

# **SIMULATION DES EINSATZES VON LATENTWÄRMESPEICHERN IN GEWÄCHSHÄUSERN**

Abschlussbericht 06.12.2006

Auftraggeber:

**Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft**



Durchführung:

**Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.**

**ZAE Bayern**

Abt. 1: Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien

Walther Meißner Straße 6, 85748 Garching

Wissenschaftliche Leitung: Professor Dr. U. Stimming, Professor Dr.-Ing. H. Spliethoff

Abteilungsleiter: Dipl.-Phys. W. Schölkopf

Bearbeitung:

Dr. A. Hauer, Dipl.-Phys. S. Hiebler, Dr. J. M. Kuckelkorn, Dipl.-Ing. A. Robrecht

# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>3</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
1.1 Objektkurzbeschreibung	4
1.2 Problemstellung	4
1.3 Arbeitsprogramm	5
1.4 Vorhandenes Datenmaterial	6
<b>2 BESTANDSAUFNAHME UND AUSWERTUNG</b>	<b>7</b>
2.1 Gebäudegeometrie	7
2.2 Gebäudenutzung und Komfortanforderungen	9
<b>3 GEBÄUDESIMULATION</b>	<b>10</b>
3.1 Berechnete Varianten	11
3.2 Simulationsergebnisse	14
<b>4 PHASE CHANGE MATERIALS</b>	<b>20</b>
4.1 Auswahlkriterien	20
4.2 Materialklassen zur Latentwärmespeicherung und deren typische Eigenschaften	22
4.3 Geeignete PCM	27
4.4 Schmelzbereich eines PCM	28
4.5 Technische, energetische und wirtschaftliche Machbarkeit des Speichersystems	31
<b>5 ANHANG</b>	<b>38</b>

## Zusammenfassung

Die Nutzung von Latentwärmespeichern (PCM) eignet sich sehr gut, um Temperaturspitzen im Innenraum des Gewächshauses zu dämpfen und so eine längere Betriebsdauer im Optimaltemperaturbereich zu ermöglichen. Dabei kann sowohl Heizenergie eingespart als auch die Öffnungszeiten der Lüftungsklappen deutlich reduziert werden. Mit PCM ist es außerdem möglich, den Innenraum unter die aktuellen Außenlufttemperatur abzukühlen, was bisher mit der reinen Lüftung nicht möglich ist. Eine Wirtschaftlichkeit ausschließlich auf Basis der Heizkosteneinsparung bezogen auf die heutigen Energiepreise kann hingegen nicht erreicht werden.

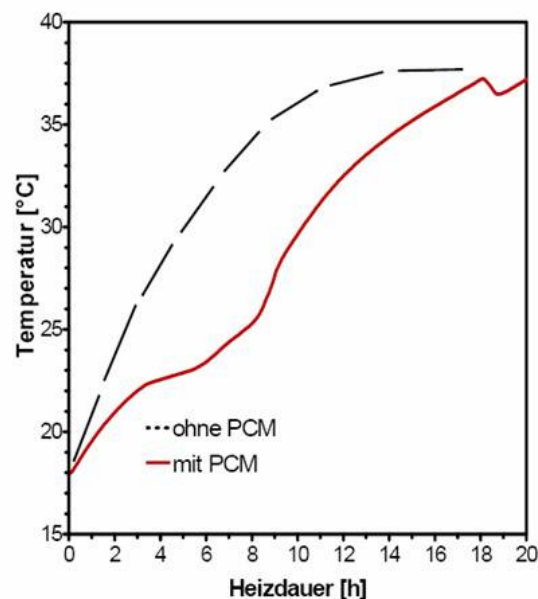
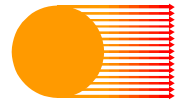


Abbildung 0-1: Temperaturanstieg der Raumlufttemperatur mit und ohne PCM.

Durch eine längere Verschlusszeit der Lüftungsklappen kann ein im Mittel höherer  $\text{CO}_2$ -Gehalt eingestellt werden, außerdem werden die Zeitspannen, in denen Schädlinge ins Gewächshaus eindringen, verkürzt. Im Sommer bzw. in den Übergangsjahreszeiten kann unter Umständen ganz auf eine Heizung verzichtet werden, was sich in einer Betriebsstundeneinsparung der Heizungsanlagen und damit einer längeren Lebensdauer niederschlägt. Bei Gewächshäusern ohne Winternutzung kann bei entsprechender Auslegung auf eine Heizung ganz verzichtet werden.

Eine Umsetzung der Studie in die Praxis ist technisch auf jeden Fall möglich, verspricht energetische Vorteile gegenüber der bisherigen Bau- und Betriebsweise und hat darüber hinaus einen Pilotcharakter. Eine kleine Versuchsanlage mit 500 kg Paraffin inkl. Verkapselung würde für eine Kabine ca. 10.000 € kosten. Dabei bieten sich die äußeren Kabinen (z.B. Kabine 10.1) an, weil dort der Heizenergieverbrauch höher und das Temperaturverhalten ausgeprägter als in der mittleren Kabine ist. Für eine Ausführungsplanung sind noch weitere Simulationen nötig, um den komplexen Betrieb des Gewächshauses genauer abzubilden. Dabei sind insbesondere die Temperaturschichtung, die Wirkungsweise des Energieschirms sowie der Lüftungsklappen genau im Modell abzubilden, um eine Optimierung der Speichereffizienz zu erzielen. Unabhängig davon wurden energetische Optimierungspotentiale bei der Analyse des Gewächshauses festgestellt (Reduzierung der Transmissionswärmeverluste).



# 1 Einleitung

Ganzjährige genutzte Gewächshäuser haben einen hohen Energieverbrauch, was sowohl energetisch als auch ökonomisch ein Problem darstellt. Häufig folgt im täglichen Betrieb auf den Heizfall direkt eine Überhitzung über die Optimaltemperatur, die bisher durch Lüftung des Gewächshauses reduziert werden kann. Oft muss dann im weiteren Tagesverlauf bzw. in der Nacht wieder geheizt werden. Dieser Tagesgang verspricht eine gute Anwendungsmöglichkeit von Latentwärmespeichern, so genannten PCMs (Phase Change Materials). Diese Speichersysteme sind in der Lage, oberhalb ihrer Schmelztemperatur überschüssige Wärmemengen aufzunehmen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder an das inzwischen abgekühlte Gewächshaus abzugeben. Dadurch können der Heizenergieverbrauch und damit die Betriebskosten reduziert werden, die Raumtemperatur länger im Bereich der optimalen Temperatur gehalten werden sowie die Lüftungsdauer reduziert werden. Vor allem bei hohen Außentemperaturen ist eine ausreichende Kühlung nur durch Lüftung nicht möglich. Durch den Einsatz von PCM kann dagegen die Raumtemperatur unterhalb der Außentemperatur gehalten werden und die eingespeicherte Wärme z.B. nachts an die Außenluft abgegeben werden.

Ziel des Forschungsprojekts ist es, die Möglichkeiten des Einsatzes von Latentwärmespeichern in Gewächshäusern anhand von Simulationen beschreiben zu können und das energetische und wirtschaftliche Einsparpotential zu beurteilen.

## 1.1 Objektkurzbeschreibung

Die Pillnitzer Versuchsgewächshäuser liegen am südöstlichen Stadtrand von Dresden in unmittelbarer Nähe der Elbe. Die untersuchten Gewächshäuser 10 und 11 sind baugleich und umfassen mit einer Länge von 46,4 m und einer Breite von 12,85 m eine Bruttogrundfläche von 596 m<sup>2</sup>. Die Häuser sind als Deutsche Normgewächshäuser in Einzelschiffbauweise erstellt worden und in jeweils drei Kabinen unterteilt, die unterschiedlich genutzt werden können.

Die Kabinen werden hauptsächlich durch eine Untertischheizung beheizt. Weiterhin können Konvektoren an den Steh- und Giebelseiten sowie eine Rohrheizung in Traufenhöhe zugeschaltet werden. Die Belüftung erfolgt über zweiseitige Firstklappen sowie Klappen in der Stehwand.

Ein trapezförmig angeordneter Energieschirm aus Acryl schützt die Pflanzen vor direkter Sonneneinstrahlung und verringert in der Nacht die starke Auskühlung des Gewächshauses. Die Steuerung erfolgt entweder über Außenhelligkeit (z.B. Sonnenauf- bzw. Untergang) oder Uhrzeit. Zusätzlich kann die Nachtphase der Kulturpflanzen verlängert werden, indem ein zusätzlicher Verdunkelungsschirm zugezogen wird, was zu einer weiteren Heizeneinsparung führt.

## 1.2 Problemstellung

Gerade in den Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst führen die schon starken Globalstrahlungswerte dazu, dass sich das Gewächshaus im Tagesverlauf stark aufgeheizt. In der Folge müssen die Lüftungsklappen geöffnet werden, sodass sich die Optimaltemperatur wieder einstellen kann. In der Nacht muss hingegen noch mit sehr geringen Temperaturen gerechnet werden, was z. T. einen hohen Heizenergieverbrauch nach sich zieht (siehe Abb. 1-1).

### Kabine 11-2: Weihnachtssterne 2006

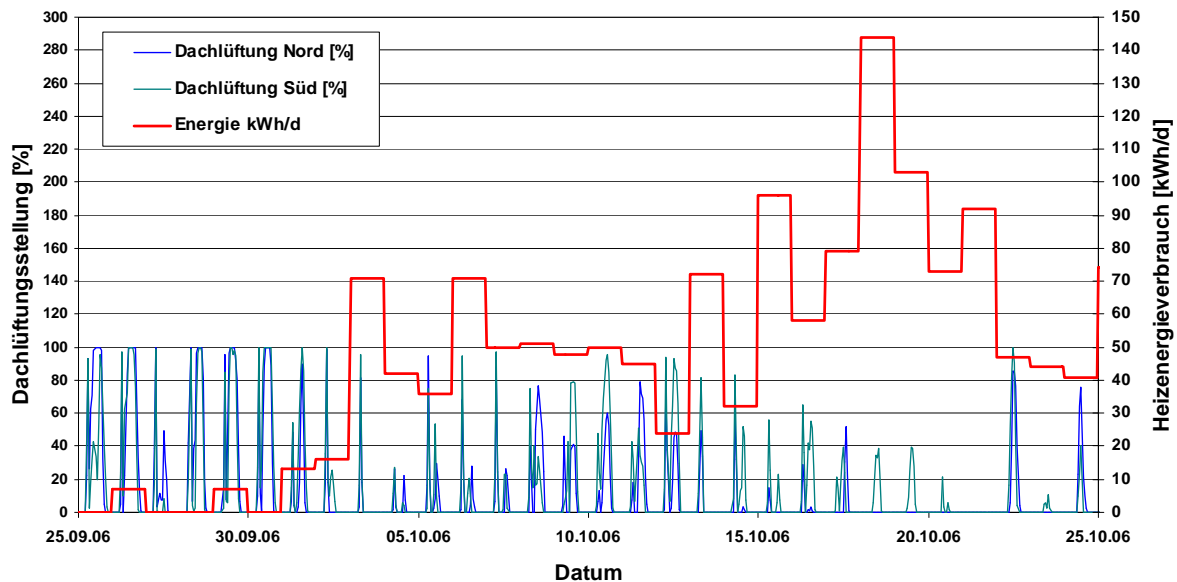


Abbildung 1-1: Auswertung von Messdaten zur Heizenergie und Lüftung in Kabine 11-2. In dem dargestellten Zeitraum wurde fast jeden Tag geheizt und durch Lüftung gekühlt.

Latentwärmespeicher können die überschüssige Energie im Tagesverlauf speichern und in der Nacht wieder an den Raum oder die Außenluft abgeben.

### 1.3 Arbeitsprogramm

Die Beauftragung des ZAE Bayern mit der Erstellung einer Simulation der Pillnitzer Gewächshäuser 10 bzw. 11 im Hinblick auf den Einsatz von Latentwärmespeicher beinhaltet folgende Arbeitpunkte:

- Aufnahme, Sichtung und Aufbereitung der von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft zur Verfügung gestellten Daten
- Auswahl geeigneter PCM-Materialien für einen definierten Temperaturbereich und Dimensionierung für die entsprechenden Energiemengen. Beschreibung von typischen Stoffeigenschaften im Hinblick auf den Einsatz
- Dynamische Simulation des Temperatur- und Energieverhaltens in den Pillnitzer Gewächshäusern auf Grundlage der Optimal- und Solltemperaturen für die Kulturpflanzen
- Vorschläge zur Dimensionierung und Einbindung von PCM in das Gesamtkonzept
- Abschätzung der energetischen Potentiale und wirtschaftliche Bewertung der PCM-Einbindung.
- Schriftliche Zusammenfassung und Präsentation der Ergebnisse

## 1.4 Vorhandenes Datenmaterial

Zur Verfügung standen folgende Unterlagen:

- Fotos der Gewächshäuser
- Pläne (Grundrisse und Gebäudeschnitte) der Gewächshäuser
- Angaben zu Bauteilen und Bauteil-U-Werten
- Sollwert-Angaben zu den verwendeten Kulturen
- Messdaten zum lokalen Klima (02/2004-10/2006)
- Abschnittsweise Messdaten zu Temperaturen, Luftfeuchte, Helligkeit, Wärmeverbrauch, Wasserverbrauch und MSR
- Technische Unterlagen zu Energieschirm und Regeltechnik

## 2 Bestandsaufnahme und Auswertung

Zunächst wurden die von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft zur Verfügung gestellten Unterlagen zu Gebäudegeometrie und –Aufbau des Gewächshauses 11 ausgewertet.

Weiterhin wurden aus Kurzbeschreibungen und Messdaten Szenarien für die klimatischen Komfortanforderungen verschiedener Kulturen und Kulturfolgen herausgearbeitet.

### 2.1 Gebäudegeometrie

In Tabelle 2-1 sind für die energetische Simulation wichtige Gebäudeparameter für das vollständige Gewächshaus 11 zusammengefasst.

**Tabelle 2-1: Ermittelte und berechnete Gebäudeparameter für Gewächshaus 11.**

<b>Lage</b>	
Dresden Pillnitz	51,00° nördl. Breite, 13,86° westl. Länge
Ausrichtung	Längsachse WNW - OSO
<b>Geometrie</b>	
Breite	12,85 m
Länge	46,40 m
Höhe Stehwand	2,92 m
Höhe First	6,00 m
Dachneigung	26,5°
Bruttogrundfläche	596,24 m <sup>2</sup>
Bruttoquerschnittsfläche	56,55 m <sup>2</sup>
Thermisches Bruttovolumen V	2623,86 m <sup>3</sup>
Thermische Hüllfläche A	1606,54 m <sup>2</sup>
A/V-Verhältnis	0,61 1/m
<b>Bauteile</b>	
Bauteilaufbau Verglasung Stehwand	Doppelverglasung $U_G = 4,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g = 0,87$
Bauteilaufbau Verglasung Dach	Gartenblankglas $U_G = 7,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $g = 0,90$
Bauteilaufbau Rahmen	Profilrahmen $U_F = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
Rahmenanteil Fensterfläche	18,3 %
Bauteilaufbau Sockel	Beton-Fertigteile $U = 3,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
Bauteilaufbau Bodenplatte	$U = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die Gebäudehülle hat wesentlichen Einfluss auf Transmissionswärmeverluste, Infiltration und die solaren Gewinne. Die flächige Zusammensetzung ist in Abb. 2-1 zu sehen, die Gewichtung der Bauteile nach Transmission ist in Abb. 2-2 zu erkennen. Dabei zeigt sich, dass die Vorhersagegenauigkeit vor allem vom U-Wert der Dachverglasung abhängt.

