

Schlussbericht

Phönix light: Heizen und Kühlen mit PCM

ausgearbeitet durch:

Ernst Hächler
Suisselectra Ingenieurunternehmung AG

Koautor: Bernd Schneider
FH Esslingen

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2002

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichtes verantwortlich.

ZUSAMMENFASSUNG

Ziele der Anwendung von PCM für Klimatisierungszwecke im Bau:

1. Kühlen im Sommer mit Nachtluft möglich ?
2. Heizen im Winter, besonders Nachts mit der gespeicherten Tageswärme möglich?

Lösungsschritte:

- Schritt 1: Grundlagen/Entwicklung Phoenix light "Doppelrohr", aktueller Stand, Anwendungsbeispiele
- Schritt 2: Überprüfung, welches PCM ist geeignet?
- Schritt 3: Messung am "Comfort-Cooler" (Prototyp)
- Schritt 4: Messungen in bestehendem Gebäude "Eye-Catcher"
- Schritt 5: Messungen im Labor FH Esslingen
- Schritt 6/7: Auswertungen, offene Probleme, Erkenntnisse

Hauptergebnisse:

- Das Gerät leistet 5kWh Passivenergie und verbraucht dabei 66Wh Elektroenergie. Entspricht den Angaben des Lieferanten $\pm 10\%$
- Das verwendete *PCM Climsel 24* nur geeignet für Räume mit hohen Temperaturen von 28 – 35°C. Für Büro nicht geeignet.
- Die "Heizleistung" passiert bei Lufttemperatur von 17 – 21°C, über eine Dauer von 7 Std. (Nachtbetrieb) Kap. 5
- Der Prototyp Comfort-Cooler muss verbessert werden:
 - Die Ziele 1+2 sind nur teilweise erreicht
 - Aussenluft/Umluftbetrieb (Kap. 6)
 - bessere Durchströmung im Gerät

Für die Praxis:

im Kap. 2 + 3 sind allgemeine Informationen über PCM, Anwendungen, Adressen, etc. ersichtlich.

Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeines	4
1.1.	Ausgangslage	4
1.2.	Ziele	4
1.3.	Lösungsweg	4
2.	Aktueller Stand auf dem PCM-Sektor	5
2.1.	Allgemeines über PCM	5
2.2.	Bisherige Anwendungen von PCM in verschiedenen Bereichen	6
2.2.1.	Automobilindustrie	6
2.2.2.	Kleidung	6
2.2.3.	Heizung	7
2.2.4.	Baumaterialien	7
2.2.5.	Elektronik	8
2.3.	Physikalische und chemische Grundlagen	9
2.3.1.	Die latente Wärmespeicherung	9
2.3.2.	Die latente Phase	10
2.3.3.	Der Phasenwechsel	11
2.4.	Anwendungsbeispiele und bisherige Studien auf dem Gebiet der Phase Change Materials	12
2.4.1.	Haus in Ebnat-Kappel	12
2.4.2.	Studie des Solarinstituts in Jülich	12
2.4.3.	Wärme-Speicher (Herstellerfirma SCHNEIDER von PCM-Speichern)	14
2.4.4.	PCM-Studie Fraunhofer Institut	14
2.4.5.	"New Spirit" – Erste Anwendung in einem Kühldeckensystem eines Bürogebäudes	17
2.4.6.	ZAE München	24
2.5.	Weltweite Suche über Internet nach Quellen zum Thema PCM	25
2.6.	Spezifische Daten von PCMs verschiedener weltweiter Hersteller	28
2.6.1.	PCMs von der Firma CLIMATOR aus Schweden	28
2.6.2.	PCMs von TEAP Energy	30
2.6.3.	Hochtemperatur PCMs aus Paraffinen von der Firma Honeywell	30
3.	Phoenix-Light: Die Idee mit dem Doppelrohr (Grundlagen Schritt 1)	32
3.1.	Allgemein	32
3.2.	Wie funktioniert Phoenix-Light	32
3.2.1.	„Phoenix-Light“-Standard	32
3.2.2.	„Phoenix-Light“-Umluft	32
3.2.3.	„Phoenix-Light“-Rectangular	32
3.3.	Vergleiche und Trends	33
3.4.	Wo wäre Phoenix-Light einsetzbar ?	35
3.5.	Überprüfung der Verwendbarkeit Phoenix light "Doppelrohr"	45

4. Comfort-Cooler (Schritt 3).....	46
4.1. Allgemein	46
4.2. Wie funktioniert "Comfort-Cooler"	46
4.3. Labormessungen im Labor für Versorgungstechnik der FHT-Esslingen	48
4.3.1. Messeaufbau	48
4.3.2. Messgrößen	48
4.3.3. Impressionen, Fotos der Messungen an der FH Esslingen	49
4.3.4. Ermittlung des Volumenstromes über Geschwindigkeitsmessung.....	51
4.3.5. Messschritte	52
4.3.6. Messunsicherheiten nach VDI 2080.....	53
4.3.7. Auswertung Messung 1	53
4.4. Messungen in bestehendem Gebäude	59
4.4.1. Allgemein.....	59
4.4.2. Messungen.....	60
4.4.3. Auswertung	64
4.5. Erkenntnisse	64
5. Erkenntnisse aus dem Laborversuch	65
6. Optimierung	67
7. Ausblick – PCMs und deren Zukunft in der Heizungs- und Klimatechnik.....	69
7.1. Noch bestehende Probleme auf dem Gebiet der Phase Change Materials:	69
7.2. Vorschlag für weiteres Vorgehen	69
8. Anhang	70
8.1. Quellenverzeichnis.....	70

1. Allgemeines

1.1. Ausgangslage

Die moderne Architektur wird immer mehr bestimmt durch transparente Gebäude mit hohem Glasanteil. Auch Leichtbauten in Kombination mit dem Werkstoff Holz und Holzbeton bieten Vorteile wie kurze Bauzeiten und hohe Behaglichkeit.

Die Wärmedämmeigenschaft der Gläser konnte in den letzten Jahren revolutionär verbessert werden. Die Glasfassaden können heute so geplant werden, dass sie im Winter als eigentliche Passiv-Sonnenkollektoren das Gebäude zum grossen Teil beheizen. Jedoch kann im Sommer und vor allem in der Übergangszeit ein Überhitzungsproblem auftreten wegen der Einstrahlung (trotz gutem Sonnenschutz) aber auch infolge der Fremdwärme durch die Beleuchtung, die Personen und die elektronischen Einrichtungen. Es resultieren nicht selten heisse Räume, welche im Nachhinein mit kostenintensiven Klimaanlageanlagen saniert werden müssen.

Die PCM-Technologie wurde bisher schon in der Textiltechnik, bei der Produktion von Astronautenanzügen, aber auch in der Automobilindustrie zum Kühlen und wieder Aufheizen von Motoren angewandt. Diese neue Technologie zur Lösung des alten Übels zu verwenden ist Gegenstand der nachfolgenden Studie.

1.2. Ziele

- Anwendung von PCM für Klimatisierungszwecke im Bau
 - Kühlen im Sommer mit Nachtluft
 - Heizen im Winter, besonders Nachts mit der gespeicherten Tageswärme
 - Aufzeigen des niedrigen Energieverbrauchs und der niedrigen Betriebskosten
- Neue Wege für Leichtbauten mit viel Glas.

1.3. Lösungsweg

Grundlagen erarbeitet:

- Schritt 1: Grundlagen erarbeitet:
Entwicklung Phoenix light "Doppelrohr"
- Schritt 2: Phoenix light "Doppelrohr" geprüft. Geeignet für Weiterentwicklung?
- Schritt 3: Messungen am "Comfort-Cooler" (Kühlgerät mit PCM auf Salzbasis)
- Schritt 4: Messungen im bestehenden Gebäude "Eye-Catcher" mit Comfort-Cooler von August/Sept. 02.
- Schritt 5: Messungen des Comfort-Coolers im Labor der Hochschule Esslingen, von Nov./Dez. 2002.
- Schritt 6: Auswertungen
- Schritt 7: Offene Probleme, weiteres Vorgehen

2. Aktueller Stand auf dem PCM-Sektor

2.1. Allgemeines über PCM

PCM steht wie oben schon erwähnt für **Phase change material** (Phasenwechsel Materialien)

Die Gebäudetechnik ist derzeit am entwickeln von sinnvollen Einsatzmöglichkeiten von PCM in der Heiz- und Klimatechnik. Raumklimatisierung kann einerseits über Aktiv-Klimatisierung durch Heizen und Kühlen unter Einsatz von Primärenergie realisiert werden. Andererseits eignen sich massereiche Bauteile, etwa massive Gebäudehüllen etc. zur Passivklimatisierung, da die Bauteilmassen beträchtliche Wärmemengen speichern bzw. puffern können.

Um jetzt bei Leichtbauten auch eine Passivklimatisierung ermöglichen zu können sollen nun geeignete Substanzen wie PCM zum Einsatz kommen, welche grosse Wärmemengen speichern können. Bei diesen Materialien wird nun die latente Phase zur Speicherung von Wärmeenergie genutzt. Optimal wäre es, wenn bei Leichtbauten eine PCM-Schicht in der Aussenwand die Kühlung im Sommer bewältigen könnte ohne zusätzliche Klimaanlage.

Drei verschiedene Arten von PCM sind derzeit im Test und teilweise im Gebrauch:

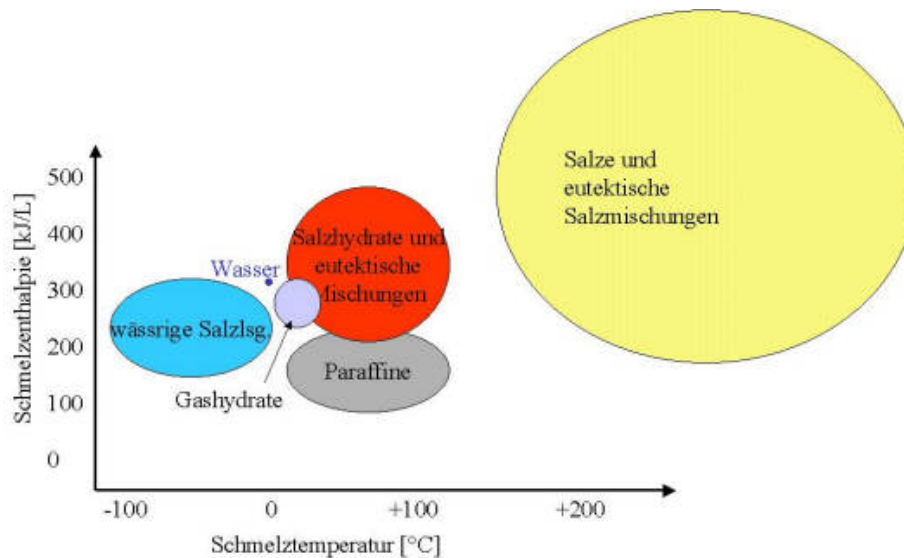


Abb. 1

- Salzhydrate / eutektische Salzmischungen
- Paraffine
- Wässrige Salzlösungen

Die spez. Wärmekapazität von Wärmeparaffinen liegt bei etwa 2,1 kJ/kg *K.

Zusammen mit der Schmelzenthalpie von 180 bis 230 kJ/kg ergeben sich für organische Stoffe sehr gute Wärmespeichereigenschaften.

Es gibt eine Serie von PCM, die auf speziellen Wärmeparaffinen unterschiedlicher C-Kettenlängen (n-Paraffine, natürliche und *Fischer-Tropsch* Paraffine) basieren, und deren Schmelztemperaturen zwischen ca. 5°C und 110°C liegen.

Am häufigsten aber werden Salzhydrate eingesetzt.

PCM fand in vergangener Zeit auch schon Anwendungen in verschiedenen anderen Bereichen.

2.2. Bisherige Anwendungen von PCM in verschiedenen Bereichen

2.2.1. Automobilindustrie

BMW bietet in der 5er-Serie einen Latentwärmespeicher an.

Der Speicher ist in den Kühlwasserkreislauf eingebunden und wird mit Abwärme geladen, wenn der Motor auf Betriebstemperatur ist. Diese Wärme steht dann beim nächsten Kaltstart zum schnellen Aufheizen des Motors (Verbrauchsreduzierung) und der Fahrgastzelle (Komfort und Sicherheit) zur Verfügung. Durch gute Isolierung des Speichers hält er die Wärme bis zu zwei Tage bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Aussentemperatur.

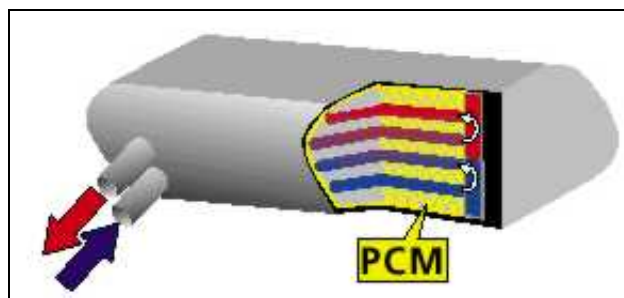


Abb.2

2.2.2. Kleidung

Seit der Einführung wasserdichter und gleichzeitig atmungsaktiver Stoffe haben funktionelle Textilien immer mehr an Bedeutung gewonnen. Ein neuer Ansatz, den Tragekomfort von Ski-Kleidung zu erhöhen, ist der Einsatz von PCM: Befindet sich das Kleidungsstück in Innenräumen oder ist der Träger aktiv, nimmt das PCM Wärme auf und kühlt damit den Sportler. In Ruhephasen (z.B. beim Anstehen am Ski-Lift) gibt das PCM die Wärme wieder ab und wärmt den Sportler.

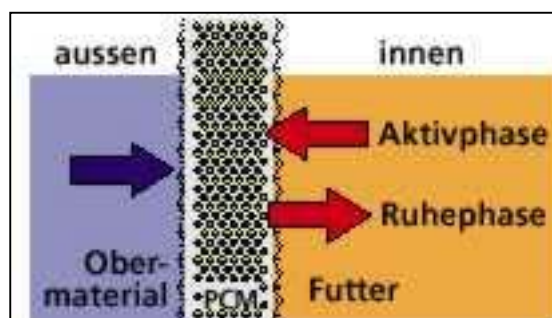


Abb.3

2.2.3. Heizung

Solar-Anlagen erfordern eine Zwischenspeicherung der Wärme für Heizung oder Warmwasserbereitung. Latentwärmespeicher benötigen geringeres Volumen als herkömmliche Wasser Speicher und haben einen höheren Wirkungsgrad aufgrund der geringeren Temperaturdifferenzen zwischen Be- und Entladen des Speichers.

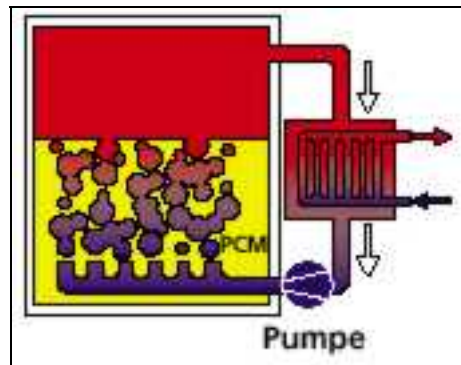


Abb.4

2.2.4. Baumaterialien

Das Klima in Räumen sollte sich im Verlauf eines Tages möglichst wenig ändern. Aus diesem Grund sind Häuser mit dicken Wänden besonders komfortabel: Im Sommer kühl und im Winter warm. Um diesen Komfort auch im Leichtbau zu erreichen, kann man auf Baumaterialien zurückgreifen, die PCM's enthalten und dadurch die gleichen Eigenschaften wie massive Wände aufweisen.

Durch die Aufnahme von Wärmespitzen (z.B. durch Sonneneinstrahlung) und verzögerte Abgabe in der Nacht, könnte in vielen Fällen sogar auf eine Klimatisierung der Räume verzichtet werden.

