



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Muhammed Nurullah Yilmaz

Matr.-Nr.: 2031601

Konstruktive Gestaltung der Messtechnik eines Latentwärmespeichers

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Muhammed Nurullah Yilmaz
Konstruktive Gestaltung der
Messtechnik eines
Latentwärmespeichers

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau – Energie und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüferin: Professor Dr.-Ing. Heike Frischgesell
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Jens Brodersen

Abgabedatum: 26-10-2015

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Muhammed Nurullah Yilmaz

Thema der Bachelorthesis

Konstruktive Gestaltung der Messtechnik eines Latentwärmespeichers

Stichworte

Latentwärmespeicher

Wärmespeicher

Messtechnik

Phasenwechselmaterial

Kurzzusammenfassung

Die Rohstoffressourcen, die die Menschheit als Primärenergie nutzen, gehen langsam zur Neige. Daher ist es wichtig, die regenerativen Primärenergien einzusetzen, doch die Schwankungen der Verfügbarkeit dieser Energiequellen macht es den Menschen nicht leicht, diese kontinuierlich zu nutzen. Um diese Schwankungen auszugleichen, spielen die thermischen Speicher eine wichtige Rolle. Es gibt drei Arten von Wärmespeichern: sensible, latente und thermochemische.

Für kleine Temperaturbereiche weisen latente Wärmespeicher große Vorteile auf, vor allem mit Speichermedien (PCM), die eine geeignete Schmelztemperatur haben. Über diese Speicherart und PCM gab es in den letzten Jahren viele Forschungen. Auch die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg besitzt eine Latentwärmespeicheranlage, um den Studenten einen Überblick über diese Entwicklung zu verschaffen.

Name of Student

Muhammed Nurullah Yilmaz

Title of the paper

Structural design of metrology a latent heat storage

Keywords

Latent heat storage

Heat storage

Measuring technology

Phase Change Material

Abstract

The energy resources which humans use as primary energy are slowly being depleted. Because of this it is important to use regenerating energy resources. But the swaying availability of these resources makes it hard to use them continuously. Thermal storage units can play an important part to compensate these sways. There are three different kinds of thermal storage units: Sensible-, latent- and thermochemical storage units.

Latent thermal storage units show big advantages for relative small temperature ranges. Especially when equipped with PCM, which have a relative small melting temperature. There has been done a lot of research over the last years about this kind of storage units and PCM`s. Also does the University of Applied Sciences have a latent thermal storage facility to give the students an overview about this development.

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders gilt dieses Dank Herrn Dipl.-Ing. Jens Brodersen und Herrn Dipl.-Ing. Alexander von Stryk, die meine Arbeit und somit auch mich betreut haben. Nicht nur gaben Sie mir immer wieder durch kritisches Hinterfragen wertvolle Hinweise – auch für Ihre moralische Unterstützung und kontinuierliche Motivationen haben einen großen Teil zur Vollendung dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mich nicht nur während der Schulzeit sondern auch während des Studiums so herzlich unterstützten.

Last but not least: Mein besonderer Dank gilt meiner Ehefrau, die durch moralische Unterstützung, wertvolle Anregungen und ständige Motivation ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet hat.

Aufgabenstellung

Im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg werden unterschiedliche thermische Speicherverfahren untersucht. Um den Vorgang des Ladens und Entladens des Latentwärmespeichers sichtbar zu machen, ist das Messtechnikkonzept zu überarbeiten.

Folgende Aufgaben sind zu bearbeiten:

- Untersuchung und Darstellung des bisherigen Messaufbaus
- Erarbeitung eines neuen Messkonzeptes, Auswahl der Sensorik, die Visualisierung der Messwerte soll mit dem Programm „LabView“ erfolgen
- Beschaffung der eventuell fehlenden Bauteile
- Umbau der vorhandenen Versuchsanlage
- Inbetriebnahme der Anlage und erste Messungen

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Danksagung	III
Aufgabenstellung	IV
0 Formelzeichen und Abkürzungen	- 2 -
1 Einleitung	- 3 -
1.1 Motivation.....	- 3 -
1.2 Zielsetzung	- 3 -
2 Theoretische Grundlagen.....	- 4 -
2.1 Grund der Wärmespeicherung	- 4 -
2.2 Arten von Wärmespeicherung	- 5 -
2.2.1 Sensible Wärmespeicherung.....	- 6 -
2.2.2 Chemische Wärmespeicherung	- 7 -
2.2.3 Latente Wärmespeicherung.....	- 9 -
2.3 Phasenwechselmaterial (PCM) als Latentwärmespeicher	- 14 -
3 Stand der Technik und Entwicklung.....	- 17 -
4 Praktische Ausarbeitung	- 19 -
4.1 Einführung in die Ausarbeitung	- 19 -
4.2 Versuchsvorbereitung	- 20 -
4.2.1 Feststellung der Messpunkte	- 20 -
4.2.2 Montage der Temperatursensoren.....	- 20 -
4.2.3 Speicherzellen	- 21 -
4.2.4 Bestimmung des Schmelzpunktes von Paraffinwachs	- 25 -
4.2.5 SPS-System	- 26 -
4.2.6 Programmierung mit „LabView“	- 28 -
5 Laborversuch „Latentwärmespeicher“	- 29 -
5.1 Begriff des Latentwärmespeichers	- 29 -
5.2 Versuchsaufbau und Durchführung	- 30 -
6 Fazit	- 31 -
Abbildungsverzeichnis.....	- 32 -
Tabellenverzeichnis.....	- 32 -
Literaturverzeichnis.....	- 33 -

0 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen:

Q	Wärmemenge [kJ]
$Q_{\text{ges,w}}$	Gesamtwärmemenge für Wasser [kJ]
Q_{sen}	sensible Wärmemenge [kJ]
$Q_{\text{ges,p}}$	Gesamtwärmemenge für Paraffin [kJ]
Q_{lat}	latente Wärmemenge [kJ]
c_p	spezifische Wärmekapazität [kJ/kg K]
c_{pw}	spezifische Wärmekapazität für Wasser [kJ/kg K]
c_{pf}	spezifische Wärmekapazität der festen Phase [kJ/kg K]
c_{pfl}	spezifische Wärmekapazität der flüssigen Phase [kJ/kg K]
m	Mediummasse [kg]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
T_s	Schmelztemperatur [°C]
Δh	Enthalphiedifferenz [kJ/kg]
Δh_f	Umwandlungswärme [kJ/kg]
h	Enthalpie des Festkörpers [kJ /kg]
h'	Enthalpie der Flüssigkeit [kJ /kg]
Θ_t	Umwandlungstemperatur [°C]
ΔH	Reaktionsenthalpie [kJ]
ρ	Dichte [kg/m ³]
V	Volumen [m ³]

Abkürzungen:

PCM	Phase-Change-Material (Phasenwechselmaterial)
RTD	Resistance Temperature Detektoren
PT	Platin-Messwiderstand
WMZ	Wärmemengenzähler

1 Einleitung

Mit der wachsenden Weltbevölkerung und dem durch die industrielle Entwicklung eingeleiteten technologischen Fortschritt steigen der Energiebedarf und die Nachfrage an Primärenergie der Welt. Bis heute wird die Primärenergie hauptsächlich aus fossilen Rohstoffen (Holz, Kohle, Öl etc.) und Kernenergien gewonnen, die aber auch für die Umwelt und die Menschheit negative Folgen mit sich gebracht haben. Diese fossilen Energieträger setzen bei ihrer Anwendung/Verbrennung Kohlendioxid frei, das zur globalen Erwärmung führt. Laut Bundesumweltamt entstehen 50% aller Schadstoffe allein in den Start- und Abschaltphasen der Brenner [14]. Die fossilen Rohstoffe stehen zudem nicht unbegrenzt zur Verfügung und die Knappheit dieser Ressourcen wird in Zukunft zu einem starken Preisanstieg dieser Energiemedien führen. Neben den bisherigen Energiequellen (Holz, Kohle, Öl etc.) werden neue regenerative Primärenergie wie z. B. Sonne, Wind und Meer eingesetzt, die unbegrenzt zur Verfügung stehen. Für die Wärmeversorgung wird ausschließlich die Sonnenenergie eingesetzt. Doch die Natur allein stellt uns diese Primärenergie nicht das ganze Jahr über kontinuierlich zur Verfügung. Um die Sonnenergie das ganze Jahr über effizient nutzen zu können, werden Wärmespeicher eingesetzt.

1.1 Motivation

Wärmespeicherung teilt sich in ein sehr weites und vielschichtiges Feld auf. An der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen werden unterschiedliche thermische Speicherverfahren untersucht. Seit mehreren Jahren besitzt die Hochschule eine Latentwärmespeicheranlage und im Rahmen eines Bachelorprojekts wurde diese Anlage von den Studierenden untersucht. Bevor die Latentwärmespeicheranlage von den Studierenden als Labor benutzt werden kann, soll das Messtechnikkonzept überarbeitet werden.

1.2 Zielsetzung

In dieser Bachelorthesis ist die „Latentwärmespeicherung“ das Hauptthema. Durch Theoriewissen und Praxisteil der Abschlussarbeit wird versucht, einen Überblick über das Thema zu geben. Neben der Latentwärme werden auch andere Arten der Wärmespeicherung kurz erklärt. Zu dem Praxisteil gehört das Umbauen und Prüfen der Messtechnik eines Latentwärmespeichers in der Maschinenhalle der Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Die Anlage wird nach der Thesis, im kommenden Semester, als Labor verwendet.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Wärmespeicherung erklärt und anhand von Unterpunkten zusammengefasst.