Hüllflächen Gewächshaus 11 [m<sup>2</sup>]

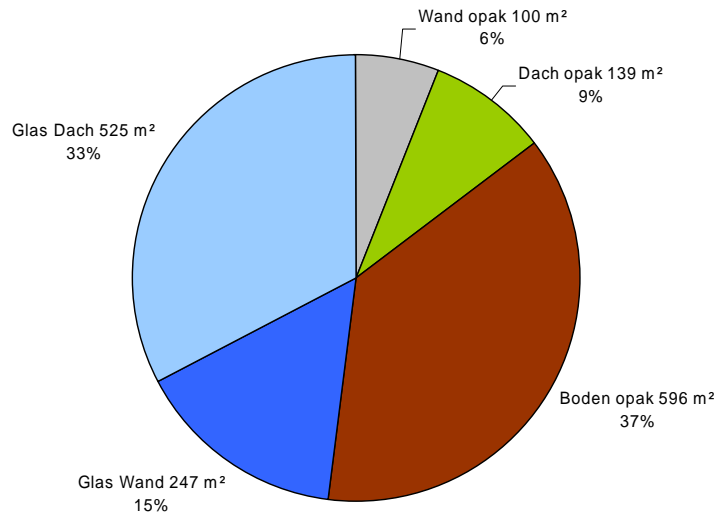


Abbildung 2-1: Zusammensetzung der thermischen Hüllfläche von 1606,5 m<sup>2</sup> nach Bauteilflächen.

Transmissionswärmeverlust  
Gewächshaus 11 [kW]

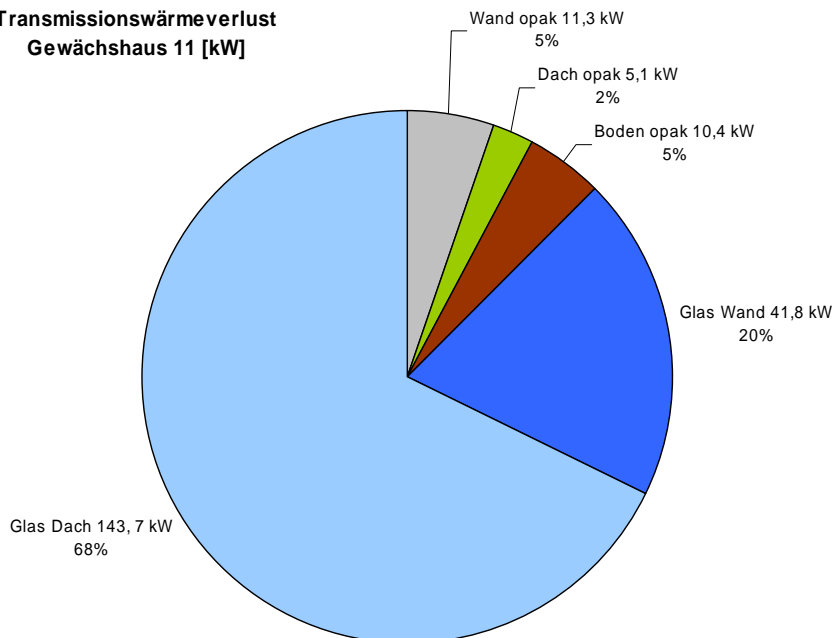


Abbildung 2-2: Verteilung des Transmissionswärmeverlustes der thermischen Hüllfläche von 212 kW bei  $T_{Raum} = 20^{\circ}C$ ,  $T_{Umgebung} = -16^{\circ}C$ .



## 2.2 Gebäudenutzung und Komfortanforderungen

Im Laufe eines Jahre werden verschiedene Kulturpflanzen in den Gewächshäusern angebaut, deren Komfortanforderungen sich unterscheiden. Die zeitliche Abfolge und die dazugehörigen Temperaturanforderungen sind in Tabelle 2-2 aufgelistet.

Tabelle 2-2: Angaben zu Anbauzeiten und Temperaturanforderungen der verwendeten Kulturen.

KW	Kulturpflanzen	Optimal- temperatur [°C]	Heizungs- sollwert Tag/Nacht [°C]	Lüftungs- sollwert Tag/Nacht [°C]
<b>Hauptkulturen</b>				
09 - 12	Beet- und Balkonpflanzen	14 - 18	18 / 18	21 / 21
13 - 20	Beet- und Balkonpflanzen	14 - 18	16 / 14	18 / 16
25 - 48	Alpenveilchen	18 - 20	16 / 14	19 / 17
29 - 35	Weihnachtssterne	19 - 22	20 / 20	23 / 23
36 - 41	Weihnachtssterne	19 - 22	18 / 18 (*)	21 / 21 (*)
42 - 49	Weihnachtssterne	19 - 22	18 / 18	21 / 21
<b>Optional</b>				
20 - 08	Schnittalpenveilchen	(16) 18 - 20	16 / 16	19 / 19
50	Frühjahrsblüher	20	18 / 18	22 / 22
51 - 08	Frühjahrsblüher	12	10 / 10	14 / 14

(\*) cool morning Absenkung

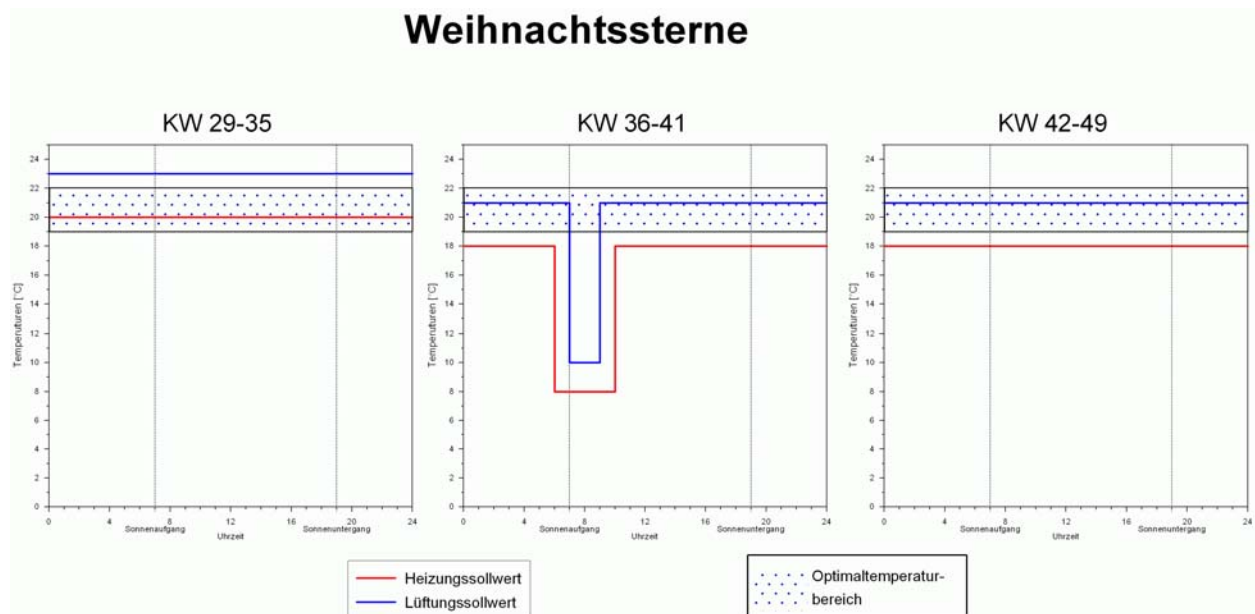


Abbildung 2-3: Zeitlicher Ablauf (Tageszyklen innerhalb definierter Kalenderwochen) für die Temperaturanforderungen (Optimaltemperaturen) und die Sollwertvorgaben für Heizung und Lüftung beim Anbau von Weihnachtssternen (Poinsettien). Als Besonderheit ist hier der cool-morning-Betrieb zu sehen.

### 3 Gebäudesimulation

Um eine Aussage über den Heiz- und Kühlbedarf verschiedener Szenarien in Form von zeitlich aufgelösten Lastkurven zu bekommen, wurden thermische Gebäudesimulationen mit dem Programm TRNSYS durchgeführt [TRNSYS, 2000]. Das Gebäudemodell wurde mit dem Programm TRNSYS<sup>1</sup> in der Version 15.1 und dem Präprozessor PreBid, Version 5.0.8, erstellt. Die geographische Position für den Sonnenstand wurde zunächst mit 51,05° nördlicher Breite und 13,73° östlicher Länge gerechnet (der MEZ-Shift<sup>2</sup> beträgt -1,27°). Im Modell fand die Sommerzeit keine besondere Berücksichtigung.

Das Gebäudemodell ist in drei Kabinenzonen unterteilt und im Gegenuhrzeigersinn um 30° gedreht, d.h. die Nordfassaden zeigen nach NNW. Für die Hüllflächen wurden entsprechend 4 Himmelsrichtungen angelegt.

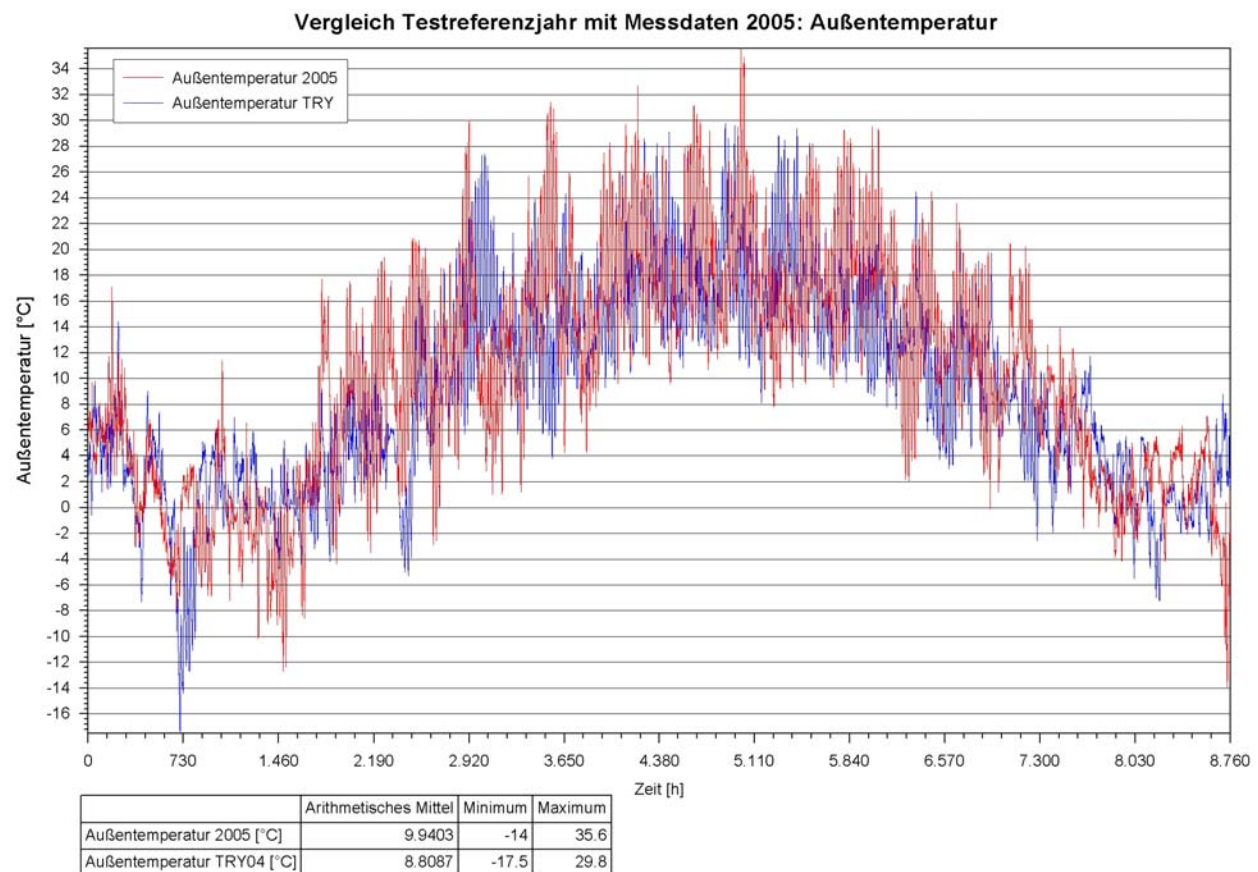
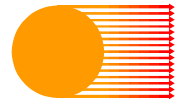


Abbildung 3-1: Jahresgang der Außenlufttemperatur aus den Stundenwerten des verwendeten Klimadatensatzes und den 2005 gemessenen Temperaturen.

<sup>1</sup> TRaNsient SYstem Simulation program: Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin - Madison, bzw. in Deutschland: TRANS-SOLAR Energietechnik GmbH/Stuttgart

<sup>2</sup> Ortszeitdifferenz zur mitteleuropäischen Zeitzone



Für den Klimadatenatz wurde das für den Raum Dresden gültige Testreferenzjahr TRY04<sup>3</sup> in der aktuellen Fassung verwendet. Die gemessenen Strahlungs- und Temperaturwerte der letzten Jahre liegen im Mittel höher, in Abb. 3-1 ist hierzu der Jahresverlauf der Umgebungslufttemperatur der Messung 2005 und des Testreferenzjahres zu sehen. Die zeitliche Auflösung der Simulation und des Klimadatenatzes beträgt eine Stunde, der jeweilige Betrachtungszeitraum bis zu einem Jahr ( $1a = 8760$  h).

Zur Ermittlung des Jahresheizwärme- und Kühlbedarfs wurden dynamische Simulationen durchgeführt, die das Gebäude mit seiner Gebäudetechnik und Regelstrategie abbilden. Hierzu zählen auch Luftwechsel, Nachtlüftung, Heizungssystem, Nachtabsenkung und der Einsatz von PCM-Speichern. Verschattungseinrichtungen und Energieschirm wurden bisher nicht berücksichtigt. Aus den Simulationen erhält man u. a. Jahresdauerlinien, Jahres- und Tagesbilanzen.

### 3.1 Berechnete Varianten

Mit dem Modell konnten verschiedene Szenarien berechnet werden. Dabei wurden die Klimadaten und vor allem die Komfortanforderungen variiert.