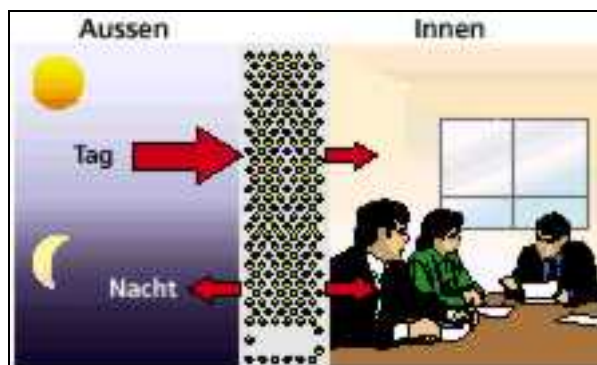


Abb.5

2.2.5. Elektronik

Elektronische Bauteile sind empfindlich gegen Überhitzung, die sowohl Lebensdauer als auch Zuverlässigkeit der Bauteile beeinträchtigt. Meist werden zur Kühlung Wärmeleitbleche verwendet, deren Wirkung noch durch den Einsatz von Lüftern verbessert wird. Diese haben bewegliche Teile, die ausfallen können. Die Aufnahme von Wärmespitzen durch PCM hingegen ist zuverlässig, da keine Motoren oder Temperaturfühler erforderlich sind. Das PCM regeneriert sich zwischen den Wärmespitzen durch Abgabe der Wärme über die Kühlrippen. Dadurch benötigt man weniger Platz für die Kühlung und gewinnt an Zuverlässigkeit.

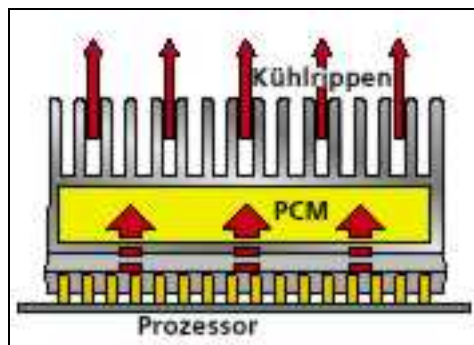


Abb.6

2.3. Physikalische und chemische Grundlagen

2.3.1. Die latente Wärmespeicherung

Es handelt sich um ein bekanntes physikalisches Prinzip. Schmelzen und Verfestigen von Materialien (so genannter Wechsel des Aggregatzustandes) benötigt riesige Energiemengen, ohne dass sich die Temperatur massgeblich verändert.

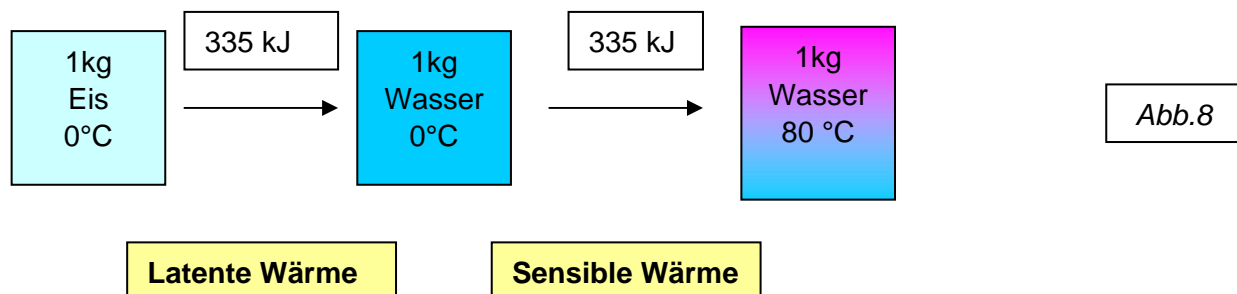
Will man zum Beispiel Eis bei 0°C zu Wasser von 0°C schmelzen, benötigt man die gleiche Energiemenge, wie wenn das Wasser von 0°C auf 80°C erhitzt werden soll.

Bei wachsähnlichen Paraffinen ist die Energieaufnahme, die bei 32 – 37°C gestaffelt zu schmelzen beginnen, dreimal so hoch wie die von Wasser.

Vorteile latenter Wärme

Viele Wärmespeicher wie z.B. der klassische Wärmespeicher nutzen nur die sogenannte sensible Wärme, d.h. die durch eine Temperaturänderung fühlbare Wärme. Die Wärmekapazität eines solchen Speichers kann durch die Gleichung bestimmt werden:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$



Erkenntnis:

In der Schmelzwärme von 1 kg Eis steckt z.B. die gleiche Wärmemenge, die benötigt wird, um die selbe Menge Wasser von 0°C auf 80°C zu erwärmen.

2.3.2. Die latente Phase

Erklärung:

Salze sind z.B. aus Ionen aufgebaut, etwa das gut bekannte Kochsalz (= Natriumchlorid) aus Natriumionen Na^+ und Chloridionen Cl^- . Im festen Zustand bilden Salze Ionengitter aus, in denen sich positive und negative Ionen regelmässig anordnen.

Aufgrund der elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen positiven und negativen Ionen sind solche Gitter ausserordentlich stabil.

Bei der Einspeicherung von Wärme in das Speichermaterial beginnt das Material beim Erreichen der Temperatur des Phasenübergangs zu schmelzen und erhöht dann, trotz weiterer Einspeicherung von Wärme, seine Temperatur nicht, bis das Material komplett geschmolzen ist. Erst dann tritt wieder eine Erhöhung der Temperatur auf (rote Kurve Abb.9).

Da für längere Zeit trotz Wärmezufuhr keine merkliche Temperaturerhöhung auftritt, nennt man die während des Phasenübergangs eingespeicherte Wärme "**versteckte Wärme**" oder auch "**latente Wärme**". Latentwärmespeicherung ist allgemein in Form von Eis oder von Wärmekissen, die in heißem Wasser geladen werden, bekannt.

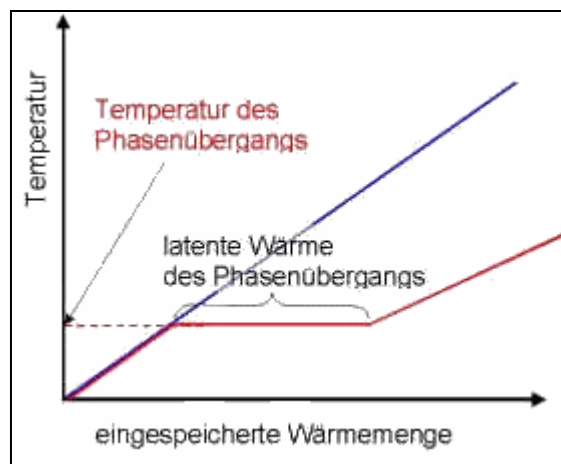


Abb.9

Fazit:

1. Es ist möglich in einem Bereich kleiner Temperaturänderung verhältnismäßig große Wärmemengen zu speichern und somit **hohe Speicherdichten** zu erreichen.
2. Da der Phasenübergang bei konstanter Temperatur über einen gewissen Zeitraum vonstatten geht (Abb.10), besteht die **Möglichkeit, Temperaturschwankungen zu glätten und Temperaturspitzen zu verhindern**

Glättung einer Temperaturschwankung und Reduzierung der Temperaturspitze mittels Speicherung von latenter Wärme (rot) im Vergleich zur Speicherung von sensibler Wärme (blau).

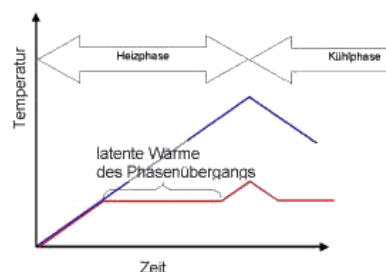


Abb.10

2.3.3. Der Phasenwechsel

Führt man einem festen PCM Wärme zu, so beginnt dieses bei Erreichen seiner Schmelztemperatur seinen Aggregatzustand von fest nach flüssig zu ändern. Während dieses Phasenwechsels absorbiert das PCM eine bestimmte Wärmemenge, die sogenannte Schmelzwärme. Da sich hierbei die Temperatur des PCM's trotz Wärmezufuhr nicht ändert, spricht man wie schon erwähnt von latenter (*versteckter*) Wärme. Gleichermassen wird im umgekehrten Phasenwechsel, von flüssig nach fest, die gespeicherte Latentwärme wieder bei konstanten Temperaturen abgegeben.

Jedes Material nimmt beim Erhitzen Energie (Wärme) auf und wird dabei immer wärmer. Diese Energie wird *fühlbare (oder "sensible") Wärme* genannt, da man die Energiezunahme direkt durch die Temperaturerhöhung spürt.

Schmilzt das Material, durchläuft es also einen Übergang von der flüssigen zur festen Phase, so wird am Schmelzpunkt von ihm sehr viel Wärme aufgenommen. Dabei erhöht sich die Temperatur so lange nicht, bis alles Material geschmolzen ist. Aus diesem Grunde wird die so in dem Material gespeicherte Energie als "latente "oder versteckte Wärme bezeichnet. Beim Erstarren gibt das Material die Schmelzwärme wieder ab.

Auch die Umkehrung dieses Prozesses ist nutzbar: Eine Flüssigkeit kann Kälte aufnehmen (d.h. Wärmeenergie abgeben) und beim Phasenübergang flüssig nach fest erstarren. In diesem Prozess wird die dafür notwendige Schmelzwärme abgegeben.

Bei der Erwärmung schmilzt es wieder und kühlt dabei seine Umgebung. Diese Form der Kältespeicherung wird bereits heute in Klimaanlage für Bürogebäude eingesetzt.

Bei nur geringen Temperaturänderungen können PCM's erheblich grössere Wärmemengen aufnehmen als vergleichbare „sensible“ Speichermedien:

Am Beispiel des PCM 72 von der Firma Merck kann z.B. im Temperaturbereich von 70-80°C etwa viermal mehr Wärme aufnehmen als Wasser und über zehnmal mehr als Steine oder Ziegel. (Abb.11)

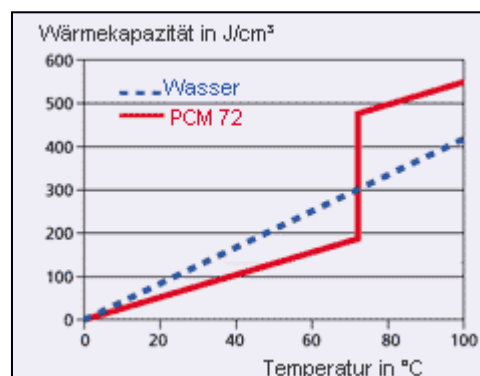


Abb. 11

2.4. Anwendungsbeispiele und bisherige Studien auf dem Gebiet der Phase Change Materials

2.4.1. Haus in Ebnat-Kappel

- Hier wurde eine durchscheinende Paraffinschicht als Latentwärmespeicher hinter einer Wärmeschutzverglasung angeordnet als Alternative zu einer 30-40cm gedämmten Südwand.
Vorteile: - schlanke Aussenwand, die in faszinierend durchscheinender Weise das Aussenklima im Inneren wiedergibt und die eine positive Energiebilanz aufweist. Diese neuentwickelte Folienverbundverglasung hat einen U-Wert von $0,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ und einen g-Wert von 40%.
- Ausserdem ist dieses Haus in Ebnat-Kappel mit einer Solarspeicherwand gebaut worden. Hier wirkt eine Paraffinschicht als Latentspeicher.
Funktionsprinzip: Sie schmilzt bei Sonneneinstrahlung und erstarrt anschliessend langsam unter Wärmeabgabe in den Raum.(heizen mit PCM)

2.4.2. Studie des Solarinstituts in Jülich

Hier wurde ein PCM-Speicher mit Paraffin mit einem Wasserspeicher verglichen.

Vorteile des PCM-Speichers verglichen zum Wasserspeicher war, dass er seine Arbeitstemperatur mit weniger Energie erreichte als der Wasserspeicher. Ausserdem speichert der PCM-Speicher die meiste Energie bei der Arbeitstemperatur.

- Problem von Paraffin ist die schlechte thermische Leitfähigkeit
- *So war das Ziel der Studie den Transport der thermischen Energie mit Paraffin zu steigern!*
- zuerst wurde eine Mischung von Paraffin und Wasser ausprobiert. Der Siedepunkt des Wassers wurde an den Schmelzpunkt angepasst indem man den Druck im Behälter erniedrigte.
- => diese Kombination war zu teuer laut den Untersuchungen
- Lösungsansatz: Man hat nun Metallbestandteile in das Paraffin gebracht und verbesserte somit den Wärmetransport.**(Metall-Paraffin-Struktur)**

Konzepte für einen Latentspeicher:

Langzeitspeicher:

Ziel:

- er sollte in der Lage sein, Energie von Solarkollektoren zu speichern während einer Periode von einigen Wochen.
- Die Menge der Speicherung sollte bei 10kW liegen (Einfamilienhaus)
- Die Langzeitspeicherung wurde mit einem drucklosen Behälter mit internem Wärmetauscher realisiert.
- Der Wärmetransport in der Paraffinschicht wurde nun durch Integration einer Metallstruktur verbessert. Das Paraffin wird in einem Bett mit hohlen Metallzylindern eingepackt. Der Volumenanteil des Metalls ist weniger als 3%.
- Die Speicherung kann in jeder Geometrie ausgeführt werden.

Kurzzeitspeicher:

In einem Kurzzeitspeicher wird die Energie von einigen Stunden bis ein paar Tage gespeichert. Diese Latentspeicher fallen kleiner aus als die normalen Wasserspeicher. Dies ist von Interesse, wenn nicht genügend Platz im Haus ist.

Für einen Kurzzeitspeicher sind kleine Latentspeicherelemente mit einer grossen Oberfläche zum Wärmetransport erforderlich. Die Grösse dieser Elemente variiert von einigen Millimetern bis einigen Zentimetern aufgrund der geringen thermischen Leitfähigkeit. Das Konzept dieser Studie war es ein existierender Wasserspeicher mit Latentspeicherelementen zu füllen. Die Elemente bestanden aus einer Plastik-Paraffin-Sruktur. Die gewählte Struktur bestand aus 60% Paraffin. Die Wärmekapazität sollte um 50% steigen in einer Bandbreite von 20K.

Die Ladespitze würde so von dem übriggbleibenden Wasser gedeckt werden (20-30 % des Volumens).

Versuche:

Die thermische Leitfähigkeit spielt eine wichtige Rolle für das Design des Speichers. Im Falle der neuen Erkenntnis eines mit Paraffin gefüllten Bettes wurde nun die thermische Leitfähigkeit gemessen. So wurde also folgendes Experiment gestartet:

=> verschiedene Metallzylinder wurden ausprobiert

Die thermische Leitfähigkeit von der Paraffin-Metall-Struktur wird aus dem Wärmestrom und einem beständigen Temperaturprofil berechnet. Während die Leitfähigkeit der Bodenplatte bekannt war, konnte die Leitfähigkeit des Paraffins ermittelt werden.

Die folgende Tabelle gibt Auskunft über die in dieser Studie getesteten Materialien:

Füllung	Material	Hersteller	Höhe in mm	Durchmesser in mm	Volumenanteil
Nichts	Paraffin	Schümann	-	-	100%
Wicklung	Aluminium	Lathery	-	ca.3	ca. 5%
Plastic	HDPE	Schümann	ca. 10	5	ca. 40%
Lessing	Stahl	Prym, Stolberg	8	8	20%
Pall 25	Aluminium	VFF, Ransbach	50	50	2%
Pall 40	Aluminium	VFF, Ransbach	25	25	2%
Spiralen	Rostfreier St.	Spontex	-	3	-
VSP 25	Aluminium	VFF, Ransbach	25	25	2%
VSP 50	Aluminium	VFF, Ransbach	50	50	2%

Während den Messungen von den Plastik-Paraffin Zylindern tauchte ein Problem auf:

Bei höheren Temperaturen schmolz das Plastik und die Form des Zylinders war nicht mehr gegeben. Deshalb waren Zylinder nicht anwendbar für die mit Wasser gefüllten Latentspeicher. So wurden nun alle Versuche zum Kurzzeitspeicher gestrichen und die Untersuchungen zum Langzeitspeicher wurden fortgesetzt.

2.4.3. Wärme-Speicher (Herstellerfirma SCHNEIDER von PCM-Speichern)

Der Latentwärmespeicher nutzt, wie der Name bereits besagt, die Schmelzwärme eines Salzhydrates. Beim Speicher mit einer Arbeitstemperatur von 58,5°C wird Natriumacetat als Speichermedium verwendet.

Ein spezieller Wärmetauscher, der in dem Speichermodul eingebaut ist, dient als Wärmeübertragung. Das heiße Wasser vom Kessel oder der Solaranlage fließt oben in den Vorlauf hinein und unten aus der Rücklaufleitung heraus. Dabei wird das Natriumacetat im Speicher beginnend von oben geschmolzen. Die Wärme wird aufgenommen und gespeichert. Wenn die Rücklauftemperatur ähnlich wie beim Vorlauf ist, ist der Speicher gefüllt und das Natriumacetat ist komplett geschmolzen.

