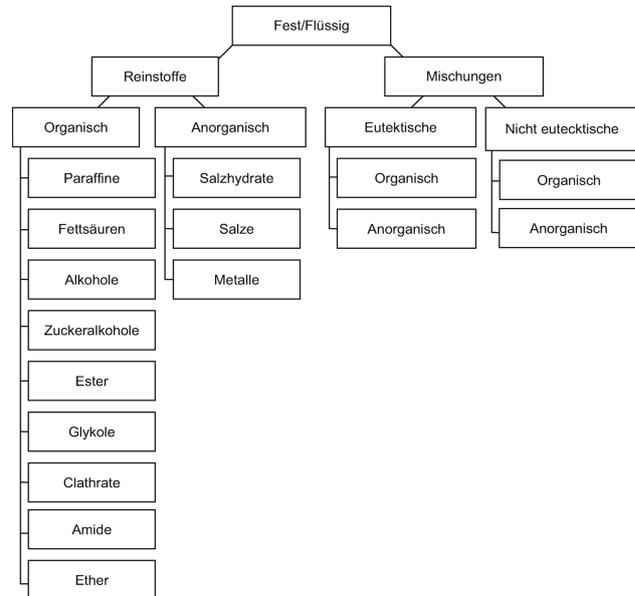


Abbildung 4.1: Unterteilung PCM [1]

Das Energie-Temperatur Diagramm ist die Charakteristik für ein PCM (siehe Abbildung 4.2). Die sensible Wärme ist die Wärme, welche in einem Körper zu einer Temperaturänderung führt. Hingegen ist die latente Wärme die aufgenommene oder abgegebene Wärme eines Materials, wenn es bei konstanter Temperatur eine Phasenänderung durchläuft. Für die Berechnungen sind dabei die Phasenwechseltemperatur T_{PC} und die Phasenwechselenthalpie Δh_{PC} massgebend.

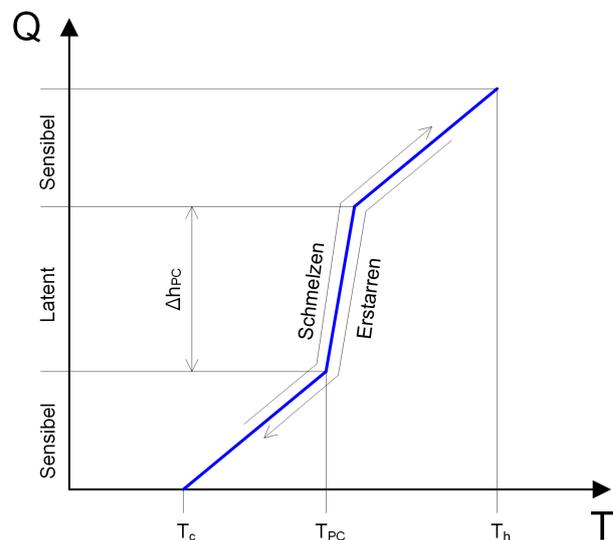


Abbildung 4.2: Q-T Diagramm eines PCM

$$\Delta Q_{charge} = m(cp_l(T_h - T_{PC}) + \Delta h_{PC} + cp_s(T_{PC} - T_c)) \quad (4.1)$$

$$\Delta Q_{discharge} = m(cp_l(T_{PC} - T_h) - \Delta h_{PC} + cp_s(T_c - T_{PC})) \quad (4.2)$$

Die Gesamtmenge an Energie, welche in einem gewissen Temperaturbereich einem PCM zugeführt (charge/Beladung) oder abgeführt (discharge/Entladung) werden kann, wird durch die Gleichungen 4.1 und 4.2 beschrieben [4].

Bei der Beladung entspricht T_c der Temperatur des PCM zu Beginn und T_h jener zum Schluss des Beladevorgangs. Beim Erstarren findet der gegenteilige Prozess statt. Energie wird aus dem PCM entfernt, während die Temperatur des PCM abnimmt. Aus den Gleichungen wird ersichtlich, dass eine hohe Phasenwechselenthalpie (Schmelz- bzw. Erstarrungsenthalpie) für die Speicherkapazität eines PCM entscheidend ist. Die Phasenwechselenthalpie Δh_{PC} ist definiert durch die Energieänderung ΔQ pro Masse während der Phasenänderung (siehe Gleichung 4.3) [4].

$$\Delta h_{PC} = \frac{\Delta Q}{m} \quad (4.3)$$

Beim Erstarrungsvorgang ist ein Phänomen zu erkennen, bei dem die Temperatur unter die Phasenwechseltemperatur absinkt und gewisse Zeit später wieder auf die Phasenwechseltemperatur ansteigt. Dieses Phänomen wird Subcooling, auch Supercooling oder Unterkühlung, genannt und ist für die Anwendung von PCM tendenziell unerwünscht. In Abbildung 4.3 ist der Temperaturverlauf im Erstarrungsvorgang von destilliertem Wasser ersichtlich. Das Vorgehen bei der Unterkühlung ist folgendermassen. Beginnt das PCM zu kristallisieren, wird so viel Energie frei, bis die Temperatur auf die Phasenwechseltemperatur angestiegen ist. Während der vollständigen Kristallisation bleibt die Temperatur konstant. Die Differenz zwischen der tatsächlichen Gefriertemperatur und der Temperatur, bei der das Gefrieren beginnt, wird als die Unterkühlungstemperaturdifferenz definiert [4].

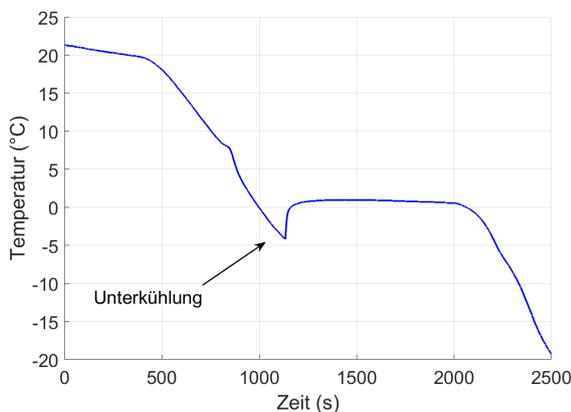


Abbildung 4.3: Temperaturverlauf destilliertes Wasser

4.1.2. Kalorimetrie

Ziel der Kalorimetrie ist die Ermittlung thermodynamischer Eigenschaften eines Stoffes durch die Bestimmung der Wärmeänderung. Dabei wird durch die Messung der Temperaturänderung Rückschluss auf die Wärmeänderung gemacht.

Ein Kalorimeter wird charakterisiert durch ein geschlossenes Messsystem, welches die Probe und die Arbeitsflüssigkeit beinhaltet. Durch die Angaben des Messprinzips, der Betriebs- und Umgebungsbedingungen sowie der Bauart lässt sich ein Kalorimeter klassifizieren. Es wird in isotherme, adiabatische und isoperibole Kalorimeter unterteilt [5].

Isothermes Kalorimeter

Bei isothermen Kalorimetern hat die Arbeitsflüssigkeit die gleiche Temperatur wie die der Umgebung. Das Messsystem tauscht die Wärme über einen endlich kleinen Wärmewiderstand mit der Arbeitsflüssigkeit aus, welche eine unendlich grosse Wärmekapazität hat [5].

Adiabates Kalorimeter

Ein adiabates Kalorimeter charakterisiert sich dadurch, dass keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht und so die gesamte Wärme für die Temperaturänderung des Messsystems verwendet wird. In der Praxis wird dies durch einen sehr grossen Wärmewiderstand zwischen Messsystem und Umgebung erreicht [5].

Isoperiboles Kalorimeter

Das Messsystem bei einem isoperibolen Kalorimeter ist über einen endlichen Wärmewiderstand an einen Umgebungsmantel mit konstanter Temperatur und unendlicher Wärmekapazität angeschlossen. Dabei wird dem Probenkörper, mit einem thermischen Effekt (Widerstandsheizung), Wärme zugeführt. Daraus resultiert eine Temperaturänderung des Messsystems, welche sich nach endlicher Zeit ins Gleichgewicht mit der Temperatur des Umgebungsmantels einstellt [5].

4.1.3. Drop Kalorimeter

Eine Methode zur Bestimmung thermodynamischer Eigenschaften ist die Verwendung eines Drop Kalorimeters, auch Einwurf Kalorimeter genannt. Durch die Funktionsweise und den Aufbau, ordnet sich dieser in die adiabatische Kalorimetrie ein.

Der Aufbau besteht aus einem isolierten Gefäss, gefüllt mit einer Arbeitsflüssigkeit, einem magnetischen Rührer, einem Probengefäss mit der PCM Probe und Temperatursensoren positioniert in der Arbeitsflüssigkeit und der Probe (siehe Abbildung 4.4).

Die Probe wird im erstarrten Zustand in den Kalorimeter eingeführt. Im Kalorimeter selbst hat zu Beginn des Experimentes die Arbeitsflüssigkeit eine homogene Temperatur. Während des gesamten Versuchs wird die Arbeitsflüssigkeit gerührt und die Temperaturen der Probe und der Arbeitsflüssigkeit aufgezeichnet.

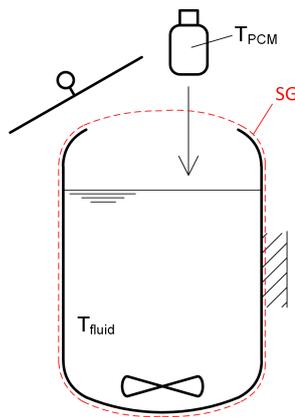


Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau eines Drop Kalorimeters

Die Energiebilanz des Versuchs wird durch die Gleichung 4.4 beschrieben. Die thermodynamischen Eigenschaften des Aufbaus sowie die Verluste sind durch Versuche und Kalibrierungen zu ermitteln. Die Energie des PCM kann in latente und sensible Anteile aufgeteilt werden (Index s und l) [6].

$$Q_{cal} + Q_{fluid} + Q_{bot} + Q_{PCM} = Q_{loss} \quad (4.4)$$

cal	Isoliertes Gefäss mit Temperatursensor, Deckel und magnetischem Rührer
bot	Flasche mit Deckel für die PCM Probe
fluid	Die Arbeitsflüssigkeit im Kalorimeter
PCM	Das zu Testende PCM

$$Q_{cal} = m_{cal} c_{p_{cal}} \Delta T_{fluid} \quad (4.5)$$

$$Q_{fluid} = m_{fluid} c_{p_{fluid}} \Delta T_{fluid} \quad (4.6)$$

$$Q_{bot} = m_{bot} c_{p_{bot}} \Delta T_{fluid} \quad (4.7)$$

$$Q_{PCM} = Q_{PCM,s} + Q_{PCM,l} \quad (4.8)$$

$$Q_{PCM,s} = m_{PCM} c_{p_{PCM}} \Delta T_{PCM} \quad (4.9)$$

$$Q_{PCM,l} = m_{PCM} \Delta h_{PCM} \quad (4.10)$$

4.1.4. Wärmestromsensor

Für eine thermodynamische Untersuchung verschiedener Materialien, ist die Messbarkeit des Wärmestromes von grossem Interesse. Durch die Messung des Wärmestroms kann die Auswertung der Energiebilanz einer Laboreinrichtung enorm vereinfacht werden. Eine Möglichkeit den Wärmestrom zu messen, bietet die Firma GreenTeg an. Ihre Produktreihe besteht aus Sensoren verschiedener Grösse für verschiedenste Anwendungen.

Basis hinter einem Wärmestromsensor ist die Halbleitertechnik. Ein solcher Wärmestromsensor besteht aus mehreren positiv und negativ geladenen Halbleitersäulen. Der dabei entstehende elektrische Strom wird durch die Thermoeffekte erzeugt. In Abbildung 4.5 ist ein schematischer Aufbau ersichtlich. Er ist vergleichbar mit einem Peltierelement, wobei hier durch den Wärmestrom ein messbarer elektrischer Strom erzeugt wird. Beim Peltierelement ist es gerade umgekehrt, durch den zugeführten elektrischen Strom wird ein Wärmestrom erzeugt. [7].

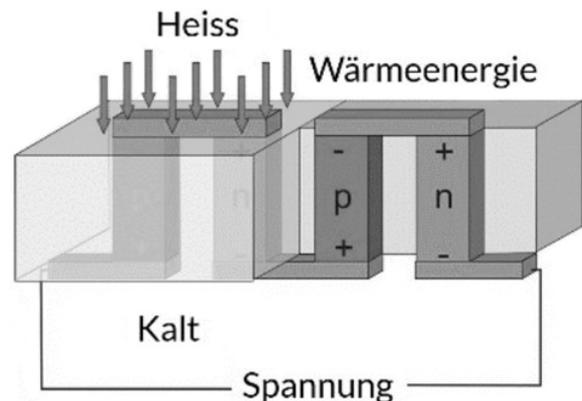


Abbildung 4.5: Thermoeffekt im Halbleiter [7]

Für diese Arbeit ist die Verwendung des Sensors mit der Benennung Heat Flux Sensor gSKIN® - XM (siehe Anhang A.9) vorgegeben. Mithilfe eines vom Hersteller vorgegebenem Kalibrierungsskalars und einem temperaturabhängigen Korrekturfaktor kann der gemessene Spannungsverlauf des Sensors in einen Wärmestromverlauf transformiert werden. Die zu messenden Spannungen sind im Bereich von $2 \frac{\mu V}{W/m^2}$

4.1.5. DSC Analyse

Eine andere Möglichkeit, um thermodynamische Eigenschaften von Materialien zu bestimmen, ist die Differential Scanning Calorimetry kurz, DSC. Dabei wird die zu untersuchende Probe in einer Aluminiumkapsel, auch Tiegel genannt, verschlossen. Zusammen mit einer leeren Aluminiumkapsel als Referenzprobe, werden diese einem zeitabhängigen Temperaturprogramm unterworfen. Dabei wird die Referenzprobe zur Verlustbestimmung verwendet. In der Apparatur selbst, wird die Messung mit zwei gegeneinander geschalteten Thermoelementen aufgezeichnet. Die daraus resultierende Thermospannung ist proportional zum Wärmestrom, welcher in die Probe fließt. Durch eine Integration des Wärmestroms über die Zeit kann die Enthalpieänderung der Probe bestimmt werden. In Abbildung 4.6 ist die Datenausgabe in Form eines \dot{Q} -T Diagrammes ersichtlich [8]. Dabei repräsentiert die Fläche unter dem Peak die Schmelzenthalpie. Der Schnittpunkt der Tangente an der Kurve stellt die Phasenwechseltemperatur dar.