Für den Klimadatenatz wurden folgende Varianten eingesetzt:

- Testreferenzjahr TRY04
- gemessene und interpretierte Daten des Jahres 2005 (Klima 2005)
- gemessene und interpretierte Daten 6.11.2005 – 5.11.2006 (Klima 2006)

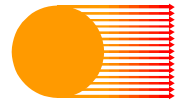
Für die Komfortanforderungen wurden Varianten für ganzjährige Nutzung des Gewächshauses mit Mischkulturfolgen und Monokulturen entwickelt. Diese sind, ganzjährig betrachtet, nicht mit dem realen Einsatz identisch, da keine Nutzungspausen enthalten sind. Weiterhin konnten bei Kulturabfolgen Überschneidungszeiten nur einer Kultur zugeordnet werden.

Folgende ganzjährige Fälle wurden eingesetzt:

- PCM15 = Monokultur 16-14 °C
- PCM18 = Monokultur 19-17 °C
- PCM19 = Monokultur 20-18 °C (z.B. Alpenveilchen/Schnittalpenveilchen)
- PCM20 = Monokultur 21-19 °C (z.B. Weihnachtssterne)
- PCM21 = Monokultur 22-20 °C
- Mix = Mischkulturabfolge
- AlpV = Monokultur Alpenveilchen mit Standardeinstellungen
- AlpV2006 = Monokultur Alpenveilchen mit Heizungssollwert 14°C/16°C

Die genaue Parametrierung der Mischkulturabfolge ist in Tabelle 3-1 und in Abbildung 3-2 beschrieben.

<sup>3</sup> Deutscher Wetterdienst DWD, aktuelle Version 2004



Für die Abbildung der Temperaturverhältnisse wurden Regeleinstellungen verwendet, für die energetischen Betrachtungen wurden Heiz- und Kühlgrenztemperaturen an die Optimaltemperaturbänder angepasst.

**Tabelle 3-1: Simulierte ganzjährige Mischkulturabfolge. Angaben zu Zeiten und Temperaturanforderungen.**

KW	Zeitabschnitt [h]	entspr. Kulturpflanzen	Optimaltemperatur [°C]	Heizungssollwert [°C] Tag/Nacht	Lüftungssollwert [°C] Tag/Nacht
01 - 08	1 - 1344	Frühjahrsblüher	12	10 / 10	14 / 14
09 - 12	1345 - 2016	Beet- und Balkonpflanzen	14 - 18	18 / 18	21 / 21
13 - 20	2017 - 3360	Beet- und Balkonpflanzen	14 - 18	16 / 14	18 / 16
21 - 24	3361 - 4032	Schnittalpenveilchen	18 - 20	16 / 16	19 / 19
25 - 28	4033 - 4872	Alpenveilchen	18 - 20	16 / 14	19 / 17
29 - 35	4873 - 5880	Weihnachtssterne	19 - 22	20 / 20	23 / 23
36 - 41	5881 - 6888	Weihnachtssterne (cool morning)	19 - 22 9-10	18 / 18 8	21 / 21 10
42 - 49	6889 - 8232	Weihnachtssterne	19 - 22	18 / 18	21 / 21
50	8233 - 8760	Frühjahrsblüher	20	18 / 18	22 / 22
51 - 52	8233 - 8760	Frühjahrsblüher	12	10 / 10	14 / 14

Folgende ganzjährige Simulationen wurden für energetische Betrachtungen durchgeführt:

- PCM15 mit Testreferenzjahr, Optimaltemperaturband
- PCM18 mit Testreferenzjahr, Optimaltemperaturband
- PCM19 mit Testreferenzjahr, Optimaltemperaturband
- PCM20 mit Testreferenzjahr, Optimaltemperaturband
- PCM21 mit Testreferenzjahr, Optimaltemperaturband
- Mix mit Testreferenzjahr, Optimaltemperaturband

Folgende ganzjährige Simulationen wurden für Temperatur- und Vergleichsbetrachtungen durchgeführt:

- Mix mit Testreferenzjahr, Heizungssollwerte, Minimallüftung
- PCM15 mit Klima2005, Heizung 14°C, Kühlung 16°C
- AlpV mit Testreferenzjahr, Heizungssollwerte, Minimallüftung
- AlpV2006 mit Klima2006, Heizungssollwerte, Lüftungssollwerte

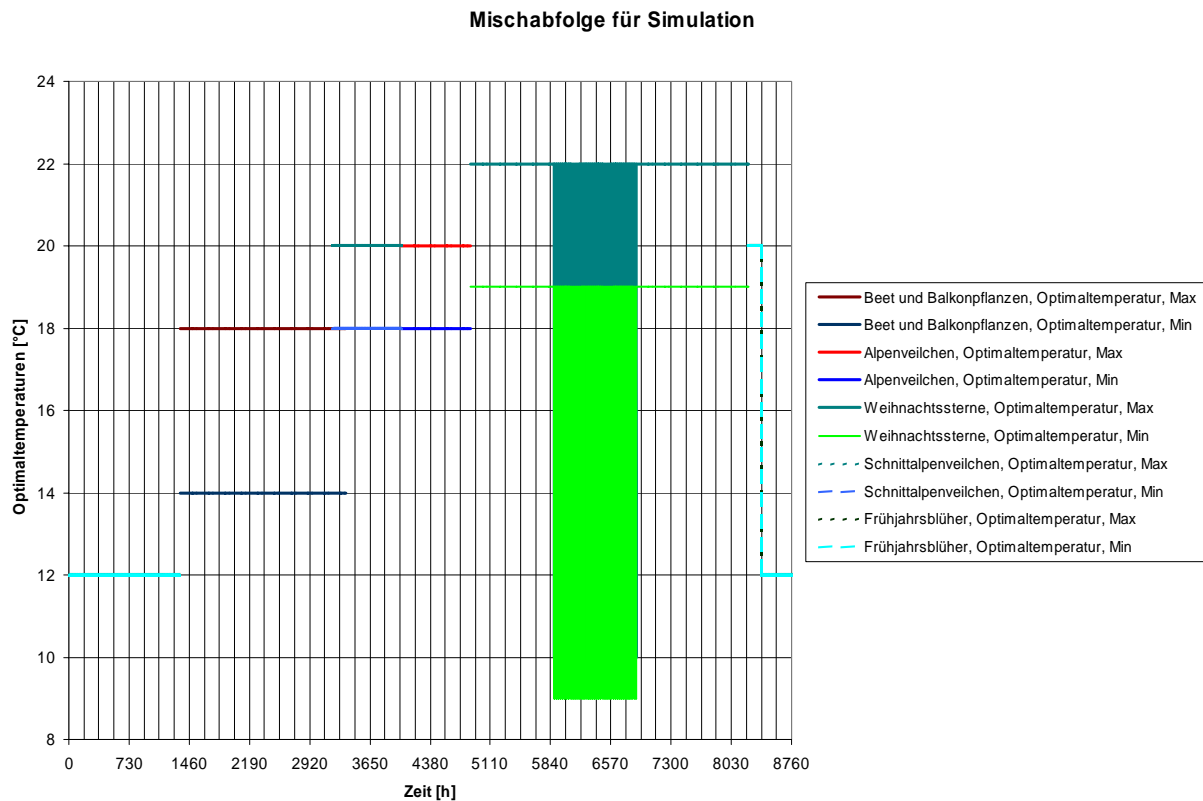


Abbildung 3-2: Jahresgang der Optimaltemperaturen für die simulierte ganzjährige Mischkulturabfolge.

Die vergleichenden Betrachtungen zwischen Modell und Messdaten beschränken sich örtlich und zeitlich auf die in Abb. 3-3 angegebenen Abschnitte und Komfortanforderungen. Diese sind jedoch geeignet, Einflüsse von Klima, Energieschirm, Verschattung, Lüftung einzustufen und eine Bewertung der Temperaturmessungen vorzunehmen.

### LfL Gewächshaus: Zeitliche und räumliche Verteilung der Messdaten

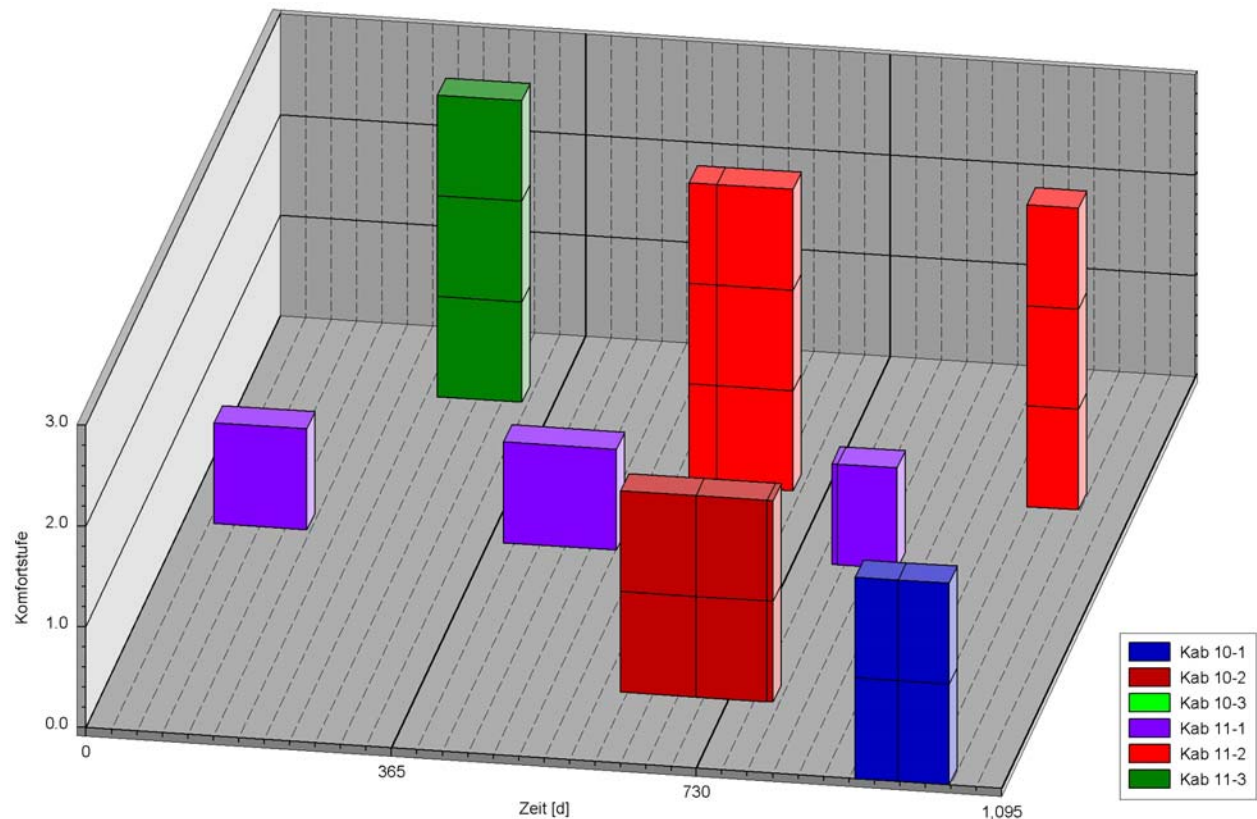


Abbildung 3-3: Übersicht zu den mit den Simulationen verglichenen Messdaten. Die x-Achse zeigt den Messzeitabschnitt im Zeitraum 2004-2006 an, die y-Achse die Komfortstufe (Stufe 1 = Beet- und Balkonpflanzen, Stufe 2 = Alpenveilchen, Stufe 3 = Weihnachtssterne). Tiefe und Farbe zeigen die Zone bzw. Kabine.

## 3.2 Simulationsergebnisse

Bei den vergleichenden Betrachtungen mit den interpolierten Klimadaten von 2005 und 2006 konnte die Aussagekraft des Modells und die Übertragbarkeit auf die Messdaten überprüft werden.

In Abb. 3-4 ist exemplarisch die berechnete Zonentemperatur der 20 cm über den Pflanzen gemessenen Temperatur gegenübergestellt. Dabei zeigt letztere eine höhere Dynamik und erwartungsgemäß um 1 K höhere Mitteltemperaturen. Dies resultiert u. a. aus der Tatsache, dass es sich um eine lokale Temperatur nahe der bestrahlten Oberfläche bzw. der beheizten Tische handelt.

In Abb. 3-5 wird der Heizenergiebedarf ohne Energieschirm mit dem Heizenergieverbrauch mit Energieschirm verglichen. Der signifikant höhere Heizenergiebedarf ist jedoch nicht nur auf den Energieschirm zurückzuführen, im Modell werden die Temperaturanforderungen strikt eingehalten, während in der Praxis aus Energie-Einspargründen dies nicht der Fall ist.

Für die Bewertung bezüglich des Einsatzes von PCM sind hier gegenüber den verwendeten Referenzfällen zusätzliche Potentiale aus der gemessenen Dynamik möglich.

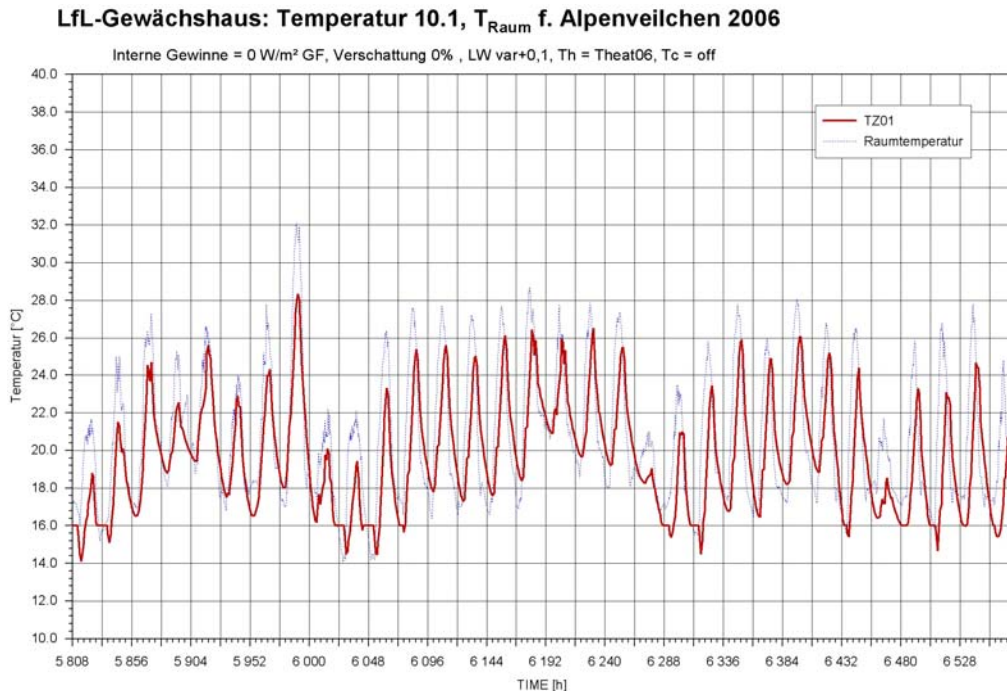


Abbildung 3-4: Direkter Vergleich der simulierten Raumlufttemperatur (rot) und der gemessenen Temperatur 20 cm über den Pflanzen (blau) in Kabine 10.1 bei nahezu gleichen klimatischen Randbedingungen (Klima 2006). Die gemessene Temperatur weist eine höhere Dynamik auf und liegt im Mittel um 1 K höher.