Wird nun von der Heizungsanlage Wärmeenergie benötigt, wird wie bei den Wasserspeichern auch, über eine hydraulische Weiche oben das heiße Wasser entnommen und unten fließt das kalte Wasser ein. Dabei erstarrt das Natriumacetat von unten beginnend.

2.4.4. PCM-Studie Fraunhofer Institut

Hier wurde eine Simulation eines Bürogebäudes mit der EPS-Software durchgeführt.

Getestet wurde ein PCM mit Schmelztemperatur von 25°C und einer Breite des Schmelzbereiches von 2K.

- ⇒ Beim Erreichen der Schmelztemperatur (Bereich von 24-26°C) erwärmen sich die Wandaufbauten mit PCM langsamer und geben diese Wärme in der Nacht wieder ab. Abgesehen von der Energieeinsparung durch die verringerte Arbeit einer Klimaanlage bedeutet dies auch eine Verbesserung des Raumkomforts. Unter Umständen ist sogar ein Verzicht auf eine aktive Kühlung denkbar.
- ⇒ Auch für den Heizfall lässt sich dieser Effekt der Glättung der Wand- und Raumtemperatur erreichen.
- ⇒ Bei geeigneten Gebäuden sind hier wesentliche Einsparungen nur in der Übergangszeit zu erwarten, wenn tagsüber durch innere Lasten oder Sonneneinstrahlung genügend Überschusswärme in der Wand gespeichert werden kann.

Messung

Hier wurden Messungen an Wandmustern der Grösse 500 mm x 500 mm durchgeführt. Dazu wird das Wandmuster zwischen zwei getrennt temperierbaren Kupferplatten gepresst, die mit Wärmestromplatten versehen sind. Eine gründliche Isolierung des Randes erlaubte es, den Wärmestrom eindimensional senkrecht zur Wand anzunehmen. So konnte nun sowohl der Wärmedurchlasskoeffizient der Wände (durch Halten verschiedener Temperaturen auf beiden Wandseiten) gemessen werden, als auch die unterschiedliche Dynamik der Wände durch Aufprägen von Temperaturprofilen an den Oberflächen bestimmt werden.

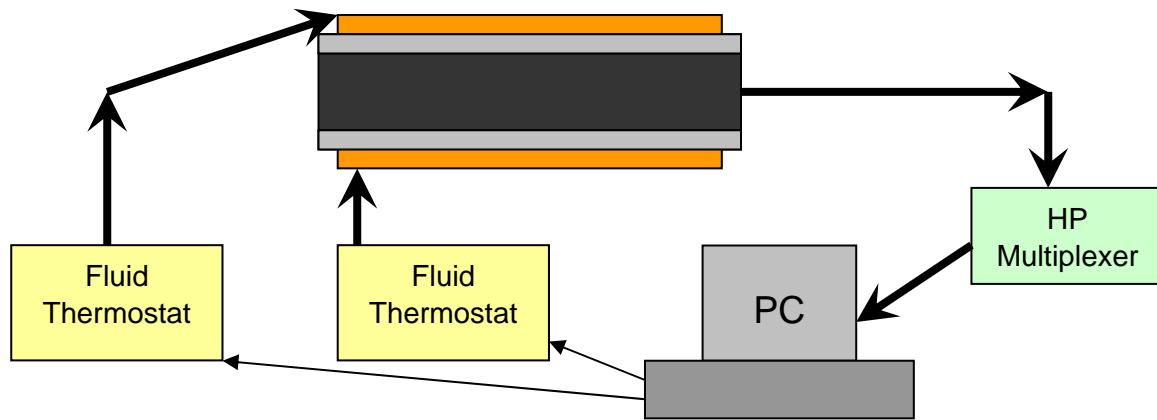
- ⇒ Hierbei wurde nun die Temperatur der beiden Kupferplatten innerhalb von 8 Stunden von 5°C auf 35°C erhöht, dort 4 Stunden konstant gehalten und wieder in 8 Stunden auf 5°C abgesenkt. Vermessen wurde ein Wandstück in dessen Putzschicht PCM beigemischt war und eine ansonsten identisch aufgebaute Referenzprobe. Die Differenz der beiden Wärmeströme zeigte deutlich die durch den Phasenwechsel aufgenommene Energie. Das hier verwendete Material zeigte noch den Effekt der Unterkühlung (niedrigere Erstarrungs- als Schmelztemperatur) und zwei Peaks beim Abkühlen. Beides ist unerwünscht, lässt sich aber inzwischen durch geeignete Behandlung der Phasenwechselmaterialien unterdrücken.
- ⇒ Bei einer weiteren Messmethode wurde nicht nur die Temperatur, sondern der Wärmestrom in die Probe vorgegeben. Hält man nun den Wärmestrom in die Probe über den Messzeitraum konstant, sieht man deutlich das verlangsamte Ansteigen der Temperatur beim Erreichen des Schmelzpunktes. Ist die Energiezufuhr langsam, so ist der momentane Temperaturgradient in der Probe gering, und diese Messung kann gut zum Bestimmen der Verteilungsfunktion der Schmelzwärme über der Temperatur verwendet werden.

Zusammenfassung der Studie (Fraunhofer Institut):

Mikroverkapselung ermöglicht das einfache Einbringen von Phasenwechselmaterialien in herkömmliche Baumaterialien. Durch die Vergrößerung der thermischen Masse in einem definierten Temperaturbereich können Lastspitzen abgefangen und in günstigere Zeiten verschoben werden. Dies kann insbesondere bei Gebäuden in Leichtbauweise zu Energieeinsparung und Komfortgewinn führen. In manchen Fällen kann dadurch möglicherweise ganz auf den Einbau einer aktiven Kühlung verzichtet werden und so intensive Kosten gespart werden.

Die idealen Materialparameter hängen vom Anwendungsfall ab und können durch Parametervariationen mit einem Gebäudesimulationsprogramm bestimmt werden. Die durch das PCM veränderte Dynamik der Wände, wie sie in den Simulationen angenommen wird, sollte durch geeignete Messungen überprüft werden. Dazu wurde eine Messvorrichtung am Fraunhofer ISE aufgebaut. Durch detaillierte Messungen und Bauteilsimulationen kann auch der optimale Aufbau solcher PCM-Wände ermittelt werden.

Experimentaufbau:



2.4.5. "New Spirit" – Erste Anwendung in einem Kühldeckensystem eines Bürogebäudes

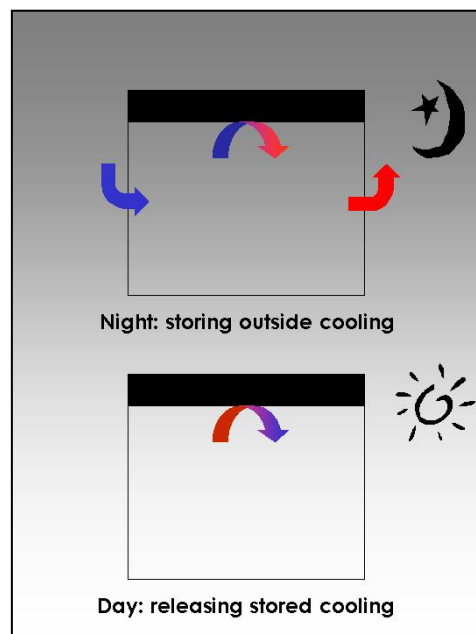
Erster Anwendungsversuch mit PCM in einer Klimaanlage in einem Bürogebäude in England. PCM in Verbindung mit einer Kühldecke und Nachtventilation.
(Projekt der Firma FaberMaunsell)

Dieser Bericht stellt eine Übersicht dar von Systemen welche PCM in Verbindung mit Nachtventilation verwenden. Es diskutiert die Konzepte dahinter und die Entwicklung eines Systems (Cool deck) zur Verbesserung von Kühldecken und Fussbodenlüftungen. Das System verbessert die thermische Wechselwirkung zwischen der zirkulierenden Luft und dem PCM in der Platte. Eine Fallstudie präsentiert die Effizienz dieses Systems in einem Sanierungsgebrauch (Stevenage Borough Council Office). Die Aufnahme von PCM in das System ist auch beschrieben.

Einführung:

Das PCM kann in Verbindung mit Nachtventilation in einem Gebäude eingesetzt werden um es mit Passivkühlung zu versorgen.

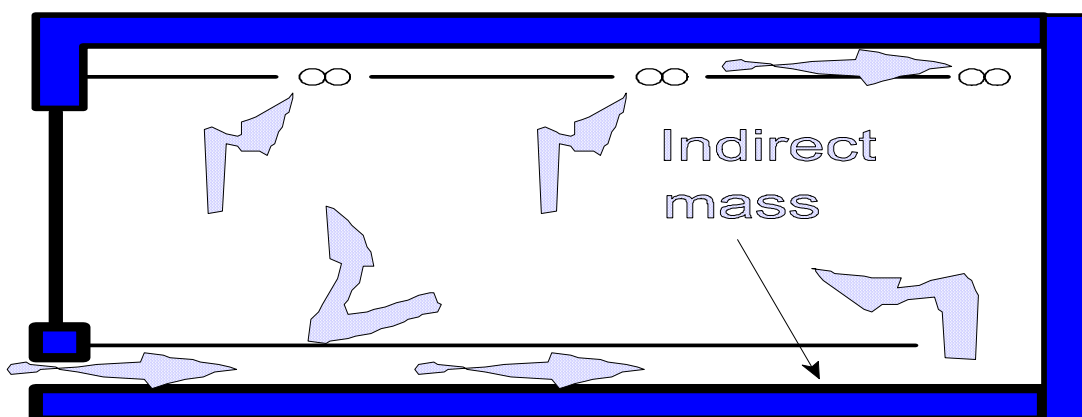
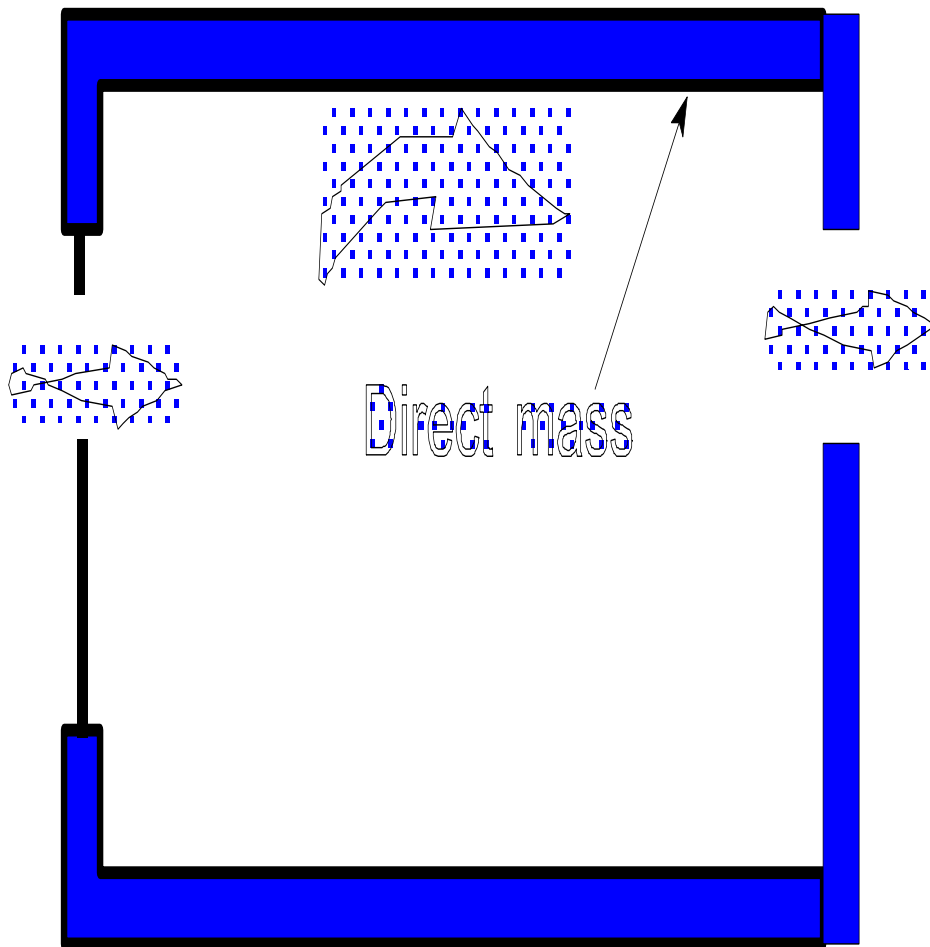
Aussenluft zirkuliert durch das Gebäude während diese mit dem PCM in Kontakt kommt und so das Gebäude kühlt. Die Kühlung ist in der Gebäudestruktur gespeichert und dann verfügbar um am darauffolgenden Tag Hitzespitzen zu kompensieren und die Temperatur in einem bestimmten Bereich zu halten.



Nachtventilation mit PCM ist am effektivsten in moderaten Klimagebieten wo die Tages-Schwingung ausreichend ist und die Temperatur bei Nacht unterhalb der normalen Tageszeit Innentemperaturen fallen. Dies ist passend für Gebäude mit täglichen periodischen Ladungen wie z.B. Bürogebäude.

Der Gebrauch von PCM in Verbindung mit Nachtbelüftung kann die Notwendigkeit einer mechanischen Kühlung minimieren oder sogar eliminieren. Ohne eine mechanische Kühlung können so Komfortbedingungen aufrechterhalten werden, welche niedrige bis gemässigte Kühlladungen erfordern.

Die Systeme mit diesem Kühlprinzip können in „direkt“ und „indirekt“ kategorisiert werden abhängig davon wie die Wärme zwischen Wärmespeicherung und dem zu klimatisierenden Raum übertragen wird.



Direkte Systeme:

Direkte Systeme haben sichtbare Oberflächen im Raum, welche im direkten thermischen Kontakt mit dem zu klimatisierenden Raum stehen.

Die einfachste Form ist eine freigelegte Unterseite der Kühldecke. Die sichtbare Unterseite kühlt den bewohnten Raum über den Tag sowohl mit radiativer und konvektiver Kühlung. Jedoch das Aussehen dieser freigelegten Unterseite verursacht eine grosse Anzahl von Meinungen über die Ästhetik, Akustik und Services hohen Standards.

Besondere strukturelle Formen und Endungen können erforderlich sein, um ein akzeptables Aussehen zu erreichen. Das Freilegen dieser Kühldeckenunterseite in der Zimmerdecke wird schwere Oberflächen im Raum mit sich bringen und ein Ansteigen des reflektierenden Schalls. Dies führt zum Einsatz spezieller Messungen bezüglich absorbierender Teile oder der Integration von akustischen Elementen hohen Standards mit Beleuchtung.

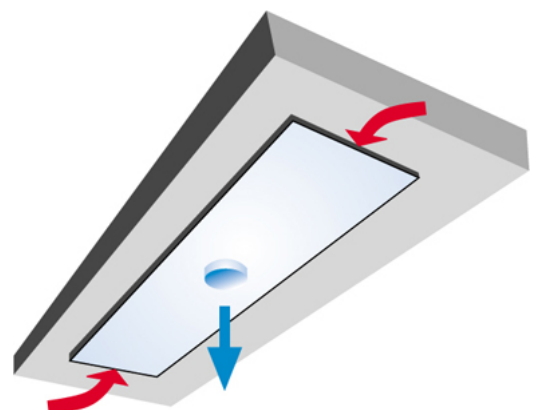
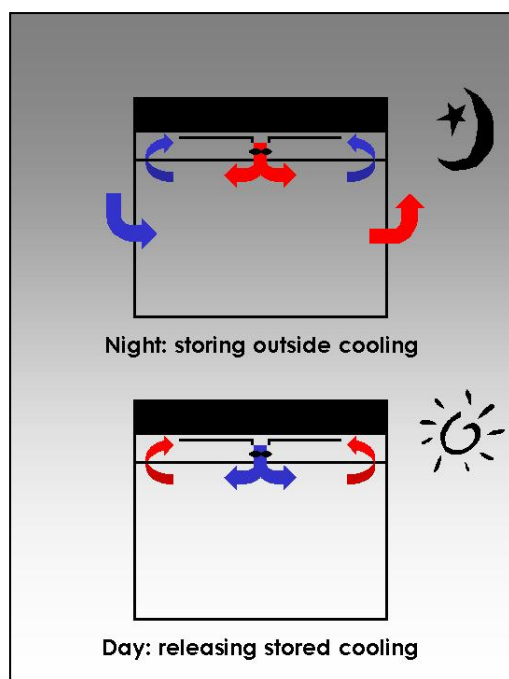
Indirekte Systeme:

Indirekte Systeme basieren auf zirkulierender Luft um die thermische Energie zwischen der thermischen Speicherung und dem zu klimatisierenden Raum zu transportieren.