2.1 Grund der Wärmespeicherung

Die Natur stellt ihre Energie nicht kontinuierlich zur Verfügung, daher ist die thermische Solarenergie ohne Speicherung kaum in nennenswertem Umfang zu nutzen. Da ungefähr ein Drittel des deutschen Primärenergiebedarfs für Raumtemperierung und Warmwasserbereitung verwendet wird, kommt thermischen Speichern eine bedeutende Rolle bei der Erreichung der Ziele in der Klimapolitik zu [11]. Um die Warmwasserversorgung täglich 24 Stunden zu gewährleisten, muss die am Tag angebotene Wärmeenergie gespeichert werden. Doch nicht nur die Nacht, sondern auch indirekte Lichtverhältnisse, z. B. ein bewölkter Himmel, verhindern die Wärmeerzeugung [04]. Außer der solaren Warmwasserbereitung wird immer mehr auch die solare Heizungsunterstützung benötigt. Wie in der Abbildung 1 veranschaulicht wird, ist der Bedarf zur Heizungsunterstützung eher gering, wenn die Sonne große Energiemengen liefert.

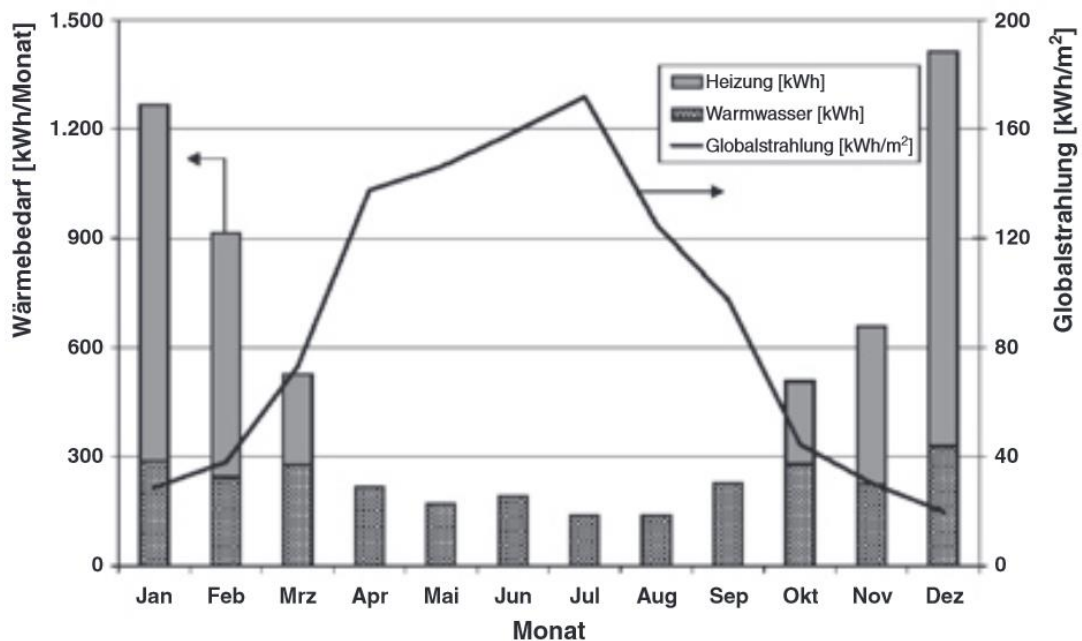


Abbildung 1: Saisonale Verteilung von Solarenergieangebot und Wärmebedarf [12]

Der im Sommer entstehende Überschuss der Solarenergie wird im Winter kaum angeboten. Die Menschen müssen daher auf Primärenergien wie Gas, Öl oder Festbrennstoffe zurückgreifen, die besonders hohe Heizkosten und große Umweltverschmutzung mit sich bringen.

Um diese Heizkosten zu reduzieren und die Ressourcen zu sparen, spielt eine langanhaltende Energiespeicherung eine wichtige Rolle. Der Idealfall wäre eine Speicherung der Wärme im Sommer, die im Winter genutzt werden könnte.

2.2 Arten von Wärmespeicherung

Wärmespeicher dienen zur zeitlich versetzten Nutzung von Wärme, wenn Wärmeeinfall und Wärmebedarf nicht gleichzeitig stattfinden.

Wärmespeicher können wie folgt eingeteilt werden:

- *„nach der Temperatur in Hoch- und Niedertemperaturspeicher.*
- *nach der Dauer der Wärmespeicherung in Kurz- und Langzeitwärmespeicher.*
- *nach dem Prinzip der Wärmeaus- und -einkopplung in direkte und indirekte Wärmespeicher. Bei den direkten Wärmespeichern sind das Speichermedium und das Wärmeträgermedium gleich, beispielsweise bei einem Wasserspeicher. Bei den indirekten Speichern wird die Wärme vom Wärmeträgermedium an das Speichermedium übertragen, bspw. durch ein Trägeröl.“¹*

Außerdem lassen sich Wärmespeicher nach ihrem physikalischen Prinzip, wie in Abbildung 2 dargestellt, unterteilen.

¹ Vgl. Rehban, E.: 2002, S. 619.

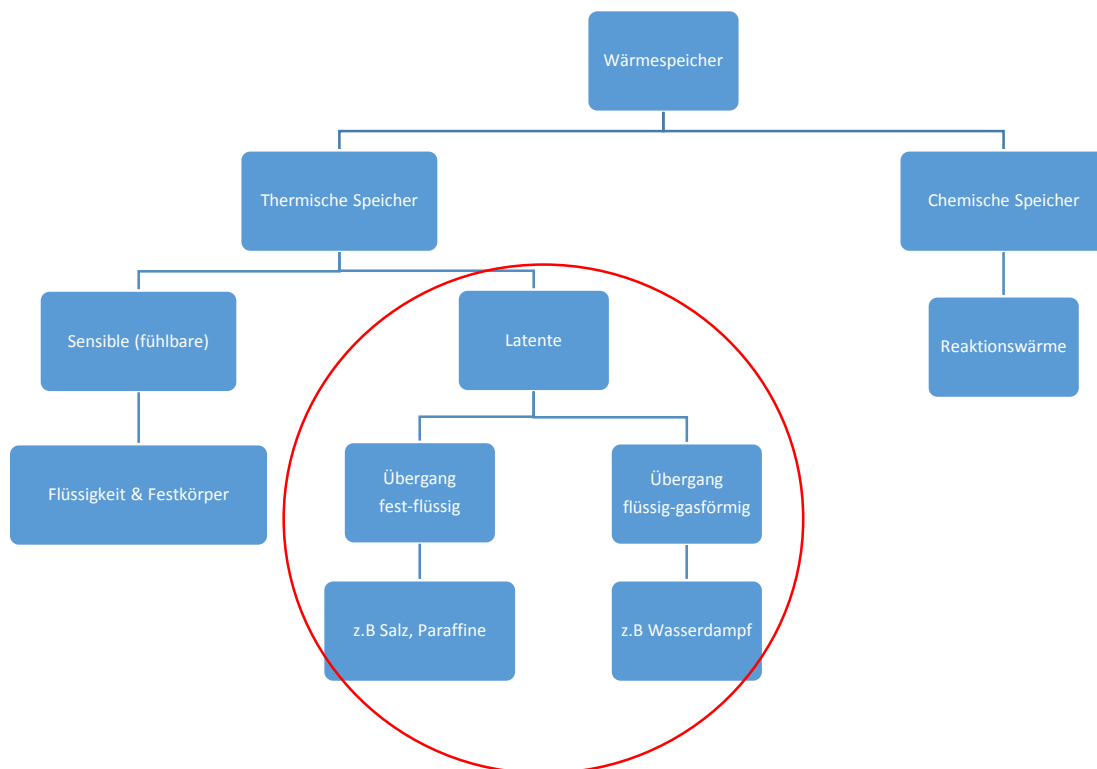


Abbildung 2: Einteilung von Wärmespeichern nach physikalischem Prinzip [02]

Da in dieser Thesis ausschließlich die Wärmespeicherung mit Latentwärmespeichern behandelt wird, wird im Folgenden mehr auf diese Art der Wärmespeicherung eingegangen und die anderen Arten der Speicherung werden nur kurz erläutert.

2.2.1 Sensible Wärmespeicherung

Beim Speichern von Wärmeenergie wird zurzeit die größte Bedeutung auf die Speicherung von fühlbarer (sensibler) Wärme gelegt. Die Wärmeaufnahme und -abgabe erfolgen proportional zu einer Temperaturänderung des Speichermaterials. Diese Form wird wegen ihrer fühlbaren Zustandsänderung auch sensible Wärmespeicherung genannt [05]. Die Menge der gespeicherten thermischen Energie pro 1 K Temperaturerhöhung ist von den Stoffeigenschaften des Speichermediums abhängig. Wie in der Gleichung 1 zu sehen ist, sind die Masse und die spezifische Wärmekapazität die Hauptfaktoren der Bestimmung, welche Wärmemenge ein Medium in einer bestimmten Temperaturdifferenz speichern kann. Die Wärmemenge kann berechnet werden:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

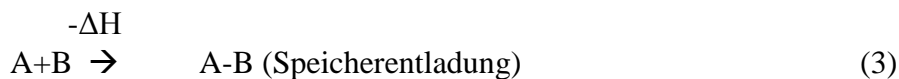
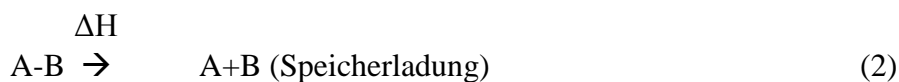
Das Zuführen von Wärme an Wasser ist eine einfache Form der Wärmespeicherung, da die große Verfügbarkeit, der unkomplizierte Transport und die Eigenschaften, dass es nicht toxisch und nicht aggressiv gegenüber anderen Materialien ist, diese Speicherart vereinfachen.

Vor allem sind die guten physikalischen Eigenschaften, wie die Wärmeleitfähigkeit und die hohe Wärmekapazität, ein Grund für die Benutzung von Wasser, Salzschnmelzen und Thermoölen als Speichermedium. Die Speicherkapazität bei sensibler Wärmespeicherung verhält sich proportional zur Masse des Speichermediums.