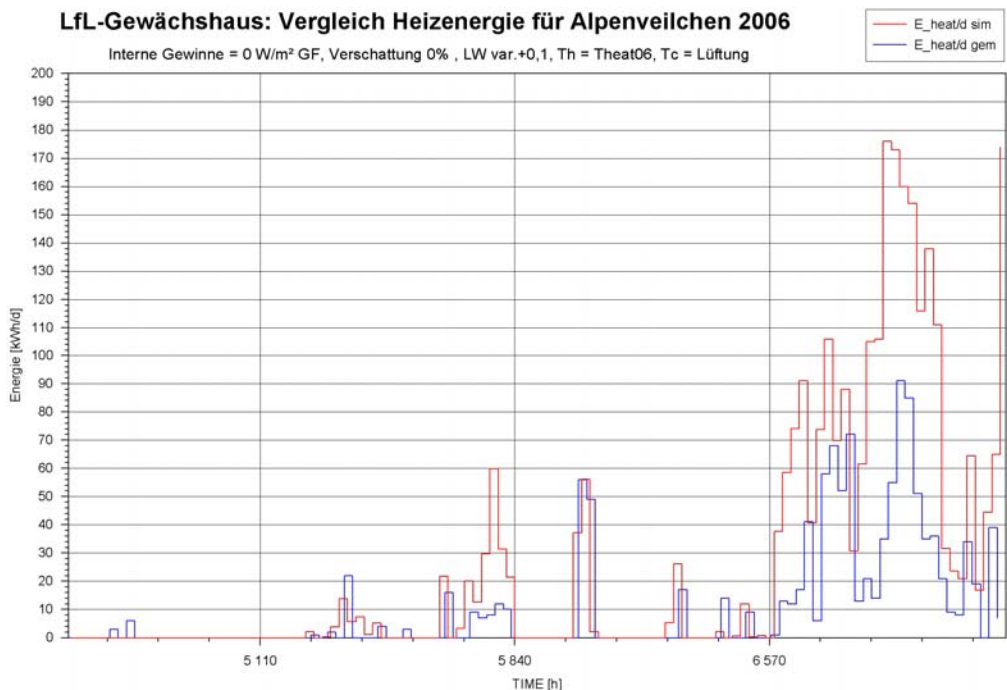


Abbildung 3-5: Direkter Vergleich des berechneten täglichen Heizenergiebedarfs ohne Energieschild (rot) und des gemessenen Wärmeverbrauches mit Energieschild (blau) in Kabine 10.1 bei nahezu gleichen klimatischen Randbedingungen (Klima 2006).

In Abb. 3-6 sind statistische Auswertungen der Temperaturen von verschiedenen Messabschnitten unterschiedlichen Simulationen gegenübergestellt. Die gemessenen Außentemperaturen liegen signifikant über dem Testreferenzjahr. Bei Simulationen mit angepasstem Klima zeigt sich, dass die 20 cm über den Pflanzen gemessene Lufttemperatur im Mittel 1 K über der Zonentemperatur liegt. In Abb. 3-7 sind analog statistische Auswertungen zu Globalstrahlung sowie Heizenergieverbrauch (mit Energieschirm) bzw. ermittelter Heizenergiebedarf (ohne Energieschirm) zu sehen. Während die Globalstrahlung im Jahresmittel 3,2% bis 9,3% über dem Testreferenzjahr liegt, ist der höhere Heizenergiebedarf gegenüber dem Verbrauch auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Die Messdaten beinhalten gegenüber den Referenzsimulationen:

- eine höhere Außentemperatur 2004-2006
- eine höhere Globalstrahlung 2004-2006
- Einsatz des Energieschirms
- erfüllen nicht immer die Temperaturanforderungen

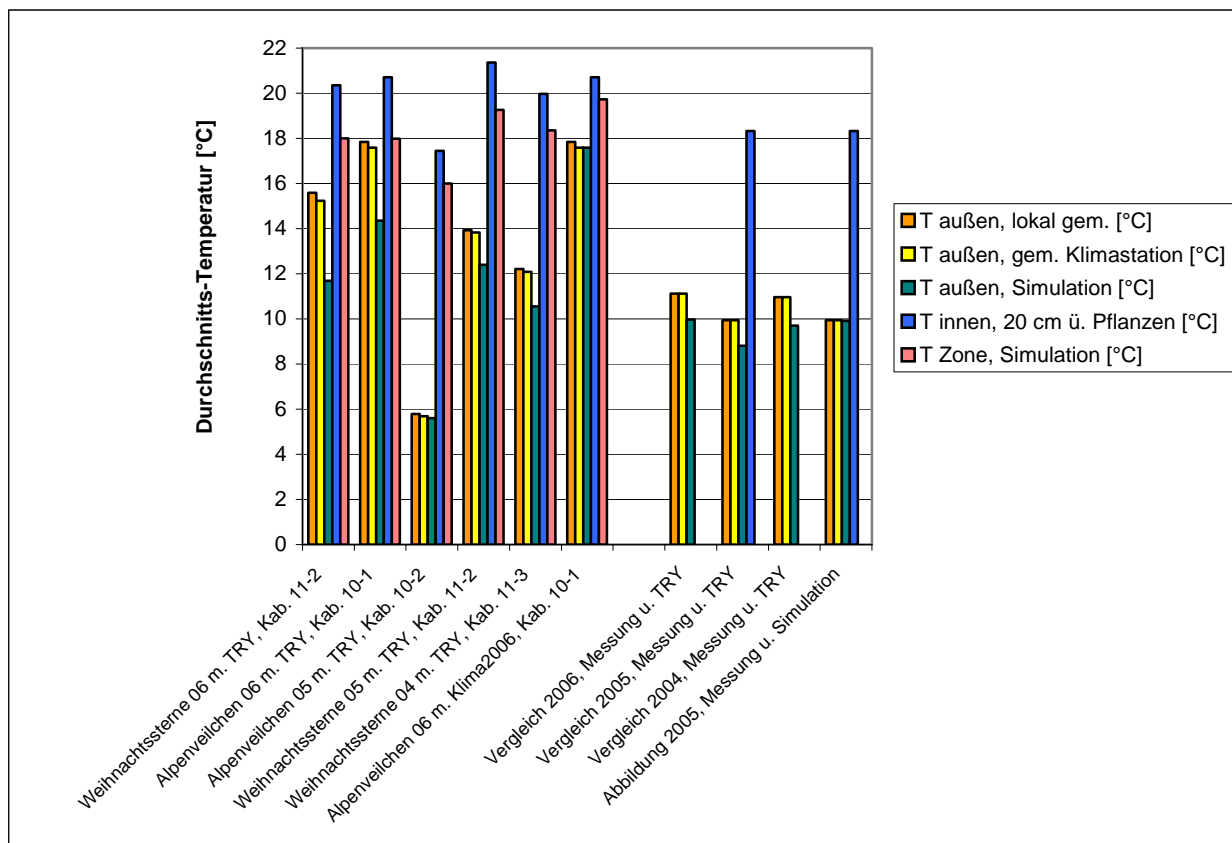


Abbildung 3-6: Vergleich der gemessenen und in der Simulation auftretenden Durchschnittstemperaturen (außen und innen) für ausgewählte Zeitabschnitte. Die gemessenen Außentemperaturen liegen häufig über dem Testreferenzjahr. Die simulierte Zonentemperatur liegt etwa 2 K unter der gemessenen Temperatur 20 cm über den Pflanzen. Davon ist etwa die Hälfte auf die höhere Globalstrahlung und Außentemperatur gegenüber dem Testreferenzjahr zurückzuführen.



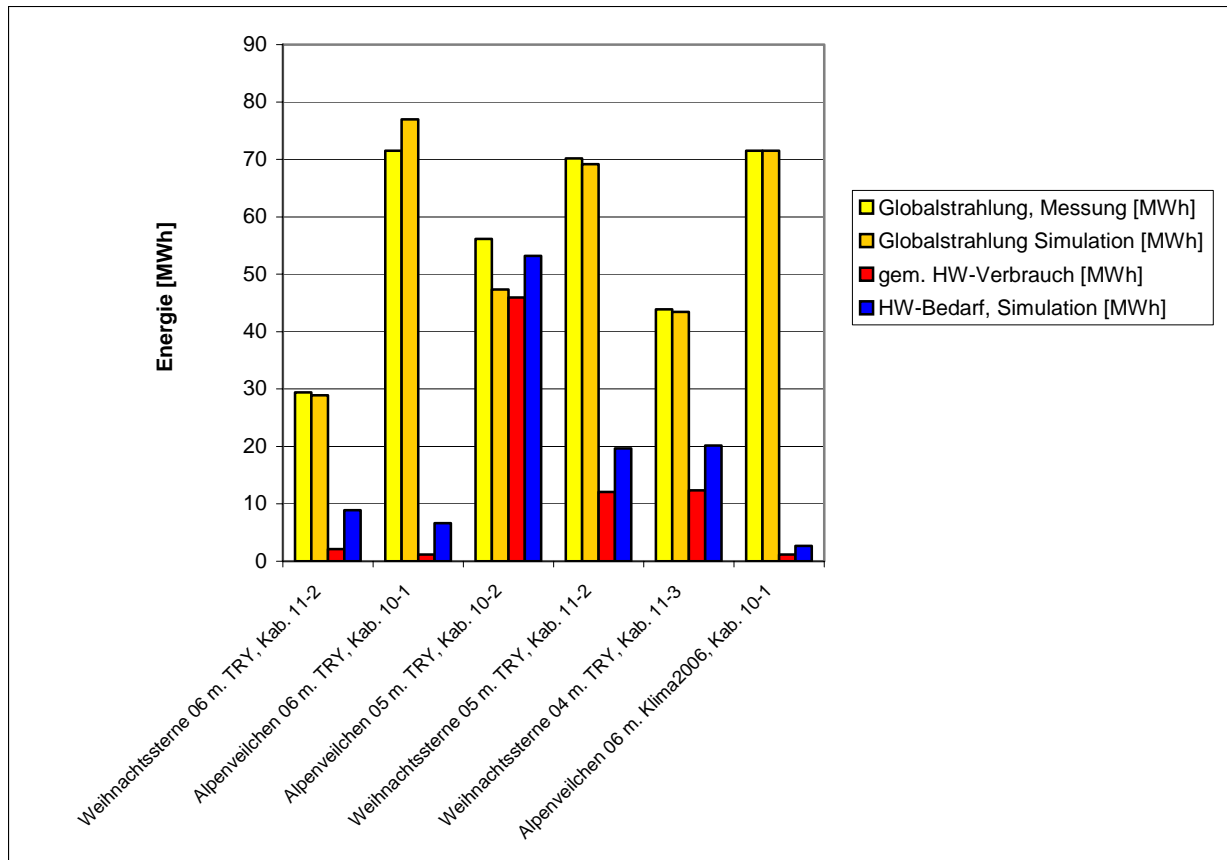


Abbildung 3-7: Vergleich der gemessenen und in der Simulation auftretenden Globalstrahlung sowie Heizenergieverbrauch mit Energieschirm bzw. ermittelter Heizenergiebedarf ohne Energieschirm für ausgewählte Zeitabschnitte. Die gemessene Globalstrahlung liegt häufig über dem Testreferenzjahr. Der Heizenergiebedarf liegt stets über dem Verbrauch.

Weiterhin kann die Lüftung nicht verglichen werden.

Für die Auswertung bezüglich des Einsatzes von PCM sind ausschließlich ganzjährige Referenzfälle mit dem Testreferenzjahr und Optimaltemperaturbändern verwendet worden. In Abb. 3-8 wird der Jahresheiz- und Restkühlbedarf bei minimaler Lüftung einer dieser Varianten mit der Mischkulturfolge sowie einer Variante mit niedrigen Optimaltemperaturen und dem interpolierten Klimadatenatz 2005 dargestellt. Die Mischkulturabfolge schneidet bezüglich der bisherigen Betriebsweise energetisch günstiger ab, die PCM15-Variante zeigt einen besonders hohen Restkühlbedarf. Beim Einsatz von PCM kann dieser jedoch zu einem großen Teil nur gegen Außenluft entspeichert werden, da zeitnah nur geringe Heizlasten auftreten.

Relevant für eine Reduzierung der Heizenergie ist die zeitnahe Entspeicherung in die Raumluft.

Daher wurden für die zeitnahe Speicherwirkung Tagessummen der Referenzvarianten gebildet. Exemplarisch sind in Abb. 3-9 die Tagessummen für Heiz- und Restkühlenergiebedarf der Variante PCM 18 dargestellt.

### LfL Gewächshaus 11: Jahresheiz- und Kühlbedarf

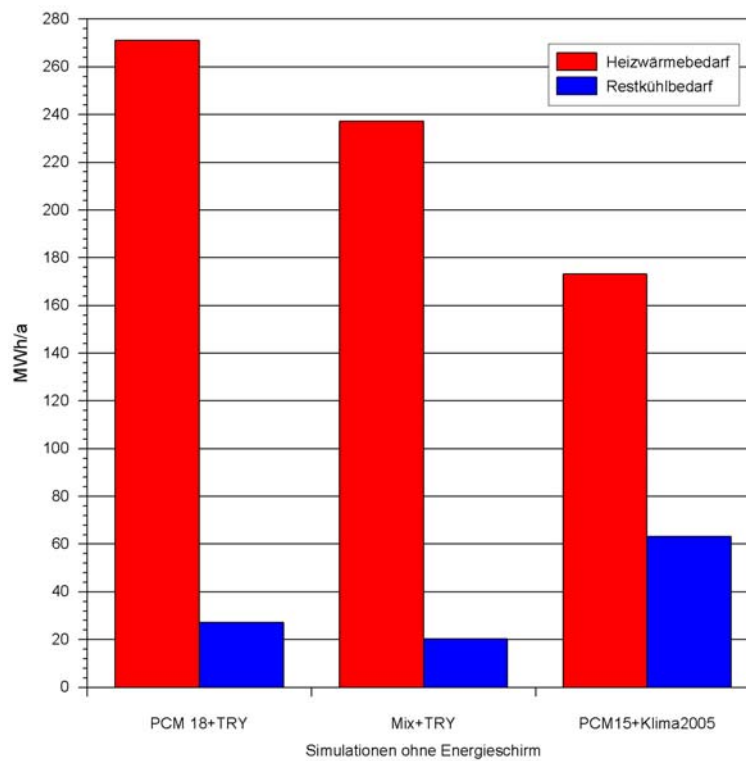


Abbildung 3-8: Simulierter Jahresheiz- und Restkühlbedarf ausgewählter Varianten mit ganzjährigem Betrieb (ohne Energieschirm, ohne Verschattung).