Luft kann durch eine Boden- oder Deckenöffnung, wo sie Wärme austauscht mit der PCM-Platte bevor diese in den zu klimatisierenden Raum eintritt, geführt werden. Der Wärmeaustausch ist hauptsächlich auf die konvektive Wärmeübertragung angewiesen.

Praktische Probleme mit diesem Systemtyp sind mögliche Konflikte zwischen der Klimatisierung von einer zentralen Versorgung und dem Effekt der thermischen Masse

d.h. die Trägheit der thermischen Masse in der Versorgung wird die Reaktion des Systems reduzieren, es sei denn die Versorgung ist mit einem Bypass zur thermischen Masse ausgestattet. Indirekte Systeme werden hauptsächlich in Kombination mit mechanischen Belüftungssystemen gebraucht. (wie auch in diesem Projekt-Bürogebäude)



Fall Studie

Ein System wurde schon konkret angewendet in „Stevenage Borough Council's offices“ (England):



In der Sommerzeit hat dieses Bürogebäude sehr hohe Wärmebelastungen als Ergebnis der vielen Computer, welche in diesem Gebäude im Einsatz sind. Anstelle einer kompletten Klimaanlage als Lösung entschied man sich für den Versuch eine Passivkühlung entsprechend den oben genannten Systemen einzusetzen.

Als ersten Schritt unternahm die Firma FaberMaunsell eine thermische Messung am Gebäude und es wurde somit ein thermisches Modell des Gebäudes konstruiert.

Die Büros sind natürlich belüftet und haben bürotypische interne Wärmebelastungen. Die Hauptfassaden Ost und West haben 40% Verglasung. Anhand des thermischen Modells und den thermischen Randbedingungen, welche dort im Sommer herrschen hat man die Entscheidung getroffen, die thermische Masse in der abgehängten Decke zu installieren.





Nachtbetrieb der Ventilatoren während der Sommerzeit:

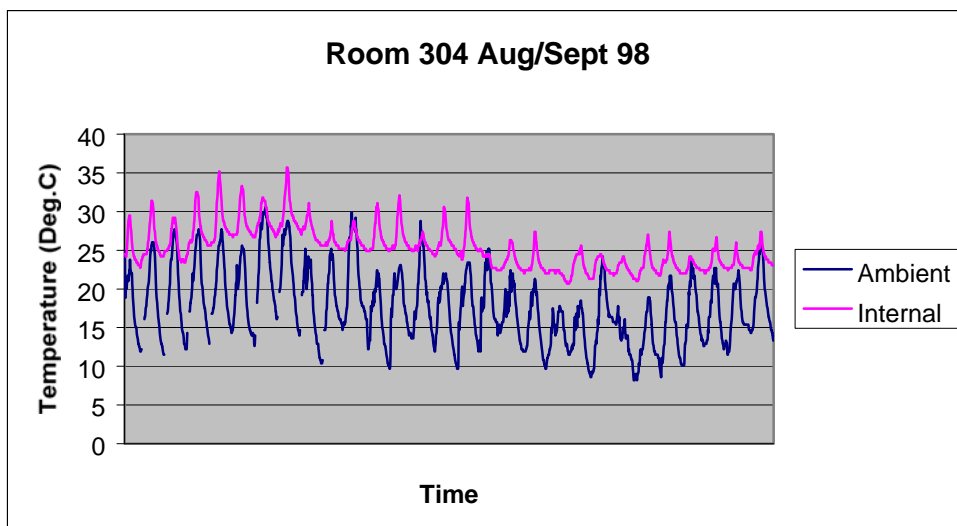
Die Fenster- und Kühldeckenventilatoren werden so gesteuert, dass sie in Betrieb gehen, wenn die Temperatur 24°C überschreitet. Die Nachtventilation wird abgebrochen, wenn die interne Temperatur unterhalb von 19 °C ist. Diese Strategie wurde gewählt damit man bei Kältespitzen ein Überkühlen des Raumes durch Nachtventilation vermeiden kann bzw. auf den Einsatz eines zusätzlichen Heizvorganges am Morgen verzichten kann.

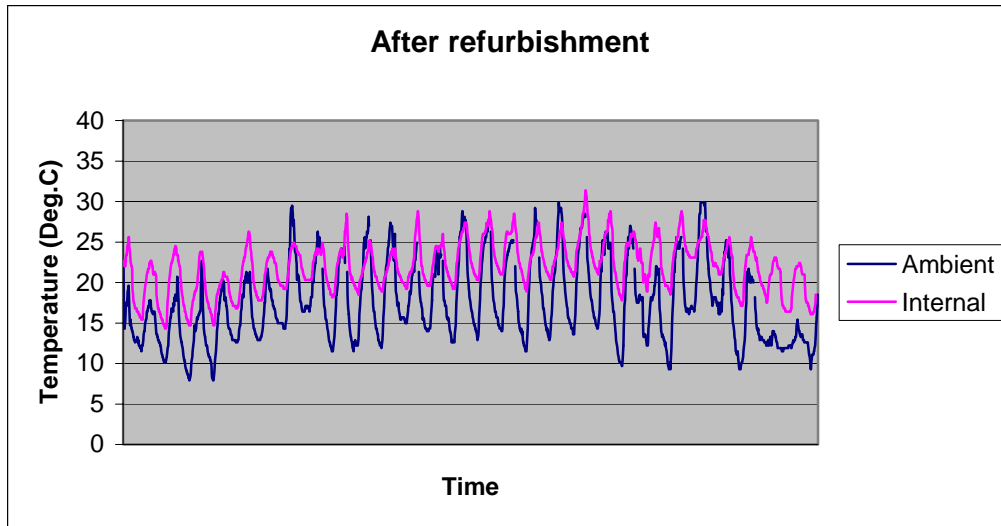
Tagbetrieb der Ventilatoren:

Die Kühldeckenventilatoren werden so gesteuert, dass sie bei einer Überschreitung der Raumtemperatur von 23 °C in Betrieb gehen.

Messungen:

Es wurden nun Messungen bzw. Überwachungen durchgeführt im Sommer vor der Kühlmassnahme in den Kühldecken mit PCM und im darauffolgenden Sommer mit PCM in der Kühldecke. Die Ergebnisse zeigen die folgenden Grafiken:





Das Ergebnis der Messung zeigt, dass eine Reduktion im Bereich von 5 K der internen Temperaturen erfolgte in Bezug auf die Umgebungstemperatur. Dies ist auch übereinstimmend mit den Modellbedingungen der vorab durchgeführten thermischen Analyse.

Ungefähr 1-2 K der Reduktion sind der Solar Blende zuzuschreiben und ca. 3-4 K dem PCM Kühldeckensystem in Verbindung mit Nachtventilation.

Ausser der Reduktion der Temperaturen wurde auch ein besserer Luftaustausch durch das Kühldeckensystem merkbar. Es wurde bemerkt, dass Bereiche mit Nachtventilation am Morgen „frischer“ waren.

Eine Energiebilanz dieser Installation wurde nicht durchgeführt. Jedoch ist das Verhältnis (Kühlung/Ventilator Energie) in der Region von 20.

Das PCM ist ein Salz, welches seine Phase im Bereich von 20-24 °C wechselt.

Auf den folgenden Bildern sieht man wie das PCM in das Kühldeckensystem eingebunden wurde:





Fazit:

Nachtventilation in Verbindung mit thermischer Masse (PCM) ist eine effektive Methode zur Passivkühlung, welche in Verbindung mit anderen Passiv Methoden zum Reduzieren bzw. Eliminieren des Gebrauchs von Klimaanlage eingesetzt werden kann. Natürlich ist reine Passivkühlung nur dann möglich wenn die Hitzespitzen in Räumen bzw. Gebäuden nicht zu hoch sind. In diesem Fall müsste man eine Klimaanlage mit der Passivkühlung kombinieren in Form einer Bypassregelung. Hier wird nun der Bypass so geregelt dass dieser nur dann auf Passivkühlung umstellt wenn im Raum ein auf die Wirkung des PCM abgestimmter Temperaturbereich herrscht. Dies ist ausserdem auch erforderlich da das PCM auch eine gewisse Reaktionszeit hat bis es Wirkung zeigt.

2.4.6. ZAE München

Derzeit laufen bei der ZAE-München einige Studien hinsichtlich PCM deren Ziel es ist Einsatzgebiete für neuartige Produkte mit kurz- bis mittelfristigen Realisierungschancen und hohem Marktpotential zu entwickeln. Das Leitprojekt besteht aus einem **zentralen Teilprojekt**, welches das Vorprodukt PCM behandelt:

Teilprojekt Nr.1: PCM-Entwicklung

und bisher **sechs Teilprojekten** zur Entwicklung von Endprodukten:

Teilprojekt Nr. 2: Wärmespeicher auf PCM-Basis für die Hausheizungstechnik

Teilprojekt Nr. 3: Putze und Verbundsysteme mit hoher Wärmespeicherkapazität

Teilprojekt Nr. 4: Transparente Wärmedämm- und Tageslichtelemente

Teilprojekt Nr. 5: Sonnenschutz-PCM Verbundsystem

Teilprojekt Nr. 6: Einsatz von PCM's in Gipsprodukten

Teilprojekt Nr. 7: PCM zur Temperaturpufferung in Solar-Luft-Systemen

Die Auswahl der Projekte zeigt eine Fokussierung auf den Bereich der Gebäudetechnik. Hier scheint derzeit das größte Interesse seitens der Industrie zu bestehen. Weitere Teilprojekte zu den genannten sind allerdings vorstellbar (PCM in Transportbehältern) bzw. werden gerade verhandelt (PCM in Isolierschaum, PCM in Kühldecken). Das Leitprojekt ist derzeit noch offen für weitere Themen und Teilprojekte!

Zielsetzung des Leitprojekts

Ziel des Leitprojekts ist die Nutzung von Phase-Change-Materials zur Lösung von Problemen im Themenkreis "Energieerzeugung und -speicherung für den dezentralen und mobilen Einsatz". Potentielle Möglichkeiten für den Einsatz von PCM's sind:

- Speicherung von Wärme und Kälte,
- Dämpfung von Temperaturzyklen,
- Kappung von Temperaturspitzen, d.h. Schutz vor Überhitzung und Unterkühlung,
- Phasenverschiebung von Temperaturschwankungen, d.h. deren zeitliche Verzögerung.

Es sollen für diese Einsatzgebiete neuartige Produkte mit kurz- bis mittelfristigen Realisierungschancen und hohem Marktpotential entwickelt werden. In diesem langfristig angelegten Forschungsprojekt werden alle Stufen der Produktentwicklung von der Materialentwicklung und -charakterisierung, über die Erprobung einzelner Komponenten bis hin zum Aufbau von Gesamtsystemen durchlaufen.

Das vom ZAE Bayern initiierte und koordinierte Forschungsprojekt "Innovative PCM-Technologie" wird durch das BMWi gefördert. Projektbeginn war im Sommer 1999; die Laufzeit des Projekts beträgt 5 Jahre.

Es waren leider keine Details zu den laufenden Studien zu ermitteln weder per Internet oder Email, sei es aus Gründen der Geheimhaltung oder aus anderen nicht bekannten Gründen!

Laufende Infos zu den Studien der ZAE-München unter www.zae-bayern.de !

2.5. Weltweite Suche über Internet nach Quellen zum Thema PCM

Quellen:

Florida Solar Energy Center
Attn: Public Information Office
1679 Clearlake Road
Cocoa, FL 32922
Phone: (321) 638-1000; Fax: (321) 638-1010
Email: info@fsec.ucf.edu
World Wide Web: www.fsec.ucf.edu

National Technical Information Service (NTIS)
5285 Port Royal Road
Springfield, VA 22161
Phone: (800) 553-6847 or (703) 605-6000
Fax: (703) 605-6900
Email: orders@ntis.fedworld.gov
World Wide Web: www.ntis.gov

When ordering from NTIS, there may be additional fees for shipping and handling. Check the price and availability before placing an order.

Energy Efficiency and Renewable Energy Clearinghouse (EREC)
P.O. Box 3048 Merrifield, VA 22116
Voice (USA only): 800-DOE-EREC (363-3732)
Email: doe.erec@nciinc.com

www.lindahall.org

J.R.Gates@bton.ac.uk.

www.omega.co.uk

www.pcm-solutions.com Grosshändler verschiedener PCM-Produkte

www.microclimate.com

www.frisby.com

PCM Wärmespeicherung

http://www.rubitherm.com/deutsch/pages/04a_waermespeicherung.htm

PCM Paraffine http://www.rubitherm.com/deutsch/pages/04b_paraffine.htm

PCM in Kleidern http://www.hucke.com/johnslim/de/aktuelles/00_07-comfortemp.htm

PCM in Kleidern 01.99 <http://tagesanzeiger.ch/archiv/99januar/990108/257594.HTM> / [Intra-Link dieser Seite](#)

Interaktive Stoffe / Erklärung <http://www.taubert.com/Interaktiver-stoff.htm>

Der PCM-Hersteller <http://www.schoeller-textil.ch>

Presse ComforTemp http://www.schoeller-textiles.com/d_press_110400.html

Erklärung latente Wärmespeicherung / PCM-Links (english) <http://freespace.virgin.net/m.eckert/>

Frisby (english) <http://www.thermasorb.com/technical.html>

Englische PCM-Links
PCM Properties

[Organic Compounds Database](#)
[ODD Ivar Levik Hydrates Page](#)

PCM Incorporated Into Textiles

[Frisby Technologies](#)

[Outlast Clothing](#)

The Use of PCM To Control Body Temperature
[Glazier Tek Inc](#)

[Coolsport Body Cooling/Heating Vests](#)

[Microclimate Systems Inc](#)

Other Applications For PCM
[Vacuum Insulated Automotive Catalytic Converter](#)

[Southeastern Medical](#)

[Thermo-Pad](#)

PCM Energy Storage System Manufacturers
[RUBITHERM GmbH](#)

[PCM Thermal Solutions](#)

[TEAP Thermal Energy](#)

PCM For Heat or Coolth Storage
[Underfloor Heating System Using PCM](#)

[PCM's For Cooling and Solar Heat Storage](#)

[Thermal Energy Storage](#)

[Thermal Management of Outdoor Enclosures](#)

2.6. Spezifische Daten von PCMs verschiedener weltweiter Hersteller

2.6.1. PCM's von der Firma CLIMATOR aus Schweden

Diese Firma gehört weltweit zu den ersten Herstellern, welche unterschiedliche PCM's herstellen. **Ausserdem hat die Firma CLIMATOR eines der weltweit ersten Raumkühlgeräte auf PCM Basis namens CLIMA COOLER hergestellt.**

Diese PCM's werden in sogenannten Pouches (Päckchen) hergestellt zu 0,5 kg und zu 1 kg.