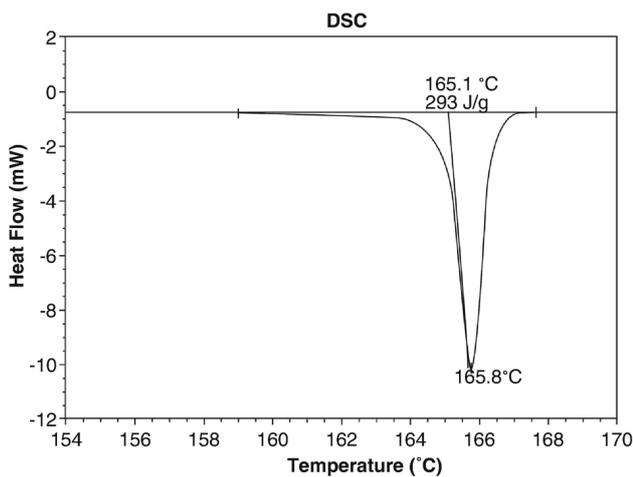


Abbildung 4.6: Datenausgabe DSC [9]

Die DSC Methode hat gewisse Vorteile im Vergleich zur Drop Kalorimetrie. Einer davon ist die automatisierten Messdurchläufe verschiedener Proben. Die DSC Analyse von PCM hat jedoch auch Nachteile. Die Probengrößen sind sehr klein (5-20mg), was eine genaue Untersuchung von großen, nicht homogenen PCM Proben verhindert. Dies wirkt sich insbesondere auf die Unterkühlung des PCM aus. Ein zusätzlicher Nachteil ist, dass die Proben nach der Vermessung nicht mehr wiederverwendbar sind, was weitere Untersuchungen mit derselben Probe verhindert [6].

4.2. CAD

Die CAD Modelle der beiden Konzepte werden auf der Software Siemens NX 12 konstruiert und visualisiert. So können die Dimension und die Funktionalitäten der Konzepte überprüft werden.

4.3. Simulation

Für die Untersuchung der Konzepte, werden thermodynamische Simulationen durchgeführt. Dabei wird die Simulationssoftware Comsol verwendet.

4.4. Datenaufnahme

Während der Versuche werden die Temperaturverläufe der PT100 Sensoren und die Spannungsverläufe des Wärmestromsensors mit dem Datenaufnahmegerät Agilent 34970A aufgezeichnet.

4.5. Datenauswertung

Die Simulationen sowie die Messresultate der Versuche werden mit Hilfe von Matlab Programmen ausgewertet, untersucht und in Grafiken veranschaulicht.

5. Zyklierapparat

5.1. Konzept Zyklierapparat

Das neue Konzept der Zyklierapparat basiert auf der bereits vorhandenen Apparatur aus dem Vorprojekt. In die Konzeptionierung fließen Punkte des Vorprojektes, welche nicht realisiert werden konnten und Rückmeldungen von Benutzern der Apparatur ein. Folgende Zusatzpunkte sind beim neuen Konzept zu realisieren:

- Einbau von Wärmestromsensoren
- Verwendung eines geschlossenen Kühlkreislaufes kombiniert mit einer Wärmepumpe
- Reproduzierbare Positionierung der Temperatursensoren in den Probenflaschen
- Positionierung der Sensoren des Probenträgers
- Verminderung der Hohlräume zwischen Isolation und Komponenten zur Verminderung der Kondenswasserbildung
- Eliminierung der Luft einschüsse im Wärmeübertrager der Peltier Kühlung

In den nachfolgend Unterkapiteln wird auf die Anpassungen und Optimierungen eingegangen sowie auf die darauf bezogenen Arbeiten.

5.1.1. Simulation Wärmestromsensor

Um ausfindig zu machen, ob der gewählte Wärmestromsensor für diese Anwendung brauchbar ist und um eine optimale Positionierung zu ermitteln, wurden Simulationen durchgeführt. Für die Analyse der Verwendbarkeit des Wärmestromsensors, werden die simulierten Wärmeströme mit dem Messbereich des Sensors verglichen.

Im Simulationsmodell wurden vier Dummy-Sensoren um die Probenflasche herum platziert. Die Sensoren sind in einer Aussparung im Aluminium Probenträger eingeharzt. In Abbildung 5.1 ist der Versuchsaufbau in der Draufsicht dargestellt. Die vier Sensoren werden mit 'Peltier', 'Mitte', 'Symmetrie' und 'Isolation' benannt.

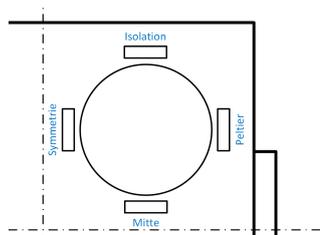


Abbildung 5.1: Simulationsmodell mit Dummy-Sensoren

Für die Auswertung der Simulation wird der ef-

fektive Wärmestrom, welcher in den PCM Volumenkörper fließt, verglichen mit den Wärmeströmen, welche durch die Sensorflächen selbst fließen. Dabei gilt es, einen repräsentativen zeitlichen Verlauf des Wärmestroms zu finden. In Abbildung 5.2 sind die Wärmestromverläufe der 4 Sensoren dargestellt.

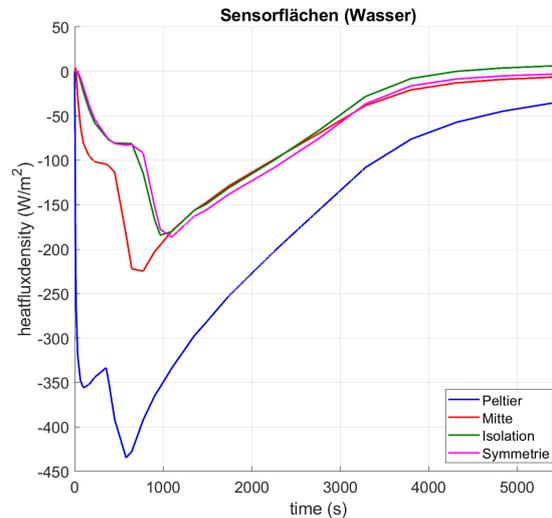


Abbildung 5.2: Q-t Diagramm der Sensoren

In Abbildung 5.3 ist der zeitliche Verlauf des arithmetischen Mittels des Wärmestroms, welcher in das PCM fließt, dargestellt.

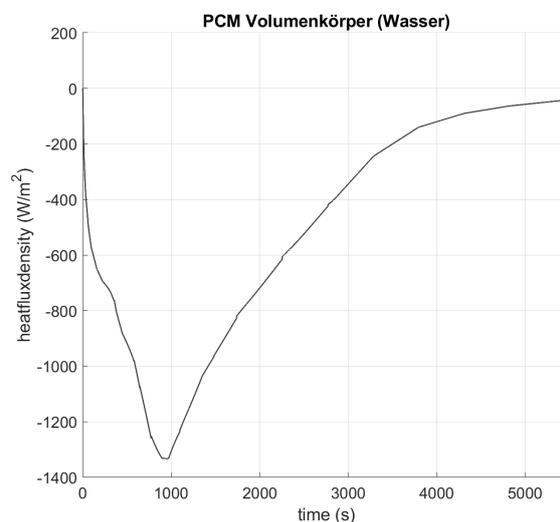


Abbildung 5.3: Q-t Diagramm des PCM

Keine der vier Sensorverläufe widerspiegeln exakt den Verlauf des Wärmestroms, welcher in das PCM fließt. Jedoch hat die Kurve der Sensorposition 'Mitte' die beste Ähnlichkeit. Ausschlaggebend dafür ist der Wendepunkt bei ca. 900s.

Berechnet man die beiden Integrale der Kurve des Sensors 'Mitte' und des PCM ist zu erkennen, dass diese um einen Skalar von 6.4 voneinander variieren. Multipliziert man nun jeden Messpunkt der Messresultate des Sensors mit dem Wert 6.4, so kann die Kurve dem Verlauf des PCM genauer angeglichen werden. In Abbildung 5.4 ist die an den PCM Verlauf angegliche Kurve des Sensors ersichtlich.

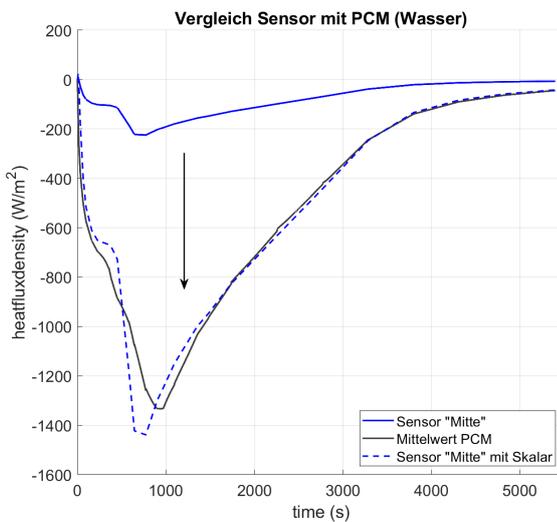


Abbildung 5.4: Q-t Diagramm PCM und Sensor 'Mitte'

5.1.2. Versuchsaufbau mit Wärmestromsensor

Durch die Erkenntnisse der Simulation kann nun davon ausgegangen werden, dass ein Sensor an dieser Position ein repräsentatives Resultat im Vergleich zum tatsächlichen Wärmestrom, welcher ins PCM fließt, darstellt. In einem ersten Schritt gilt es nun, diese Simulationen an einem Versuchsaufbau zu validieren. Dabei wird der Aufbau der Zyklierapparatur aus dem Vorprojekt so abgeändert, dass in eine Ausfräsung im Probenträger ein Wärmestromsensor mit thermisch leitendem Epoxidharz eingeklebt werden kann. Der thermisch leitende Epoxidharz hat eine Wärmeleitfähigkeit von $1.1 \frac{W}{mK}$. Die Eigenschaften des Epoxidharzes wurde vom Hersteller des Sensors so vorgegeben, dass der Epoxidharz und der Sensor die gleichen Wärmeleitfähigkeiten besitzen. Dadurch wird ein konstanter Wärmestrom durch den Sensor sowie den Epoxidharz erzielt.

Für den Einbau des Wärmestromsensors in den Probenträger wurde eine Einbaulehre verwendet. Diese Einbaulehre besteht aus einer halbierten Aluminium Probenflasche, welche passgenau in die Bohrung passt. An der Aussenseite der Einbaulehre wurde der Wärmestromsensor mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband an der richtigen Stelle, bezogen zur Ausfräsung, befestigt (siehe Abbildung 5.5).



Abbildung 5.5: Einbaulehre

Das thermisch leitende Epoxidharz wird mit einer Spritze in die Ausfräsung gefüllt. Die Ausfräsung wird im ersten Schritt bis zur Hälfte gefüllt, sodass der Sensor auf dem Epoxidharz liegt. Danach wird die Einbaulehre in der Bohrung ausgerichtet und mit Klammern befestigt, bis der Klebstoff vollständig ausgehärtet ist (siehe Abbildung 5.6).



Abbildung 5.6: Einbaulehre in Probenträger

In einem zweiten Schritt wird die Ausfräsung mit dem Sensor komplett mit Epoxidharz gefüllt, so dass der Sensor zwischen zwei Epoxidharzschichten eingebettet ist. Das überflüssige, ausgehärtete Epoxidharz wird mit Schleifpapier an die Rundung der Bohrung angepasst, so dass die Probenflasche exakt in die Bohrung eingeführt werden kann.

5.1.3. Messauswertung des Versuchsaufbaus

Für die Durchführung der Messungen mit dem Versuchsaufbau werden die vier Probenflaschen mit je 30 Gramm destilliertem Wasser ($333 \frac{J}{g}$) gefüllt. In jede Probenflasche wird ein Temperatursensor in die Mitte der PCM Probe positioniert. Für den Versuch wurde ein Gefrierzyklus von 20°C bis -20°C gefahren und ein Schmelzzyklus von -20°C bis $+10^{\circ}\text{C}$.

Die Temperaturen sowie die Spannungen des Wärmestromsensors wurden während des Versuches aufgezeichnet. In Abbildung 5.7 (siehe Anhang A.7 für grössere Abbildung) ist der Temperaturverlauf und der Spannungsverlauf in mV des Wärmestromsensors ersichtlich. Die blaue Kurve in der Grafik repräsentiert den Temperaturverlauf der Probe, an welcher der Wärmestromsensor liegt. Die rote Kurve zeigt den Spannungsverlauf des Wärmestromsensors. Die drei gepunkteten Linien sind die Temperaturverläufe der restlichen drei Proben. In Abbildung 5.8 sind die Benennungen der Sensoren mit der korrespondierenden Position ersichtlich.

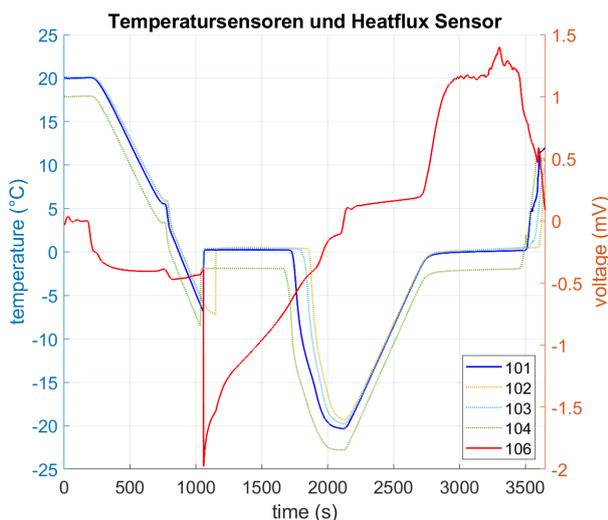


Abbildung 5.7: Temperatur- und Spannungsverlauf

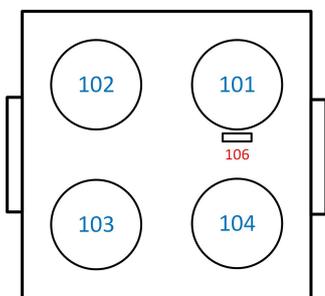


Abbildung 5.8: Benennung und Position der Sensoren

Betrachtet man den Bereich der Unterkühlung genauer ($t=1000\text{s}$), so wird ersichtlich, dass der Wärmestrom zur gleichen Zeit rapide sinkt, während die Temperatur des am nächsten zum Wärmestromsensor liegenden Temperatursensors auf 0°C steigt (siehe Abbildung 5.9). Der Wärmestrom sinkt nach der Unterkühlung, da die Probe während der Phasenänderung Energie abgibt. Das bedeutet, dass ein negatives Vorzeichen im Spannungsverlauf, eine Energieabgabe der Probe darstellt. Für die nachfolgenden Berechnungen und Auswertungen wird der Temperaturverlauf der Sensorposition 101 verwendet. Die Kristallisation der drei anderen Proben beginnt zu einem früheren Zeitpunkt und hat somit keinen Einfluss auf die Wärmestrommessung.