In Abbildung 3-10 sind zum Vergleich die Tagessummen der Variante PCM 15 (Optimaltemperaturen 14-16 °C) mit dem interpolierten Klimadatensatz 2005 dargestellt. Der höhere Restkühlbedarf kann nicht zeitnah zur Raumheizung eingesetzt werden.

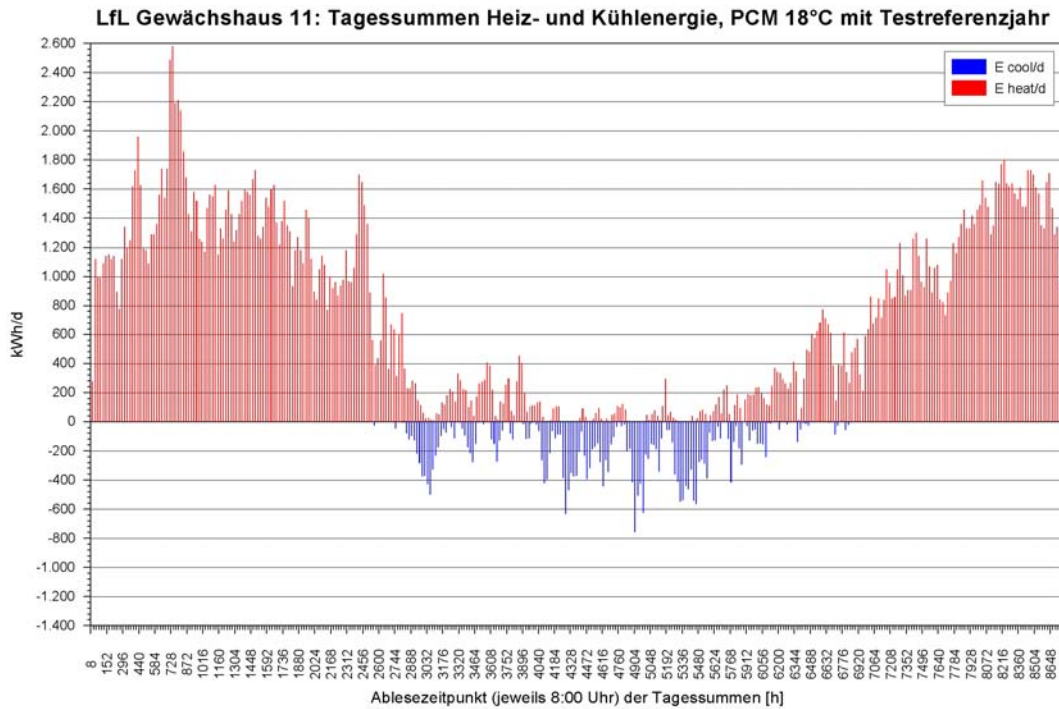


Abbildung 3-9: Tagessummen des ermittelten Heiz- und Restkühlbedarf der Variante PCM18 (Optimaltemperaturband 17-19 °C) bei ganzjährigem Betrieb mit dem Testreferenzjahr (Minimallüftung, ohne Energieschirm, ohne Verschattung).

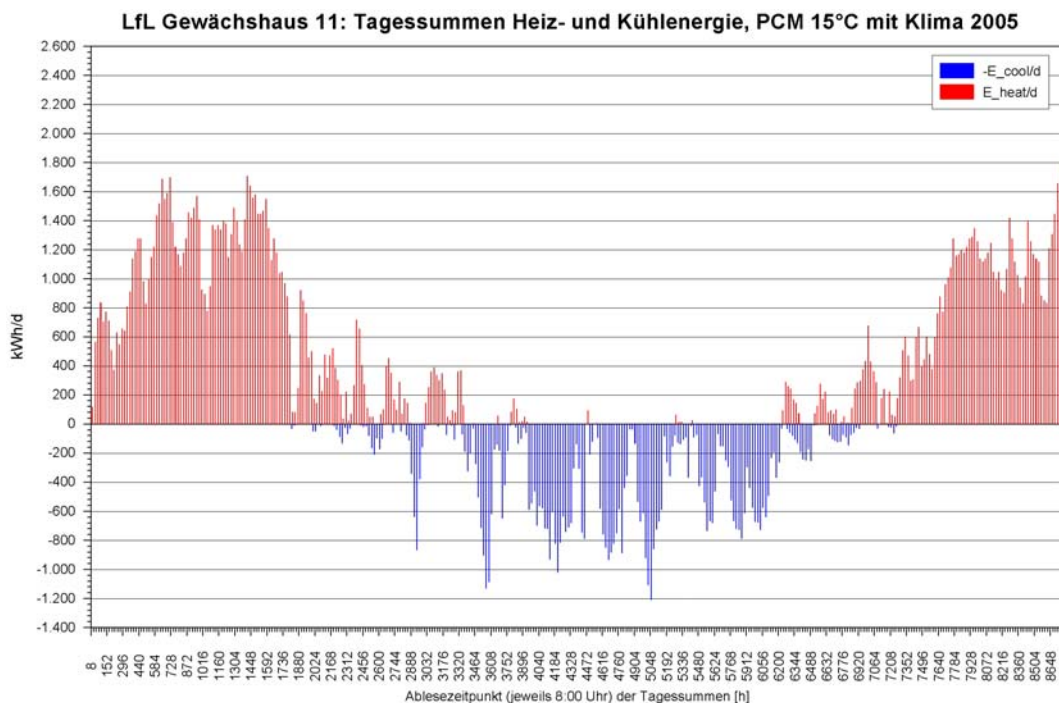


Abbildung 3-10: Tagessummen des ermittelten Heiz- und Restkühlbedarf der Variante PCM15 (Optimaltemperaturband 14-16 °C) bei ganzjährigem Betrieb mit dem Klima 2005 (Minimallüftung, ohne Energieschirm, ohne Verschattung).

## 4 Phase Change Materials

### 4.1 Auswahlkriterien

#### Physikalisch:

- **geeignete Temperatur des Phasenübergangs**
- **hohe Schmelzwärme (Enthalpie  $\Delta H$ )**
- **möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit**

Probleme durch geringe Wärmeleitfähigkeit des PCMs können durch Verwendung anderer Wärmetransportmechanismen wie Konvektion oder Zusatz von gut Wärme leitenden Materialien wie Metallspänen überwunden werden. In bestimmten Fällen, z. B. dem hier betrachteten Tetrapack-Kühler, spielt eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials keine Rolle.
- **reproduzierbarer Phasenübergang**

d.h. der Phasenübergang sollte immer gleich ablaufen. Phasenübergänge fest – flüssig werden bezüglich des Schmelzverhaltens in drei Klassen eingeteilt:

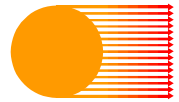
  - Kongruentes,
  - Semikongruentes und
  - Inkongruentes Schmelzen.

Bei kongruentem Schmelzen schmilzt das PCM bei einer bestimmten Temperatur ohne seine Zusammensetzung zu verändern. Ein Beispiel wären Reinstoffe wie Wasser.

Beim semikongruenten Schmelzen, z. B. bei vielen Salzhydraten, bilden sich beim Abkühlen bei einer bestimmten Temperatur eine wässrige Lösung des Salzes und ein festes, wasserärmeres Hydrat oder das feste, wasserfreie Salz. Durch die unterschiedlichen Dichten dieser Phasen setzt sich der Feststoff in der Flüssigkeit ab und bildet einen Niederschlag. Erhöht man nun die Temperatur wieder, erreicht die Löslichkeitskurve des Salzes in Wasser die ursprüngliche Zusammensetzung des Hydrats, so dass sich das übrige Salz in der Flüssigkeit lösen kann. Allerdings handelt es sich dabei um thermodynamische Gleichgewichte, die sich teils nur sehr langsam einstellen. Man erhält dabei wieder eine homogene flüssige Phase mit der Zusammensetzung zu Beginn.

Inkongruentes Schmelzen ist dem semikongruenten Schmelzen zunächst ähnlich. Wie bei semikongruentem Schmelzen zerfällt auch hier, bei einer bestimmten Temperatur, das Hydrat in eine wässrige Lösung des Salzes und ein wasserärmeres Salzhydrat bzw. wasserfreies Salz. Der Unterschied allerdings ist, dass auch bei anschließender Erhöhung der Temperatur die Löslichkeitskurve niemals die Zusammensetzung des Ausgangshydrates erreicht. Dies hat zur Folge, dass immer ein Rest Feststoff in der Lösung übrig bleibt, der sich, aufgrund der höheren Dichte, absetzt.

***Oft wird in der Literatur semikongruentes und inkongruentes Schmelzen unter dem Begriff „inkongruentes Schmelzen“ zusammengefasst.***



- **geringe Unterkühlung**

Viele PCM, vor allem Salzhydrate, unterkühlen, d. h. die Starttemperatur der Kristallisation liegt signifikant unterhalb des Schmelzpunkts. Ziel in den meisten Anwendungen ist jedoch, dass das PCM am Schmelzpunkt auch kristallisiert. Geeignete Maßnahmen um dies zu erreichen sind Kristallisationskeime, die zum PCM zugegeben werden oder bei Bedarf erzeugt werden. Zusätze können z. B. das PCM selbst im festen Zustand sein, sonstige Zusätze mit ähnlicher Kristallstruktur (Schmelzen meist selbst nur 10 – 20 °C oberhalb der Schmelztemperatur des PCMs), oder Verunreinigungen deren Wirkungsweise unbekannt ist. Zu beachten ist hierbei, dass die thermische Stabilität eines PCM oft nicht durch die Grundkomponente, sondern durch den Keimbildner beschränkt ist. Die Erzeugung von Kristallisationskeimen bei Bedarf kann, zumindest in einigen Fällen, durch mechanischen Clips (Taschenwärmer) durchgeführt werden.

**Technisch:**

- **geringer Dampfdruck**  
vor allem wegen der Stabilität der Verkapselung.
- **geringe Volumenänderung beim Phasenübergang**  
vor allem wegen der Stabilität der Verkapselung.
- **chemische und physikalische Stabilität des PCMs**  
zur Eigenstabilität
- **geringe Korrosivität gegen andere Materialien**  
vor allem wegen der Stabilität der Verkapselung, aber auch zur Sicherheit bei Leckage.

**Marktwirtschaftlich:**

- **geringer Preis**
- **Verfügbarkeit**
- **toxikologische Unbedenklichkeit**
- **Rezyklierbarkeit**

## 4.2 Materialklassen zur Latentwärmespeicherung und deren typische Eigenschaften

Da Eis mit einem Schmelzpunkt bei 0 °C natürlich vorkommt, war es das erste PCM das zur Kältespeicherung, vor allem vom Winter in den Sommer, verwendet wurde. Latentwärmespeicherung kann jedoch in einem wesentlich breiteren Temperaturbereich zur Anwendung kommen. Je nach Anwendung muss allerdings dazu ein Material mit geeigneter Temperatur des Phasenwechsels ausgewählt werden. Dabei werden je nach Temperaturbereich verschiedene Materialklassen eingesetzt (Abbildung 4-1).

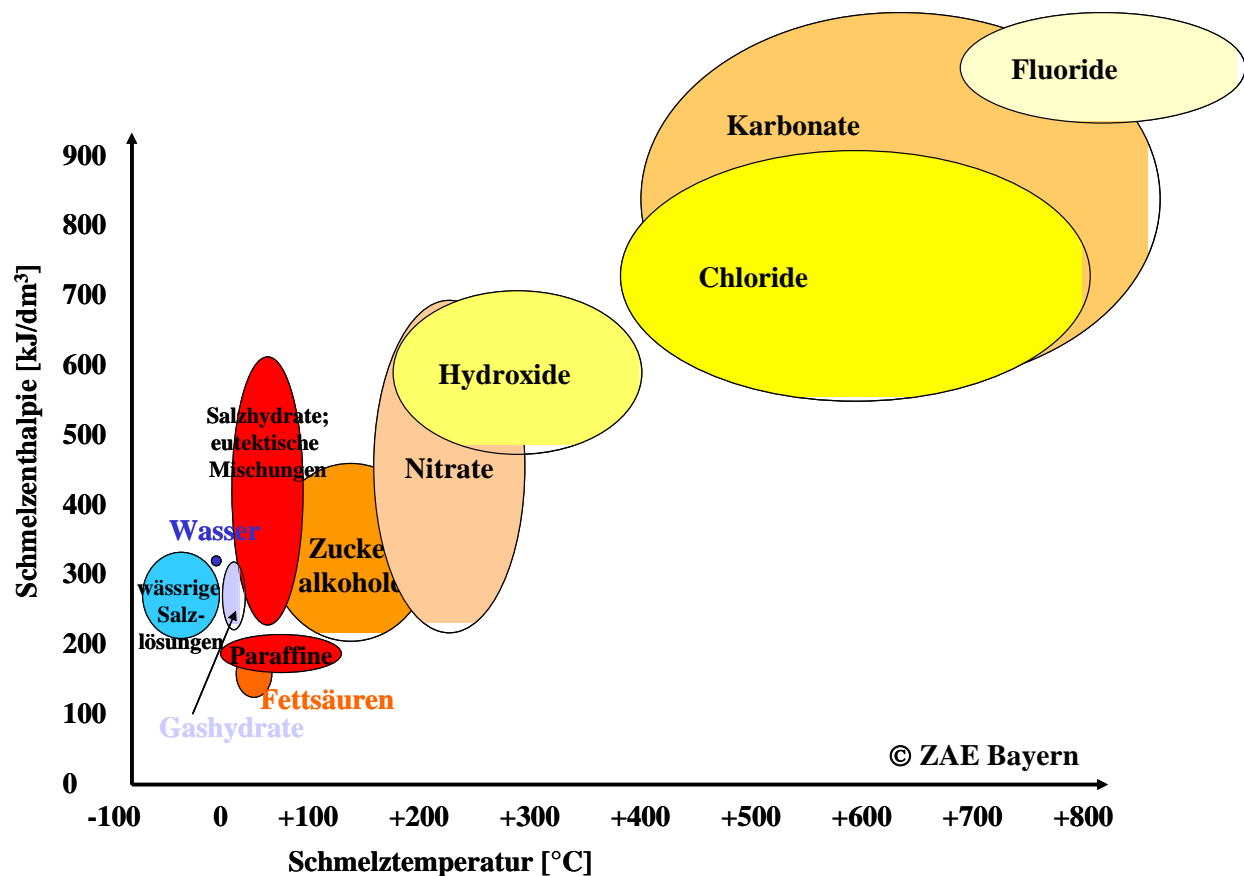
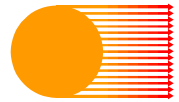


Abbildung 4-1: Materialklassen zur Latentwärmespeicherung und zugehörige, typische Temperaturbereiche.