Hier sind einige der PCM's von CLIMATOR und deren spezifische Daten:

ClimSel C 7

Phase change temperature:	7°C
Maximum temperature:	40°C
Storage capacity 0 - 30°C	45 Wh/kg
Latent heat of fusion:	15 Wh/kg
Specific heat appr. In PCM	1 Wh/kg/°C
Specific gravity:	1,42
Thermal conductivity	0,5 - 0,7 W/m/°C

ClimSel C 24

Phase change temperature:	24°C
Maximum temperature:	60°C
Storage capacity 15 - 45°C	60 Wh/kg
Latent heat of fusion:	30 Wh/kg
Specific heat appr. In PCM	1 Wh/kg/°C
Specific gravity:	1,48
Thermal conductivity	0,5 - 0,7 W/m/°C

ClimSel C 32

Phase change temperature:	32°C
Maximum temperature:	60°C
Storage capacity 20 - 50°C	84 Wh/kg
Latent heat of fusion:	54 Wh/kg
Specific heat appr. In PCM	1 Wh/kg/°C
Specific gravity:	1,45
Thermal conductivity	0,5 - 0,7 W/m/°C

ClimSel C 48

Phase change temperature:	48°C
Maximum temperature:	80°C
Storage capacity 35 - 65°C	90 Wh/kg
Latent heat of fusion:	60 Wh/kg
Specific heat appr. In PCM	1 Wh/kg/°C
Specific gravity:	1,36
Thermal conductivity	0,5 - 0,7 W/m/°C

ClimSel C 58

Phase change temperature:	58°C
Maximum temperature:	80°C
Storage capacity 45 - 75°C	101 Wh/kg
Latent heat of fusion:	71 Wh/kg
Specific heat appr. In PCM	1 Wh/kg/°C
Specific gravity:	1,46
Thermal conductivity	0,6 - 0,7 W/m/°C

Preise auf Anfrage bei der Firma CLIMATOR:

1 kg Päckchen eines jeden PCM's kostet bei CLIMATOR 4,20 Euro (oder CHF 6.30)
0,5 kg Päckchen 4 Euro (oder CHF 6.00)

2.6.2. PCM's von TEAP Energy

PCM's mit niedrigen Temperaturen

PCM von TEAP Energy	Schmelztemperatur	Latente Wärme	Preis
TEA-4	-4°C	130-300 kJ/kg	
TEA-10	10°C	130-300 kJ/kg	
TEA-16	-16°C	130-300 kJ/kg	
TEA-21	-21°C	130-300 kJ/kg	
TEA-31	-31°C	130-300 kJ/kg	

PCM's aus Salzhydraten mit hohen Temperaturen:

PCM Name	Schmelztemperatur	Average Density	Latente Wärme
TH29	29°C	1500 kg/m ³	175-225 kJ/kg
TH58	58°C	1500 kg/m ³	175-225 kJ/kg
TH89	89°C	1500 kg/m ³	175-225 kJ/kg

2.6.3. Hochtemperatur PCM's aus Paraffinen von der Firma Honeywell

Produktname High Operating Temp.	Schmelzpunkt
Astorstat 6920	225-265 F
Astorstat 6988	265-275 F
Astorstat 10069	221-223 F
Astorstat 10316	228-231 F

Produktname Low Operating Temp.	Schmelzpunkt
Astorstat HA16	64-66 F
Astorstat HA17	71-73 F
Astorstat HA18	81-83 F
Astorstat HA20	98-100 F
Astorstat HA200A	103-105 F
Astorstat HA300B	106-108,5 F

Produktname Mid. Operating Temp.	Schmelzpunkt
Astorstat 145	154-156 F
Astorstat 150	159-161 F
Astorstat 160	169-171 F
Astorstat 180	189-191 F
Astorstat 198	207-209 F

Produktname Mid. Operating Temp. RMP	Schmelzpunkt
Astorstat 134	133-135 F
Astorstat 174	173-175 F
Astorstat 181	180-182 F
Astorstat 200	199-201 F
Astorstat 215	214-216 F

3. Phoenix light: Die Idee mit dem Doppelrohr (Grundlagen Schritt 1)

3.1. Allgemein

Basierend auf dem breiten Know-how der vorgenannten Beispiele und der praktischen Erfahrung konnte innert kurzer Zeit ein neuartiges System zum Heizen und Kühlen entwickelt werden.

Mit Hilfe des PCM's soll es möglich sein mit geringstem Energieeinsatz im Sommer und Winter eine hohe Behaglichkeit zu erreichen, und zwar ohne Klimaanlage und Kältemaschine, einzig mit gezielter und regulierbarer Nutzung der kühlen Nachtluft. Das Heizen geschieht mit dem gleichen System, indem die Überschusswärme (Einstrahlung und Personen etc.) gespeichert wird und in der Nacht zum Heizen wieder abgegeben wird, und zwar selbstregulierend.

3.2. Wie funktioniert Phoenix light?

(siehe auch nachfolgend Fig. 1-9)

3.2.1. „Phoenix light“-Standard

Die trotz gutem Sonnenschutz noch eingestrahlte Wärme sowie die interne Wärmelast werden mit Phoenix light tagsüber gespeichert. Das System ist selbstregulierend. In der Nacht strömt durch das Innenrohr die kühle Luft von aussen. Das PCM erstarrt. Eine Hightech-Regelung managt den Lade- und Entladezustand, misst die Lufttemperatur im Raum und Aussen und kann auch die Storensteuerung und weitere Funktionen übernehmen. Im Winter kann das gleiche System die Heizung ganz oder teilweise übernehmen

3.2.2. „Phoenix light“-Umluft

Im Prinzip gleich wie 3.2.1 jedoch mit Umluftbetrieb.

Vorteile: Die Heiz- und Kühlleistung im Raum kann verstärkt werden und die Rohre können unsichtbar in der Hohldecke oder im Hohlboden angeordnet werden.

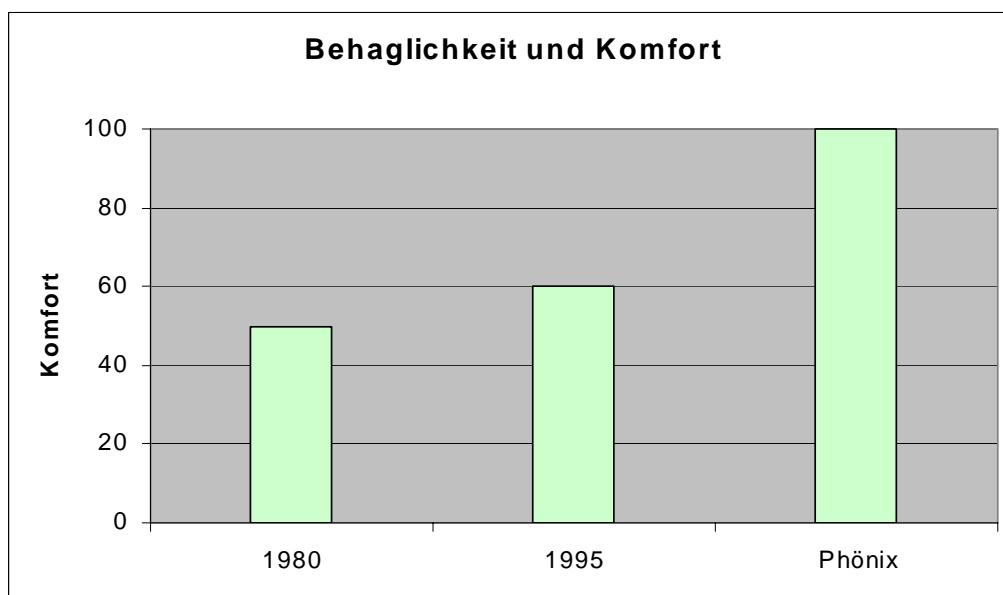
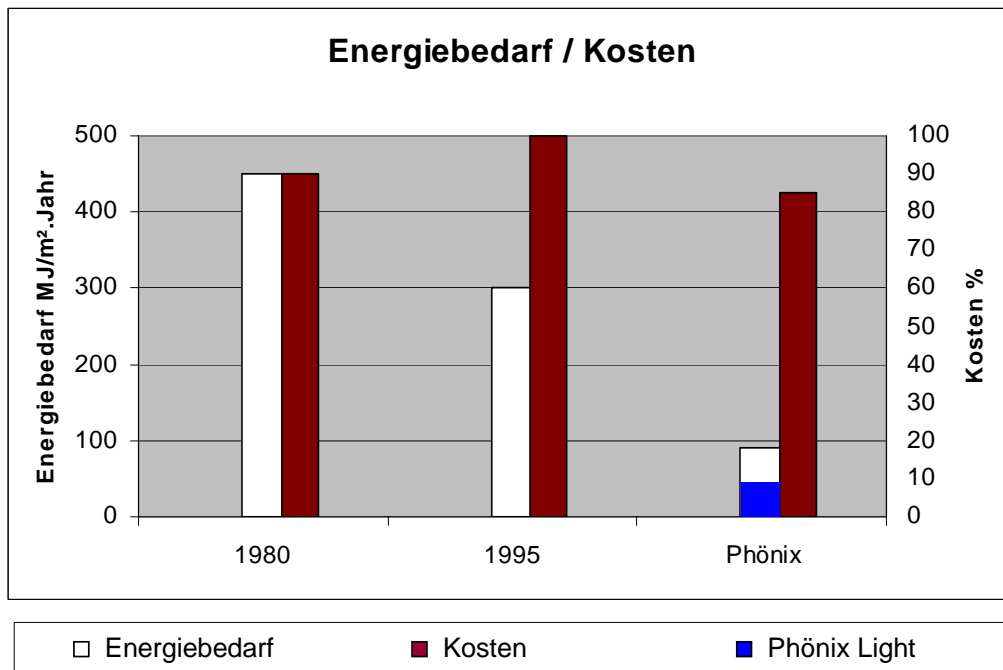
3.2.3. „Phoenix light“-Rectangular

Gleiches System wie 3.2.1 oder 3.2.2, jedoch werden rechteckige Kanäle statt Rohre eingesetzt.

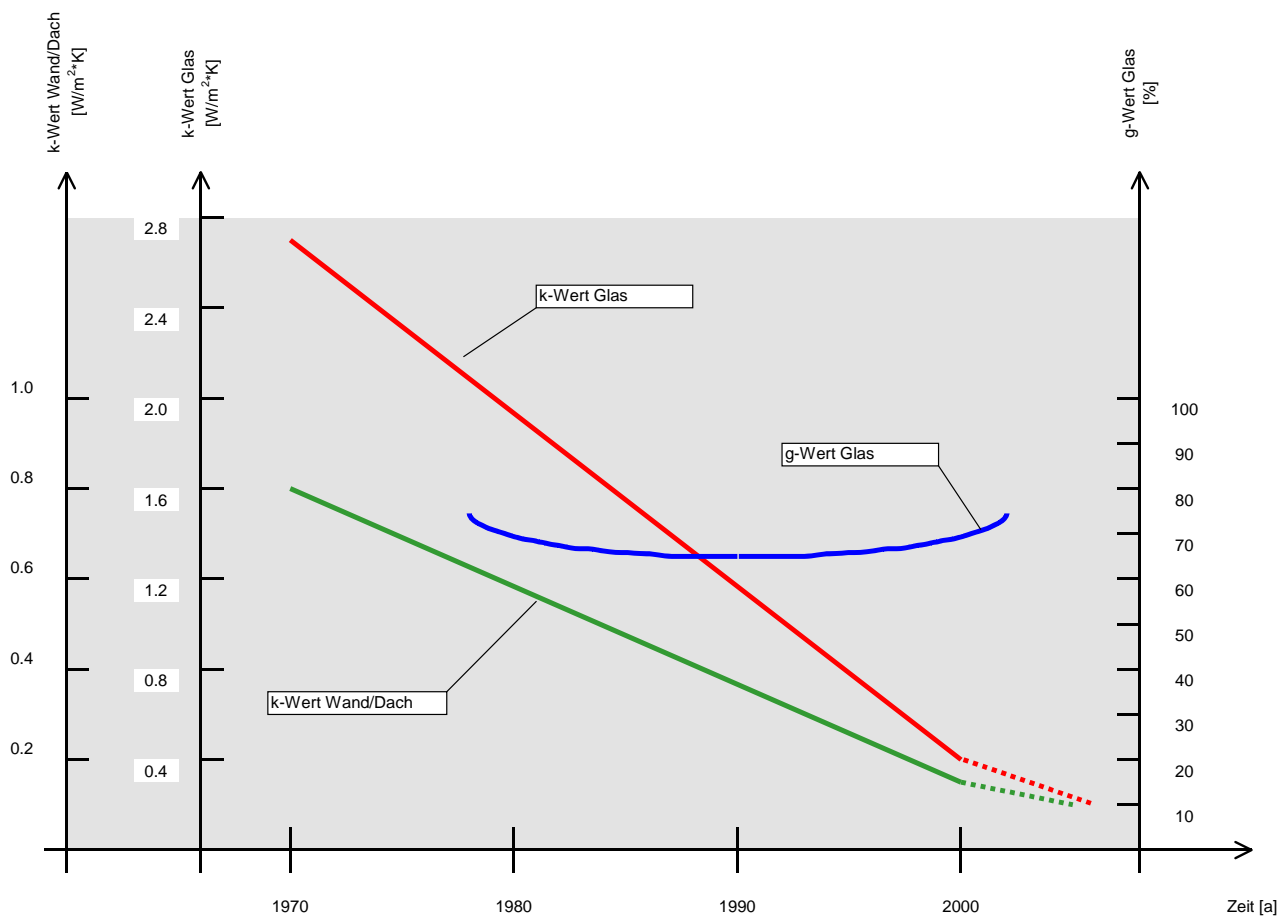
Vorteil: Flexible Einpassung in die architektonische Raumgestaltung. Der Einbau in den Deckenhohlraum oder im Hohlboden oder als Wandkonstruktion ist möglich.

3.3. Vergleiche und Trends

- Energiebedarf
- Investitionskosten
- Behaglichkeit und Komfort
- Eigenschaften der Gläser, K-Werte und G-Werte

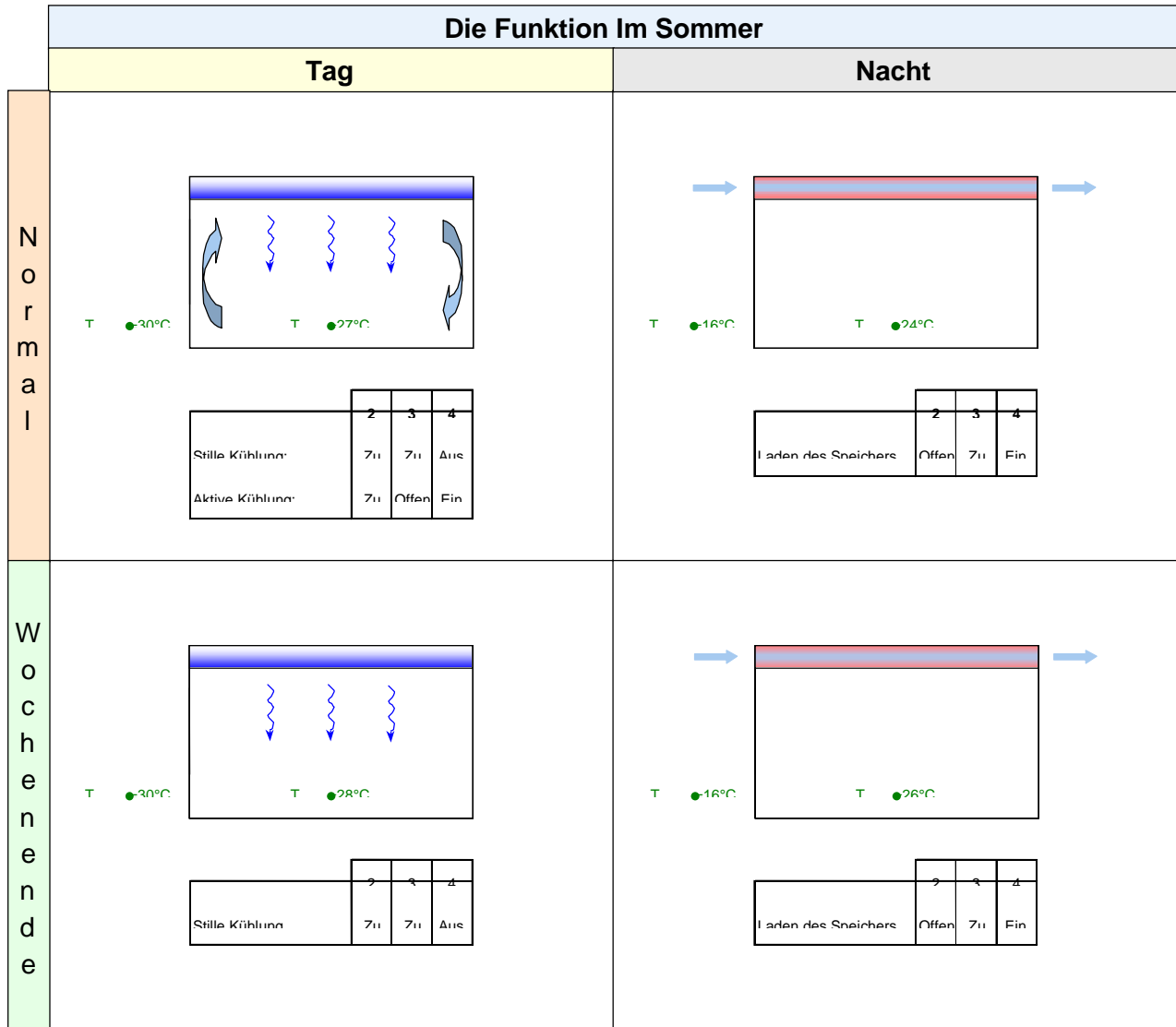


Die Entwicklung von Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Wert oder U-Wert) und von
Gesamtenergiedurchlässigkeitsfaktor der Gläser (g-Wert)