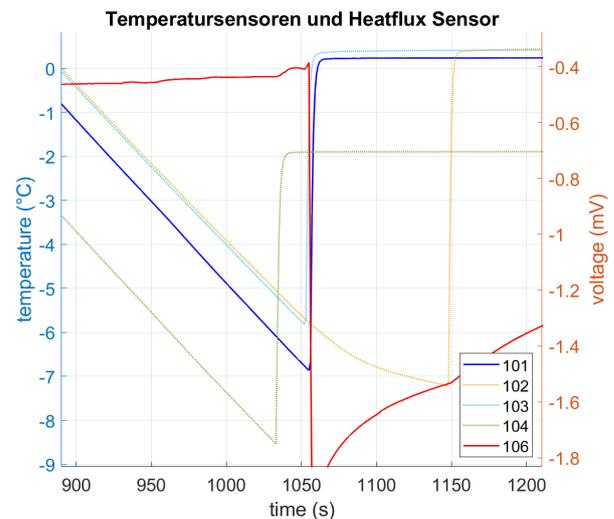


Abbildung 5.9: Temperatur- und Spannungsverlauf (vergrössert)

Für die Auswertung der Messung werden die Resultate der Sensoren 101 und 106 in einen Erstarrungsbereich ($t=0\text{s}$ bis $t=2100\text{s}$) und einen Schmelzbereich ($t=2100\text{s}$ bis $t=3600\text{s}$) aufgeteilt. Die nachfolgenden Auswertungen der Messresultate befassen sich mit dem Erstarrungsbereich. Für die Analyse wird der, aus dem Temperaturverlauf berechnete reale Energieverlauf des PCM, mit dem Energieverlauf aus der Wärmestrommessung verglichen. Für die Berechnung des Energieverlaufs aus dem Temperaturprofil wurde dieser in drei Abschnitte aufgeteilt. Die drei Abschnitte sind: sensibel flüssig, latent und sensibel fest. In den beiden sensiblen Bereichen wurde die Energieänderung, berechnet aus der Temperaturänderung, im Sekundenintervall aufsummiert.

Der übrigbleibende latente Bereich wurde als konstante Energieänderung pro Zeit aus der bekannten Phasenwechselenthalpie berechnet (siehe Gleichung 5.1).

$$\frac{\Delta Q}{t} = \frac{\Delta h_{PC} m}{t_{latent}} \quad (5.1)$$

In Abbildung 5.10 ist der aus den Berechnungen entstandene Energieverlauf ersichtlich.

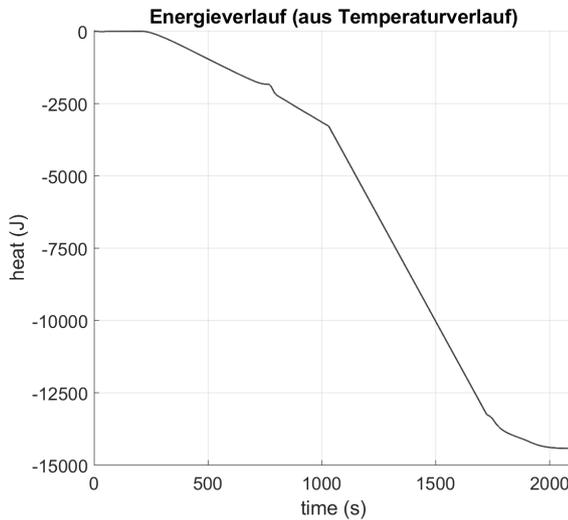


Abbildung 5.10: Energieverlauf aus Temperaturverlauf (Erstarrungsbereich)

In Abbildung 5.11 ist das Q-T Diagramm ersichtlich, welches aus der Kombination des Temperaturverlaufs und des berechneten Energieverlaufs besteht.

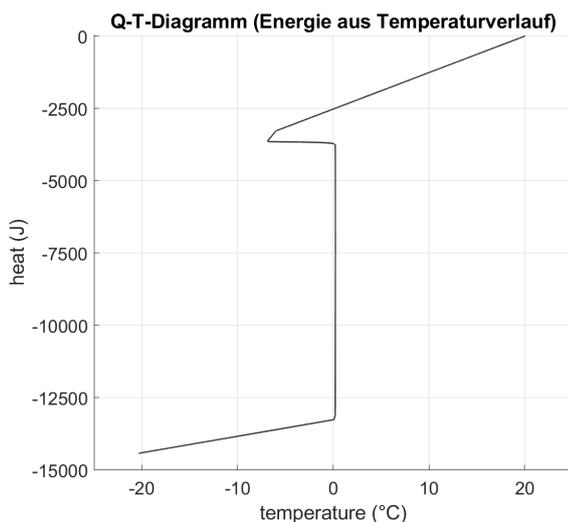


Abbildung 5.11: Q-T Diagramm aus Temperaturverlauf (Erstarrungsbereich)

Der Spannungsverlauf des Wärmestromsensors repräsentiert mit Einbezug des Kalibrierungsskalars den Wärmestrom, der durch den Sensor fließt. Mittels Integration des Wärmestromverlaufs konnte dieser in den Energieverlauf umgerechnet werden. Dieser wiederum wurde mit einem Korrekturskalar multipliziert, so dass die Gesamtenergie aus dem integrierten Spannungsverlauf gleich der Gesamtenergie, berechnet aus dem Temperaturverlauf, ist (siehe Abbildung 5.12).

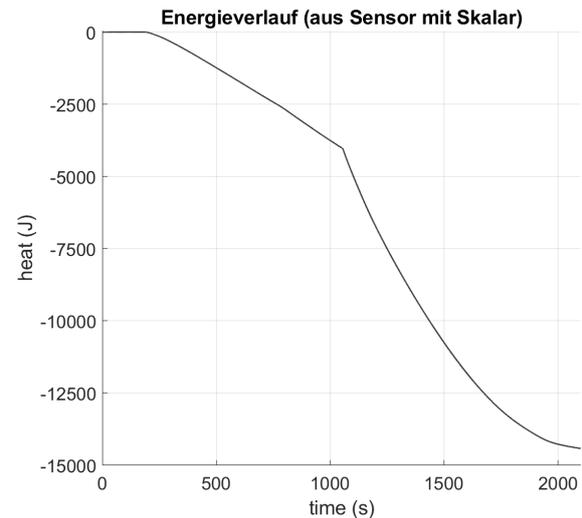


Abbildung 5.12: Energieverlauf aus Sensor (Erstarrungsbereich)

Der Korrekturskalar wird verwendet, da der Wärmestromsensor in Epoxidharz eingeklebt ist. Somit ist der dort gemessene Wärmestrom geringer als jener, welcher durch das Aluminium in die PCM Probe fließt. Der Korrekturskalar selbst wird aus dem Verhältniss der totalen Energieänderungen des Energieverlaufs, berechnet aus dem Temperaturverlauf und der Wärmestrommessung, gebildet (siehe Gleichung 5.2). In diesem Fall beträgt der berechnete Wert des Skalars 1213.

$$\text{Korrekturskalar} = \frac{\Delta Q_{total, Temperatur}}{\Delta Q_{total, Sensor}} \quad (5.2)$$

Kombiniert man nun auch diesen Energieverlauf mit dem Temperaturverlauf, so erhält man erneut ein Q-T Diagramm (siehe Abbildung 5.13).

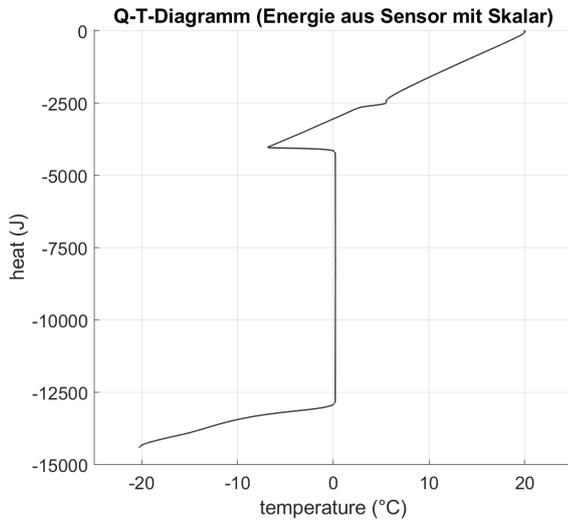


Abbildung 5.13: Q-T Diagramm aus Sensor (Erstarungsbereich)

Beim Vergleich der beiden Energieverläufe und Q-T Diagramme (siehe Abbildung 5.14) wird ersichtlich, dass die Kurven zu einem grossen Teil identisch sind.

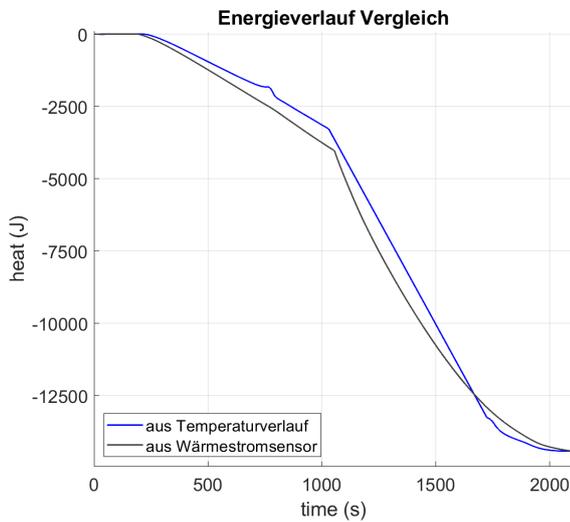


Abbildung 5.14: Vergleich Energieverlauf (Erstarungsbereich)

Die aus den beiden Q-T Diagrammen (siehe Abbildung 5.15) abgelesenen und umgerechneten Phasenwechselenthalpien liegen im Bereich von $\pm 10\%$ der tatsächlichen Phasenwechselenthalpie von $333 \frac{J}{g}$.

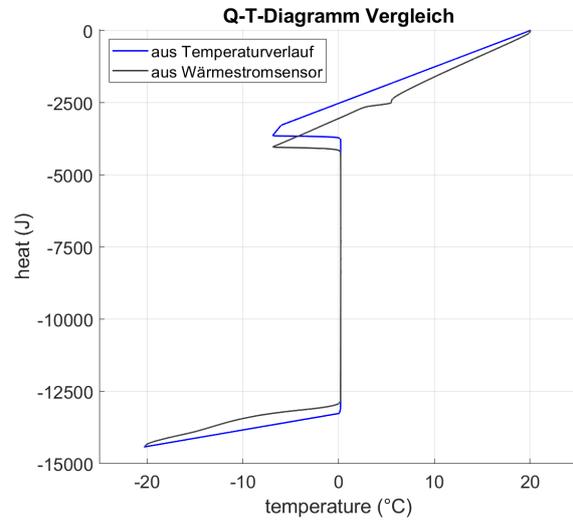


Abbildung 5.15: Vergleich Q-T Diagramm (Erstarungsbereich)

Dieses Vorgehen zur Berechnung der Energieverläufe wurde auch für den Schmelzbereich der Versuchsmessung angewendet. Nachfolgend sind die Vergleiche der beiden Energieverläufe sowie Q-T Diagramme ersichtlich (siehe Abbildung 5.16 und 5.17). Diese wurden nach nach dem gleichen Vorgehen wie für den Gefrierbereich erstellt.

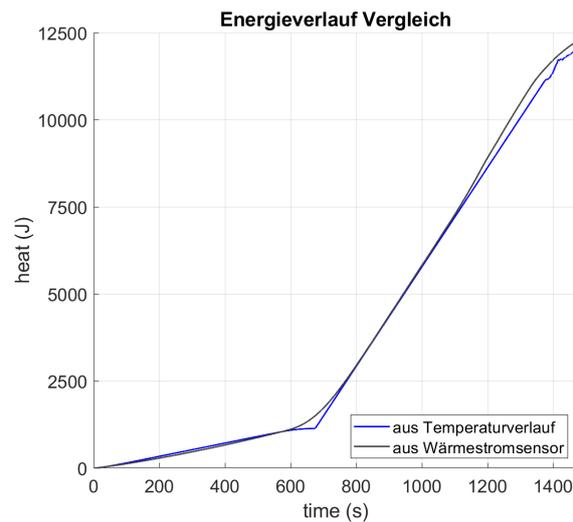


Abbildung 5.16: Vergleich Energieverlauf (Schmelzbereich)

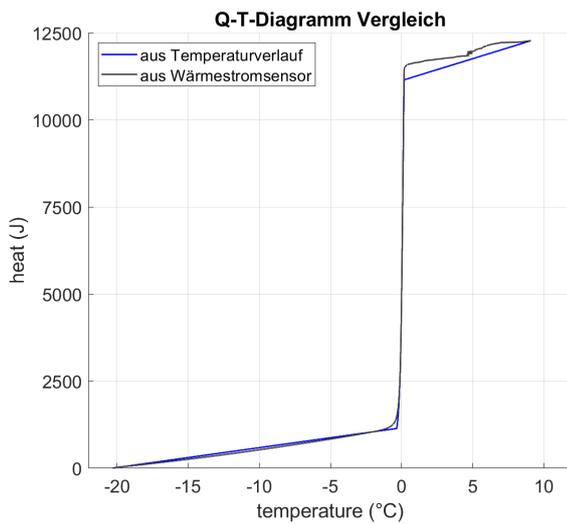


Abbildung 5.17: Vergleich Q-T Diagramm (Schmelzbereich)

Der Skalar, welcher gebildet wurde um den Energieverlauf anzupassen, beträgt in diesem Fall 1285. Dieser liegt nahe am Wert für die Auswertung des Erstarrungsbereiches.