### Salzhidrater

Für die Wärmespeicherung im Temperaturbereich von 5 °C bis etwa 130 °C werden Salzhidrater und eutektische Mischungen von Salzhidraten eingesetzt. Salzhidrater können als extreme Modifikation des Gitters des Wassers betrachtet werden. Aufgrund der Massenanteile kann man sie allerdings auch als Salze mit hohem Wassergehalt (Kristallwasser) betrachten. Salzhidrater sind feste Verbindungen nach der Formel  $M \cdot xH_2O$ , wobei  $M$  ein wasserfreies Salz darstellt, z. B.  $MgCl_2$ , und  $x$  die Anzahl der Wassermoleküle pro Salz-molekül ist.  $x$  ist meist eine ganze Zahl. Beispiele für Salzhidrater sind  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  und  $NaOH \cdot 3,5H_2O$ . Die Wassermoleküle solvatisie-



ren meist das Kation des Salzes, so dass  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  auch geschrieben werden kann als  $(\text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O})_2 + \text{Cl}_2^-$ . In einigen Fällen ist allerdings das Wasser an das Anion gebunden, wie es z. B. bei einigen Sulfaten vorkommt. Es kann verschiedene Hydratationsstufen der Ionen geben und es kann zusätzliches Wasser in Lücken des Kristallgitters eingebaut werden. Daher kann es mehrere Hydrate eines Salzes geben, wie z. B.  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ . Das zusätzliche Wasser ist nicht so stark gebunden und kann deshalb leichter aus dem Hydrat entfernt werden.

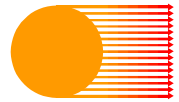
Typische Eigenschaften der Salzhydrate sind:

#### Physikalisch:

- **geeignete Temperatur des Phasenübergangs**  
Salzhydrate schmelzen meist in einem engen Temperaturbereich. Die Schmelztemperaturen liegen im Bereich 5 – 130 °C.
- **hohes  $\Delta H$**   
Salzhydrate besitzen aufgrund ihrer hohen Dichte vergleichsweise hohe Schmelzenthalpien pro Volumeneinheit.
- **möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit**  
Salzhydrate haben im Vergleich zu anderen PCM eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit. Dies verbessert den Wärmetransport in und aus dem Speicher.
- **reproduzierbarer Phasenübergang**  
Bei manchen Salzhydraten reduzieren Abscheidungen von niedrigeren Hydraten oder des wasserfreien Salzes, die sich aufgrund ihrer höheren Dichte abzusetzen, das zur Wärmespeicherung zur Verfügung stehende aktive Volumen. Dieses Problem kann in vielen Fällen durch Zugabe von Gelier- oder Verdickungsmitteln reduziert werden.
- **geringe Unterkühlung**  
Viele Salzhydrate neigen zu einer starken Unterkühlung, deshalb ist in den meisten Fällen die Zugabe eines Keimbildners erforderlich. Dessen Temperaturstabilität liegt oft nur wenige 10 K oberhalb der Schmelztemperatur des PCMs und beschränkt somit die maximale Einsatztemperatur.

#### Technisch:

- **geringer Dampfdruck**  
Salzhydrate haben einen relativ hohen Dampfdruck durch das in ihnen enthaltene Wasser. Bei den hier vorgesehenen Temperaturen ist dies eher unkritisch.
- **geringe Volumenänderung**  
Salzhydrate haben meist eine geringere Volumenänderung beim Phasenwechsel als andere PCM.  
  
Dafür sind sie oft sehr hart, was unter Umständen zu Beschädigungen am Wärmetauscher oder Behälter führen kann.

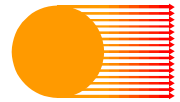


- **chemische und physikalische Stabilität des PCMs**  
Ist zum größten Teil gegeben. Einige Salze haben brandfördernde Eigenschaften, diese werden durch den hohen Wassergehalt verringert. Bei der Verkapselung von Salzhydraten ist darauf zu achten dass eine Änderung des Wassergehalts verhindert werden muss. Bei Einsatz von Kunststoffen als Verkapselungsmaterial ist dabei die Diffusionsdichtigkeit bzgl. Wasser zu beachten.
- **geringe Korrosivität gegen andere Materialien**  
Salzhydrate haben je nach Salz ein sehr unterschiedliches Korrosionsverhalten.

#### Marktwirtschaftlich:

- **geringer Preis**  
Salzhydrate können je nach Verfügbarkeit sehr preiswert sein.
- **Verfügbarkeit**  
Salzhydrate sind meist in großen Mengen verfügbar.
- **toxikologische Unbedenklichkeit**  
Salzhydrate können unter Umständen sehr giftig oder völlig ungiftig sein.  
Einige Salzhydrate sind stark ätzend.
- **Rezyklierbarkeit**  
Salzhydrate können meist sehr gut wieder verwendet werden.





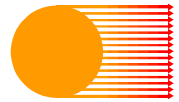
## Paraffine / Alkane

Eine andere Materialklasse im selben Temperaturbereich sind die Paraffine. Sie werden oft wegen ihrer chemischen Trägheit und somit einfacheren Handhabung eingesetzt. Im Vergleich zu Salzhydraten haben sie typischerweise ähnliche massenbezogene Energiedichten. Wegen ihrer geringeren Dichte sind sie allerdings den Salzhydraten bei der volumenbezogenen Energiedichte unterlegen. Paraffine sind ein Gemisch aus gesättigten Kohlenwasserstoffen, die sich hauptsächlich aus langkettigen n-Alkanen zusammensetzen. Diese werden durch Destillation aus Erdöl gewonnen. Je größer die Kettenlängen, desto höher ist auch die Schmelztemperatur, wodurch sich ein bestimmter Schmelzpunkt einstellen lässt. Die Firma matino GmbH, früher Rubitherm GmbH, vertreibt eine Serie von PCM auf Basis von Paraffinen, die einen Temperaturbereich zwischen  $-3\text{ °C}$  und  $+100\text{ °C}$  abdecken. Solche PCM auf Paraffinbasis zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie kongruent schmelzen, ökologisch unbedenklich, nicht gesundheitsschädlich, nicht korrosiv gegenüber vielen Materialien in einem Wärmesystem und zyklenstabil sind. Auch das einfache Handling, das durch die chemische Stabilität bedingt ist, ist ein Vorteil dieser Materialien. Nachteile von Paraffinen sind ihre relativ hohe Volumenänderung am Schmelzpunkt (5 % - 20 %) und ihre sehr geringe Wärmeleitfähigkeit (typisch  $0,2\text{ W/m K}$ ). Auch ist die auf das Volumen bezogene Übergangsenthalpie im Vergleich zu Salzhydraten relativ gering. Weiterhin weisen Paraffine einen Phasenübergang ca. 20 – 30 K unterhalb des eigentlichen Schmelzpunktes auf. Dieser Übergang fest-fest weist zwar nur eine geringe Übergangsenthalpie auf, bewirkt aber dass unterschiedliche Angaben über die in einem Speicher zur Verfügung stehenden Übergangsenthalpien gemacht werden. Man muss bei der Auswahl dieser Materialien darauf achten, ob dieser fest-fest Übergang mit eingerechnet ist und ob diese Übergangsenthalpie in dem geplanten Speicherkonzept genutzt werden kann. Typische Eigenschaften der Paraffine bezüglich der wichtigsten Kriterien sind:

Typische Eigenschaften der Paraffine sind:

### Physikalisch:

- **geeignete Temperatur des Phasenübergangs**  
Da diese Paraffine aus einem Gemisch aus verschiedenen n-Alkanen bestehen, weisen diese keinen scharfen Umwandlungspunkt, sondern einen Übergangsbereich auf. Je größer die Reinheit der Paraffine/Alkane desto kleiner der Umwandlungsbereich und desto höher die Übergangsenthalpie.
- **hohes  $\Delta H$**   
Im Vergleich zu Salzhydraten haben sie typischerweise ähnliche massenbezogene Energiedichten. Wegen ihrer geringeren Dichte sind sie allerdings den Salzhydraten bei der volumenbezogenen Energiedichte unterlegen.
- **möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit**  
Paraffine weisen eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit auf, typisch  $0,2\text{ W/m K}$  im festen Zustand.
- **reproduzierbarer Phasenübergang**  
Die Zyklenstabilität von Paraffinen ist sehr gut.
- **geringe Unterkühlung**  
Paraffine weisen praktisch keine Unterkühlung auf. Sie benötigen daher auch keine Keimbildner.

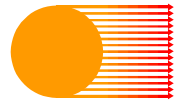


### Technisch:

- **geringer Dampfdruck**  
Der Dampfdruck von Paraffinen hängt stark von der Schmelztemperatur und den Inhaltsstoffen ab, ist jedoch meist kein Problem.
- **geringe Volumenänderung**  
Paraffine zeigen eine große Volumenänderung am Phasenübergang. Da sie aber nicht sehr hart sind, kann eine Zerstörung des Behälters leicht vermieden werden. Allerdings kann die Volumenkontraktion zu einer Verringerung der Fläche, die zum Wärmeaustausch mit der Umgebung zur Verfügung steht, führen.
- **chemische und physikalische Stabilität des PCMs**  
Paraffine sind chemisch sehr stabil und reaktionsträge, allerdings brennbar. Sie können zudem mit Luftsauerstoff auf Dauer oxidieren.
- **geringe Korrosivität gegen andere Materialien**  
Gegen Metalle sind Paraffine praktisch nicht korrosiv. Vorsicht ist bei der Benutzung von Kunststoffen geboten, da Paraffine in diese eindringen und diese dabei erweichen können.

### Marktwirtschaftlich:

- **geringer Preis**  
Der Preis von Paraffinen ist meist höher als der von Salzhydraten.
- **Verfügbarkeit**  
Paraffine sind bereits von mehreren Herstellern beziehbar.
- **toxikologische Unbedenklichkeit**  
Die toxikologische Unbedenklichkeit ist gegeben. Bei niedrigen Schmelztemperaturen (unter Raumtemperatur) Einstufung als gesundheitsschädlich. Aspirationsgefahr: kann bei Verschlucken Lungenschäden verursachen (Gefahrenhinweise, R-Sätze: R65 und R66; Sicherheitsratschläge, S-Sätze: S23, S24, S62).
- **Rezyklierbarkeit**  
Die Rezyklierbarkeit bei Paraffinen ist durch ihre chemische Trägheit gut.

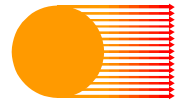


### 4.3 Geeignete PCM

Bei der folgenden Auflistung kommerzieller PCM, sowie in der Literatur genannter Materialien (siehe Anhang), ist zu beachten, dass die vorhandene Datenbasis keine ausreichende Genauigkeit der Daten liefert. Die genannten Schmelztemperaturen / Schmelzbereiche sowie latente Wärmen sind nur als Richtwerte zu verstehen.

Eine weitere Klasse an PCM mit einem Phasenübergang in diesem Temperaturbereich sind die Gashydrate bzw. Chlathrate. Diese Gruppe ist allerdings aufgrund ihrer Eigenschaften (nötiger hoher Druck, flüchtige Bestandteile, schlechte Kristallisationseigenschaften, etc.) nur sehr schwer zu handhaben und nur wenig erforscht. Kommerzielle Produkte auf dieser Basis stehen zurzeit nicht zur Verfügung. Aus diesen Gründen wurde diese Klasse hier nicht berücksichtigt.

#### Hersteller



## Verfügbarkeit

Alle kommerziellen Produkte sollten in ausreichender Menge verfügbar sein. Genauere Aussagen kann hierzu nur der Hersteller treffen.

Bei den Materialien aus der Literatur, die als PCM vorgeschlagen wurden, ist die Verfügbarkeit fraglich. Einige Materialien sind sehr gut verfügbar z.B. Natriumhydroxid NaOH oder Kaliumfluorid KF, einige sind praktisch nicht verfügbar z.B. Lithiumchlorat.

## Toxikologie

Paraffine sind aufgrund ihrer chemischen Trägheit toxikologisch unbedenklich. Allgemein gilt allerdings für kurze aliphatische Kohlenwasserstoffe mit 6 - 18 Kohlenstoffatomen, dass sie bei direkter Inhalation Lungenentzündung, evtl. auch Lungenödem verursachen können. Diese treten allerdings nur bei Bedingungen, die hier nur unter besonderen Umständen eintreten können, auf (Vernebelungen, Versprühen, Aerosoleinatmung u. ä.). Resorption sehr großer Mengen verursacht Narkose.

Somit sind Paraffine aus toxikologischer Sicht für die Anwendung hier gut geeignet.

Bei den PCM auf Salzhydratbasis hängen die toxikologischen Eigenschaften sehr stark von den einzelnen Bestandteilen ab. Somit können die PCM völlig unbedenklich bis hoch giftig bzw. hoch aggressiv/ätzend sein. Deshalb kann keine allgemeine Aussage hierzu getroffen werden. Kommerziell vertriebene PCM sollten allerdings keine bzw. nur sehr geringe Toxizität aufweisen. Ob sie allerdings für den hier gezeigten Anwendungsfall geeignet sind, muss für den Einzelfall geprüft werden.

## 4.4 Schmelzbereich eines PCM

Da für PCM aus Kostengründen nicht hochreine Stoffe verwendet werden können, besitzen diese keinen definierten Schmelzpunkt sondern einen Schmelzbereich, der sich über mehrere Grad Kelvin erstrecken kann.

Paraffine, die kommerziell angeboten werden, bestehen aus einer Mischung von mehreren fast gleichlangen n-Alkanen, um den gewünschten Temperaturbereich des Phasenübergangs einstellen zu können. Je enger der Schnitt an n-Alkanen, desto höher ist die Übergangsenthalpie und je schmaler wird der Temperaturbereich des Phasenübergangs. Reine n-Alkane haben einen engen Temperaturbereich des Phasenübergangs und eine vergleichsweise hohe Übergangsenthalpie. Reine n-Alkane sind aber vergleichsweise teuer.

Für ein beispielhaftes, kommerzielles Paraffin, das für Wärmespeicherzwecken von der Firma matino GmbH bei einer Schmelztemperatur von etwa 6 °C angeboten wird, sind in den folgenden Grafiken Daten zur gespeicherten Energie über der Temperatur dargestellt. Mit den Messungen soll gezeigt werden, dass übliche PCM einen Phasenübergangsbereich und keinen scharfen Übergangspunkt haben.

Die erste Grafik stellt eine Messung des Herstellers dar, die weiteren Grafiken sind Messungen des ZAE Bayerns.