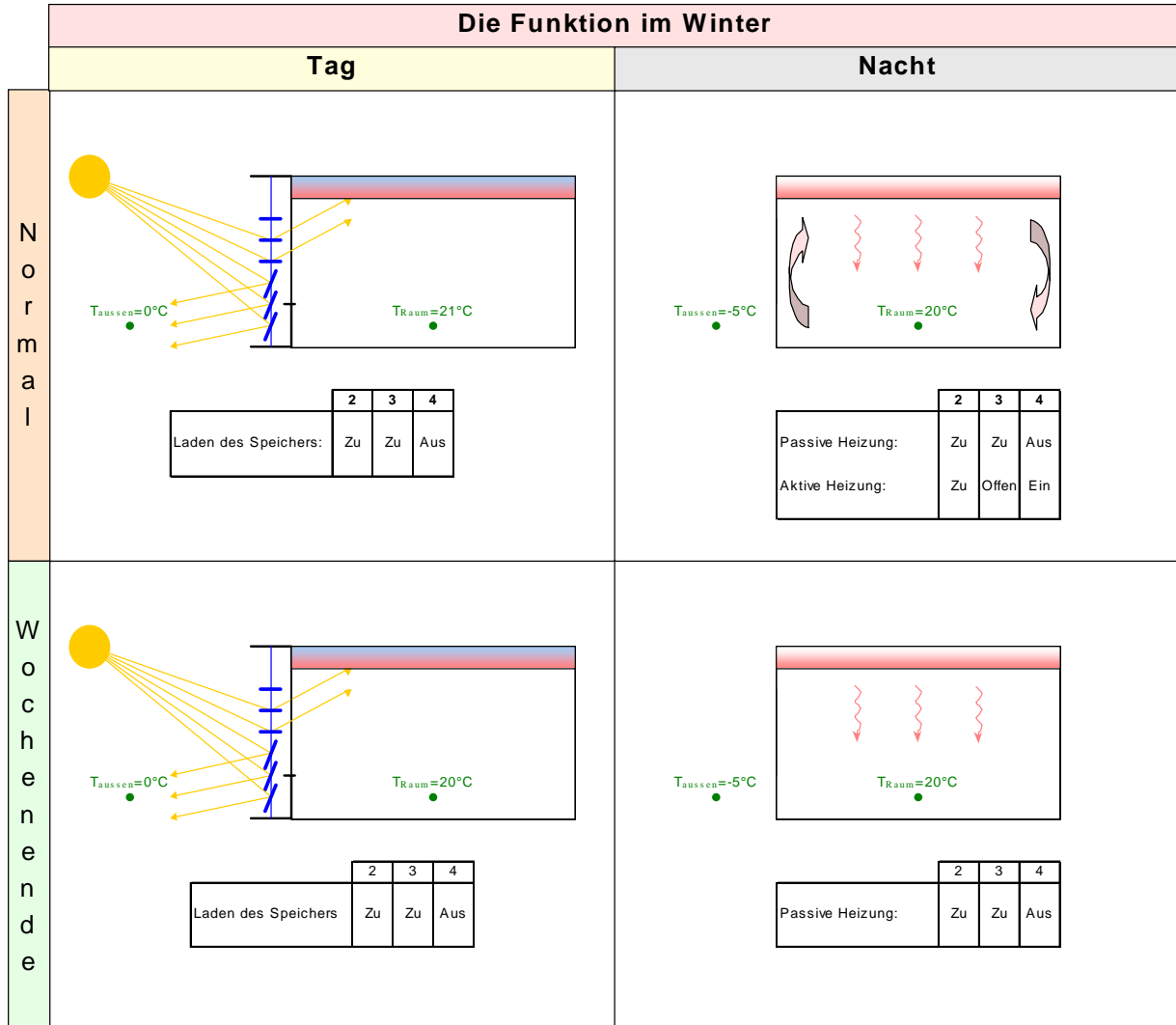


3.4. Wo wäre Phoenix light einsetzbar?

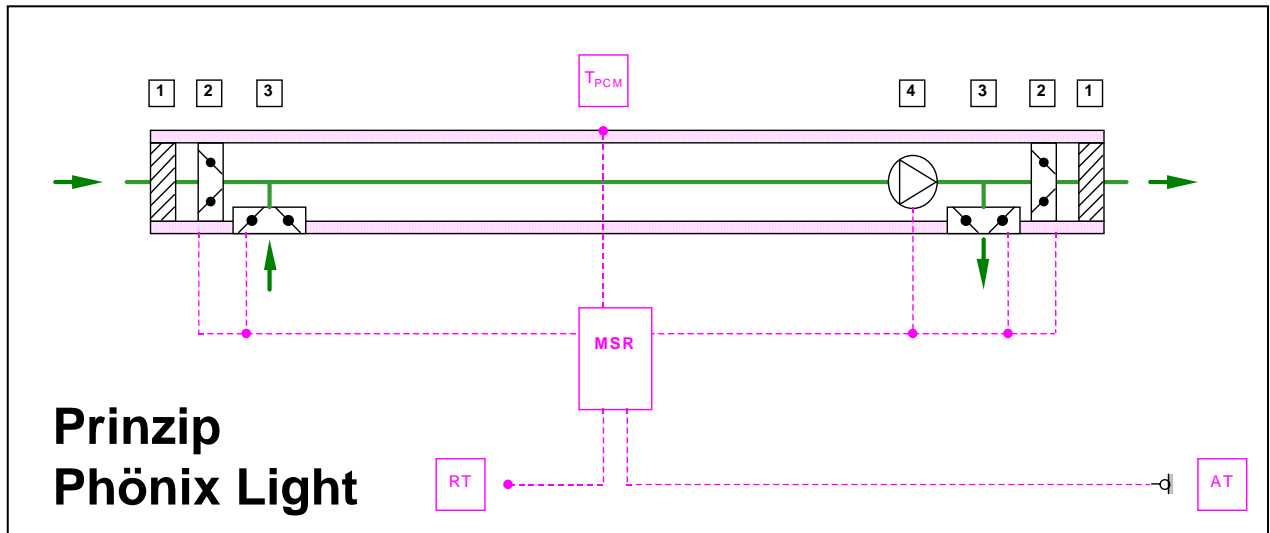
- In Neubauten und Sanierungen
- Überall da, wo die Aktive-Speicher-Decken (Bauteilkonditionierung) nicht möglich sind.
- Überall da, wo neue Wege beschriftet werden.



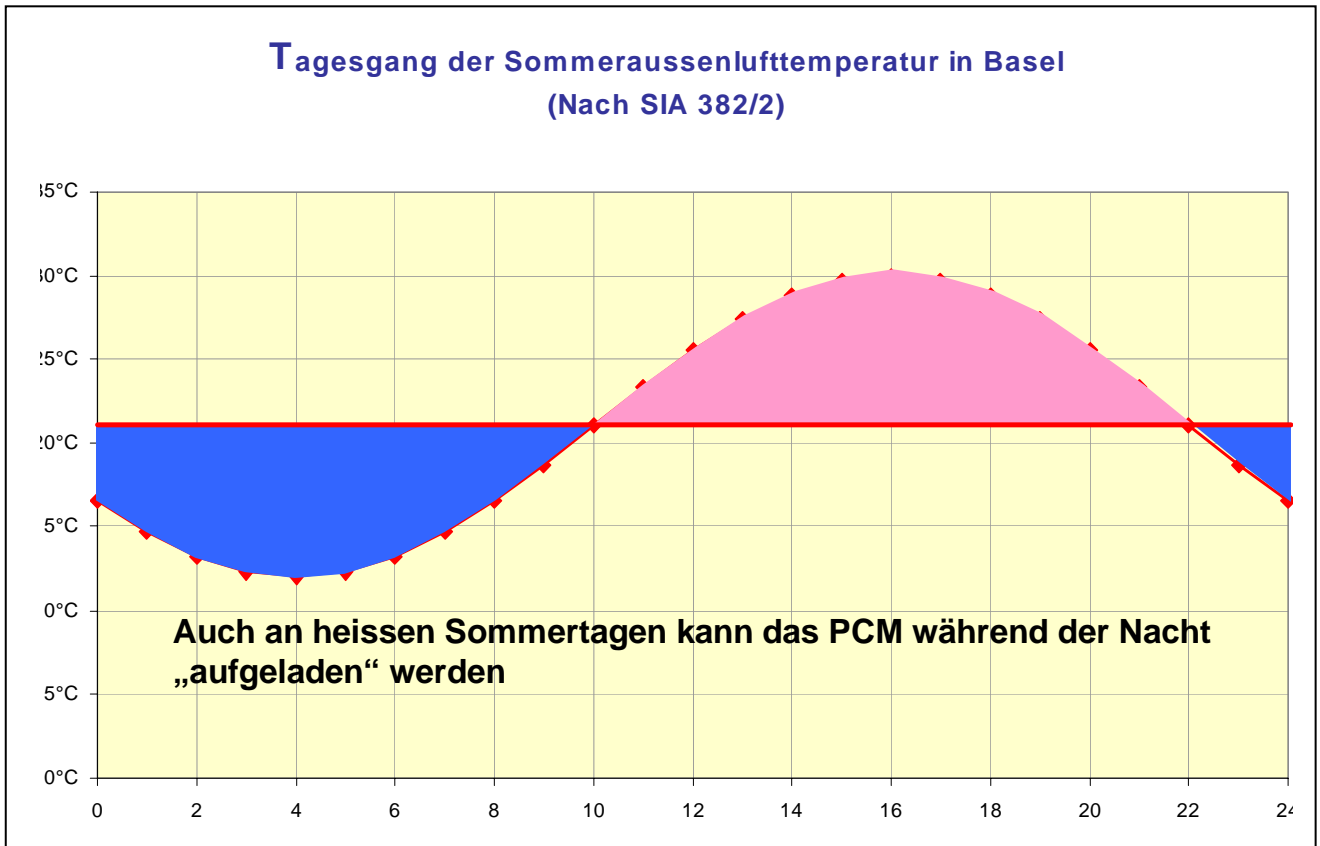
(Fig. 1)



(Fig. 2)

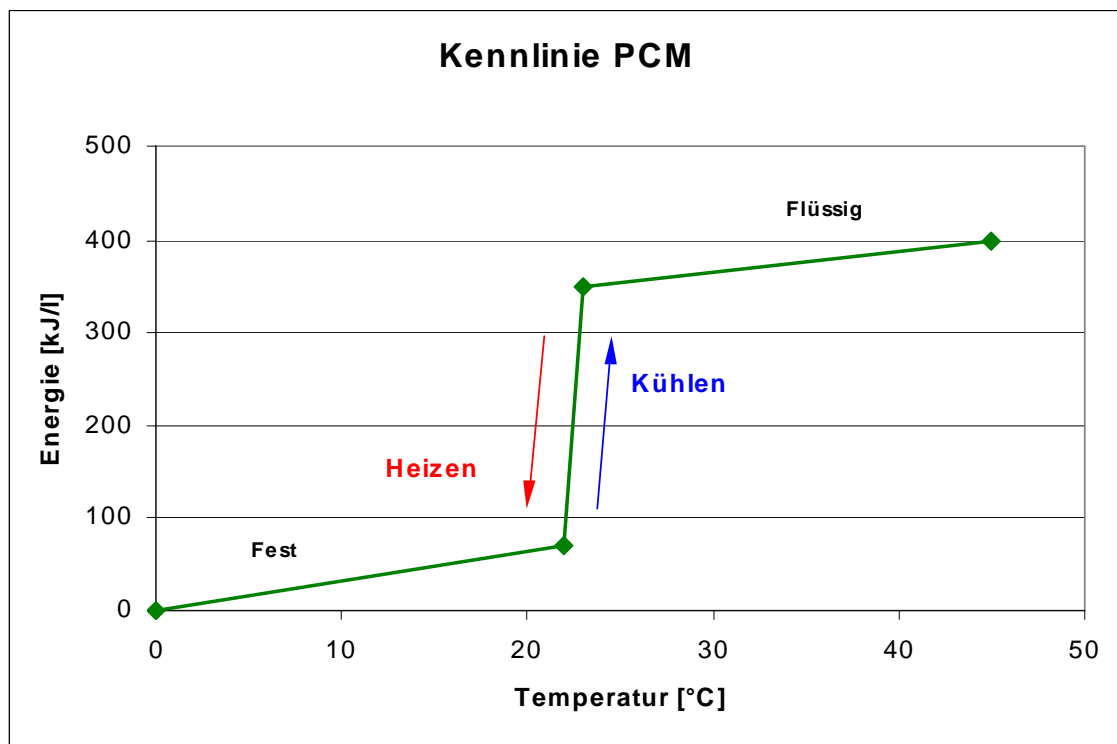


(Fig. 3)



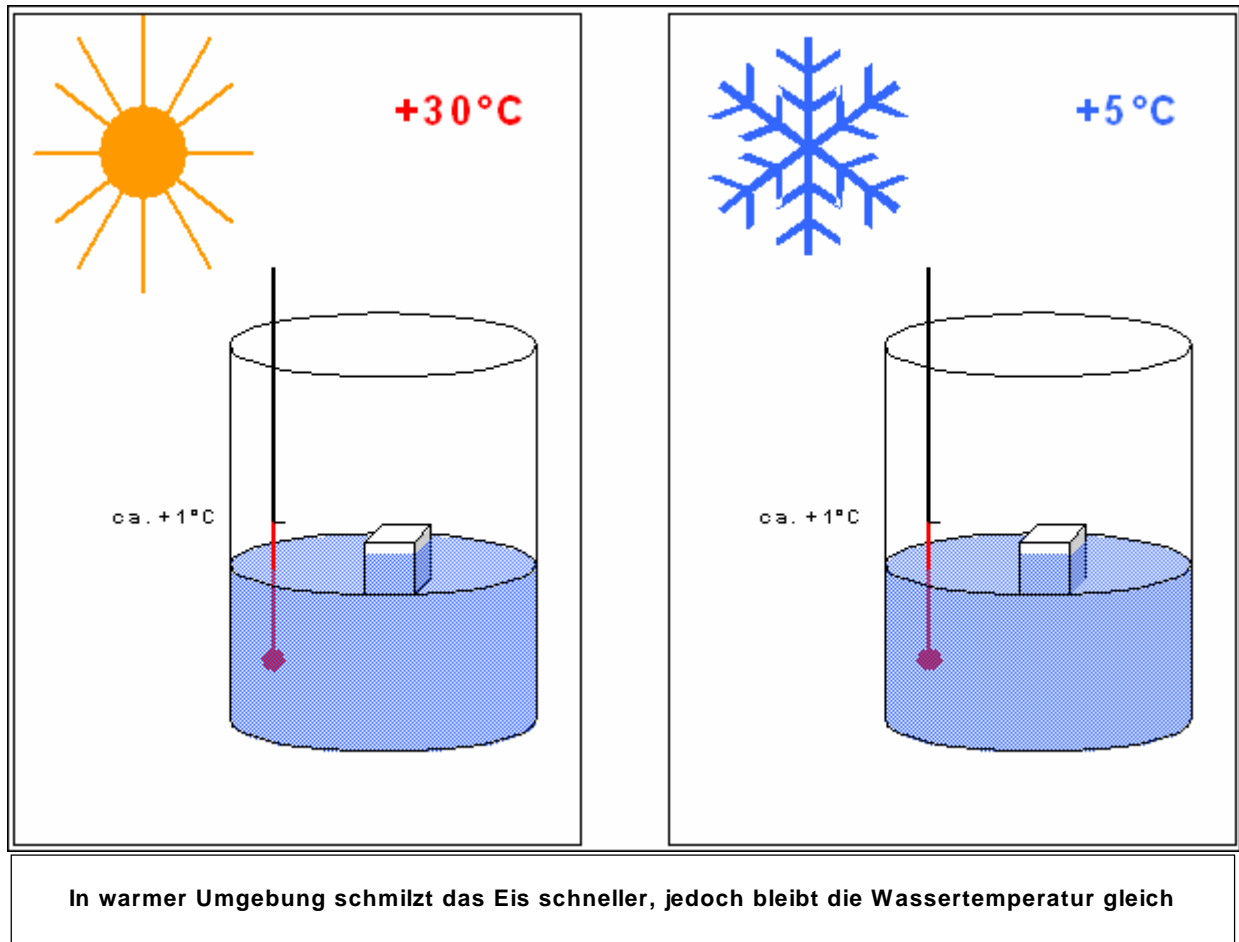
(Fig. 4)

Wie funktioniert das PCM?