5.1.4. Implementierung Wärmestromsensor

Aus dem Versuchskonzept wurde ersichtlich, dass die Position des Wärmestromsensors nicht optimal ist für die Benutzung der Apparatur. Es besteht die Gefahr beim Einsetzen der Probenflaschen, dass das Sensorkabel abknicken kann. Aus diesem Grund wird der Probenträger neu konstruiert. Im Vergleich zum vorherigen Probenträger besteht dieser nun aus zwei separaten Bauteilen: aus einem Grundkörper mit den Bohrungen für die Probenflaschen und aus einem Unterboden. Die Kabel der Wärmestromsensoren sowie des Temperatursensors im Probenträger können so von unten eingebaut werden. Die Kabel werden mit einem 3D gedruckten Bauteil geklemmt, welches als Zugentlastung dient.

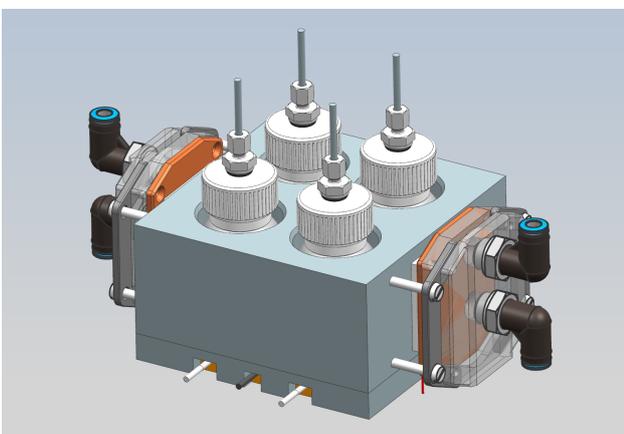


Abbildung 5.18: CAD Modell Zyklierapparat

In der Schnittansicht (siehe Abbildung 5.19) ist die Positionierung sowie die Kabelführung des Wärmestromsensors im Inneren des Probenträgers ersichtlich.

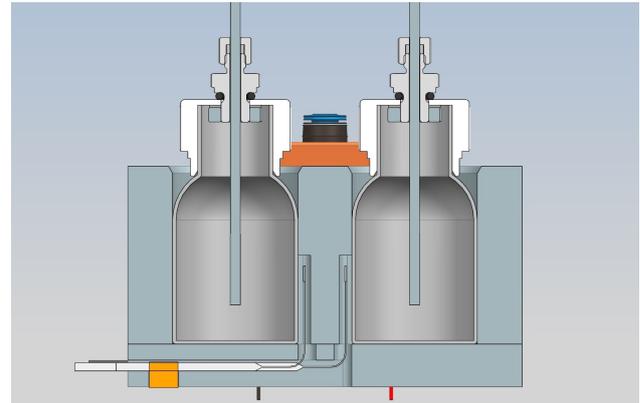


Abbildung 5.19: CAD Modell Zyklierapparat (Schnittansicht)

5.1.5. Grundlegende Anpassungen der Konstruktion

Bei den Wärmeübertragern, welche für die Wärmeabfuhr an den Peltierelementen zuständig sind, gilt es, die Lufteinschlüsse im Durchflussbereich zu eliminieren. Die Lufteinschlüsse verkleinern die nutzbare Wärmeübertragerfläche und minimieren so die übertragene Wärme. Mit Verwendung von neu konstruierten Befestigungsbauteilen kann nun der Wärmeübertrager 90° gedreht montiert werden (siehe Abbildung 5.18). Dadurch ist die Auslassöffnung des Wassers an höchster Stelle und die Luft kann zusammen mit dem Wasser entweichen.

Um die Reproduzierbarkeit der Sensorpositionierung in den Probenflaschen zu gewährleisten, wurde eine Klemmvorrichtung für die Temperatursensoren entwickelt. Diese Klemmvorrichtung basiert auf einem Bauteil der Firma Serto, welches eine Einschraubmöglichkeit und eine Klemmmöglichkeit für die Sensoren besitzt. Die Konstruktion besteht aus der Serto Thermofühlerverschraubung, einem O-Ring, einer U-Scheibe und einer Flachmutter. Wie in Abbildung 5.20 ersichtlich, werden die Komponenten in eine Bohrung im Deckel eingeschraubt und mit der Mutter geklemmt.

Mittels Anschließen eines Druckluftschlauches, konnte die Dichtheit geprüft und der maximale Druck ausfindig gemacht werden. Nach Erreichen von 2bar entweicht die Luft über das Gewinde des Deckels der Probenflasche.

Die Dichtigkeit der Probenflaschen ist wichtig, da verhindert werden soll, dass während der Zyklierung Luft und somit Feuchtigkeit in die PCM Proben kommen könnte. Diese zusätzliche Feuchtigkeit in der Probe, kann die Mischung der Probe ändern und die damit verbundenen Messresultate verfälschen.

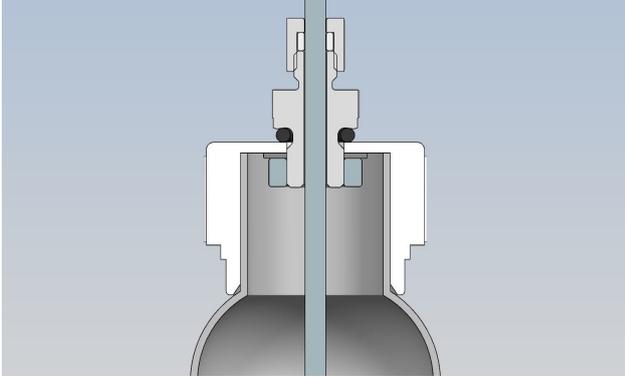


Abbildung 5.20: CAD Modell Klemmvorrichtung für Sensoren (Schnittansicht)

Beim neuen zweiteiligen Probenträger sind die Probenflaschen bis zum Beginn des Deckels im Probenträger versenkt. Der Probenträger selbst wird in Isolationsmaterial eingebettet. Da nur noch die Deckel der Probenflasche aus dem Probenträger schauen, können nun die Flächen des Probenträgers besser eingepackt werden. Dadurch können die Lufteinschlüsse, an denen sich Kondenswasser bildet, minimiert werden.

Genauere Angaben zum Aufbau und der Stückliste befinden sich in der Montagezeichnung im Anhang A.9. Ebenfalls im Anhang ist eine Kostenzusammenstellung zu finden, in welcher die in dieser Arbeit erworbenen Komponenten aufgelistet sind (siehe Anhang A.5).

5.1.6. Geschlossener Kühlkreislauf mit Wärmepumpe

Mit Hilfe eines geschlossenen Kühlkreislaufes, kombiniert mit einer Wärmepumpe, kann die Temperatur des Kühlwassers konstant gehalten werden. Zusätzlich kann mit einer noch tieferen Kühlwassertemperatur, die zu erreichende Zyklertemperatur noch weiter gesenkt werden.

Für die Auslegung der Wärmepumpe im Kühlkreislauf wurde die Temperaturänderung des Kühlwassers während einer kompletten Zyklierung aufgezeichnet (siehe Abbildung 5.21). Dabei wird angenommen, dass die Temperatur des Frischwassers konstant bei 15.8°C liegt. Dadurch konnte die notwendige Mindestleistung der Wärmepumpe mit Hilfe der Gleichung 5.3 ermittelt werden.

Das Kühlwasser erreicht eine Maximaltemperaturdifferenz von 8°C bei einem Volumenstrom von $0.4 \frac{\text{l}}{\text{min}}$, aus welcher eine Leistung von 224W resultiert. Somit eignet sich eine Wärmepumpe mit einer Leistung im Bereich von 300W , um das Kühlwasser mit einer konstanten Temperatur bereitzustellen.

$$\dot{Q} = \dot{V} \rho \Delta T \quad (5.3)$$

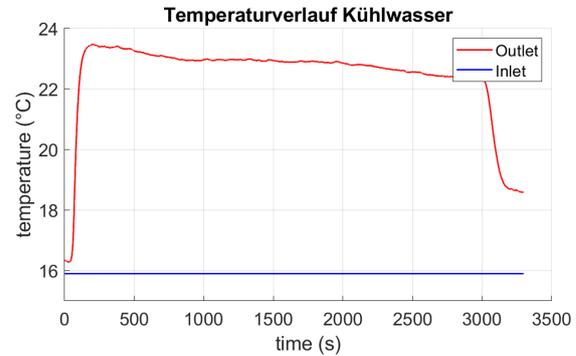


Abbildung 5.21: Temperaturverlauf Kühlwasser

5.2. Kalibrierung Zyklierapparatur

Bei den Messresultaten der Zyklierapparatur werden hohe Erwartungen an die absoluten Messwerte sowie der Wiederholgenauigkeit gestellt. Darum gilt es, eine sinnvolle Kalibrierung der Zyklierapparatur zu erarbeiten. Nachfolgend wird eine Möglichkeit zur Kalibrierung und deren Vorgehen erläutert.

Ziel ist es, die Messresultate der Wärmestromsensoren an den realen Wärmestrom anzupassen. Dabei werden mit mehreren bekannten PCM Messungen durchgeführt und wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, ein Skalar (Siehe Gleichung 5.2) für die Energieanpassung des Wärmestromsensors ausfindig gemacht. Sofern dieser Skalar für verschiedene PCM konstant ist, kann dieser als repräsentativ für zukünftige unbekannte PCM Messungen angewendet werden. Dabei ist zu beachten, dass eine konstante Kühl- und Heizrate der Peltierelemente verwendet wird. Die Rate ist in direkter Abhängigkeit zum Skalar der Energieanpassung. Grund dafür ist, dass der Skalar aus dem zeitlichen Integral der Messkurve des Wärmestromsensors gebildet wird. Dafür wird eine konstante Rate gewählt, welche für verschiedene PCM eine sinnvolle Messdurchlaufzeit ergibt.

6. Drop Kalorimeter

6.1. Konzept Drop Kalorimeter

Der bestehende Aufbau wird komplett durch ein neu erstelltes Konzept (siehe Abbildung 6.1) ersetzt. Vom Aufbau aus dem Vorprojekt werden gewisse Aspekte, wie das externe Abwägen der Probe und der Arbeitsflüssigkeit sowie der Magnetprüher im Gefäß übernommen. Der Magnetprüher wird benötigt um die Arbeitsflüssigkeit zu durchmischen. Dadurch kann eine homogene Temperatur gemessen werden.

Das Kalorimetergefäß selbst wird beim neu erarbeiteten Konzept durch ein Dewar Gefäß der Firma KGW Isotherm ersetzt. Das Dewar Gefäß eignet sich durch eine gute thermische Isolation für diese Anwendung. Das Gefäß besteht aus einem doppelwandigen (mit Vakuum) Glasbehälter mit einer Silberbeschichtung. Die Dewar Gefäße werden laut Herstellerangaben für den Transport von z.B. flüssigem Stickstoff verwendet. Das Gefäß hat eine maximale Füllkapazität von 600ml. Jedoch wird der Kalorimeter nur mit 500ml Arbeitsflüssigkeit befüllt. Dadurch kann verhindert werden, dass die Flüssigkeit beim Rühren überschwappt und ausläuft. Die Probenflaschen werden zu 3/4 mit PCM gefüllt, so wird garantiert, dass die Probe komplett in der Arbeitsflüssigkeit eingetaucht ist.

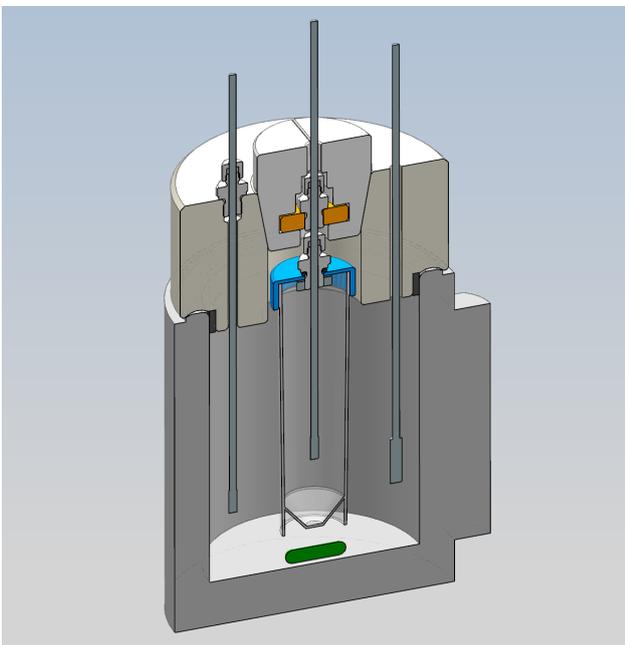


Abbildung 6.1: CAD Modell Drop Kalorimeter (Schnittansicht)

Der Gefäßsdeckel ist so konstruiert, dass an diesem ein Temperatursensor und eine Heizpatrone befestigt werden können. Zusätzlich ermöglicht eine Öffnung im Deckel, die PCM Probe mit dem Einhängemechanismus (siehe Abbildung 6.2) in den Kalorimeter einzuführen. Durch den entwickelten Einhängemechanismus kann die Probe mit wenigen Schritten und ohne Werkzeug, reproduzierbar in den Kalorimeter eingetaucht werden. Der Einhängemechanismus besteht aus zwei Halbschalen mit Positionierschrauben und Magneten. Diese Halbschalen klemmen eine Positionierscheibe, welche am Temperatursensor der Probenflasche befestigt ist. Die Positionierung der Temperatursensoren in den Probenflaschen basiert auf demselben Prinzip, wie die der Zyklierapparatur (siehe Kapitel 5.1.5)

Der Gefäßsdeckel sowie die beiden Halbschalen werden additiv mittels 3D Druck gefertigt. Dadurch kann mit der Füllstruktur im Innern des Bauteils die Wärmeleitung vermindert werden.

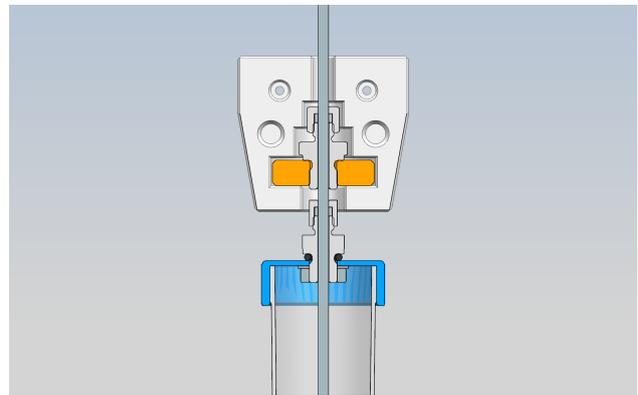


Abbildung 6.2: CAD Modell Einhängemechanismus (Schnittansicht)

Genauere Angaben zum Aufbau und der Stückliste befinden sich in der Montagezeichnung im Anhang A.10. Ebenfalls im Anhang ist eine Kostenzusammenstellung zu finden, in welcher die in dieser Arbeit erworbenen Komponenten aufgelistet sind (siehe Anhang A.6).