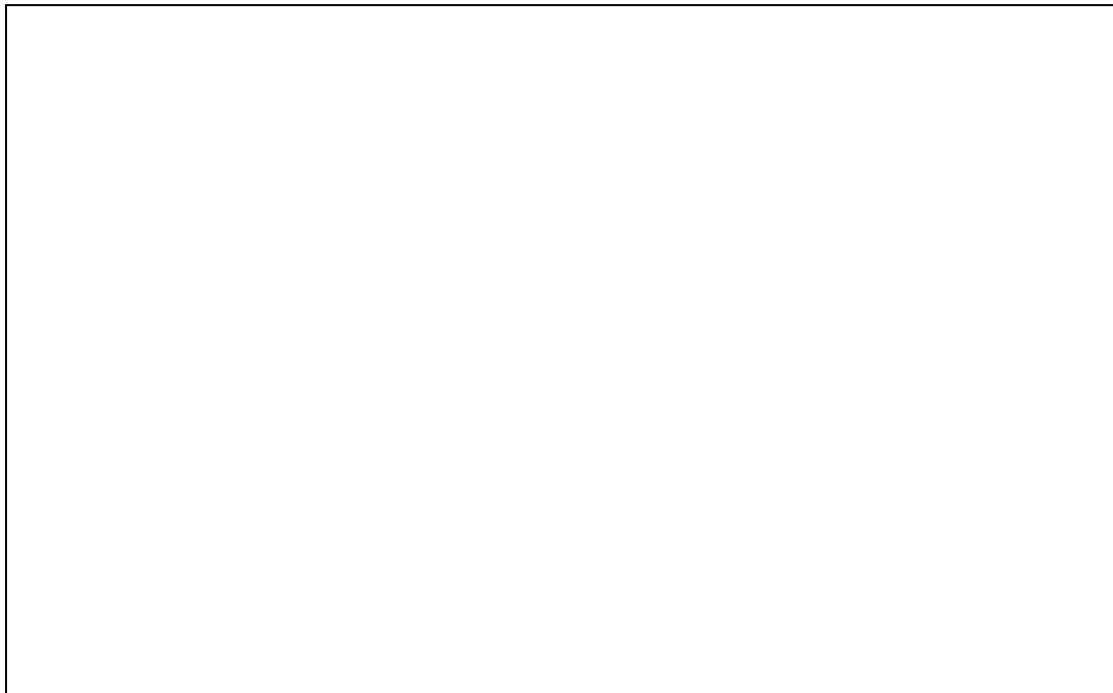


Abbildung 4-2: Paraffin RT 6 der matino GmbH. Messdaten des Herstellers. Verlauf der im jeweiligen Temperaturintervall (0,5 K) gespeicherten Energie.

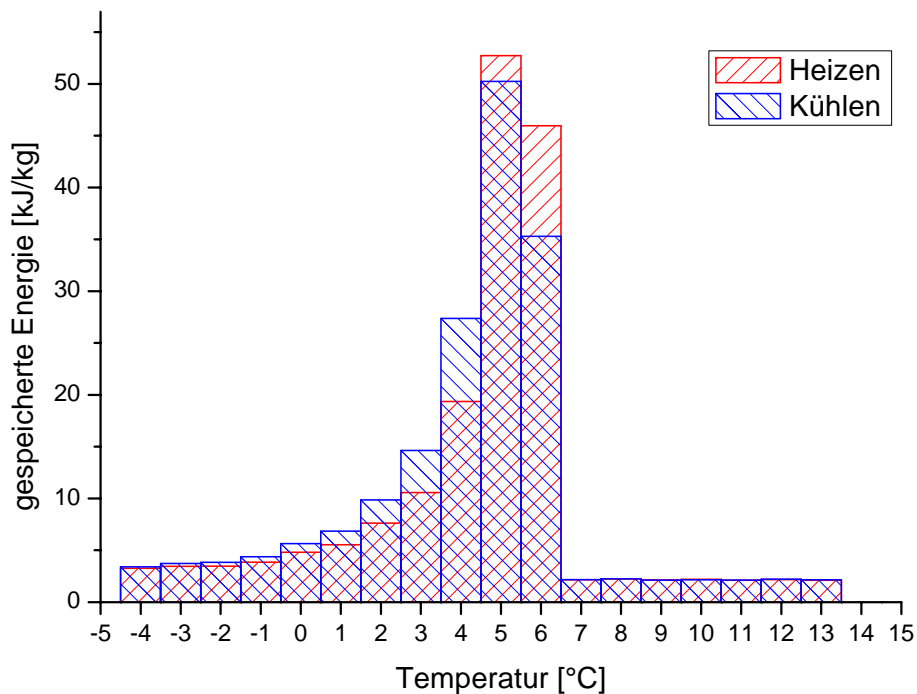


Abbildung 4-3: Paraffin RT 6 der matino GmbH. Messdaten des ZAE Bayern Abteilung 1. Verlauf der im jeweiligen Temperaturintervall (1 K) gespeicherten Energie.

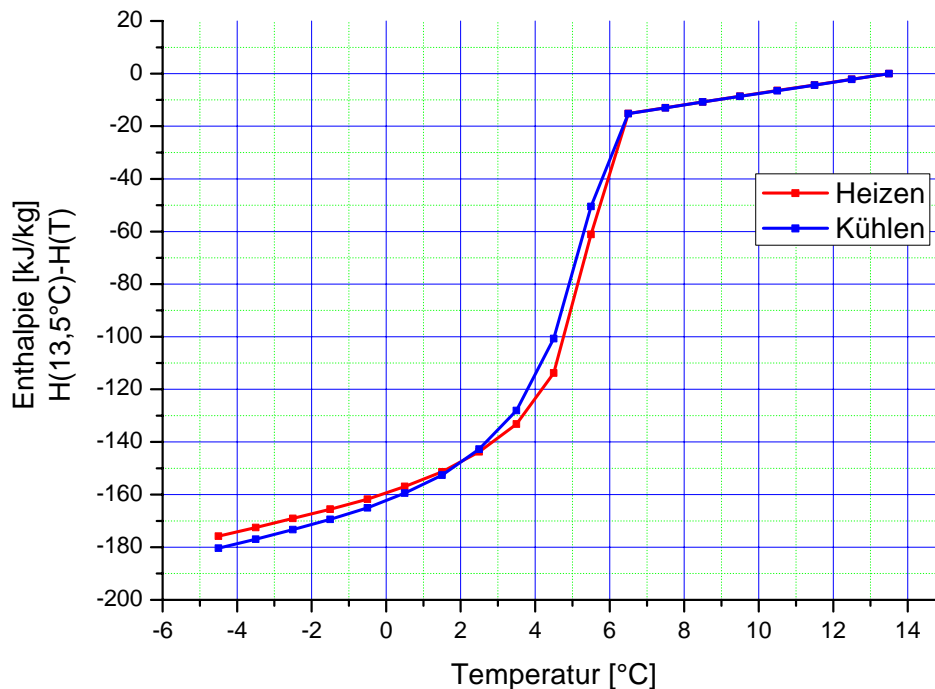


Abbildung 4-4: Paraffin RT 6 der matino GmbH. Messdaten des ZAE Bayern Abteilung 1. Enthalpieverlauf über der Temperatur.

Die Graphen zeigen leichte Abweichungen zwischen den Angaben des Herstellers und den am ZAE Bayern gemessenen Werten. Zum einen kommen diese Abweichungen durch die Genauigkeit der Messtechnik zustande, zum anderen durch Abweichungen der Proben, die möglicherweise auf unterschiedliche Chargen bzw. unterschiedlicher Probenpräparation beruhen.

Die Vermessung des Temperaturverlaufs der Enthalpie bzw. der gespeicherten Energie von PCM ist aufgrund deren Eigenschaften schwierig und bedarf spezieller Messtechnik und entsprechender Erfahrung.

Diese beispielhaften Messungen an einem PCM zeigen, dass sich das Schmelzen über ca. 5 Kelvin erstrecken kann. Das bedeutet, dass bei diesem Paraffin die latente Wärme über diesen Bereich verteilt ist. Weiterhin zeigen diese Messungen, dass bei dem hier verwendeten Paraffin praktisch keine Unterkühlung auftritt.

Ein Schmelzbereich eines PCM's hat im Vergleich zu einem Schmelzpunkt negative Auswirkungen auf die Lade-/Entladeleistung eines Latentwärmespeichers, der in einem engen Temperaturband betrieben wird.

Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Vermessung der PCM wurde 2004 die Gütegemeinschaft PCM e.V. gegründet und ein Gütezeichen „Phase Change Material (Phasenwechselmaterial)“ (RAL-GZ 896) erarbeitet, das die Vermessung und die Angabe der dabei erhaltenen Daten regelt. Dabei war das ZAE Bayern eines der beiden Institute, die die Vorschläge und die Vorgehensweise zu den durchzuführenden Messungen erarbeitet hat.

## 4.5 Technische, energetische und wirtschaftliche Machbarkeit des Speichersystems

Die folgenden Berechnungen basieren auf Simulationen bei denen die benötigte Kühlenergie bei Überschreiten der Optimaltemperaturen für die jeweiligen Pflanzen im PCM-Speicher gespeichert wird und verlustfrei bei nachfolgender Heizanforderung wieder als Heizenergie abgegeben wird. D. h. der Speicher wurde als ideal wärmegeleitet und mit unbeschränkter Leistung betrachtet. Beides wird bei einem realen Speicher nicht zutreffen. Somit ist der hier gezeigte Energieumsatz als der maximal erreichbare anzusehen.

Abbildung 4-5 zeigt den Ladezustand für einen 100 kWh Speicher mit einem PCM, das einen Phasenübergang bei 19 °C aufweist.

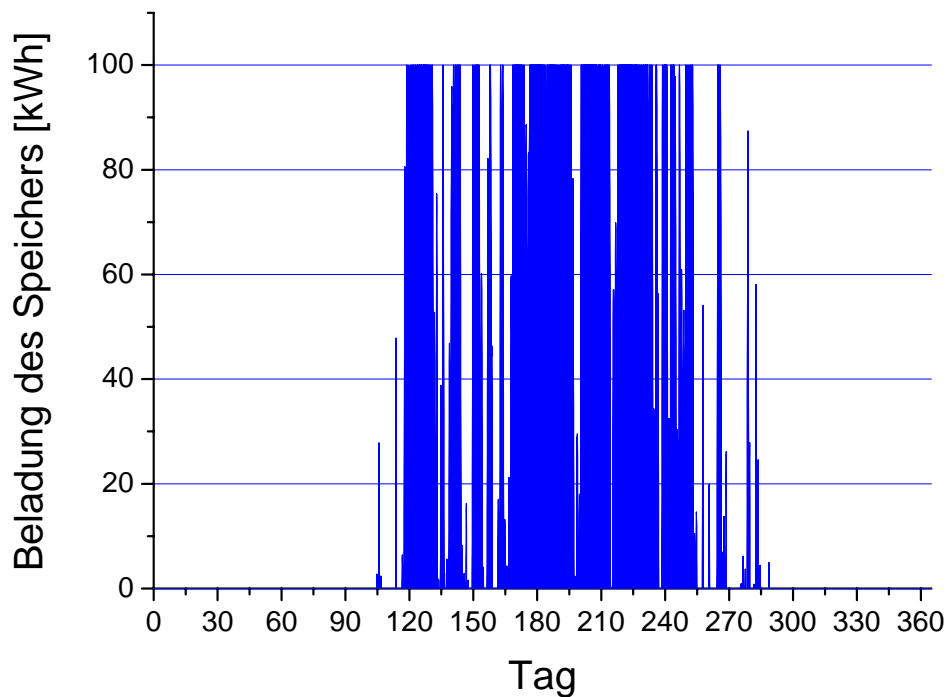


Abbildung 4-5: PCM19 100kWh Speicher

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Speicher nur während weniger Tage im Sommer geladen und wieder entladen wird. Im Winter wird aufgrund der fehlenden Kühllast keine Energie durch den Speicher umgesetzt.

Abbildung 4-6 zeigt die aufintegrierte, aus dem Speicher entnommene Heizenergie.

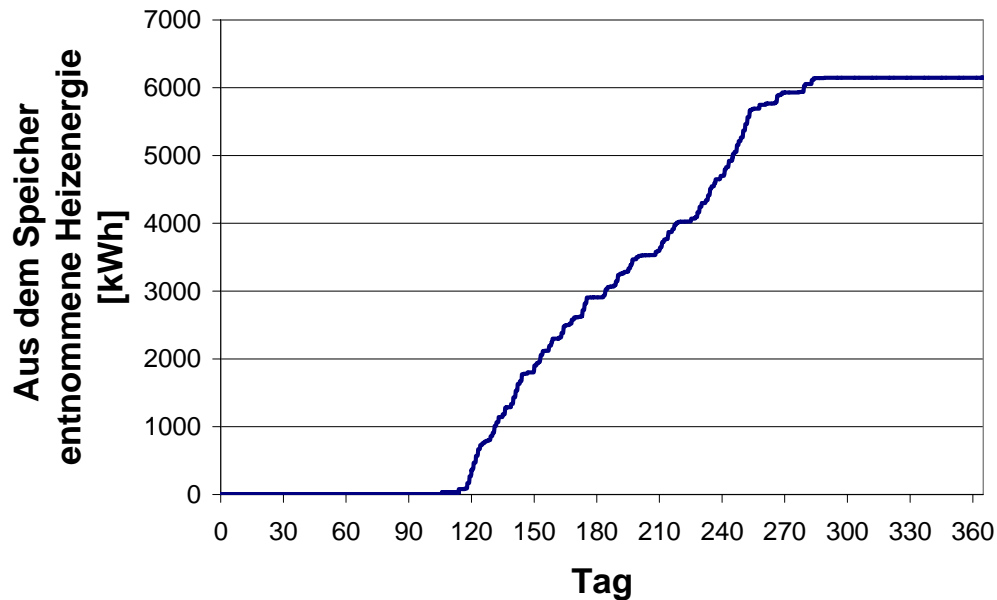


Abbildung 4-6: Aufintegrierte, aus dem Speicher entnommene Heizenergie. (PCM18; 100kWh Speicher)

Auch in dieser Grafik ist zu erkennen, dass nur während der Sommermonate Energie durch den Speicher umgesetzt wird. Aber auch während der Sommermonate gibt es immer wieder Zeiten, in denen keine Energie aus dem Speicher entnommen wird. Weiterhin lässt sich die maximale während eines Jahres eingesparte Heizenergie ablesen. Diese beträgt in diesem Fall 6148 kWh pro Jahr.

Diese Einsparung wurde in Abbildung 4-7 für verschiedene Schmelztemperaturen und unterschiedlichen Speichergrößen berechnet.