Spezifische Wärmekapazität: Die Wärmemenge, die erforderlich ist, um eine Stoffmenge um einen bestimmten Temperaturbetrag zu erhöhen, hängt auch vom Stoff selbst ab. Um diesen stoffabhängigen Faktor bei der Berechnung der Wärmemenge zu berücksichtigen, wird die spezifische Wärmekapazität c eingeführt. Sie gibt an, welche Wärmemenge nötig ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Die spezifische Wärmekapazität wird in kJ/kg K angegeben.

2.2.2 Chemische Wärmespeicherung

Die chemische Wärmespeicherung befindet sich noch in einem Forschungsstadium und ist deshalb noch nicht ausgereift. Das Prinzip dieser Wärmespeicherung ist die Umkehrung einer chemischen Reaktion im Speicher. Die Vorgänge der Speicherbeladung und -entladung lassen sich mit den Reaktionsgleichungen schematisch darstellen:



Dabei ist ΔH die sogenannte Reaktionsenthalpie (oder Reaktionswärme) (kJ/kg), die bei der Reaktion umgesetzt wird [01].

Die wesentlichen Vorteile dieser Speicherart gegenüber dem Latentwärmespeicher sind eine viel höhere Energiedichte und dass auch bei langer Speicherdauer keine Wärmeverluste auftreten. Geladen wird ein solcher Sorptionsspeicher, indem durch die Zufuhr von Wärme einem Sorptionsmittel Wasser entzogen wird. Für diese

Speicherart eignen sich Metallhybride, Silikagele und Zeolithe, z. B. sind Adsorption oder Adsorption eines Arbeitsmittels die geeigneten Prozesse hierfür [06].

Adsorption

Unter Adsorption (lat.: adsorbere = ansaugen) versteht man die Anlagerung von Teilchen (Atome, Moleküle, Ionen etc.) einer oder mehrerer Teilchensorten aus einer flüssigen oder gasförmigen Phase an der Oberfläche eines Festkörpers oder auch einer Flüssigkeit. Da sich dabei der flüssige oder gasförmige Stoff auf der Oberfläche anreichert, findet bei diesem Vorgang immer eine Konzentrationsänderung an der Phasengrenzfläche statt. Meistens wird von Adsorption beim Vorliegen einer Gas-Feststoff-Grenzfläche gesprochen.

Die Desorption stellt die Umkehrung der Adsorption dar [08].

Bei einer thermochemischen Wärmespeicherung werden folgende Eigenschaften sichtbar:

- Die Reaktionswärmen sind zum Teil mehr als 10-mal so groß wie bei Latentspeichermaterialien, aber nur weniger als ein Zehntel der Reaktionswärmen der üblichen Verbrennungsvorgänge mit Sauerstoff.
- Die Reaktionstemperaturen liegen meist weit über 100 °C. Für die Speicherung von Sonnenenergie bedeutet dies, dass konzentrierende Systeme (Parabolrinnen bis etwa 400 °C, darüber Solarturmkraftwerke) zur Sammlung der Sonnenenergie verwendet werden müssen.
- Einer der Reaktionspartner ist im Zustand höherer Energie (beladener Speicher) gasförmig und benötigt entsprechend großes Volumen zur Speicherung.

Der große Vorteil chemischer Energiespeicherung ist, dass die Reaktionspartner bei Umgebungstemperatur beliebig lange gelagert werden können, ohne dass Wärme verloren geht, wie dies bei Speichern von sensibler und latenter Wärme der Fall ist [01].

2.2.3 Latente Wärmespeicherung

Der Begriff „latent“ ist die Ableitung von dem lateinischen Wort „latens“ und hat die Bedeutung „verborgen“ oder „im Verborgenen“. Während sensible Wärme aufgrund der Temperaturerhöhung fühlbar ist, bleibt die latente Wärme des Phasenüberganges bei konstanten Temperaturen (isotherm) im Verborgenen [03].

Bei der Latentwärmespeicherung wird die Wärme in einem Medium gespeichert. Das Wärmespeichermedium von Latentwärmespeichern ändert bei der Speicherung von Wärme seinen Aggregatzustand von fest auf flüssig oder von flüssig auf gasförmig. Die Aggregatzustandsänderung von flüssig auf gasförmig wird jedoch, wegen der sehr großen Volumenänderung, selten genutzt. Ein Anwendungsgebiet für die Aggregatzustandsänderung von flüssig auf gasförmig ist z.B. der Kompressorkühlschrank bei dem ein Kühlmittel im Inneren verdampft und dabei viel Energie dem Kühlschrank entzieht [13]. Unterhalb der Phasenwechseltemperatur wird die zugeführte Wärme sensibel gespeichert, was an der Temperaturerhöhung sichtbar wird. Beim Erreichen der Schmelztemperatur bleibt die Temperatur, trotz weiterer Wärmezufuhr, konstant. Die zugeführte Energie wird für den Phasenwechsel des Speichermediums benötigt. Wenn also ein fester Stoff durch Wärmezufuhr schmilzt, wird in der Phase der Aggregatzustandsänderung latente Wärme gespeichert und kann danach dem Stoff wieder entnommen werden. Erst nach Abschluss des Schmelzvorgangs tritt wieder eine Erhöhung der Temperatur (sensible Speicherung) auf [07]. Wie in der Abbildung 3 zu sehen ist, kann die latente Wärme in einem kleinen Temperaturbereich große Energiemengen speichern. Der Dichteunterschied vom festen zum flüssigen Zustand ist bei vielen Materialien vernachlässigbar klein. Die im Speichermedium gespeicherte Energiemenge kann über die Enthalpiedifferenz bei einer Phasenumwandlung berechnet werden:

$$Q_{lat} = m \cdot \Delta h_f \quad (4)$$

$$\Delta h = h' - h. \quad (5)$$

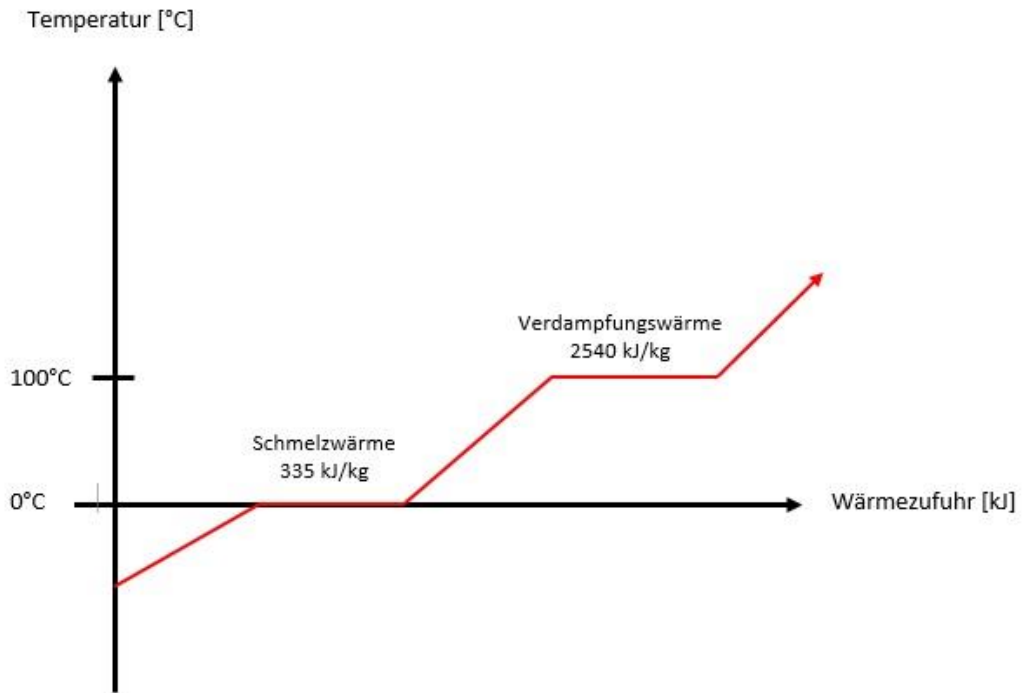


Abbildung 3: Phasenwechseldiagramm von Wasser

Der bekannteste Stoff für Latentwärmespeicherung ist Wasser. Der Phasenwechsel von fest auf flüssig erfolgt bei 0 °C. Mit der Wärme, die notwendig ist, um 1 kg Eis zu schmelzen, kann anschließend die gleiche Menge Wasser von 0 °C auf 80 °C erhitzt werden [12]. In der folgenden Rechnung wird dies veranschaulicht:

Rechnung:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{sen}} &= m \cdot c \cdot \Delta T \\
 &= 1 \text{ kg} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg K} \cdot (80-0) \text{ K} \\
 &= 335,2 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{lat}} &= m \cdot \Delta h_f \\
 &= 1 \text{ kg} \cdot 335 \text{ kJ/kg} \\
 &= 335 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

Bei den Latentwärmespeichern werden neben Wasser spezielle Salze oder Paraffine als Speichermedium benutzt. Diese Speichermedien nennt man auf Deutsch Phasenwechselmaterialien oder auf Englisch Phase-Change-Materials (PCM). Die Arbeitstemperatur eines Latentwärmespeichers ist abhängig von dem Phasenwechselmaterial. Diese Stoffe ändern ihren Aggregatzustand auf jeweils verschiedenen Temperaturniveaus und können große Energiemengen aufnehmen (beladen) und wieder abgeben (entladen).