6.2. Inbetriebnahme Drop Kalorimeter

Alle Komponenten des Aufbaus wurden montiert (siehe Abbildung 6.3). Am Deckel des Dewar Gefäßes wurde eine 3mm dicke Schicht Armaflex aufgeklebt (siehe schwarzer Ring in Abbildung 6.1). Diese dient zum Klemmen des Deckels auf das aus Glas bestehende Gefäß. Der gesamte Aufbau wird auf eine IKA RCT Heizplatte mit Magnetprüher platziert. Die Heizfunktion der Platte wird nicht verwendet, die Möglichkeit einen Magnetprüher im Gefäß zu betreiben jedoch schon.



Abbildung 6.3: Aufbau Drop Kalorimeter

Die Magnete und Schrauben wurden in den Halbschalen des Einhängemechanismus verbaut. Am Sensor der Probe wurde die Haltescheibe befestigt (siehe Abbildung 6.4).

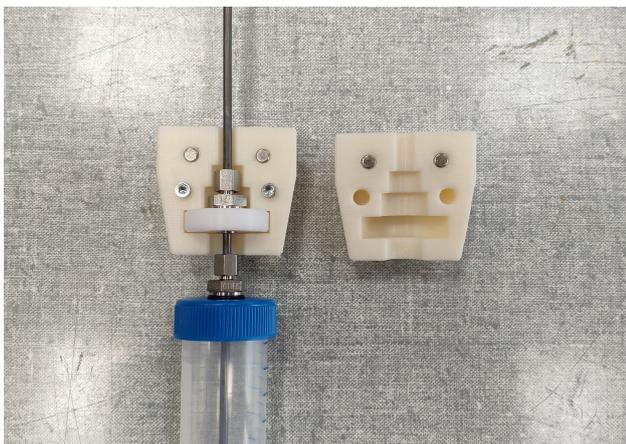


Abbildung 6.4: Aufbau Einhängemechanismus

Die Arbeitsflüssigkeit, welche in diesem Fall Wasser ist, wird separat in einem Wasserkocher auf die gewünschte Temperatur gebracht. Dabei wird eine um ca. 30°C höhere Temperatur gewählt, als die Phasenwechseltemperatur der PCM Probe.

6.3. Kalibrierung Drop Kalorimeter

Für eine korrekte Energiebilanzierung müssen die Eigenschaften sowie die Verluste des Aufbaus ausfindig gemacht werden. Nachfolgend wird auf ein mögliches Vorgehen zur Kalibrierung und der Verlustmessung des Drop Kalorimeters eingegangen.

6.3.1. Verlustmessung

Um die Verluste des Aufbaus zu bestimmen, kann eine Versuchsreihe an Messungen durchgeführt werden. Das Prinzip basiert auf der Abklingung der Temperaturkurve. Dabei wird die Arbeitsflüssigkeit auf eine höhere Temperatur als die Umgebungstemperatur gebracht. Die Temperatur der Umgebung sowie der Arbeitsflüssigkeit werden während einer gewissen Zeit im Drop Kalorimeter gemessen. Dabei nähert sich die Temperatur der Arbeitsflüssigkeit an die Umgebungstemperatur an [6]. Die Messzeit wird so gewählt, dass diese die Versuchsdauer einer PCM Messung darstellt.

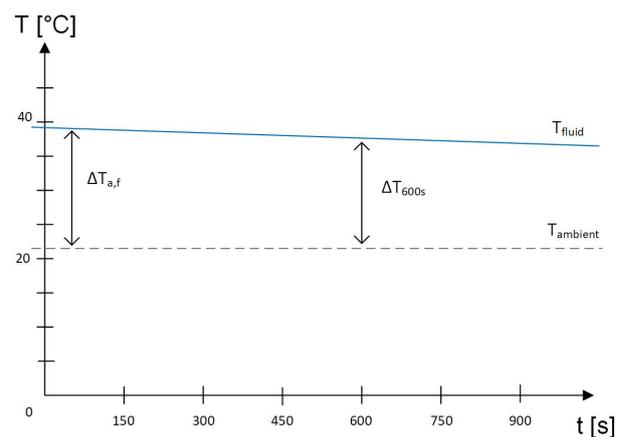


Abbildung 6.5: Temperaturverlauf Verlustmessung

Dadurch kann ein Temperaturverlust ΔT_{loss} bezogen auf die Umgebungs- und Arbeitsflüssigkeitstemperatur ausfindig gemacht werden (siehe Gleichung 6.1). Der Temperaturverlust wird für eine PCM Messung übliche Dauer bestimmt. Dieser Vorgang wird für viele verschiedene Temperaturen der Arbeitsflüssigkeit, welche im Spektrum der Temperaturen für die PCM Messungen liegen, gemacht. In einem Scatterplot werden diese Ergebnisse dargestellt (siehe Abbildung 6.6).

$$\Delta T_{loss} = \Delta T_{a,f} - \Delta T_{600s} \quad (6.1)$$

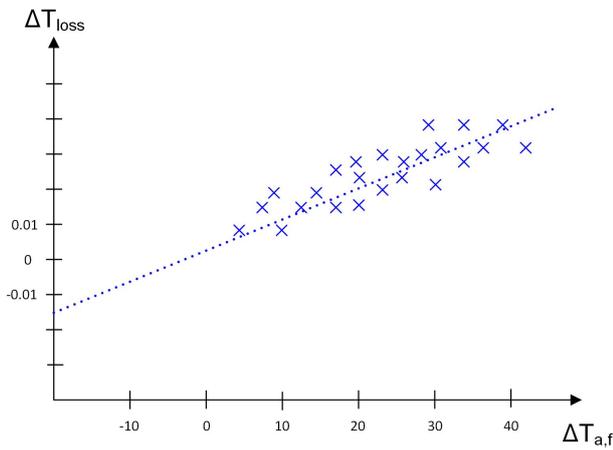


Abbildung 6.6: Regressionsanalyse Verlustmessung

Wendet man eine Regressionsanalyse an, kann man daraus eine lineare Funktion (siehe Gleichung 6.2) bilden, welche die Temperaturverluste in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz von Arbeitsflüssigkeit und Umgebung darstellt. Bestehend aus Steigung a und Verschiebung q .

$$f_{loss} = a \Delta T_{a,f} + q \quad (6.2)$$

Durch diese Funktion f_{loss} kann nun in der Energiebilanz des Drop Kalorimeters der Energieverlustterm Q_{loss} vernachlässigt werden. Im Gegenzug wird die Temperaturdifferenz der Arbeitsflüssigkeit mit der Funktion der Temperaturverluste erweitert. Daraus können folgende Gleichungen gebildet werden:

$$Q_{cal} + Q_{fluid} + Q_{bot} + Q_{PCM} = 0 \quad (6.3)$$

$$Q_{cal} = m_{cal} c_{p_{cal}} (\Delta T_{fluid} + f_{loss}) \quad (6.4)$$

$$Q_{fluid} = m_{fluid} c_{p_{fluid}} (\Delta T_{fluid} + f_{loss}) \quad (6.5)$$

$$Q_{bot} = m_{bot} c_{p_{bot}} (\Delta T_{fluid} + f_{loss}) \quad (6.6)$$

6.3.2. Cp Bestimmung

Die Bestimmung der thermodynamischen Eigenschaften des Aufbaus wird über experimentelle Versuche ermittelt. Mithilfe der Widerstandsheizung im Drop Kalorimeter kann eine bekannte und konstante Leistung in das System geführt werden. Dadurch kann die Energiebilanz nach der unbekanntem spezifischen Wärmekapazität des Drop Kalorimeters aufgelöst werden. Dabei müssen die Verluste, welche aus der Verlustmessung entstanden sind, berücksichtigt werden [6].

7. Diskussion

7.1. Abhandlung der Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung, welche in Kapitel 1.1 erwähnt wurde, konnte zu einem grossen Teil abgearbeitet werden. Die Zyklierapparatur sowie der Drop Kalorimeter konnten erfolgreich konzeptioniert und der Drop Kalorimeter montiert werden. Jedoch konnte aus Zeitgründen die Kalibrierungen der Einrichtungen nicht abgehandelt werden. Auch konnten die Einrichtungen nicht mit PCM in einem Real World Szenario getestet werden und die Resultate mit bestehenden Ergebnissen aus der PCM Datenbank verglichen werden.

7.2. Erreichen der Anforderungen

In diesem Kapitel wird auf das Erarbeiten der wichtigsten Anforderungen eingegangen, welche im Kapitel 2 erwähnt wurden.

7.2.1. Zyklierapparatur

Bei der Zyklierapparatur konnten alle Anforderungen im Bereich Thermodynamik und Mechanik abgearbeitet werden. Dabei konnte der neu konstruierte, zweiteilige Probenträger mit vier Wärmestromsensoren erweitert werden. Zusätzlich wurde die Halterung der Wärmeübertrager so angepasst, dass sich keine Luftschlüsse bilden können. Die Probenflasche wurden mit einem Klemmmechanismus für die Sensorpositionierung erweitert.

7.2.2. Drop Kalorimeter

Der Drop Kalorimeter erfüllt alle Anforderungen an die Thermodynamik und Konstruktion. Jedoch konnte aus Zeitgründen die intergrierte Heizung für die Arbeitsflüssigkeit nicht realisiert werden. Somit muss die Arbeitsflüssigkeit separat in einem Wasserkocher auf die entsprechende Temperatur gebracht werden. Zusätzlich können die Probenflaschen nur zu 3/4 mit PCM befüllt werden, da die Tiefe des Gefässes nicht ausreichend ist, um die Flasche komplett in der Arbeitsflüssigkeit zu versenken.

7.3. Vergleich der Simulation mit dem Versuchsaufbau

Im Vergleich mit der Simulation und den Messresultaten aus dem Versuchsaufbau ist ein unterschiedlicher Korrekturskalar verwendet worden. Ein möglicher Grund dafür ist, dass das Simulationsmodell nicht exakt den Versuchsaufbau wiedergibt, da diese Simulation auf einem vereinfachten Modellaufbau basiert. Zusätzlich ist der Korrekturskalar stark von der Heiz- beziehungsweise Kühlgeschwindigkeit abhängig, wie in Kapitel 5.2 erwähnt. In diesem Fall ist die Dauer der Simulation länger als die der Versuchsmessung. Somit wird der Korrekturskalar geringer mit kürzerer Versuchsdauer. Zusätzlich ist in der Simulation der Wärmestromabfall nach der Unterkühlung nicht so stark ausgeprägt wie in der Versuchsmessung. Das hat damit zu tun, dass in der Simulation das Phänomen der Unterkühlung nicht mathematisch einbezogen wird.

7.4. Untersuchung der Messauswertung des Versuchsaufbaus

Nachfolgend wird auf die Messauswertung des Versuchsaufbaus mit dem Wärmestromsensor eingegangen (Siehe Kapitel 5.1.3). Dabei werden die beiden Bereiche des Schmelzvorgangs und des Gefriervorgangs verglichen und untersucht. Ziel ist, dass der Energieverlauf der Wärmestrommessung gleich dem realen Energieverlauf des PCM ist. Dabei ist der reale Energieverlauf derjenige, welcher aus dem Temperaturverlauf des PCM berechnet wurde.

Tendenziell ist zu erkennen, dass die beiden Energieverläufe aus dem Schmelzbereich besser aufeinander folgen, als bei der Messauswertung des Gefrierbereichs (siehe Abbildung 5.14 und 5.16). Dazu kommt, dass der Energieverlauf der Wärmestrommessung beim Gefrierbereich niedriger ist, als der reale Verlauf. Ein Grund dafür könnte sein, dass beim Beginn der Kristallisation der abrupte Spannungsaussschlag des Wärmestromsensors durch die Trägheit der thermischen Masse des Aluminium Probenträgers beeinflusst wird. Zusätzlich besteht eine gewisse Schwierigkeit, die Unterkühlung in der Auswertung optimal einzubeziehen.

Daher kann man sich bei der Auswertung der Messresultate auf den Schmelzbereich fokussieren. So kann eine möglichst hohe Genauigkeit der Resultate und somit der Bestimmung der Schmelzenthalpie erreicht werden.

7.5. Alternativen zu einem Drop Kalorimeter

Aus einem gemeinsamen Brainstorming entstanden viele weitere Ideen und Möglichkeiten, um eine Kalorimetrie für PCM zu realisieren. Nachfolgend wird auf zwei dieser Möglichkeiten eingegangen.

7.5.1. Überströmter Körper

Der Probenkörper wird im festen Zustand mit einem Fluid (z.B. Wasser) in einem isolierten Kanal überströmt. Die Temperaturen eingangs und ausgangs der Strömung sowie des Probenkörpers werden während des gesamten Vorgangs aufgezeichnet. Die Energiebilanz mit dem Strömungsfluid und dem Probenkörper wird mit den bekannten und unbekanntem Werten aufgestellt. Daraus kann die Schmelzenthalpie berechnet werden. In Abbildung 7.1 ist der vereinfachte Aufbau dargestellt.

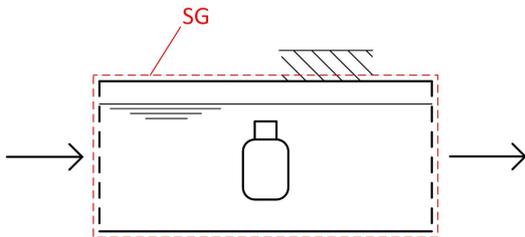


Abbildung 7.1: Überströmter Körper

Die Schwierigkeiten in diesem Aufbau liegen darin, dass bei der Auswertung nur geringe Temperaturänderungen zu messen sind und somit hohe Anforderungen an die Messeinrichtung bestehen. Zusätzlich müssen auch Strömungsphänomene in der Auswertung berücksichtigt werden.

7.5.2. Stufenweises Erwärmen

Der Grundgedanke hinter der Stufenweisen Erwärmung ist das Prinzip der DSC Analyse. Der Aufbau für die stufenweise Erwärmung besteht aus zwei baugleichen, getrennten und isolierten Wasserbädern, welche mit einer elektronischen Heizung ausgestattet sind. In eines der beiden Bäder wird der Probenkörper in festem Zustand hineingelegt. Die Bäder werden parallel mit derselben Geschwindigkeit und bekannter Leistung erwärmt. Bei beiden Vorgängen wird die Temperaturänderung des Wassers sowie des Probenkörpers gemessen. Mit Hilfe des leeren Wasserbades können so die Verluste der Einrichtung bestimmt werden. Aus der Energiebilanz kann nun die Schmelzenthalpie berechnet werden. In Abbildung 7.2 ist der vereinfachte Aufbau dargestellt.