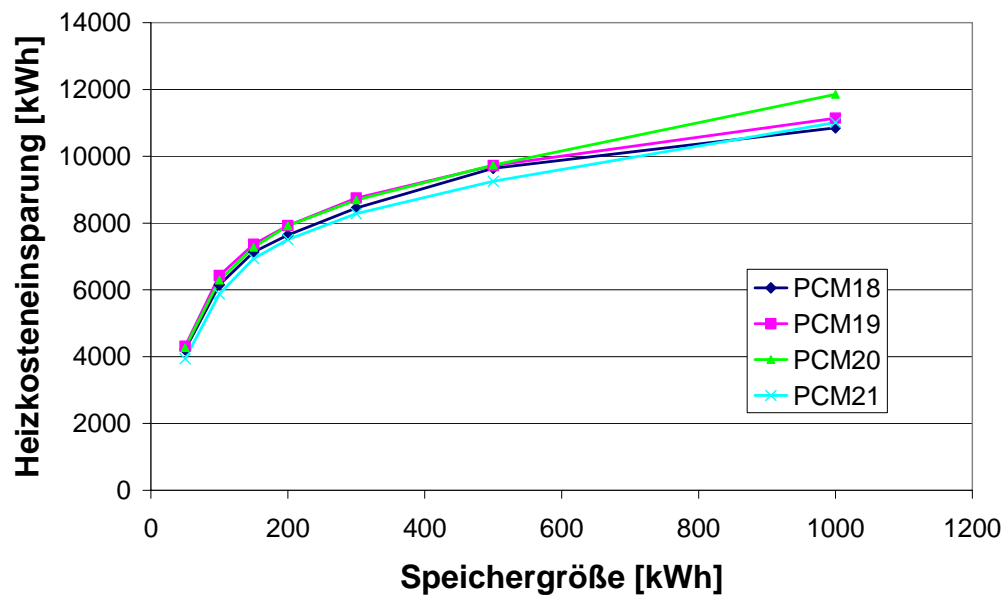


Abbildung 4-7: Heizkosteneinsparung bei verschiedenen Speichergrößen und Schmelztemperaturen.

Es ist zu erkennen, dass bei kleinen Speichergrößen eine Schmelztemperatur von 19 °C die höchsten Ergebnisse liefert und bei größeren Speichern eine Übergangstemperatur von 20 °C. Absolut betrachtet sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Phasenübergangstemperaturen nur sehr gering.

Setzt man eine Amortisationszeit von 10 Jahren, eine Speicherkapazität von 160 kJ/kg des PCMs (typischer Wert für ein Paraffin) und einen Wärmepreis von 0,08 Cent/kWh an, ergeben sich ohne Verzinsung und Betriebskosten des Speichers (z.B. Lüfterstrom) die in Abbildung 4-8 dargestellten maximalen Preise des Speichers je Kilogramm Speichermaterial.

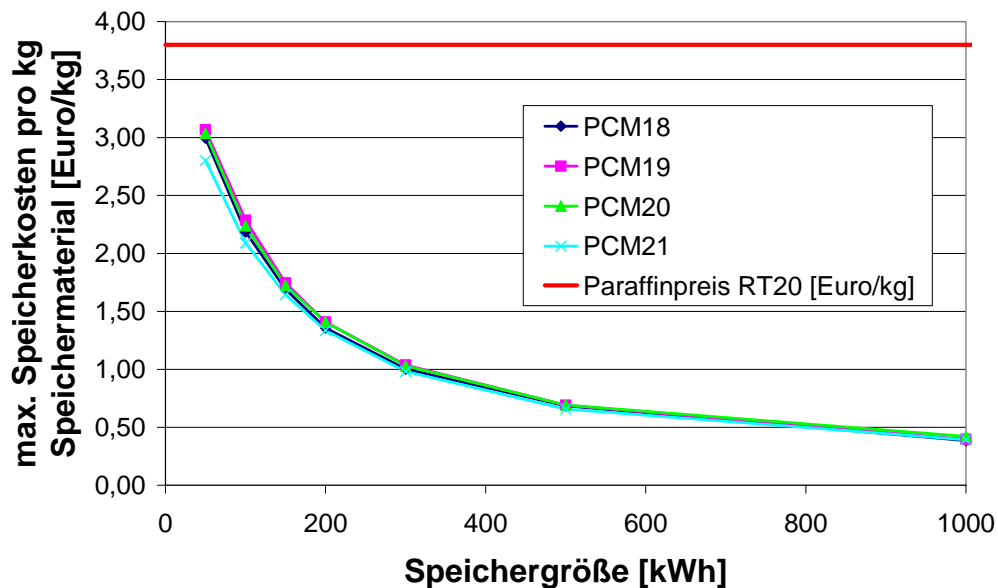


Abbildung 4-8: Maximale Speicherkosten für ein Kilogramm Speichermaterial bei Verwendung eines typischen Speicherparaffins.

Je kleiner der Speicher ist, desto öfter wird ein Großteil des Speichers geladen und entladen und desto mehr Energie bezogen auf die Speicherkapazität des Latentwärmespeichers wird umgesetzt. Somit steigen mit kleiner werdender Speichergröße die eingesparten Heizkosten pro Masseneinheit Speichermaterial. Dies führt dazu, dass die maximalen Speicherkosten für einen Speicher mit kleiner werdender Speicherkapazität steigen (siehe Abbildung 4-8).

Für einen 50 kWh-Speicher (1125 kg Speichermaterial, ca. 2,5 m<sup>3</sup> Speichervolumen) ergibt sich somit in etwa ein maximaler Speicherpreis von 3 €/kg. Mit diesem Preis müssen sämtliche Investitionskosten wie Kosten für die Verkapselung des PCMs, Konstruktionsmaterialien, Wärmetauscherstrukturen, Wärmedämmung, Luftführung, Ventilatoren, etc. gedeckt werden.

Allerdings liegt bereits der Preis für ein Kilogramm typisches Wärmespeicherparaffin (matino /Rubitherm RT20) bei etwa 3,80 € und damit deutlich über dem maximalen Speicherpreis.

Kosten für die Verkapselung eines PCM betragen abhängig von der Art der Verkapselung (Kunststoffbeutel bis Metallplatte) zwischen ca. 3 und 10 €/kg.

Bei der Verwendung von Materialdaten für ein typisches Salzhydrat (Kaliumfluorid Tetrahydrat, KF·4H<sub>2</sub>O) ergeben sich die Werte die in Abbildung 4-9 dargestellt sind.

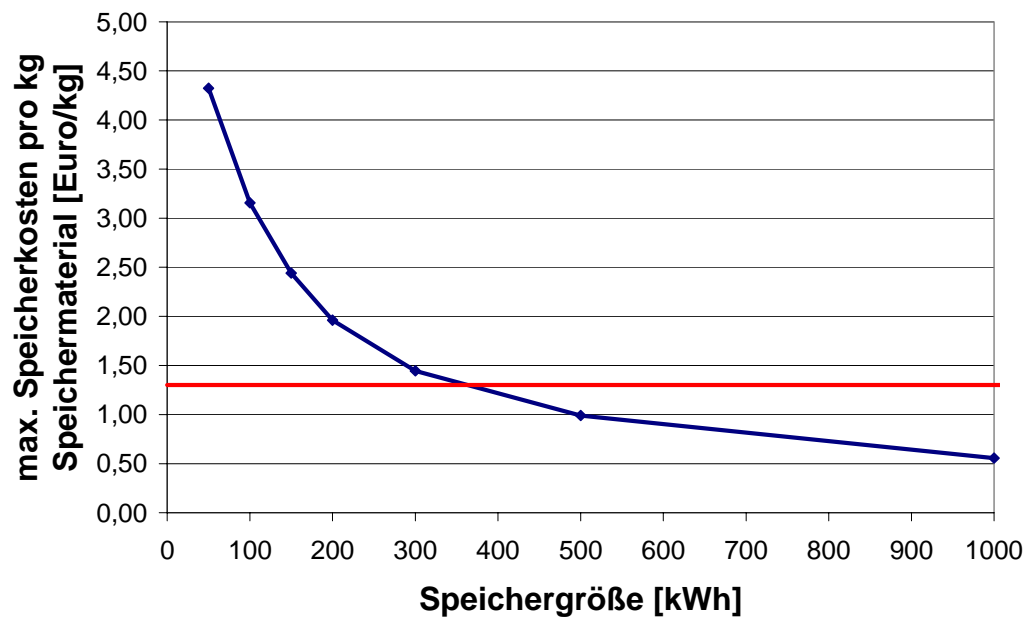


Abbildung 4-9: Maximale Speicherkosten für ein Kilogramm Speichermaterial bei Verwendung von Kaliumfluorid Tetrahydrat  $KF \cdot 4H_2O$ .

Aufgrund der höheren Speicherdichte von Kaliumfluorid Tetrahydrat ergeben sich höhere maximale Speicherpreise pro Kilogramm Speichermaterial. Hier ergeben sich bereits bei einer Speichergröße von 100 kWh ein Maximalpreis von über 3 €/kg Speichermaterial. Der Preis für Kaliumfluorid Tetrahydrat beträgt ca. 1,30 €/kg.

Allerdings handelt es sich bei Kaliumfluorid Tetrahydrat um eine Chemikalie und nicht um ein speziell als PCM getestetes Produkt. Kaliumfluorid Tetrahydrat zeigt z.B. Unterkühlung. Es muss deshalb zuerst auf seine Tauglichkeit für die Anwendung hier untersucht werden.

In Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 wurde die für die optimale Ausnutzung der Energie nötige Leistung des Speichers dargestellt. In Abbildung 4-10 sind die über eine Stunde gemittelten Leistungen während des Testjahres dargestellt. Diese Stundenwerte wurden in Abbildung 4-11 der Größe nach sortiert, um die insgesamt auftretende Dauer der verschiedenen Leistungen darzustellen.

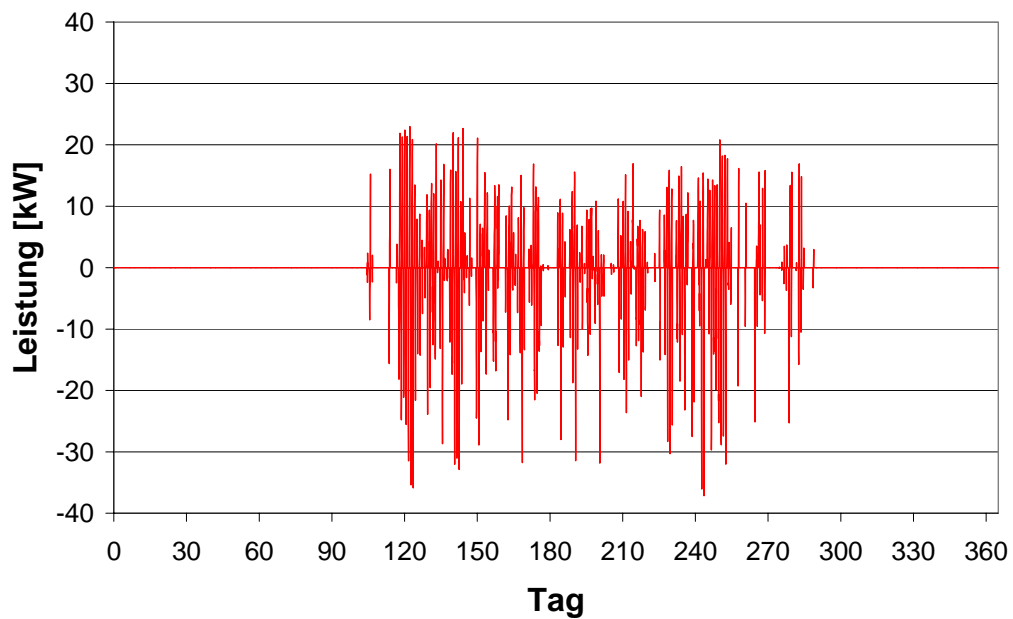


Abbildung 4-10: Über eine Stunden gemittelte Leistung die ein 100 kWh-Speicher liefern muss, um die vorhandenen Energie optimal zu nutzen.

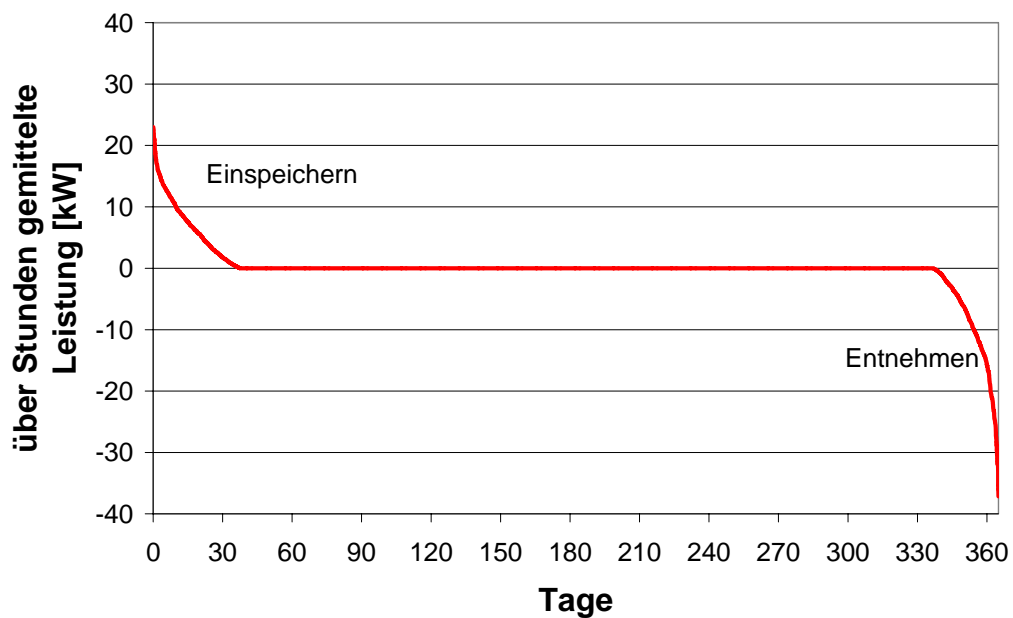
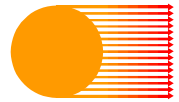


Abbildung 4-11: Über eine Stunden gemittelte Leistung die ein 100 kWh-Speicher liefern muss, um die vorhandenen Energie optimal zu nutzen. Hier wurden die Stundenwerte nach Größe der notwendigen Leistung sortiert.



Aus Abbildung 4-11 kann man ablesen, dass der Speicher eine Leistung von 10 bis 20 kW bereitstellen muss, um die Energie rechtzeitig ein- und wieder auspeichern zu können.

Wenn man ein Speicherkonzept annimmt, bei dem der Speicher durch einen Luftstrom beladen wird, ist technisch eine Leistungsdichte von 5 kW pro  $\text{m}^3$  Speichermaterial innerhalb vertretbarer Kosten zu erreichen. Somit kann bei etwa  $1,5 \text{ m}^3$  Speichermaterial lediglich eine Leistung von ca. 7,5 kW erreicht werden. Somit kann nur ein Teil der Kühlenergie genutzt werden.

Kurzfristige Leistungsspitzen innerhalb der Stunde, über die gemittelt wurde, werden durch eine ebenfalls kurzfristige Temperaturänderung im Gewächshaus abgedeckt.

## 5 Anhang