In der Tabelle 1 werden die meistgenutzten Speichermedien für Latentwärmespeicher und ihre Eigenschaften dargestellt:

Tabelle 1 : Umwandlungstemperatur und Umwandlungswärme einiger Latentspeichermaterialien [12]

Medium	Umwandlung	Umwandlungs- temperatur Θ_f	Umwandlungs- wärme Δh_f	Spezifische Wärmekapazität c_{p1}/c_{p2}
Einheit		°C	kJ/kg	kJ/kg K
Wasser	fest/flüssig flüssig/gasfö- mig	0 100	335 2.540	2,1/4,19 4,19/1,86
Paraffine Eicosan Rohparaffin	fest/flüssig fest/flüssig	36,6 34,3	243 142	1,94/2,08
Fettsäure Laurinsäure Myristinsäure Stearinsäure -rein -technisch	fest/flüssig fest/flüssig fest/flüssig	44 54 69,7 64,8	183 187 221 203	1,8/2,16 1,83/2,3
Salzhydrate Na₂SO₄ 10H₂O Na₂S₂O₃ 5H₂O Ba(OH)₂ 8H₂O	fest/flüssig fest/flüssig fest/flüssig	32 48 78	241 201,2 266,7	
Salzgemische 48NaCl/52MgCl₂ 67NaF/33MgF₂	fest/flüssig fest/flüssig	450 832	432 618	0,9/1,0 1,42/1,38

Der Vergleich der Speicherkapazität eines Latentwärmespeichers mit der eines Speichers für fühlbare Wärme hängt davon ab, in welchem Temperaturbereich gearbeitet wird. Wenn z. B. eine Wärmequelle einen Wasserspeicher nur auf eine Temperatur von 35 °C aufheizen könnte, wäre damit die nutzbare Kapazität relativ gering. Ein Latentwärmespeicher mit einer Phasenwechseltemperatur von unter 35 °C dagegen könnte voll ausgenutzt werden. Wenn dagegen ein breiter Temperaturbereich der Wärmequelle nutzbar ist, bietet ein Latentwärmespeicher nicht unbedingt einen großen Vorteil [09].

Latentwärmespeicher können zur sensiblen Wärme auch latente Wärme speichern, die durch die Wärmekapazität im Phasenwechsel des Speichermaterials bestimmt wird, was sehr nützlich ist.

In der folgenden Beispielsrechnung wird anhand der Daten der Tabelle 1 bewiesen, dass die gespeicherte Wärme von Paraffin zwischen 30 °C und 40 °C deutlich höher ist als die Wärme der gleichen Menge Wasser:

Rechnung:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ges,w}} &= Q_{\text{sen}} = m \cdot c_{\text{pw}} \cdot \Delta T \\ &= 1 \text{ kg} \cdot 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot 10 \text{ K} \\ &= 41,9 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{ges,p}} &= Q_{\text{sen,T0/Ts}} + Q_{\text{lat}} + Q_{\text{sen,Ts/T1}} \\ &= m \cdot [c_{\text{pf}} \cdot (T_s - T_0) + \Delta h_f + c_{\text{pfl}} \cdot (T_1 - T_s)] \\ &= 1 \text{ kg} \cdot [1,94 \text{ kJ/kg K} \cdot (34,3 - 30) \text{ K} + 142 \text{ kJ/kg} + 2,08 \text{ kJ/kg K} \cdot (40 - 34,3) \text{ K}] \\ &= 162,2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Mit

$Q_{\text{ges,w}}$	Gesamtwärmemenge für Wasser [kJ]
Q_{sen}	sensible Wärmemenge [kJ]
$Q_{\text{ges,p}}$	Gesamtwärmemenge für Paraffin [kJ]
Q_{lat}	latente Wärmemenge [kJ]
c_{pw}	spezifische Wärmekapazität für Wasser [kJ/kg K]
c_{pf}	spezifische Wärmekapazität der festen Phase für Paraffin [kJ/kg K]
c_{pfl}	spezifische Wärmekapazität der flüssigen Phase für Paraffin [kJ/kg K]
m	Mediummasse [kg]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
T_s	Schmelztemperatur [°C]
Δh_f	Umwandlungswärme für Paraffin [kJ/kg]

Obwohl Wasser eine höhere spezifische Wärmekapazität (4,19 [kJ/(kg K)]) als Wärmeparaffine (ca. 2,1 [kJ/kg K]) aufweist, können diese, wenn die latente Phase eintritt, deutlich mehr Wärme speichern – vor allem in einem nutzbaren Temperaturintervall. Der Vorteil von Latentwärmespeichern gegenüber Warmwasserspeichern besteht darin, dass bei einer geringen Temperaturdifferenz eine große Wärmemenge pro Speichervolumen aufgenommen werden kann.

Abbildung 4 veranschaulicht dies:

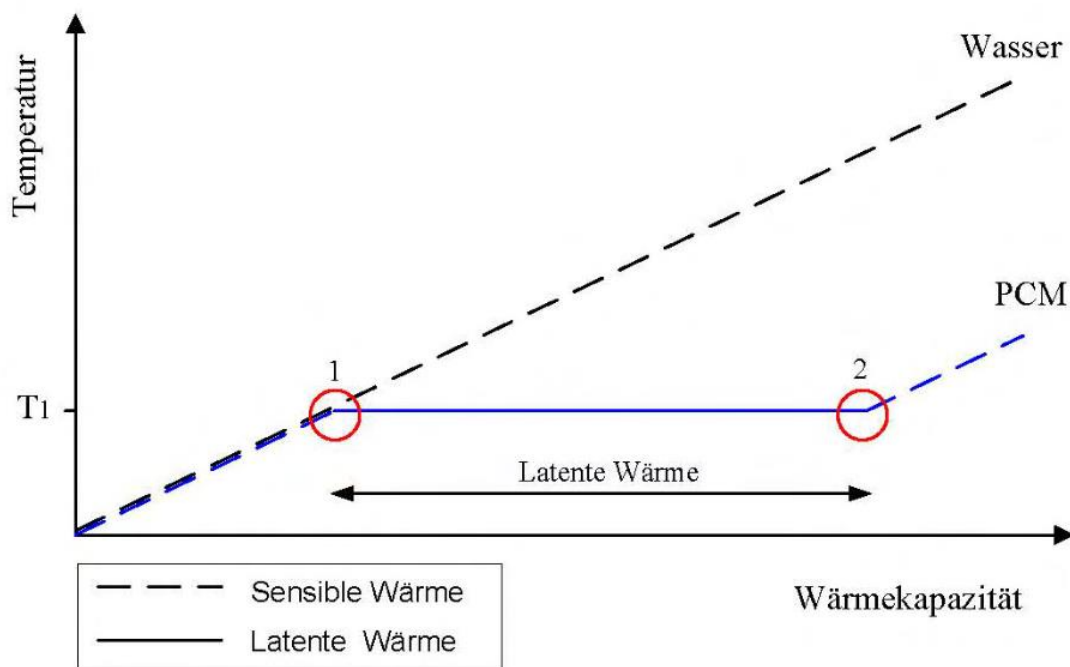


Abbildung 4: Vergleich sensibler und latenter Wärmespeicherung [02]

Neben den Vorteilen weisen Latentwärmespeicher auch Nachteile auf und zwar folgende:

- die geringe Wärmeleitfähigkeit der PCM
- die Volumenänderung beim Schmelzen bzw. Erstarren
- die Bildung von Hohlräumen im Speichermaterial
- die Korrosivität einiger PCM
- hohe Kosten für die Speichermaterialien und aufwendige Technik

Um einen wirtschaftlichen Einsatz zu gewährleisten, sind neben den temperaturbezogenen Materialeigenschaften auch die thermische Beständigkeit, die Verträglichkeit mit anderen Medien sowie die Ansprüche an Lagerungen und Förderung zu beachten.

Nachdem der Schwerpunkt in diesem Kapitel auf Latentwärmespeichern lag, wird im nächsten Kapitel das Phasenwechselmaterial (PCM) als Latentwärmespeicher betrachtet.

2.3 Phasenwechselmaterial (PCM) als Latentwärmespeicher

Jedes Material, das einen Phasenwechsel bei Wärmezufuhr- oder -abfuhr vollzieht, kann theoretisch für einen Latentwärmespeicher genutzt werden.

Bei der Auswahl des Speichermaterials sind neben dem Einsatzbereich auch einige andere Kriterien zu berücksichtigen. Die physikalischen, technischen und marktwirtschaftlichen Anforderungen an ein PCM sind [10]:

physikalisch:

- geeignete Temperatur des Phasenübergangs
- große Umwandlungswärme Δh und spezifische Wärmekapazität c_p
- möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit
- reproduzierbarer Phasenübergang
- geringe Unterkühlung

technisch:

- geringer Dampfdruck
- geringe Volumenänderung
- chemische und physikalische Stabilität
- geringe Korrosivität

marktwirtschaftlich:

- geringer Preis
- toxikologische Unbedenklichkeit
- Handling/Verarbeitung

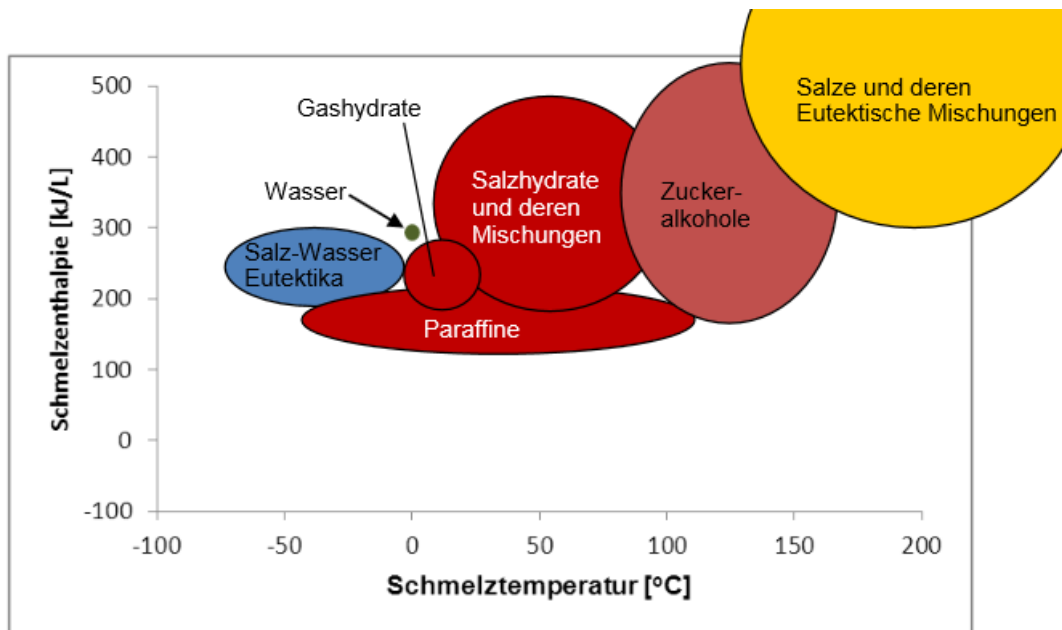


Abbildung 5: Spezifische Speicherkapazitäten und Schmelztemperaturen unterschiedlicher Materialien [01]

Die Abbildung 5 gibt eine Übersicht über mögliche PCM-Materialien und deren Schmelztemperaturen und Speicherkapazitäten. Wie hier zu sehen ist, werden in der Regel im Bereich um 0 °C Wasser und für die Raumtemperatur Paraffine, Gashydrate und Salzhydrate als Speichermaterial eingesetzt. Zwar ist es auch möglich PCM einzusetzen, die unterhalb dieser Temperatur ihren Phasenwechsel vollziehen, doch führt dies nicht zu der gewünschten Einsparung von Energie, da die Temperaturdifferenz zwischen gewünschter Vorlauftemperatur und der niedrigen Erstarrungstemperatur des PCM zu groß ist.