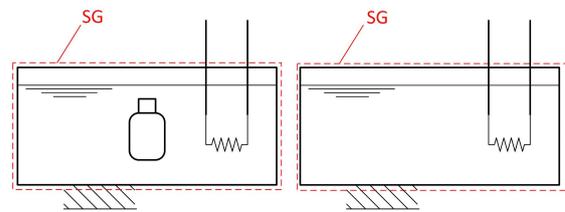


Abbildung 7.2: Stufenweises Erwärmen

Für den Aufbau gelten sehr hohe Anforderungen an eine optimale Regelung, aus denen wiederum hohe Kosten entstehen. Vorteile dabei liegen darin, dass eine Vielfalt an Probengrößen und Probenbehälter in der Einrichtung untersucht werden können.

8. Schlusswort

In diesem Kapitel wird auf die Erkenntnisse und Erfolge dieser Arbeit, in Form eines Fazits, eingegangen. Zusätzlich wird in einem Ausblick auf das weitere Vorgehen Stellung genommen.

8.1. Fazit

Bei der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe von Recherchen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen die Konzeptionierung zweier Laboreinrichtungen möglich. Dabei ergaben sich für mich viele neue Erkenntnisse im Bereich von PCM Unterkühlung sowie der Kalorimetrie.

Die Ergebnisse der Simulation zur Untersuchung der Positionierung des Wärmestromsensors gaben Auskunft über den Fluss des Wärmestroms. Es war interessant zu sehen, wo genau der Wärmestrom fließt und an welchen Positionen die grössten Wärmeströme vorhanden sind. Beim Versuchsaufbau mit dem Wärmestromsensor konnte man, durch den direkten Vergleich des Temperaturverlaufs mit dem Energieverlauf, die Charakteristik eines Phasenübergangs sowie die Unterkühlung erkennen. Für die Optimierungen der Apparatur war es sehr hilfreich, Rückmeldungen von Personen zu bekommen, welche die Apparatur aus der Vorarbeit bereits für Messungen verwendet hatten.

Während der Recherche bezüglich der Kalorimetrie war es sehr erstaunlich zu sehen, dass sich Forscher schon im späten 18. Jahrhundert an die Bestimmung von thermodynamischen Eigenschaften der Materialien gewagt haben. Dabei ist es faszinierend, eine Einrichtung nach einem alten Prinzip aufzubauen. Bei einem gemeinsamen Brainstorming wurden von den Teilnehmern viele interessante Ideen und neue Ansichten erarbeitet. Dadurch konnte der Aufbau so konzeptioniert werden, dass alle wichtigen Aspekte miteinbezogen werden. Für die Entwicklung des benutzerfreundlichen Einhängemechanismus war der 3D Drucker sehr hilfreich, um die verschiedenen Prototypen und Verbesserungen in kurzer Zeit austesten zu können.

Ich konnte in dieser Arbeit viel Neues dazulernen und wichtige Erfahrungen in der Entwicklung einer Laboreinrichtung mitnehmen. Dabei war es motivierend die Zyklrierapparatur aus meiner Vorarbeit zu erweitern und zu ergänzen und Rückmeldungen von Benutzern zu bekommen. Grundsätzlich ist es sehr positiv zu wissen, dass die Zyklrierapparatur und der Drop Kalorimeter von grossem Interesse am CCTES sind und man nicht etwas aufbaut, was später keine Verwendung findet.

Grundsätzlich konnte ich mich durch eine zweite Arbeit im Bereich PCM noch tiefer einarbeiten und viele zusätzliche Erfahrungen sammeln. Es war für mich sehr wichtig, einmal in der Woche nach Horw ins Labor zu gehen, um so eine Abwechslung zum Alltag zuhause zu erleben.

8.2. Ausblick

Für die Zyklrierapparatur steht in erster Linie der Zusammenbau mit der anschliessenden Inbetriebnahme sowie die Realisierung des geschlossenen Kühlkreislaufes mit der Wärmepumpe an. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme gilt es, eine für die Peltierelemente sinnvolle Kühl- sowie Heizgeschwindigkeit auszumachen, welche für jeden Messdurchlauf konstant sein soll. Zusätzlich soll durch Messungen verschiedener bekannter PCM, die Apparatur kalibriert und ein repräsentativer Skalar für die Energieanpassung ermittelt werden. Für die Auswertung der Messresultate soll ein geeignetes Matlab Programm erstellt werden.

Für den Drop Kalorimeter gilt es in erster Linie, den Aufbau mit der integrierten Widerstandsheizung zu erweitern. Danach können die Verluste mittels Verlustmessung ermittelt und aus diesen die temperaturabhängige Verlustfunktion gebildet werden. Nachdem die Energiebilanz mit den Verlusten erweitert wurde, soll nun die thermische Eigenschaft des Aufbaus bestimmt werden. Zum Schluss soll auch hier ein geeignetes Matlab Programm zur Auswertung der Messresultate erstellt werden.

9. Danksagung

Ohne das Mitwirken anderer Personen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. So möchte ich mich bei Ludger Fischer für seine zielführenden Feedbacks an den Meilensteinsitzungen und an der Zwischenpräsentation. Weiter bedanke ich mich bei Sebastian Ammann, Simon Maranda, Remo Waser, Benjamin Fenk und Adrian Müller. Sie gaben mir an den Meetings konstruktive Unterstützung und waren stets für Fragen erreichbar. Speziell möchte ich mich nochmals bei Sebastian Ammann für die großartige Hilfestellung bei den zahlreichen Versuchen und Arbeiten im Labor bedanken.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Einteilung von PCM [2]	1
3.1. Zyklierapparat im thermodynamischen Labor	3
3.2. Mettler Toledo Easy Max 102	3
3.3. Zyklierapparat aus Vorarbeit	3
3.4. Drop Kalorimeter aus Vorarbeit	4
4.1. Unterteilung PCM [1]	5
4.2. Q-T Diagramm eines PCM	5
4.3. Temperaturverlauf destilliertes Wasser	6
4.4. Schematischer Aufbau eines Drop Kalorimeters	7
4.5. Thermoeffekt im Halbleiter [7]	7
4.6. Datenausgabe DSC [9]	8
5.1. Simulationsmodell mit Dummy-Sensoren	9
5.2. Q-t Diagramm der Sensoren	9
5.3. Q-t Diagramm des PCM	9
5.4. Q-t Diagramm PCM und Sensor 'Mitte'	10
5.5. Einbaulehre	10
5.6. Einbaulehre in Probenträger	10
5.7. Temperatur- und Spannungsverlauf	11
5.8. Benennung und Position der Sensoren	11
5.9. Temperatur- und Spannungsverlauf (vergrößert)	11
5.10. Energieverlauf aus Temperaturverlauf (Erstarrungsbereich)	12
5.11. Q-T Diagramm aus Temperaturverlauf (Erstarrungsbereich)	12
5.12. Energieverlauf aus Sensor (Erstarrungsbereich)	12
5.13. Q-T Diagramm aus Sensor (Erstarrungsbereich)	13
5.14. Vergleich Energieverlauf (Erstarrungsbereich)	13
5.15. Vergleich Q-T Diagramm (Erstarrungsbereich)	13
5.16. Vergleich Energieverlauf (Schmelzbereich)	13
5.17. Vergleich Q-T Diagramm (Schmelzbereich)	14
5.18. CAD Modell Zyklierapparat	14
5.19. CAD Modell Zyklierapparat (Schnittansicht)	14
5.20. CAD Modell Klemmvorrichtung für Sensoren (Schnittansicht)	15
5.21. Temperaturverlauf Kühlwasser	15
6.1. CAD Modell Drop Kalorimeter (Schnittansicht)	16
6.2. CAD Modell Einhängemechanismus (Schnittansicht)	16
6.3. Aufbau Drop Kalorimeter	17
6.4. Aufbau Einhängemechanismus	17
6.5. Temperaturverlauf Verlustmessung	17
6.6. Regressionsanalyse Verlustmessung	18
7.1. Überströmter Körper	20
7.2. Stufenweises Erwärmen	20

Literatur

- [1] FISCHER, Ludger J. ; SPRINGER LINK (Hrsg.): *Phasenwechselmaterialien (PCM) für Latent-Wärmespeicher, VDI-Wärmeatlas pp 1-20, Springer Link*. VDI-Wärmeatlas pp 1-20. 2018
- [2] DR. ANASTASIA STAMATIOU, PROF. DR. JOERG WORLITSCHKEK: *Vorlesung TA.BA STORAGE.HS21, Thema: "Thermal Energy Storage,"*, Institut fuer Maschinen- und Energietechnik der Hochschule Luzern (HSLU). Luzern, 2021
- [3] TIM ZGRAGGEN: *Konzeption einer Zyklrierapparat für Speichermaterialien: Industriearbeit 5.Semester*. 2020
- [4] DR. MATTHIAS BERGER: *Vorlesung TA.BA EFPENG.FS20, Thema: "Energiespeicher",* Institut fuer Maschinen- und Energietechnik der Hochschule Luzern (HSLU). Luzern, 2020
- [5] VOLKMAR KOSE UND SIEGFRIED WAGNER: *Praktische Physik Band 1: Kohlrausch*. Stuttgart : B. G. Teubner Verlag, 1996
- [6] CHARLES JOSHUA: *Performance and Stability of CaCl₂ · 6H₂O-Based Phase Change Materials: Theses and Dissertations 4343*. <https://preserve.lehigh.edu/etd/4343>. Version: 2019
- [7] HANS KAMMER, MANUEL KUGLER, IRMA MGELADZE: *Waermestromsensoren: Neue Messmoeglichkeiten fuer den Physikunterricht*
- [8] HOCHSCHULE-LUZERN: *Differenzkalorimetrie (DSC)*. <https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/technik/thermische-energiesysteme-und-verfahrenstechnik/mess-und-analysetechnik/cctevt-differenzkalorimetrie/>. Version: 02.06.2021
- [9] THOMAS, Shelly J. Leonard C. und Schmidt S. Leonard C. und Schmidt: *Thermal Analysis*. Version: 2017. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_30. In: NIELSEN, Suzanne S. (Hrsg.): *Food Analysis*. Cham : Springer International Publishing, 2017 (Food Science Text Series). – DOI 10.1007/978-3-319-45776-5_30. – ISBN 978-3-319-45774-1, S. 529-544

A. Anhang

A.1. Aufgabenstellung

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur

Abteilung Maschinentechnik

Bachelor-Thesis im Themengebiet Thermische Energiespeicher

Aufgabe für Herr Tim Zraggen

1. Arbeitstitel

PCM Drop Kalorimeter und Zyklierapparat

2. Fachliche Schwerpunkte

Phase Change Material, Wärmeübertragung, Messtechnik, Thermische Analyse, Simulation

3. Einleitung

Das Kompetenzzentrum Thermische Energiespeicher (CC TES) entwickelt Speicherlösungen basierend auf sog. Phasenwechselmaterialien (PCM). PCM sind Speichermaterialien, welche durch Ausnutzung des Phasenüberganges von fest auf flüssig viel Energie auf kleinem Temperaturniveau zu speichern vermögen. PCM haben verschiedene Einsatzmöglichkeiten: Sie werden zum Beispiel als thermische Speicher in Gebäuden oder zur Erhaltung der Temperaturstabilität von Transportgütern eingesetzt. Einige der am CC TES entwickelten PCM basieren auf Salz/Wasser Mischungen im Einsatzbereich zwischen -50°C und $+80^{\circ}\text{C}$.

Es ist von zentralem Interesse den Phasenübergang fest/flüssig von diversen PCM messen und genau charakterisieren zu können. Innerhalb dieser Arbeit geht es darum, zwei geeignete Setups zur Vermessung von PCM zu nutzen.

Setup 1: Zykliersetup

In einem Vorprojekt wurde ein Setup gebaut, mit welchem sich PCM Proben (ca. 30-50 g) im Temperaturbereich von -50°C bis $+50^{\circ}\text{C}$ zyklieren lassen. Im Rahmen dieser Arbeit soll dieses Setup in Betrieb genommen, durch Messeinrichtungen erweitert sowie charakterisiert werden. Anschliessend werden damit Messungen verschiedener PCM durchgeführt.

Setup 2: Drop Kalorimeter

Ebenfalls in einem Vorprojekt wurde eine erste Version eines Drop Kalorimeters hergestellt, welcher genau die Energie im Phasenwechsel messen kann (Phasenwechselenthalpie). Damit sind Proben in der Grössenordnung $\sim 50\text{g}$ messbar. Ziel dieser Arbeit ist es, dieses Setup ebenfalls zu erweitern und zu charakterisieren. Dazu gehören Planung, Aufbau sowie die Analyse von verschiedenen Versuchen.

4. Aufgabenstellung

In dieser Bachelor-Thesis sollen folgende Punkte erarbeitet werden:

a. Zykliersetup mit «heatflux» Sensor erweitern

Zur Erweiterung des Zykliersetup welches aus der PAIND von Tim Zraggen entstanden ist, soll die Einbringung eines «heatflux» Sensor der Firma greenTEG abgeklärt werden. Hierzu sind in einem ersten Schritt thermische Simulationen in COMSOL durchzuführen, um die Eignung eines solchen Sensor zu überprüfen. Falls ein Sensor als geeignet herausgestellt, ist das Zykliersetup für den Einbau anzupassen.

b. Inbetriebnahme und Kalibrierung des Zykliersetup

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, muss das Zykliersetup kalibriert werden. Weiter müssen kleinere Optimierungen durchgeführt werden, um eine bessere Performance zu erhalten.

c. Durchführung von Zyklierexperimenten

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme, sind Zyklierexperimente mit diversen PCM durchzuführen.

d. Auswertung und Analyse der Experimente

Die Experimente sind mit einer geeigneten Auswertung zu Analysieren. Hierzu kommen diverse Software (Matlab, Python) in Frage. Die Experimente sind allenfalls mit anderen Messungen (EasyMax, Dopkalorimeter etc.) zu vergleichen.

e. Einarbeitung in die Thematik Dropkalorimeter

Durch eine Literaturrecherche abreiten Sie sich in die Thematik des Dropkalorimeter ein. Zusätzlich sind kommerzielle Dropkalorimeter für eine allfälligen Kauf zu evaluieren.

f. Auslegung, Anpassung, Erweiterung Dopkalorimeter

Die Erkenntnisse aus der Einarbeitung fliessen direkt in die Anpassung/Erweiterung oder neu Auslegung eines Dropkalorimeter ein.

g. Durchführung Experimente Dropkalorimeter

Der angepassten Dropkalorimeter ist in Betrieb zu nehmen und es sind Experimente durchzuführen.

h. Auswertung und Analyse der Experimente

Die Experimente sind mit einer geeigneten Auswertung zu Analysieren. Hierzu kommen diverse Software (Matlab, Python) in Frage. Die Experimente sind allenfalls mit anderen Messungen (EasyMax, DSC etc.) zu vergleichen.