Für die Raumtemperatur sind die Gashydrate noch nicht zum Einsatz gekommen, weil sie sich noch im Forschungsstadium befinden.

Die Salzhydrate, die bei der Latentwärmespeicherung bei Raumtemperatur genutzt werden, haben eine höhere Dichte (ca. 1,4 – 1,6 kg/l) und eine höhere Umwandlungswärme (siehe Tabelle 1) im Vergleich mit den Paraffinen.

Die einfache und günstige Herstellung der Salzhydrate ist ein weiterer Vorteil.

Die Salzhydrate besitzen allerdings auch einen gravierenden Nachteil: Sie schmelzen nicht kongruierend, d. h., es bilden sich beim Aufschmelzen mehrere Phasen, die sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte räumlich trennen. Soll das Material wieder verfestigt werden, gelingt dies in der Regel nur unvollständig [10].

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Salzhydrate korrosiv und teilweise giftig sind.

Die im selben Temperaturbereich liegende Gruppe Paraffin ist ein Destillat aus Benzin, Diesel oder Heizöl mit der Summenformel C_nH_{n+2} . Da Paraffine reaktionsträge Stoffe sind, sind sie generell nicht toxisch und zeigen keine Korrosion an Metallen. Ein weiterer Vorteil der Paraffine besteht darin, dass durch Variation der Kettenlänge (C-Zahl) der Schmelzbereich einstellbar ist.

Wie in der Tabelle 1 zu sehen ist, beträgt die Schmelzwärme von Rohparaffin 142 kJ/kg.

Weitere Eigenschaften der Paraffine sind:

- wachsartige Konsistenz
- geruchs- und geschmackslos
- ungiftig
- elektrisch isolierend
- wasserabstoßend

Die wesentlichen Schwachpunkte der Paraffine sind:

- geringe Dichte
- hohe Materialkosten
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- geringe Schmelzenthalpie

3 Stand der Technik und Entwicklung

Die Wärme oder Kälte in einem Phasenübergang (latent) zu speichern ist keine neue Idee. Auch die Römer haben damals Eis geschmolzen (d. h. Phasenübergang fest-flüssig), um Lebensmittel kühl zu halten. Das Eis kommt natürlich vor, also war es das erste PCM, das zur Kältespeicherung verwendet wurde. Das Eis schmilzt bei 0 °C, doch die Latentwärmespeicherung kann auch in anderen Temperaturbereichen eingesetzt werden. Je nach Anwendungsfall muss dazu ein Material (PCM) mit geeigneter Temperatur des Phasenwechsels ausgewählt werden (siehe Kapitel 2.3 - Abbildung 5).

In den 1940er-Jahren wurden die ersten Versuche zur Latentwärmespeicherung (PCM) in den USA durchgeführt, um ein Wohnhaus zu heizen. Die Vermarktung des Latentwärmespeichers hat in den letzten 25 Jahren große Fortschritte gemacht. Die Gründe hierfür sind die Verbesserungen der technischen Eigenschaften der PCM und die Suche nach wirtschaftlichen Anwendungen [01].

Die latente Wärme wird in der Energietechnik in verschiedenen Bereichen genutzt:

- Die Innentemperatur einer Box wird beim Transport von temperatursensitiven Gütern im Medizinbereich, wie Blutpräparate, Medikamente, Pharmazeutika, Geräte, Instrumente etc., mit einem PCM-Modul längerfristig stabilisiert.
- Auch auf dem Funktionskleidung-Markt spielt das PCM eine Rolle. Bei Textilien wie z. B. für Skibekleidung wird mikroverkapseltes PCM zur Stabilisierung der Temperatur integriert, das das Auskühlen der Kleidung hinauszögern soll. Die Feuerwehranzüge benötigen das Gegenteil und somit wird auch hier ein mikroverkapseltes PCM integriert, das das Aufheizen des Inneren des Schutzanzuges beim Einsatz hinauszögern soll.
- Die Wärmespeicherfähigkeit eines Hauses kann erhöht werden, indem Latentwärmespeicher eingebaut werden. Diese enthalten PCM, z. B. Salze oder kleine Wackskügelchen, die bei einer gewissen Temperatur schmelzen und dabei Wärme aufnehmen, die sie beim Erstarren wieder abgeben.
- Es sind auch mobile Wärmespeicher entwickelt worden, bei denen ein latenter Wärmespeicher (z. B. auf der Basis von Natriumacetat) mit Abwärme z. B. von einem Kraftwerk aufgeladen, mit einem Lkw zu einem Verbraucher gefahren und dort entladen wird. Dies kann wirtschaftlich sein, wenn die Transportdistanz genügend gering, aber eine Nahwärmeleitung doch zu teuer wäre.
- Kleine Latentwärmespeicher werden vereinzelt in Autos verwendet, um den Motorblock vor dem Start vorzuwärmen. Während der Fahrt werden sie vom Kühlwasser des Motors wieder aufgeheizt.

- Kleine Wärmekissen auf der Basis von Natriumacetat werden verwendet, um an eisigen Wintertagen die Hände zu wärmen. Andere Anwendungen gibt es in speziellen Funktionstextilien und bereits auch in Waschmaschinen und Geschirrspülmaschinen zur Rückgewinnung von Wärme aus dem Abwasser [09].

Obwohl die Latentwärmespeicher für verschiedene Anwendungen viele Vorteile aufweisen, konnten sie bis jetzt kaum benutzt genutzt werden. Dies ist neben den oft zu hohen Kosten vor allem auf technische Probleme zurückzuführen. Auch die als Speichermaterial eingesetzten PCM weisen Probleme, wie geringe Wärmeleitfähigkeit oder auch Unterkühlungserscheinungen, auf.

4 Praktische Ausarbeitung

In diesem Kapitel wird die praktische Ausarbeitung der Latentwärmespeicher im Zentrum für Energietechnik des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg erklärt und anhand von Unterpunkten zusammengefasst. Die Versuchsdurchführungen mit der Latentwärmespeicheranlage werden aufgrund von Behinderungen durch Bauarbeiten in der Maschinenhalle in dieser Ausarbeitung nicht erfolgen.

4.1 Einführung in die Ausarbeitung

Im Jahr 2013 wurde die Latentwärmespeicheranlage, die von der Firma „Powertank“ geliefert wurde, durch Studierende der HAW Hamburg als Bachelorprojekt bearbeitet. Die Aufgabe der Studierenden war es, die einzelnen Teile der Anlage zu beschreiben.

In dieser Arbeit werden nun die fehlenden Teile der Anlage besorgt, die vorhandene Versuchsanlage umgebaut und es wird versucht, ein optimales Messkonzept für die Temperaturmessung der Anlage zu erzeugen, da die Latentwärmespeicheranlage bislang kein genügendes Messtechnikkonzept besitzt. Für die Visualisierung der Messwerte ist das Programm „LabView“ vorgesehen.

Ein Datenblatt für den Latentwärmespeicher „Powertank“ ist im Anhang zu finden.



Abbildung 6: Der Latentwärmespeicher vor der Ausarbeitung

4.2 Versuchsvorbereitung

4.2.1 Feststellung der Messpunkte

Am Anfang der Arbeit wurden die Messpunkte der Speicheranlage festgelegt, um die Paraffintemperatur der Zelle messen zu können. Dafür wurden für die erste Zelle der Speicheranlage fünf gleichmäßig (von unten nach oben) verteilte Messpunkte vorgesehen. Für die restlichen fünf Zellen wurden jeweils zwei (oben und unten) Messpunkte ausgewählt. Das Ziel dieser Verteilung ist es, die Temperaturschichtung der einzelnen Zellen zu bestimmen und zu vergleichen (für die Maße der Messstellen: Siehe Abbildung 12).

4.2.2 Montage der Temperatursensoren

Nachdem die 15 Messpunkte der Speicherzellen bestimmt wurden, sind 16 Temperaturfühler (einer als Ersatz) ausgesucht und an den Messpunkten montiert worden.



Abbildung 7: Die erste Zelle mit den montierten fünf Temperatursensoren

Die ausgewählten Temperaturfühler sind wasserdicht und haben einen Messbereich von -50 °C bis $+200\text{ °C}$. Die PT100-Temperatursensoren mit M6-Gewinde haben eine 4-Leitertechnik und besitzen eine Kabellänge von 15 Metern bei 17 mm Einbaulänge.

Das Datenblatt für die Temperaturfühler ist im Anhang zu finden.

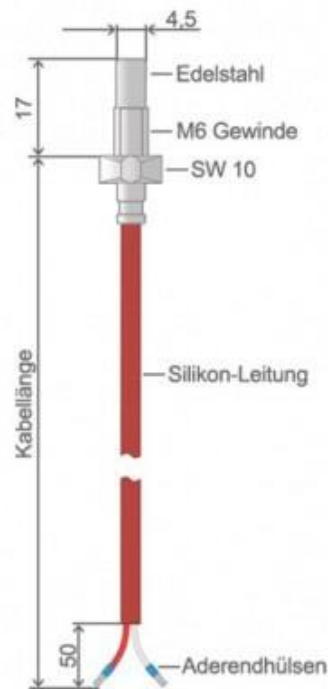


Abbildung 8: Skizze des Temperaturfühlers

4.2.3 Speicherzellen

Der vorhandene Latentwärmespeicher bestand aus sechs undurchsichtigen Kunststoffzellen. Diese sollten durch durchsichtige Plexiglaszellen ersetzt werden, damit es möglich ist, die Phasenwechsel in den Zellen zu beobachten. Bei den ersten drei Kunststoffzellen wurde am Boden jeweils ein Loch gebohrt und konnten so durch Schmelzen des Paraffinwachses (jeweils ca. 33 kg) entleert werden. Mithilfe einer Stichsäge wurden die leeren Kunststoffzellen abgesägt und entfernt. Nach dem Absägen konnte beobachtet werden, dass die Kupferrohre, durch die das Warmwasser fließen soll, spiralförmig sind. Mit dem erzielten Theoriewissen wurde festgestellt, dass der Grund hierfür die Erhöhung der Kontaktfläche zwischen Wachs und Rohr ist.

In der Abbildung 9 wird das Entfernen der ersten Kunststoffzelle dargestellt:



Abbildung 9: Das Entfernen der Kunststoffzelle

Das Ablassen des flüssigen Waxes hat viel Zeit und Aufwand gekostet, deswegen wurden die letzten drei Kunststoffzellen ohne Ablassen des Waxes abgesägt und entfernt. Auch bei dieser Methode folgten Schwierigkeiten, wie z. B. das Entfernen des Waxes in der festen Phase.

In der Abbildung 10 wird das Entfernen der letzten Kunststoffzellen dargestellt:



Abbildung 10: Das Entfernen der Kunststoffzellen 2

Nach dem Entfernen der Kunststoffzellen wurde das Kupferrohr an vier verschiedenen Stellen mithilfe eines Rohrschneiders abgesägt, um die Spiralrohre von der Bodenplatte zu befreien und sie später in die neuen Plexiglaszellen einzutauchen.

Die ersten beiden abgesägten Stellen sind vor dem Rohrentlüfter der Anlage und die nächsten zwei Stellen sind zwischen den ersten drei und den letzten drei Zellen zu sehen.

Um die Rohre nach dem Eintauchen in die Plexiglaszellen wieder zusammenzufügen, sind einige Verbindungsmaterialien (Übergangsnippel, Schiebemuffe etc.) bestellt worden.

In der Abbildung 11 sind die bestellten Verbindungsteile zu sehen:



Abbildung 11: Verbindungsteile

Eine Muffe kann beim Verbinden von dünnwandigen Rohren die Verbindungsstellen verstärken oder die Verbindung überhaupt erst herstellen. Da die zwei Rohrentlüfter jeweils eine Innengewinde besitzen, sind für diese Verbindungsstellen Steckfitting-Übergangsnippel mit $\frac{3}{4}$ Außengewinde und als Gegenstück, zwischen Übergangsnippel und Kupferrohr, Steckfitting-Muffe bestellt worden. Mit Hilfe eines Demontagewerkzeuges ist das Steckverbindersystem demontierbar und wiederverwendbar. Die Teile sind aus Messing hergestellt worden.

Für die einfache Kupferrohrverbindung an zwei Stellen zwischen den ersten drei und die letzten drei Speicherzellen sind Steckfitting-Schiebemuffe aus Kupfer bestellt worden.

Die sechs Plexiglaszellen haben eine Gesamthöhe von 1600 mm (10 mm Bodenplatte), einen Außendurchmesser von 200 mm und eine Wanddicke von 5 mm. Die erste Zelle hat jeweils fünf und die restlichen 5 Zellen haben jeweils zwei M6-Bohrungen, um die Temperaturfühler an den Zellen einschrauben zu können. Bei der oben genannten Bauarbeit wurde eine Zelle mit zwei M6-Bohrungen zerstört, aus diesem Grund wurde eine neue Zelle bestellt. In der Abbildung 12 sind die Skizzen für die erste Plexiglaszelle zu sehen. Die Maße der Messstellen ist in der ersten Skizze (links) vorhanden.

Die technischen Informationen über die Plexiglaszellen sind im Anhang zu finden.

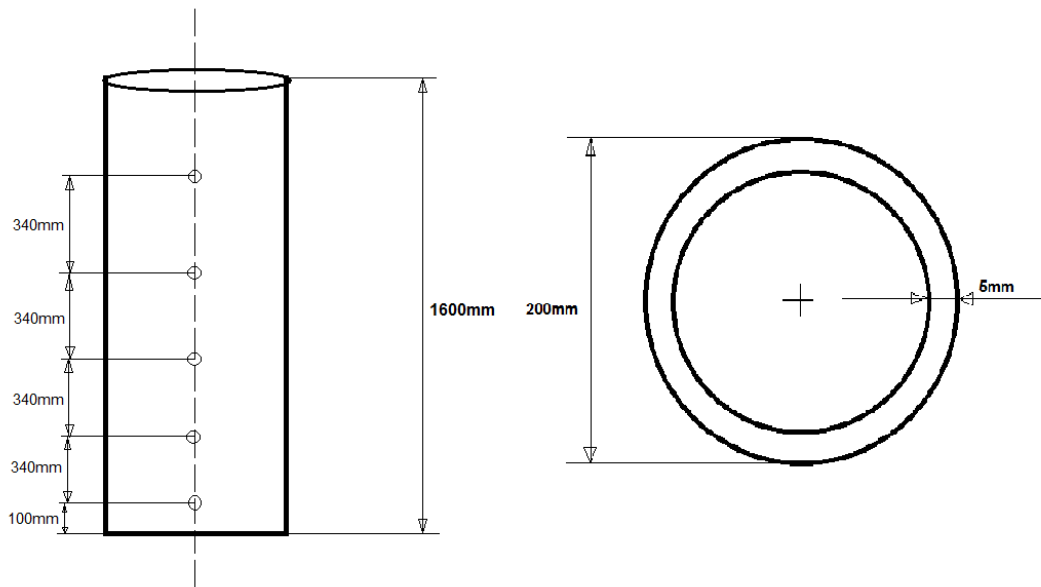


Abbildung 12: Skizze der Plexiglaszellen (Ansicht v. vorne (links) und v. oben (rechts))

4.2.4 Bestimmung des Schmelzpunktes von Paraffinwachs

Der Schmelzpunkt des vorhandenen Paraffinwachses wurde mithilfe eines Laborversuches „*Bestimmung des Tropfpunktes von Schmierfett nach ISO 2176*“ bestimmt. In der Durchführung wurde das Paraffinwachs in einem Nippel eingefüllt und mit einem Metallstab gleichmäßig an den Nippelrand kegegelt. Der Nippel wurde in ein Reagenzglas eingehängt und mit einem Thermometer versehen. Das Prüfgerät wurde in einem Paraffinbad erwärmt, wobei durch einen Rührer eine gleichmäßige Temperaturverteilung erreicht werden musste. Mit zunehmender Temperatur ist Paraffinwachs bei 60 °C aus dem Nippel ausgetreten.

Zusätzlich wurde 200 kg Paraffinwachs mit einer Schmelztemperatur von 60-62°C und Schmelzwärme von 200-240 kJ/kg bestellt. Ein Phasenwechseldiagramm von dem vorhandenen Paraffinwachs ist in der Abbildung 13 zu sehen.

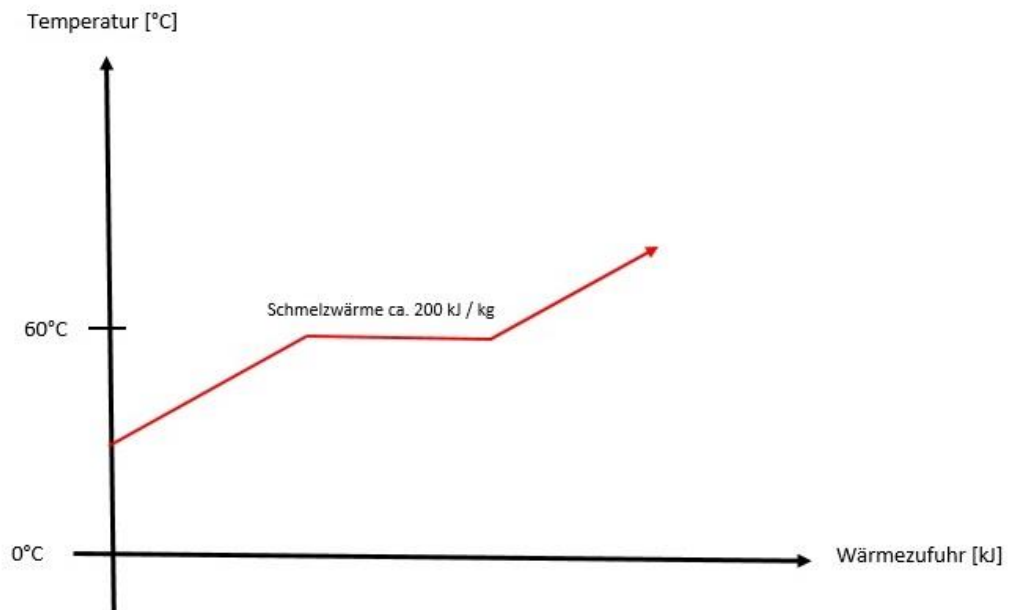


Abbildung 13: Phasenwechseldiagramm des verwendeten Paraffinwachses

4.2.5 SPS-System

SPS steht für speicherprogrammierbare Steuerung. Es ist ein System, das für Steuerung oder Regelung der Maschine oder Anlage eingesetzt und auf digitaler Basis programmiert wird. Eine SPS besteht in der Regel aus:

- Stromversorgung
- Baugruppen für digitale Eingänge und Ausgänge
- internem Bussystem

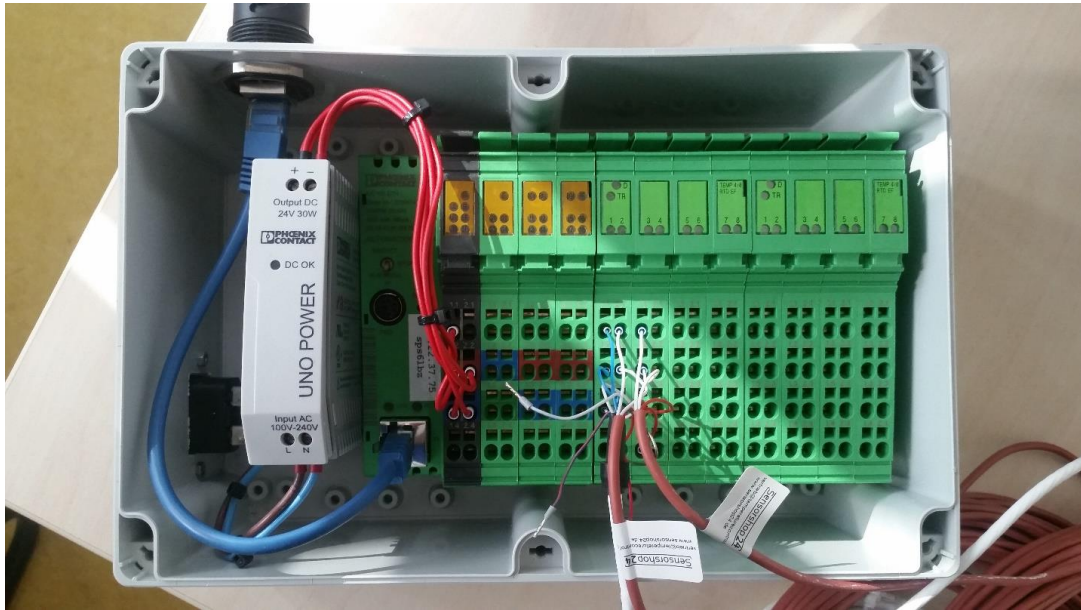


Abbildung 14: SPS-Box für Datenverarbeitung des Latentwärmespeichers

Wie in der Abbildung 14 zu sehen ist, sorgt das linke Teil in der Box (mit der Beschriftung „UNO POWER“, von der Firma Phoenix Contact) für die Stromversorgung.

Auf der rechten Seite in der Box sind zwei Inline-Klemmen mit acht analogen Eingangskanälen für den Anschluss von Temperatur-Messwiderständen (RTD) eingebaut. Die Inline-Modular-Analog-Eingabeklemmen haben eine 4-Leiter-Anschlussstechnik (siehe Anhang: Datenblatt). Um das Innere der SPS-Box zu sehen, hat die Box eine durchsichtige Scheibe. Ein Datenblatt für die Teile in der SPS-Box ist im Anhang zu finden.

4.2.6 Programmierung mit „LabView“

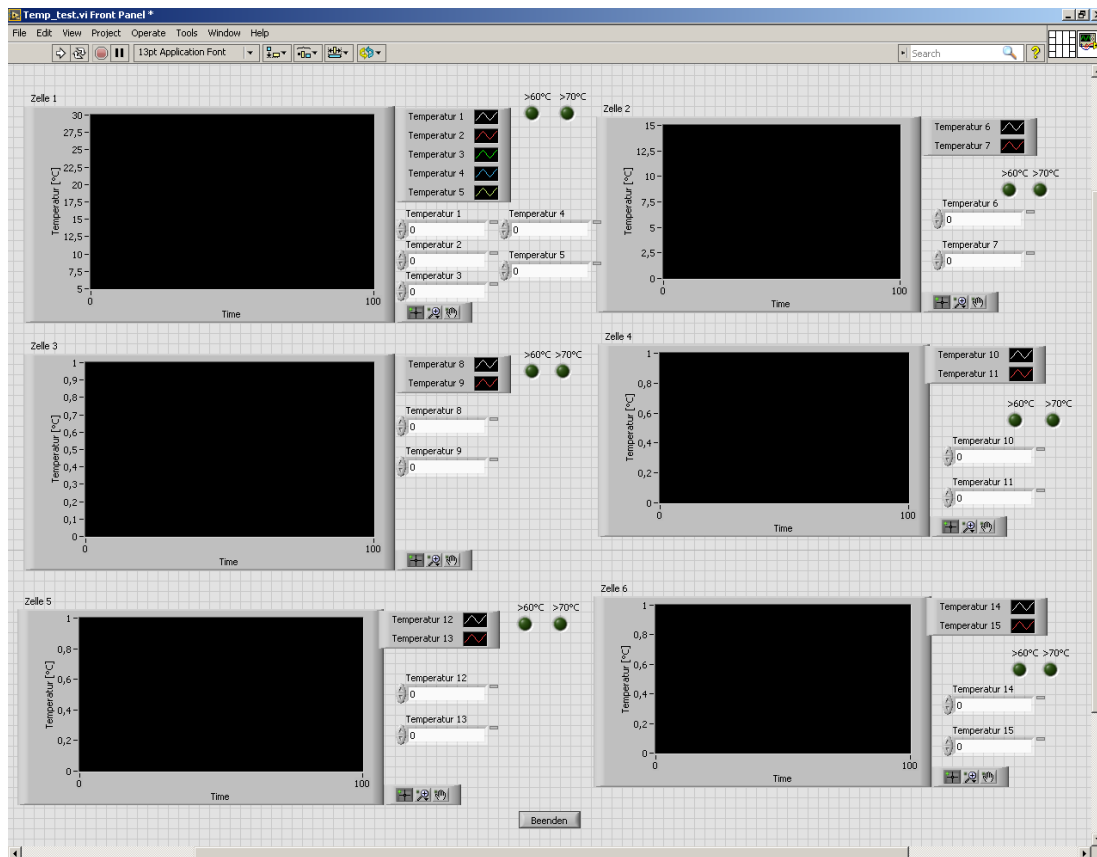


Abbildung 15: Visualisierung der Messwerte mit „LabView“

Die Visualisierung der Temperaturmesswerte des Latentspeichers wird mit dem Programm „LabView“ erfolgen. Wie in der Abbildung 15 zu sehen ist, sind sechs Fenster für die jeweiligen Zellen vorhanden. Die Zelle 1 hat, wie im Unterpunkt 4.2.1 erläutert, fünf Temperaturfühler und die restlichen Zellen jeweils zwei.

Also werden für die erste Zelle auf dem Fenster 1 fünf Kurven und Werte angezeigt, für die restlichen Zellen werden jeweils zwei Kurven und Werte erscheinen. Für jeweils den ersten Temperaturfühler jeder Zelle sind zwei Überwachungssensoren vorhanden. Der erste Sensor leuchtet grün, wenn die Schmelztemperatur des Paraffinwachses 60 °C (siehe 4.2.4) erreicht, und der zweite leuchtet rot, wenn 70 °C (siehe Anhang: Datenblatt Plexiglas) erreicht werden. Die Messwerte werden in der Excel-Tabelle gespeichert. Ein detailliertes Blockschaltbild von dem Programm „LabView“ ist im Anhang zu finden.

5 Laborversuch „Latentwärmespeicher“

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie ein Latentwärmespeicher-Laborversuch in den kommenden Semestern aussehen kann.

5.1 Begriff des Latentwärmespeichers

Der Begriff „latent“ ist die Ableitung von dem lateinischen Wort „latens“ und hat die Bedeutung „verborgen“ oder „im Verborgenen“. Während sensible Wärme aufgrund der Temperaturerhöhung fühlbar ist, bleibt die latente Wärme des Phasenüberganges bei konstanten Temperaturen (isotherm) im Verborgenen.

Bei der Latentwärmespeicherung wird die Wärme in einem Medium gespeichert. Dieses Medium nennt man Phasenwechselmaterial (Phase-Change-Material). Das Wärmespeichermedium (PCM) von Latentwärmespeichern ändert bei der Speicherung von Wärme seinen Aggregatzustand von fest auf flüssig oder von flüssig auf gasförmig. Die Aggregatzustandsänderung von flüssig auf gasförmig wird jedoch, wegen der sehr großen Volumenänderung, selten genutzt. Unterhalb der Phasenwechseltemperatur wird die zugeführte Wärme sensibel gespeichert, was an der Temperaturerhöhung sichtbar wird. Beim Erreichen der Schmelztemperatur bleibt die Temperatur, trotz weiterer Wärmezufuhr, konstant. Die zugeführte Energie wird für den Phasenwechsel des Speichermediums benötigt. Wenn also ein fester Stoff durch Wärmezufuhr schmilzt, wird in der Phase der Aggregatzustandsänderung latente Wärme gespeichert und kann danach dem Stoff wieder entnommen werden.