4. Durchführung der Arbeit**Termine**

Start der Arbeit:	Montag, 22.02.2021
Zwischenpräsentation:	Dienstag, 13.04.2021 (Vormittag)
Abgabe Schlussbericht:	Freitag, 11.06.2021
Schlusspräsentation:	Dienstag, 29.06.2021 (am Nachmittag)
Abgabe Text BDA-Broschüre:	noch nicht definiert (Details zu Layout, Text-Umfang, Bilder und Grafiken folgen später)
Abgabe Poster:	noch nicht definiert (Details zu Layout, Ablageort usw. folgen)
Öffentliche Diplomausstellung:	Termin noch nicht definiert

Der Schlussbericht muss als PDF auf Ilias ([BAT-CCTES](#)) hochgeladen werden. Die termingerechte Abgabe wird mit dem Upload Datum auf Ilias bestätigt. (Dateiname:

Vorname Nachname BAT-M JJMMDD.pdf)

Die [Selbstständigkeits- und Redlichkeitserklärung](#) muss zwingend zusammen mit der Thesis abgegeben werden. (Dateibeschriftung: Vorname Nachname REDEK JJMMDD.pdf)

Organisatorisches

Ihr Arbeitsplatz während der Diplomarbeit ist soweit es die Covid Schutzmassnahmen erlauben grundsätzlich an der HSLU T&A. Es sind die notwendigen Schutzvorgaben für Laborsicherheit und Covid-Regelungen strikte zu befolgen. Es ist eine enge Zusammenarbeit mit dem Betreuersteam und dem Industriepartner anzustreben. Bitte organisieren Sie die Termine mit den zuständigen Personen in Absprache mit dem Betreuersteam.

6. Dokumentation

Die Dokumentation ist in Form eines technisch-wissenschaftlichen Berichts mit einem Umfang in der Grössenordnung von 30 Seiten Berichtteil und 15 Seiten Anhang zu erstellen. Er ist gemäss den „Regeln“ für technisch-wissenschaftliche Berichte zu erstellen und enthält einen englischen Abstract mit maximal 2'000 Zeichen sowie folgende Selbständigkeitserklärung auf der Rückseite des Titelblattes:

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textauschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.
Horw, Datum, eigenhändige Unterschrift“

Der Schlussbericht muss gemäss Studienreglement im Sekretariat Bachelor- & Masterausbildung in dreifacher Ausführung abgegeben werden. Vertrauliche Arbeiten sind in einem verschlossenen Kuvert abzugeben. Die termingerechte Abgabe wird mit einem Stempel bestätigt. Zusätzlich muss dem verantwortlichen Dozenten an der Schlusspräsentation in digitaler Form der Bericht inkl. Anhang, den Präsentationen, Messdaten, Programmen, Auswertungen usw. abgeben werden.

Parallel zur Abgabe einer Papierversion ist die Bachelor-Thesis mit all seinen Anhängen in einer digitalen Version durch die Studierenden in Ilias spätestens am Abgabetag im entsprechenden Ordner abzulegen.

Für die öffentliche Diplomausstellung ist ein Poster gemäss Vorgaben zu erstellen.

7. Fachliteratur/Web-Links/Hilfsmittel

Eine weiterführende spezifische Literaturrecherche ist Bestandteil Ihrer Arbeit.

Zusätzliche Bemerkungen

Besprechen Sie in regelmässigen Zeitabständen Ihren Fortschritt bei der Projektbearbeitung und Dokumentation mit Ihrem Betreuungsteam.

9. Industrie-/Wirtschaftspartner (Kontaktpersonen)

Cowa Thermal Solutions AG / Skycell AG

10. Verantwortlicher Dozent / verantwortliche Dozentin, Betreuungsteam

Prof. Dr. Ludger Fischer, Simon Maranda, Sebastian Ammann

11. Experte/Expertin

Kai Lieball

12. Bewertungsraster für Bachelor-Thesis

	Vorgängige Punk- tezuordnung	Erreichte Punkte
1. Prozess (30 Punkte)		
- Erfassen der Problemstellung, Abgrenzung, Zielsetzung	6	
- Planung, Organisation, Systematik	6	
- Erwerb von neuem Wissen	6	
- Selbstständigkeit, Einsatz, Problemlösung, Motivation	6	
- Kommunikation und Teamarbeit	6	
2. Bericht und Inhalt (50 Punkte)		
2.1 Bericht		
- Lösungswege überzeugend und nachvollziehbar	10	
- Validierung und Diskussion der Lösungen	10	
- Berichtstruktur (Layout, Sprache und Vollständigkeit)	10	
2.2 Inhalt		
- Zielerreichung, Erfüllungsgrad (absolut 50% / dokumentiert 50%)	10	
- Innovation, Kreativität der erarbeiteten Lösungen	10	
3. Präsentation (20 Punkte)		
- Projektzwischenpräsentation	5	
- Gehalt Schlusspräsentation	5	
- Schlusspräsentation: Präsentationstechnik, Stimulanz, Sprache, Auftreten	5	
- Mündliche Befragung	5	
Erreichte Punktzahl		
Bewertung (F < 60, E = 60...67, D = 68...75, C = 76...83, B = 84...91, A = 92 ... 100)		

Horw, 22.02.2021
Prof. Dr. Ludger Fischer



Unterschrift Ludger Fischer



Unterschrift Tim Zraggen

A.2. Projektplan

Projektname
 Verantwortlicher Dozent
 Betreuungsteam

Startdatum
 Zwischenpräsentation
 Abgabe Dokumentation
 Abschlusspräsentation

Montag, 22. Februar 2021
 Dienstag, 13. April 2021
 Freitag, 11. Juni 2021
 Dienstag, 29. Juni 2021

Letzte Semester-
 Woche

Aufgaben	Status	SW 1	SW 2	SW 3	SW 4	SW 5	SW 6	SW 7	SW 8	SW 9	SW 10	SW 11	SW 12	SW 13	SW 14	SW 15	SW 16	SW 17	SW 18	SW 19	
Vorarbeiten		22.2	1.3	8.3	15.3	22.3	29.3	5.4	12.4	19.4	26.4	3.5	10.5	17.5	24.5	31.5	7.6	14.6	21.6	28.6	
Kick-off-Meeting Info	Abgeschlossen																				
Kick-off-Meeting Planung / Inhalt	Abgeschlossen																				
Einarbeitung / Recherche																					
Heat-Flux-Sensor	Abgeschlossen																				
Drop Kalorimeter	Abgeschlossen																				
Kalibrierung	Abgeschlossen																				
DSC	Abgeschlossen																				
Zyklierapparat																					
Simulation (Sensorik)	Abgeschlossen																				
Versuchsaufbau (Sensorik)	Abgeschlossen																				
Konzeptionierung	Abgeschlossen																				
Inbetriebnahme / Kalibrierung	Nicht begonnen																				
Zyklieren von PCM	Nicht begonnen																				
Auswertung und Analyse der Messung	Nicht begonnen																				
Drop Kalorimeter																					
Brain Storming	Abgeschlossen																				
Auslegung	Abgeschlossen																				
Konzeptionierung	Abgeschlossen																				
Inbetriebnahme	Abgeschlossen																				
Kalibrierung	Nicht begonnen																				
Experimente mit PCM	Nicht begonnen																				
Auswertung und Analyse der Messung	Nicht begonnen																				
Dokumentation																					
Layout erstellen	Abgeschlossen																				
Inhaltsverzeichnis	Abgeschlossen																				
Anforderungsliste	Abgeschlossen																				
Einleitung	Abgeschlossen																				
Methodik	Abgeschlossen																				
Resultate	Abgeschlossen																				
Diskussion	Abgeschlossen																				
Schlusswort	Abgeschlossen																				
Druck	Abgeschlossen																				
Abgabe	Abgeschlossen																				
Präsentation																					
Zwischenpräsentation	Abgeschlossen																				
Poster erstellen																					
Abschlusspräsentation																					



A.3. Anforderungsliste Zyklierapparat

Anforderungsliste: Zyklierapparat

ID	Name	Beschreibung	Kategorie	Priorität
Konstruktion				
1	PCM Proben	Die Zyklierapparat soll mit mehreren Proben der Größe 20-40ml bestückt werden können	Konstruktion	muss
2	PCM Proben	Die Zyklierapparat soll mehrere Proben (min. 4 Stk.) gleichzeitig zyklieren können	Konstruktion	muss
3	Isolation	Die temperierten Bauteile sollen isoliert werden um die Wärmeverluste zu minimieren	Konstruktion	muss
4	Modularität	Die Zyklierapparat soll modular aufgebaut sein, um die Anzahl der Zyklierproben einfach zu erweitern	Konstruktion	soll
5	Dimensionierung	Die Zyklierapparat soll die max. Dimensionen von 500x500x250mm haben	Konstruktion	kann
6	Gewicht	Die Zyklierapparat soll ein Gewicht von max. 50kg haben	Konstruktion	kann
Thermodynamik				
7	Peltier	Die Wärme Ab- und Zufuhr der Zyklierapparat soll mit einem Peltierelement realisiert werde	Thermodynamik	muss
8	Zyklertemperaturen	Die Zyklierapparat soll Zyklierungen zwischen -50°C und +60°C ermöglichen	Thermodynamik	muss
Energieversorgung				
9	Inbetriebnahme	Die Zyklierapparat soll bei Verwendung, einfach aufgebaut, in betriebgenommen und mit 230V Strom versorgt werden	Energieversorgung	soll
Steuerung/Regelung				
10	Zyklierung	Die Zyklierapparat soll eine eigenständige Zyklierung der PCM Proben ermöglichen	Steuerung/Regelung	muss
11	Durchgänge	Die Zyklierapparat soll die angegebenen Anzahlen von Zyklierungen ausführen	Steuerung/Regelung	muss
12	Not-Aus	Die Zyklierapparat soll in einem Notfall per Not-Aus sicher abgeschaltet werden	Steuerung/Regelung	muss
13	Zyklertemperatur	Die Ziel Temperaturen sollen mit einer Toleranz von $\pm 1^\circ\text{K}$ erreicht werden	Steuerung/Regelung	muss
14	Temperaturprofil	Die Zyklierung soll per Sollprofilvorgabe für die Temperatur gestartet werden	Steuerung/Regelung	muss
15	Lautstärke	Die Zyklierapparat soll während der Zyklierung eine maximale Lautstärke von 75 dB haben. Nach EN ISO 3746	Steuerung/Regelung	muss
Datenausgabe				
16	Langzeitanalyse	Der Zyklierprozess soll nach jedem Durchgang in einem T(PCM)-t-Diagramm abgelegt werden	Datenausgabe	muss
18	Wärmemenge	Der Zyklierprozess soll nach jedem Durchgang die zugeführte Wärmemenge in einem Q-T-Diagramm ablegen	Datenausgabe	muss
19	Schmelzenthalpie Bestimmung	Die Zyklierapparat soll die Schmelzenthalpie des PCM bestimmen können	Datenausgabe	muss

A.4. Anforderungsliste Drop Kalorimeter

Anforderungsliste: Drop Kalorimeter

ID	Name	Beschreibung	Kategorie	Priorität
Konstruktion				
1	PCM Proben	Der Drop Kalorimeter soll mit einer Probe der Größe ca. 50ml bestückt werden können	Konstruktion	muss
3	Isolation	Der Aufbau soll isoliert werden um die Wärmeverluste gering zu halten	Konstruktion	muss
4	Einwurf	Die Probe soll wiederholgenau und ohne Verwendung von Werkzeug in den Kalorimeter eingeführt werden können	Konstruktion	muss
5	Dimensionierung	Der Drop Kalorimeter soll die max. Dimensionen von 500x500x250mm haben	Konstruktion	kann
6	Gewicht	Der Dropkalorimeter soll ein Gewicht von max. 50kg haben	Konstruktion	kann
Thermodynamik				
7	Gewicht Kalorimetrieflüssigkeit	Das Gewicht der Kalorimetrieflüssigkeit, soll in der Apparatur mit einer Genauigkeit von $\pm 1g$ ausgemessen werden können	Thermodynamik	muss
8	Gewicht Probe	Das Gewicht der Probe, soll extern mit einer Genauigkeit von $\pm 0.1g$ ausgemessen werden können	Thermodynamik	muss
9	Temperatur	Die Kalorimetrieflüssigkeit soll in der Apparatur auf Solltemperatur gebracht werden können	Thermodynamik	soll
10	Temperatur	Die Probe soll in der Apparatur auf Solltemperatur gebracht werden können	Thermodynamik	kann
Steuerung/Regelung				
11	Temperatur	Die Temperatur der Probe sollen mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ K$ während der durchführung gemessen werden können	Steuerung/Regelung	muss
12	Temperatur	Die Temperatur der Kalorimetrieflüssigkeit sollen mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ K$ während der durchführung gemessen werden können	Steuerung/Regelung	muss
Bedienung				
13	Einwurf	Die Probe soll manuel nach Erreichen der homogenen Temperatur in die Kalorimetrieflüssigkeit eingeworfen werden können.	Bedienung	soll
Energieversorgung				
14	Inbetriebnahme	Der Drop Kalorimeter soll bei Verwendung, einfach aufgebaut, in betriebgenommen und mit 230V Strom versorgt werden	Energieversorgung	soll
Datenausgabe				
15	Schmelzenthalpie Bestimmung	Der Drop Kalorimeter soll die Schmelzenthalpie des PCM bestimmen können	Datenausgabe	muss