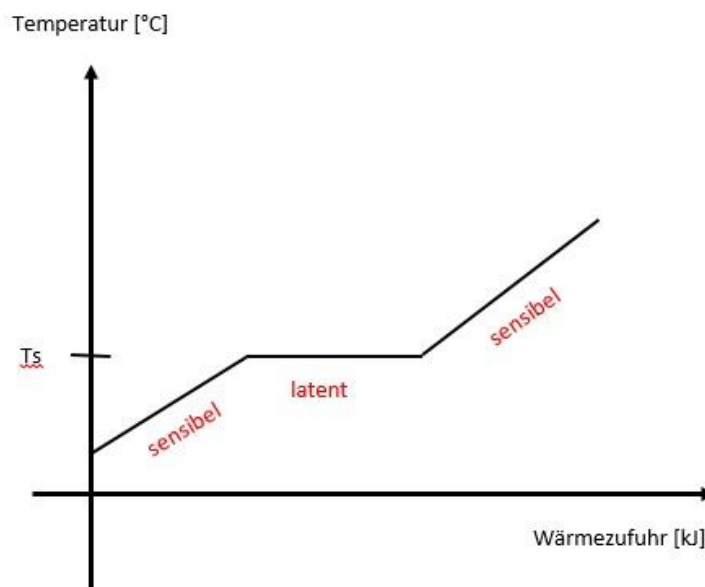


Abbildung 16: Phasenwechseldiagramm

5.2 Versuchsaufbau und Durchführung

In der Versuchsanlage Thermische Speicher der HAW Hamburg sind drei Wasserspeicher und ein Latentwärmespeicher in ein System eingebunden, wie es für die Energieversorgung eines Gebäudes verwendet werden könnte. Der Latentwärmespeicher besteht aus sechs Plexiglaszellen (Höhe 1600 mm, Außendurchmesser 200 mm, Wanddicke 5 mm, Bodenplatte 10 mm). An der ersten Zelle sind fünf gleichmäßig verteilte und an den restlichen Zellen sind jeweils zwei (oben und unten) PT100 Temperatursensoren eingeschraubt. Als Speichermedium wird beim Versuch das PCM Paraffinwachs verwendet, welches ungefährlich ist. Die Anlage besitzt zwei Wärmemengenzähler.

Das Aufladen des Latentwärmespeichers, also das Zuführen von Energie erfolgt, indem warmes Wasser durch das Speichermedium geleitet wird. Dieses läuft durch eine Kupferleitung, die spiralförmig durch das Speichermedium geführt ist und somit als Wärmetauscher dient. Das Warmwasser aus dem Warmwasserspeicher wird durch eine Pumpe in die Kupferleitung zugeführt. Danach fließt es durch den Wärmespeicher, indem es seine Wärme an das kältere Speichermedium abgibt. Die zugeführte Energiemenge und die Temperatur des Wassers kann aus dem WMZ abgelesen werden. Die Visualisierung der Messwerte der Temperatursensoren erfolgt mit dem Programm LabView.

Aufgabe:

1. Bestimmen Sie die Eigenschaften von Paraffinwachs
 - a. Bestimmung der Dichte
 - b. Bestimmung des Volumens
 - c. Bestimmung der Masse $\rho = m/V$
 - d. Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität $c_p = Q/m \cdot \Delta T$
2. Bestimmen Sie den Schmelzpunkt / Erstarrungspunkt von Paraffinwachs
3. Erstellen Sie eine Temperaturkurve von Paraffinwachs, die den Temperaturanstieg im Verhältnis zur zugeführten Wärmeenergie darstellt.
4. Vergleichen Sie die Energiemenge, die während der Änderung des Aggregatzustandes gespeichert werden kann, mit dem theoretischen Wert.
5. Um wie viel Grad kann 1kg Wasser mit der gespeicherten Energie erwärmt werden?

6 Fazit

Um die Temperaturschwankungen der Sonne auszugleichen, spielen die Wärmespeicher eine sehr wichtige Rolle. Der Latentspeicher bietet im Winter und im Sommer sowohl bei Tag als auch in der Nacht die Möglichkeit, die Wärme z. B. aus Sonnenenergie zu speichern. Bei dieser Art der Speicherung wird der Phasenübergang (meist von fest auf flüssig) eines Speichermediums (PCM) ausgenutzt.

Auch die HAW Hamburg besitzt einen Latentwärmespeicher, um den Studenten über diese Art der Speicherung einen Überblick zu verschaffen.

Der Zweck dieser Arbeit war es, die theoretischen Grundlagen dieser Art der Speicherung wiederzugeben und die Latentspeicheranlage für einen Laborversuch vorzubereiten.

Mit der Idee „visuell Lernen“ wurden die Kunststoffzellen der Latentwärmanlage durch durchsichtige Plexiglaszellen ersetzt – somit können die Studenten im Labor den Phasenwechsel des Speichermediums (PCM) besser beobachten und das Geschehen in den Zellen besser verstehen. Auch die SPS-System-Box hat eine durchsichtige Scheibe, um die Inline-Klemmen mit analogen Eingangskanälen für den Anschluss von Temperatur-Messwiderständen besser zu sehen und zu verstehen.

Das Hauptziel dieser Arbeit war, ein optimales Messtechnikkonzept für die Latentwärmanlage zu erstellen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden insgesamt fünfzehn Messstellen an den sechs Zellen der Anlage festgelegt und die geeigneten Temperatursensoren ausgesucht, bestellt und montiert. Somit wäre es möglich, die Temperaturverteilung an den Speicherzellen während des Phasenübergangs des Speichermediums (in dem Fall Paraffinwachs) zu messen. Die Visualisierung dieser Messwerte wird mit dem Programm „LabView“ erfolgen.

Es wurde vorgesehen, die Anlage in Betrieb zu nehmen und die ersten Messwerte auszuwerten. Doch aufgrund von Bauarbeiten in der Maschinenhalle der HAW Hamburg, wo die Latentwärmespeicheranlage gelagert wird, sind Verzögerungen aufgetreten. Durch diese Arbeiten ist eine Plexiglaszelle der Anlage zerstört worden. Um die Anlage in Betrieb zu nehmen, werden weitere Bearbeitungen benötigt. Hierfür wurde eine neue Plexiglaszelle bestellt. Nach dem Erhalt und der Montierung der Bestellungen werden die ersten Messwerte ausgewertet.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Saisonale Verteilung von Solarenergieangebot und Wärmebedarf [12]	- 4 -
Abbildung 2: Einteilung von Wärmespeichern nach physikalischem Prinzip [02]	- 6 -
Abbildung 3: Phasenwechseldiagramm von Wasser	- 10 -
Abbildung 4: Vergleich sensibler und latenter Wärmespeicherung [02].....	- 13 -
Abbildung 5: Spezifische Speicherkapazitäten und Schmelztemperaturen unterschiedlicher Materialien [01]	- 15 -
Abbildung 6: Der Latentwärmespeicher vor der Ausarbeitung	- 19 -
Abbildung 7: Die erste Zelle mit den montierten fünf Temperatursensoren	- 20 -
Abbildung 8: Skizze des Temperaturfühlers.....	- 21 -
Abbildung 9: Das Entfernen der Kunststoffzelle	- 22 -
Abbildung 10: Das Entfernen der Kunststoffzellen 2	- 23 -
Abbildung 11: Verbindungsteile.....	- 24 -
Abbildung 12: Skizze der Plexiglaszellen (Ansicht v. vorne (links) und v. oben (rechts))..	- 25 -
Abbildung 13: Phasenwechseldiagramm des verwendeten Paraffinwachses.....	- 26 -
Abbildung 14: SPS-Box für Datenverarbeitung des Latentwärmespeichers.....	- 27 -
Abbildung 15: Visualisierung der Messwerte mit „LabView“	- 28 -
Abbildung 16: Phasenwechseldiagramm	- 29 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Umwandlungstemperatur und Umwandlungswärme einiger Latentspeichermaterialien [12].....	- 11 -
--	--------

Literaturverzeichnis

- [01] MEHLING, H.: *BINE-Themeninfo IV/02: Latentwärmespeicher*. Eggenstein-Leopoldshafen: Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, 2002. – ISSN 1610 – 8302
- [02] WAGGER, Ch.: „*Alternative Nutzung von Abwärme durch Konzipierung einer trassenlosen Wärmeversorgung mit mobilen Latentwärmespeichern*“, Diplomarbeit FH-Kufstein 2006
- [03] IKZ-Fachplanung: *Langfristige Wärmespeicherung Funktion, Markt und Wirtschaftlichkeit von thermochemischen- und Latent-Wärmespeicher-Technologien*, Heft 1/2007
- [04] PITZ-PAAL, P. D. R.: *Solarthermische Kraftwerke – Europäische Potenziale kostengünstig erschließen*. FVS Themen 2006, 2006. 2(2): p. 52.
- [05] SCHOSSIG, P, und HAUSMANN T,: *Wärme- und Kältespeicherung – Stand der Technik und Ausblicke*, 2011, ISSN 1864-6972.
- [06] O. Verf.: *Thermochemische Speicher*. BINE-Projektinfo 02/2001, 2001. 02: p. 4.
- [07] VAHLENKAMP, T.: *Modellierung einer Teilklimaanlage mit Latentwärmespeicher*. Technische Universität Hamburg Harburg, Diplomarbeit 2006
- [08] *Grundlagen der Adsorption*,
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/adsorption/grundlagen/grundlagen_der_adsorption.vlu.html (Abruf: 2015-07-12)
- [09] PASCHOTTA, R.: RP-Energie-Lexikon, *Latentwärmespeicher*,
<https://www.energie-lexikon.info/latentwaermespeicher.html> (Abruf: 2015-09-04)
- [10] MILOW, B. und STADERMANN, G.: ForschungsVerbund Sonnenergie Workshop Wärmespeicherung 2001, *Anforderungen an PCM*, S. 50.
- [11] SCHOSSIG, P.: *Wärmespeicher für die Hausenergieversorgung*, FVS, LZE Themen 2005, p. 125.
- [12] KÜBLER, R, und FISCH, N,: *BINE: Informationsdienst: Wärmespeicher, Ein Informationspaket*, Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH, 1998. – ISBN 3-8249-0442-X.
- [13] *Wärmespeicherung mit oder ohne Aggregatzustandsänderung*,
http://www.wuestenbaum.de/energie/mit_ohne_zustandsaenderung.html (Abruf: 2015-09-03)
- [14] PowerTank GmbH, *Der Latentspeicher Ökologische Konsequenz Ökonomische Effizienz*

Literaturverzeichnis