A.5. Kostenzusammenstellung Zyklrierapparatur

Kostenzusammenstellung Zyklrierapparatur

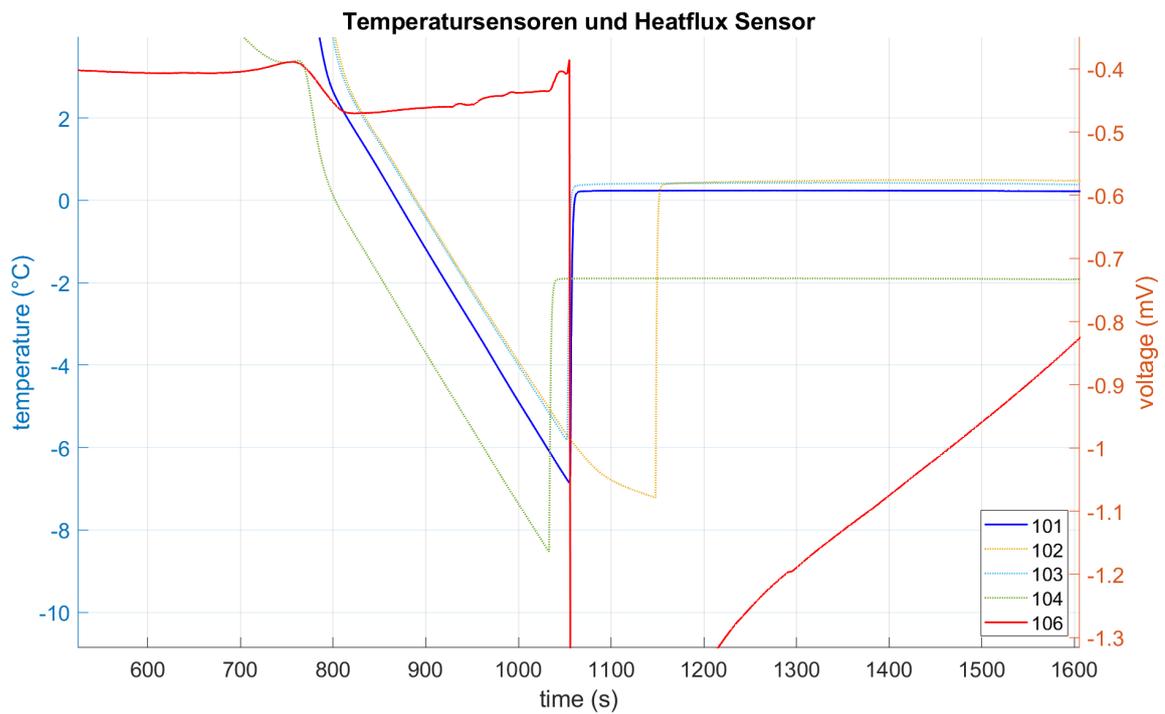
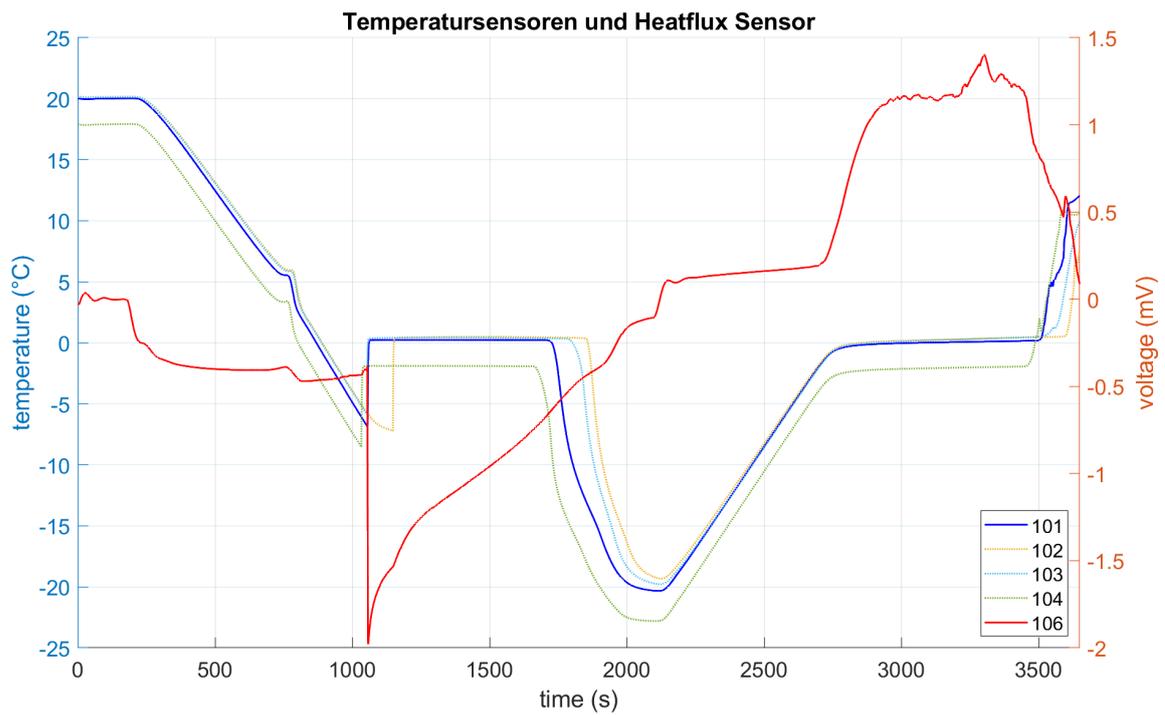
Benennung	Lieferant	Anzahl	Preis
Heat Flux Sensor gSKIN [®] - XM	GreenTeg	1	316.65
Kabelfühler Ø3mm x 10mm	Sensorshop24	4	103.4
Thermofühlerverschraubung SO 51194-3-M8x1	Serto	10	90.8
Sechskantmuttern M8x1	Bossard	10	8.5
Total			519.35

A.6. Kostenzusammenstellung Drop Kalorimeter

Kostenzusammenstellung Drop Kalorimeter

Benennung	Lieferant	Anzahl	Preis
Dewar Gefäß	KGW Isotherm	1	647.85
Thermofühlerverschraubung SO 51194-3-M8x1	Serto	15	136.1
Sechskantmuttern M8x1	Bossard	15	10
Total			793.95

A.7. Messresultate Versuchsaufbau mit Wärmestromsensor



A.8. Datenblatt Wärmestromsensor

gSKIN® Heat Flux Sensors for R&D

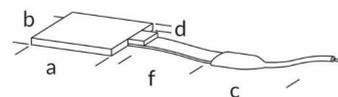
- Ultra-high resolution of thermal energies and temperature differences
- Low invasiveness & thickness
- Versions with connectors compatible with all gSKIN® DLOG data loggers
- All sensors with conductive heat flux calibration cohering to ISO 8301



Product Name	gSKIN®		gSKIN®		gSKIN®		gSKIN®	gSKIN®
	XM 26 9C	XM 27 9C	XP 26 9C	XP 27 9C	XI 26 9C	XI 27 9C	XO 67 7C	XO-66 7C -Temp
Article Number	A-044336	A-044339	A-044573	A-044577	A-044628	A-044630	A-044717	A-044728
Detector Type	Thermoelectric		Thermoelectric		Thermoelectric		Thermoelectric	Thermoelectric / NTC
Surface Material (Sensing Area)	Anodized Aluminum		Anodized Aluminum		Anodized Aluminum		Polyamide	Polyamide
Sensing Dimensions (a x b x d) [mm x mm x mm]	4.4 x 4.4 x 0.5		10.0 x 10.0 x 0.5		18.0 x 18.0 x 0.5		30.0 x 30.0 x 3.3	30.0 x 30.0 x 3.3
Heat Flux Range Min / Max [kW/m²]	-150 / 150		-150 / 150		-150 / 150		-15 / 15	-15 / 15
Noise Equivalent Heat Flux² [W/m²] / absolute [µW]	0.34 / 6.6		0.05 / 5.0		0.02 / 4.6		0.07 / 64.3	0.07 / 64.3
Heat Flux Resolution [W/m²] / absolute [µW] with gSKIN® DLOG³	0.41 / 7.9		0.06 / 6.1		0.02 / 5.7		0.09 / 78.4	0.09 / 78.4
Min./Avg.⁴ Sensitivity (S) [µV/(W/m²)]	1.5 / 4.0		10.0 / 20.0		35.0 / 65.0		7.0 / 13.0	7.0 / 13.0
Temperature Dependence⁵ of S [%/°C]	0.25		0.25		0.25		0.25	0.25
Response Time⁶ (0-95%) [s]	0.7		0.7		0.7		n/a	n/a
Electrical Resistance [Ohm]	<20		<150		<400		<150	<150
Thermal Conductivity [W/(m²K)]	-1.1		-1.2		-1.3		-0.4	-0.4
Max. Compressive Force when clamped [kgf]	< 2		<10		<32		>32 (not specified)	>32 (not specified)
Operating Temperature Range Min/Max [°C]	-50 / 150		-50 / 150		-50 / 150		-50 / 80	-50 / 80
Calibration Temperature Range Min/Max [°C]	-30 / 70		-30 / 70		-30 / 70		-30 / 70	-30 / 70
Calibration Accuracy [±%]	3		3		3		3	3
Homogeneity⁷ [±%]	1		1		1		1	1
Linearity with Power [±%]	1		1		1		1	1
Accuracy Temperature Measurement [°C]	n/a		n/a		n/a		n/a	+/- 0.2 (0-30 °C), +/- 0.4 (-20-60 °C)
Resolution Temperature Measurement [°C]	n/a		n/a		n/a		n/a	n/a
Flexprint Length (f) [cm]	5		5		5		n/a	n/a
Cable Length (c) [cm] (Connector, no/yes)	100 (no) 	100 (yes) 	100 (no) 	100 (yes) 	100 (no) 	100 (yes) 	100 (yes) 	100 (no)

² Experimentally evaluated values under optimal steady state conditions.
 ³ Guaranteed minimum heat flux resolution using the gSKIN® DLOG-4219 (not applicable for XO-Temp)
 ⁴ Only a reference point.
 ⁵ The sensitivity increases (decreases) as the temperature goes above (below) 22.5 °C.
 ⁶ Refers to the heat flux measurement.
 ⁷ Conductive heat flux calibration cohering to the ISO8301 standard with mean temperature of 22.5 °C.
 ⁸ Position dependent signal change across sensing area.

Datasheet V4.1, © Copyright greenTEG AG, 2018 All Rights Reserved



greenTEG AG

Hofwisenstr. 50A
8153 Rümlang, Switzerland

T: +41 44 515 09 15

info@greenTEG.com
greenTEG.com

A.9. Montagezeichnung Zyklierapparatur

18	1	Z0101ET-00	Probenträger	Aluminium
17	2	Z0202ET-00	Wärmeüberträger	
16	4	FESTO QSL-G14-6	Pneumatik Verbinder	
15	4	Z0205ET-00	Halterung	PETG
14	2	TEC	MCPK2-19808AC-S	
13	1	Z0102ET-00	Deckel	Aluminium
12	4	Z0302ET-00	Flasche	Aluminium
11	4	Z0301ET-00	Verschluss Flasche	
10	4	O-RING		
9	4	U-SCHEIBE	Scheibe	Aluminium
8	4	MUTTER M8X1		
7	4	SO 51194-3-M8X1	Thermofühlerverschraubung	
6	4	TEMPERATURSENSOR 100MM		
5	4	SENKSCHRAUBE_DIN7991_M05X20		
4	8	M4X30		
3	1	Z0104ET-00	Zugseilastung	PETG
2	1	TEMPERATURSENSOR 30MM		
1	4	HEATFLUXSENSOR		

Pos.	Anzh.	File Name	Benennung	Material
Werkstoff				
Ersatz fuer				
Gewicht				
Ersetzt durch				

Index	
Datum	
Benennung	Zyklierapparatur
Massstab	1:1,5
Gezeichnet	01.06.21
Geprüft	
Freigegeben	
Zeichnungs-Nr.	Z0103bg
Format	A3
Blatt	1/1

Allgemeintoleranzen für spanstehende Bearbeitung / General tolerances for unhardened dimensions	
0,5 - 6	> 30,120 > 120,400 > 400,1000 > 1000,2000 > 2000,4000
±0,1	±0,2 ±0,3 ±0,5 ±0,8 ±1,2 ±2
0,2, 0,5	> 0,5, 3 > 3,6 > 6,30 > 30,120 > 120,400
±0,1	±0,2 ±0,5 ±1 ±2 ±4
0,10	> 10,50 > 50,120 > 120,400 > 400
±0,18 (±1)	±0,9 (±30) ±0,6 (±20) ±0,3 (±10) ±0,15 (±5)
≤ 5	> 15, ≤ 100 > 100, ≤ 500 > 500, ≤ 1000 ≤ 1000
±0,5	±10 ±12 ±15 ±20
Allgemeintoleranzen für Blechteile / General tolerances for sheet metal parts	
Metr. ISO Gew. / Metrische Gew. / Metric ISO threads	
N12 / 50	N8 / 32
N11 / 25	N7 / 16
N10 / 12,5	N6 / 8
N 9 / 6,3	N5 / 4
Metr. ISO Gew. / Metrische Gew. / Metric ISO threads	
6H / 6g	6H / 6g

A.10. Montagezeichnung Drop Kalorimeter

16	2	ZYL_SCHRAUBE_DIN912_M03X05	Neodym D5x9	Neodym
15	4	MAGNETE	Dewar Gefäß	
14	1	D0101ET-00	Gefäß FT	
13	1	D0201ET-00	Verschluss FT	
12	1	D0202ET-00		
11	1	O-RING		
10	1	MUTTER_M8X1		
9	1	U-SCHEIBE	Scheibe	Aluminium
8	1	D0104ET-00	Deckel	ABS
7	1	MAGNETRÜHRER		
6	1	HEIZPATRONE		
5	2	TEMPERATURSENSOR 200MM		
4	1	D0105ET-00	Halbschale	ABS
3	3	SO 51194-3-M8X1	Thermofühlerverschraubung	
2	1	D0107ET-00	Klemmscheibe	PLA
1	1	D0102ET-00	Klebstreifen	Armaflex
Pos.	Anzh.	File Name	Benennung	Material

Index	Werkstoff	Ersatz fuer	
Datum	Gewicht	Ersetzt durch	
Benennung		Massstab	Name
Drop Kalorimeter		1:2	tbzgrögg
		Gezeichnet	Datum
		01.06.21	
		Gepuffert	
		Freigegeben	
		Zeichnungs-Nr.	Blatt
		D01036g	1/1
		Form	
		A3	

HSLU LUZERN
HOCHSCHULE
 für Technik und Naturwissenschaften
 Högskolan för Teknisk och Naturovetenskap