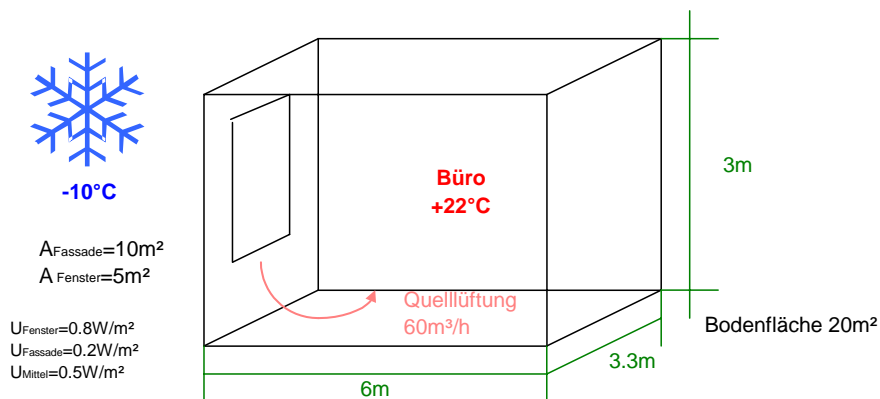
Im Bereich von 19°C bis 25°C speichert 1 Liter PCM 300 kJ und 1 Liter Beton 12 kJ

(Fig. 5)



(Fig. 6)

Heizen im Winter bei Aussentemperatur $AT=-10^{\circ}\text{C}$



Bilanz

			Wärme [W]		
			-	+	
A Transmissionsverluste	$Q_T = A \cdot \Delta T \cdot U_{\text{Mittel}}$	$10\text{m}^2 \times (22 - (-10)) \times 0.5$	160		
B Quelllüftung	$Q_L = V \cdot \text{CL} \cdot \gamma_L \cdot \Delta T$	$60\text{m}^3/\text{h} \times 0.3 \times 1.15 \times (22 - 19)$	60		
C Fremdwärme	2 Personen à 60W 2 PC à 50W Geichzeitigkeit 0.7	$(60 + 50) \text{W} \times 0.7$		150	
D1 Beleuchtung	$Q = q_{\text{SP}} \times A_{\text{Bod.}}$	$10\text{W/m}^2 \times 20\text{m}^2$	=200	200	
Oder D2 Tageslicht	$Q = A_F \cdot q_{\text{ST},g}$	$5\text{m}^2 \times 80\text{W/m}^2 \times 0.6$	=240		
			220	350	$\Delta W = 130\text{W}$

Bei $AT=-10^{\circ}\text{C}$ wird der Raum am Tag auf 22°C mit Phönix "Light" geheizt und es resultiert 130 W überschusswärme, welche vom PCM Tags gespeichert wird und während der Nacht wieder an der Raum abgegeben wird.

(Fig. 7)

Simulation

Um eine bessere Darstellung der Effizienz dieses System zu bekommen, wurde in Partnerschaft mit der Hochschule Ensais von Strassburg (Professor A. Triboix) eine erste Simulation erledigt.

Diese wurde für das Konzept „Phönix light“ für einen heissen Sommertag gemacht und beweist, dass diese innovative Art zu klimatisieren Zukunft hat!

RECHENMODELL

Raumdimensionen Breite: 4.00 m Höhe: 3.25 m
 Rechte Wand 30°C (Fensterscheibe)
 Linke Wand 25°C
 Spez. Wärmelast 60 W/m²
 Rohrdurchmesser 20 cm
 Rohrabstand 50 cm

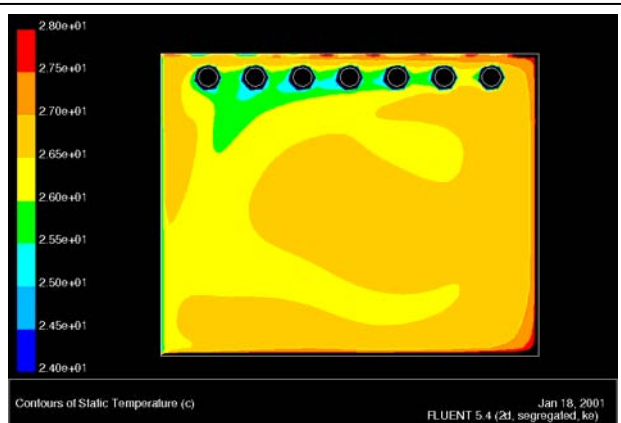
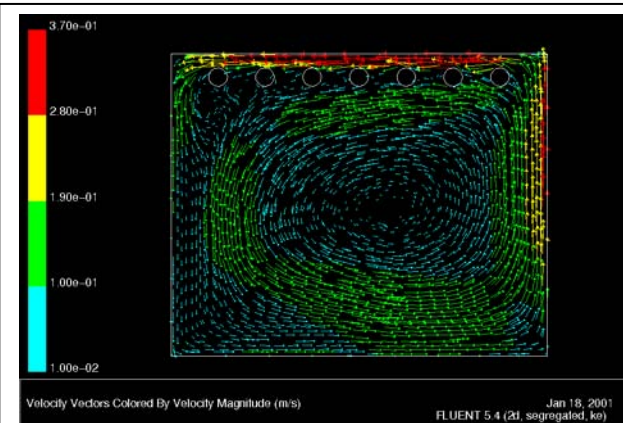
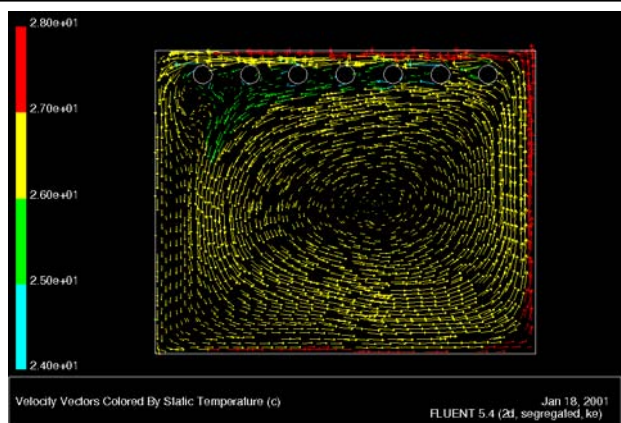
ERGEBNISSE

In der Aufenthaltszone können wir feststellen:

- Eine gute Temperaturhomogenität zwischen 26 und 27°C
- Die Luftgeschwindigkeit überschreitet nirgends 20 cm/s

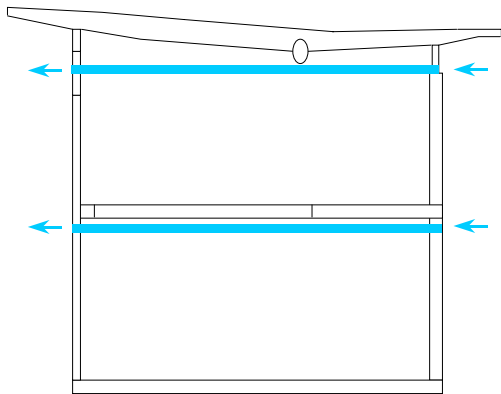
Diese Konditionen entsprechen einer guten thermischen Behaglichkeit nach Fanger

Wichtig: Die Luftumwälzung geschieht durch Schwerkraft-zirkulation ohne Ventilator

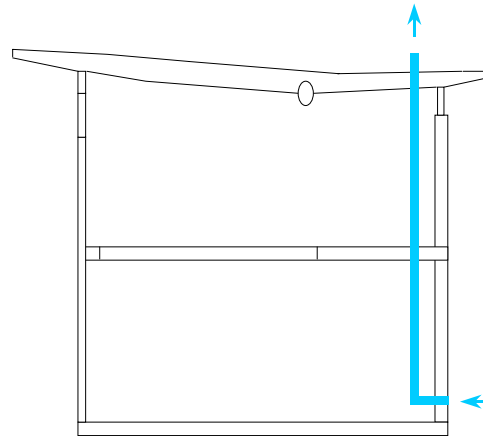


(Fig. 8)

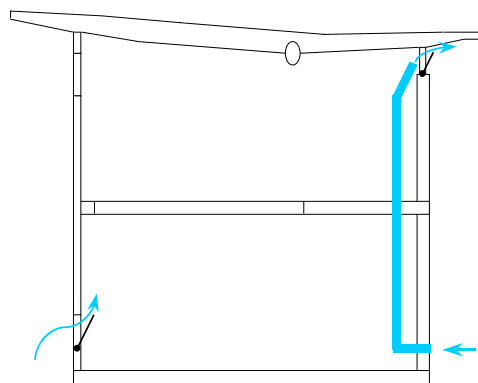
Einbauvarianten



I. Horizontal



II. Vertikal



III. Vertikal mit Induktion der
Raumluft

(Fig. 9)

3.5. Überprüfung der Verwendbarkeit Phoenix light "Doppelrohr"

Die Idee "Doppelrohr" ergibt folgende Probleme:

- Das vorgesehene PCM-Pulver (Paraffin gekapselt) ist sehr teuer, ca. Fr. 40.-- /kg.
- Der Ansprechpartner und Spezialist des Lieferanten (Firma Schoeller, Herr Suter) ist nicht mehr in der Firma, Nachfolger fehlt.
- Weitere Probleme von Paraffin sind der Wärmeübergang im festen Zustand und das Brandrisiko.

Daraus folgt, dass das PCM auf Salzbasis für unsere Anwendung günstiger ist.

Vorteile: Preisgünstiger

Nachteil: sehr korrosiv, für Doppelrohr aus verzinktem Stahlblech nicht geeignet.

Unser Entscheid:

Anstelle des Phoenix light "Doppelrohr" wird ein Gerät mit Ventilator (sog. Comfort-Cooler), welcher mit PCM-Beuteln bestückt ist, verwendet. Der Comfort-Cooler ist eine schwedische Entwicklung und steht als Prototyp zur Verfügung.

Auf die Weiterentwicklung des Doppelrohres wird verzichtet, dafür wird der Prototyp Klima-Cooler geprüft und am praktischen Beispiel ausgemessen und getestet.

Ort: Eye-Catcher (Arch. Felix Knobel) im Dreispitz-Areal. Dieses Gebäude ist für den Winterfall optimiert, im Sommer infolge des Leichtbaus problematisch, d.h. sehr heisse Räume.

4. Comfort-Cooler (Schritt 3)

Eine konkrete Schwedische Entwicklung

4.1. Allgemein

Die gewonnenen Kenntnisse über PCM wie z.B.

- hohe Kosten des vorgesehenen PCM-Pulvers von Frisby (Paraffin gekapselt) von ca. CHF 40.00/kg
- der schlechte Wärmeübergang in festem Zustand
- das Brandrisiko

zeigten, dass die Verwendung von PCM auf Salzbasis günstiger ist für die geplante Anwendung. Deshalb wurde das Produkt "Climsel 24", welches bessere Eigenschaften wie Paraffin besitzt, verwendet.

4.2. Wie funktioniert "Comfort-Cooler"

Beschreibung und Funktion des Gerätes

Anstelle des Doppelrohres Phoenix wird ein Kubus mit Ventilator (sog. Comfort-Cooler), welcher mit PCM-Beuteln bestückt ist, verwendet. Die Klappen und Regulierung sind wie bei Phoenix und müssen zusätzlich geliefert werden. Der Comfort-Cooler ist eine schwedische Entwicklung und steht als Prototyp zur Verfügung.

Fabrikation des Gerätes: Firma Climator, Schweden

Dieses Gerät gehört weltweit zu den ersten Raumkühlgräten auf PCM Basis.

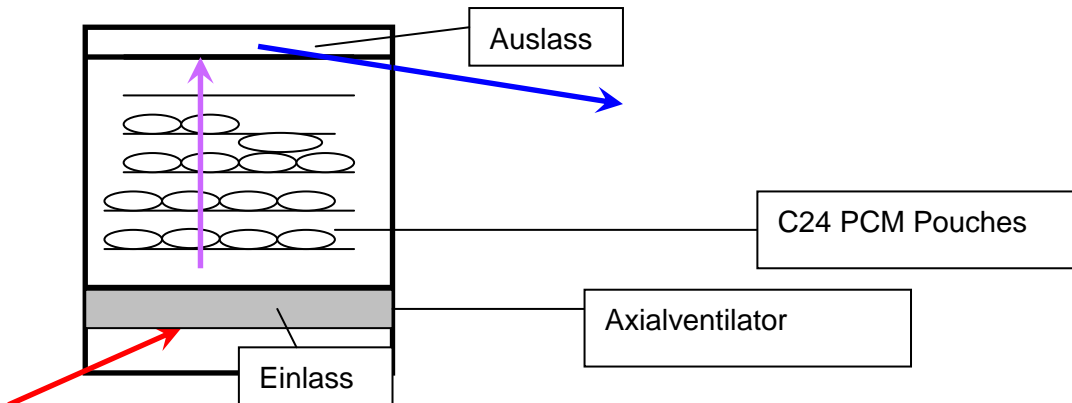
In diesem Gerät sind 70 kg ClimSel C24 PCM integriert welches auch die Firma Climator herstellt.

Spezifische Daten des C24:

ClimSel C 24

Phase change temperature:	24°C
Maximum temperature:	60°C
Storage capacity 15 - 45°C	60 Wh/kg
Latent heat of fusion:	30 Wh/kg
Specific heat appr. In PCM	1 Wh/kg/°C
Specific gravity:	1,48
Thermal conductivity	0,5 - 0,7 W/m/°C

Funktionsprinzip des Gerätes:



Unten am Gerät befindet sich der Einlass in welchem ein Axialventilator über die gesamte Einlassbreite die Luft durch die in das Gerät gebetteten PCM Päckchen führt und am obigen Auslass wieder ausbläst.

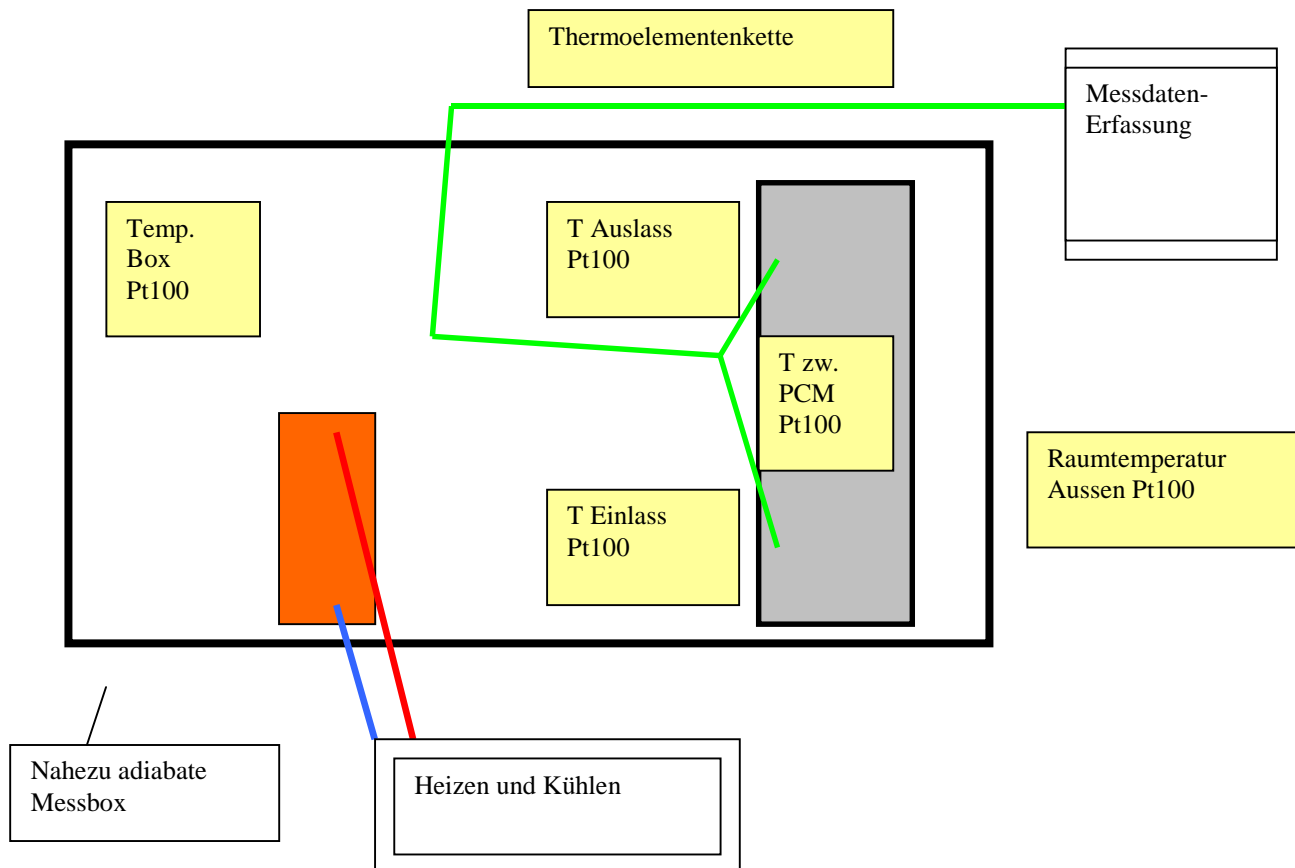
Herstellerangaben:
Niedrige Energie 77 W/h
Speicherkapazität bis zu 5 kWh
Abmessungen:

L 0,8m
H 1,1m
T 0,4m

Weitere Infos unter www.climator.com

4.3. Labormessungen im Labor für Versorgungstechnik der FHT-Esslingen

4.3.1. Messeaufbau

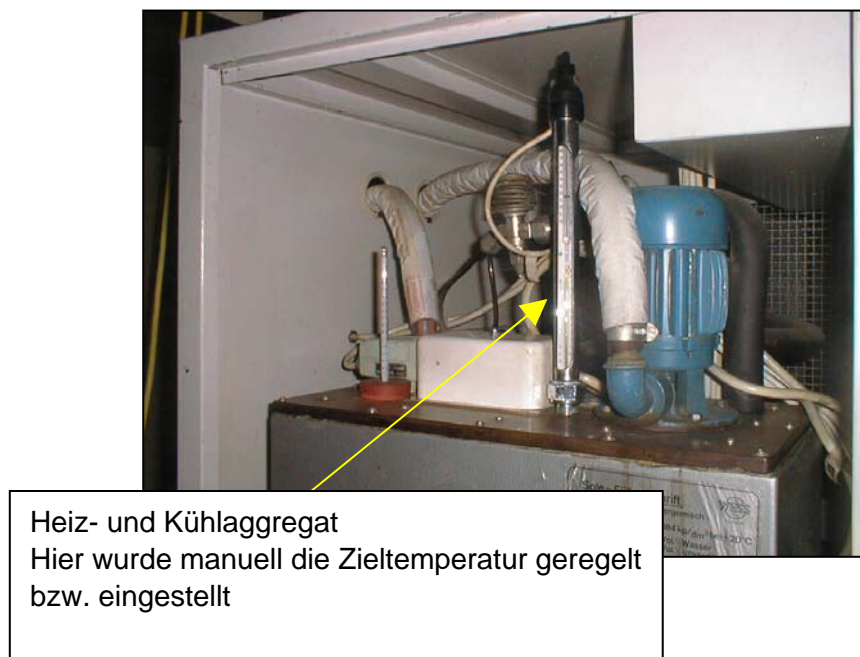
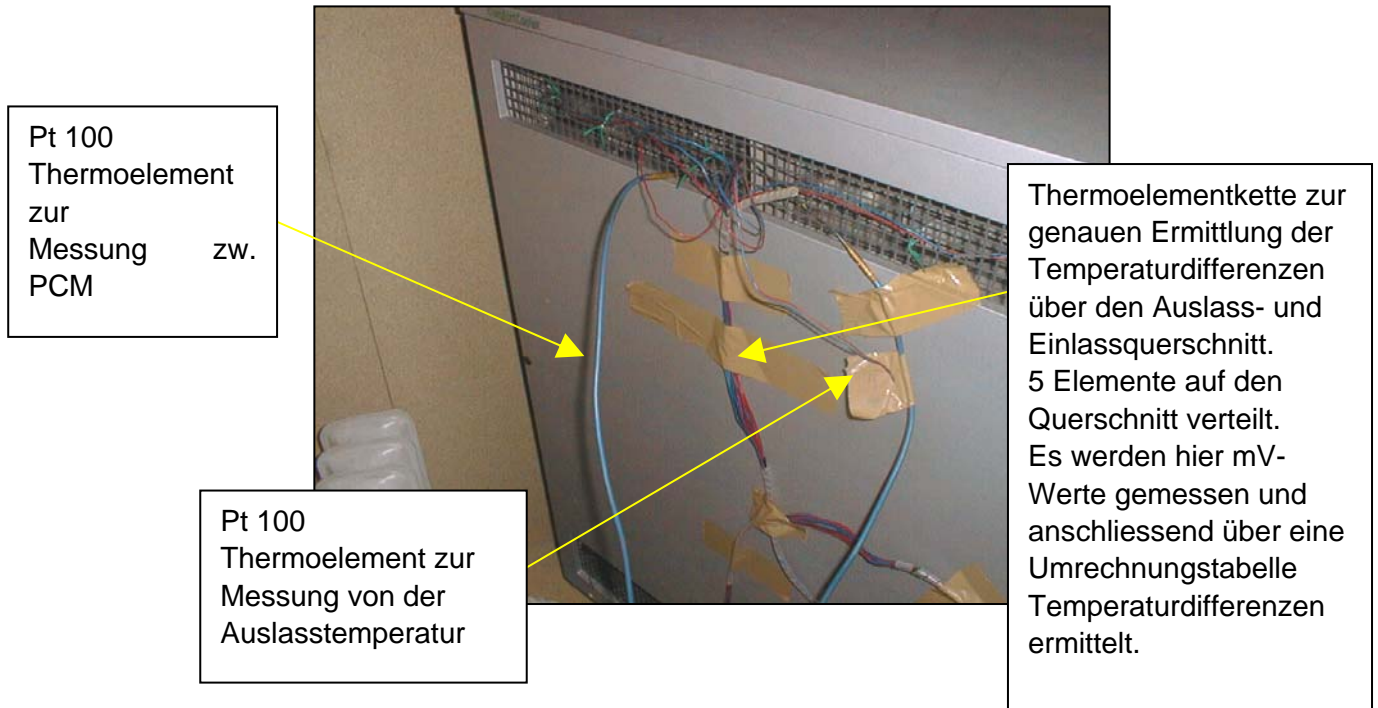


4.3.2. Messgrößen

Messgrößen:

- T1 Temperatur im Raum ausserhalb der Messbox
- T2 Temperatur in der Messbox
- T3 Temperatur am Einlass des Raumklimagerätes
- T4 Temperatur am Auslass des Raumklimagerätes
- T5 Temperatur zwischen den PCM-Päckchen im Gerät
- Delta T über Thermoelementkette direkt als Differenz erfasst
- die einzelnen Temperaturen wurden hier mit Pt100 Thermoelementen erfasst
- ausserdem wurde die Temperaturdifferenz über eine Thermoelementkette mit 5 Elementen direkt als mV-Werte gemessen und über Tabelle in °C umgerechnet.
=> sehr genau!
- Mit dem Heiz- und Kühlaggregat wurde der Temperaturverlauf über 24 Stunden eines Sommerlastfalles hergestellt.

4.3.3. Impressionen, Fotos der Messungen an der FH Esslingen





4.3.4. Ermittlung des Volumenstromes über Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeiten wurden über die Querschnittsflächen des Auslasses gemittelt und mit einem Flügelrad-Anemometer gemessen: **(nach VDI 2080)**

Hier kann das Trivialverfahren angewandt werden, da man hier ein nahezu konstantes Geschwindigkeitsprofil über den Querschnitt verteilt hat

Hier konnte nun der Messquerschnitt vereinfacht in gleich grosse Flächenelemente aufgeteilt werden.

Der relative Wandabstand der Messpunkte wurde dann nach folgender Formel berechnet:

$$\frac{y_i}{H} = \frac{x_i}{B} = \frac{2i-1}{2n}$$

Yi, xi	Koordinaten der Messpunkte
B	Breite des Auslasses
H	Höhe der Luftleitung
i	Ordnungszahl des Messpunktes
n	Zahl der Messpunkte

Abmessungen Auslass:

Breite = 70 cm

Höhe = 7 cm

- ⇒ die Querschnittsfläche wurde nun in 7 x 10/7cm Flächen aufgeteilt
- ⇒ so wurde nun immer in einer Höhe von 3,5cm gemessen
- ⇒ 7 Messpunkte von der Wand weg bei 65cm, 55cm, 45cm, 35cm, 25cm, 15cm, 5cm.

3,15 m/s	4,07m/s	3,55 m/s	3,98 m/s	4,5 m/s	4,0 m/s	3,05 m/s
----------	---------	----------	----------	---------	---------	----------

Mittlere Geschwindigkeit: 3,75 m/s

Fläche Auslass: 0,7 m * 0,07 m = 0,049 m²

V = w * A = 3,75 m/s * 0,049 m² = 0,18 m³/s = 661 m³/h

4.3.5. Messschritte

1. Kalibrierung der Pt100 Thermoelemente im Wasserbad

Die Pt100 Thermoelemente wurden vor jeder Messung im Wasserbad kalibriert. Hierbei wurden die Thermoelemente nach der Temperatur eingestellt welche ein Vergleichsthermometer in dem jeweiligen Wasserbad anzeigte. So wurde nun diese Temperatur im Messdatenerfassungssystem eingestellt.

2. Eichung des Messdatenerfassungssystems

3. Start der Messung

Bevor die Messung gestartet wurde musste man noch einige Einstellungen in der Messsoftware tätigen:

- Einstellung des Messintervalls auf 30s
- Einstellung auf manuellen Start und Stop der Messung

⇒ Start der Messung

4. Manuelles Hoch- und Runterfahren der Zieltemperatur in der Messbox über das Heiz- und Kühlaggregat:

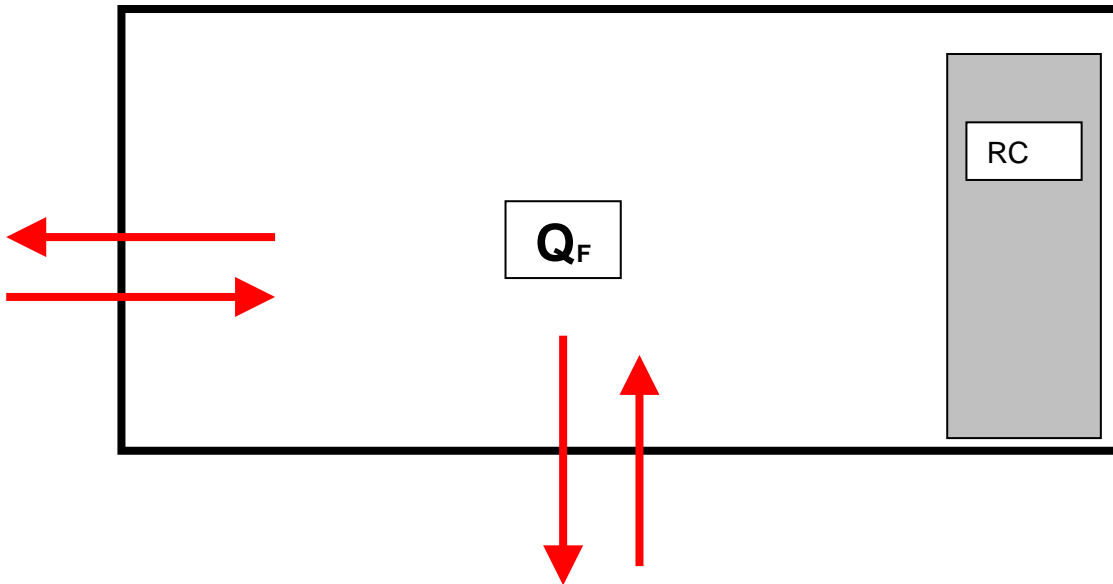
Simulation eines Sommerlastfalles:

Hier wurde die Temperatur manuell über ca. 6 – 7 Stunden im Bereich von 18 °C – 35°C hochgefahren. Dort wurde nun die Zieltemperatur solange gehalten bis sich das Material nun völlig ausgespeichert hatte d.h. Einlasstemperatur gleich der Auslasstemperatur bzw. $\Delta T = 0$ war. Ab diesem Sättigungspunkt wurde nun wieder langsam über mehrere Stunden die Temperatur in der Messbox auf ca. 18°C runtergefahren bis das Material wieder im festen Zustand war.

5. Beenden der Messung mit Datenkonvertierung zur Weiterverarbeitung mit Excel

4.3.6. Messunsicherheiten nach VDI 2080

Energiestrom durch die Messbox:



Fehlerquelle Energiestrom durch Messbox ist hier **nicht relevant**, da Messung direkt am Gerät erfolgte d.h. es wurden direkt die Einlass- und die Auslasstemperaturen gemessen und somit spielt dieser Energiestrom keine Rolle hinsichtlich der Ermittlung der Geräteleistung.

4.3.7. Auswertung Messung 1

Umrechnung der Thermospannungswerte in Temperaturdifferenzwerte:

Die Thermokette in dieser Messung hat jeweils 5 Elemente an Ein- und Auslass. Durch diese Schaltung wird ein Vielfaches des Temperaturunterschiedes zwischen Ein- und Auslass auf das Messdatenerfassungssystem übertragen.

Hier: $5 \cdot (T_a - T_e)$

Auswertung von U_{gem} anhand eines Beispielwertes aus dieser Messung:

$$U_{gem} = 0,27552 \text{ mV} = 5 \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = 0,27552 \text{ mV} / 5 = 0,05510 \text{ mV} / 0,050 \text{ K/mV} = 1,102 \text{ K}$$

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 660 \cdot 1,2 \cdot 1,005 \cdot 1,102 = 877,14 \text{ W}$$

Auswertung der Leistungskurve

Die über die Thermoelementkette erfassten Temperaturdifferenzen ergeben das Leistungsverlaufdiagramm.

Über eine numerische Integration der Flächen zwischen Zeitachse und der Kurve bekommt man die Werte für den **Kühlvorgang 4,95 kWh** und für den **Heizvorgang 5,02 kWh**. Diese Werte sind auf 70 kg des in dem Gerät enthaltenen C24 PCM bezogen und auf den Messablauf s.o.

Bezug auf 1kg: **Kühlvorgang: 4950 Wh / 70 kg = 70,71 Wh/kg**

Heizvorgang: 5002 Wh / 70 kg = 71,46 Wh/kg

Bewertung des Temperaturverlaufdiagramms

Anhand des Temperaturverlaufdiagramms ist zu erkennen, dass dieses PCM beim Kühlvorgang erst ab 24 °C Wirkung zeigt. Dies sieht man anhand der Kurven von Einlass (gelbe Kurve) und Auslass (hellblaue Kurve), welche ab 24 °C auseinander laufen. Weiterhin ist zu erkennen, dass das Material im Temperaturbereich von 28°C bis 32°C oder 35°C die beste Leistung abgibt.

Beim Abkühlen des Materials bzw. beim Heizvorgang sieht man wieder genau, dass ab ca. 24 °C das Material den Phasenwechsel vollzieht, da ab hier die Kurven für Einlass und Auslass auseinandergehen. Ab diesem Punkt gibt das Material auch die beste Heizenergie ab.

Details der Auswertung

Numerische Integration der Flächen im Leistungsverlaufdiagramm:

Kühlvorgang (ausspeichern des Materials):

1 FE = 2,125 cm² = 0,5 kWh

FE: Flächeneinheit

$$\int = \left(\frac{1}{2} * 0 + 1,2 + 2,5 + 3,9 + 5,1 + 5,9 + 5,6 + 4,9 + 4,2 + 3,25 + 2,2 + 1,3 \right) * 0,525 = 21,03 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow 21,03 \text{ cm}^2 / 2,125 \text{ cm}^2 = 9,89 \text{ FE}$$

$$\Rightarrow 9,89 \text{ FE} * 0,5 \text{ kWh} = \underline{\underline{4,95 \text{ kWh}}}$$

Heizvorgang (einspeichern des Materials):

1 FE = 2,125 cm² = 0,5 kWh

FE: Flächeneinheit

$$\int = \left(\frac{1}{2} * 0 + 2,1 + 2,4 + 2,6 + 2,7 + 2,7 + 2,6 + 2,3 + 1,8 + 1,2 + 0,7 + 0,25 + \frac{1}{2} * 0 \right) * 1,0 \text{ cm} = 21,35 \text{ cm}^2$$

$$\Rightarrow 21,35 \text{ cm}^2 / 2,125 \text{ cm}^2 = 10,05 \text{ FE}$$

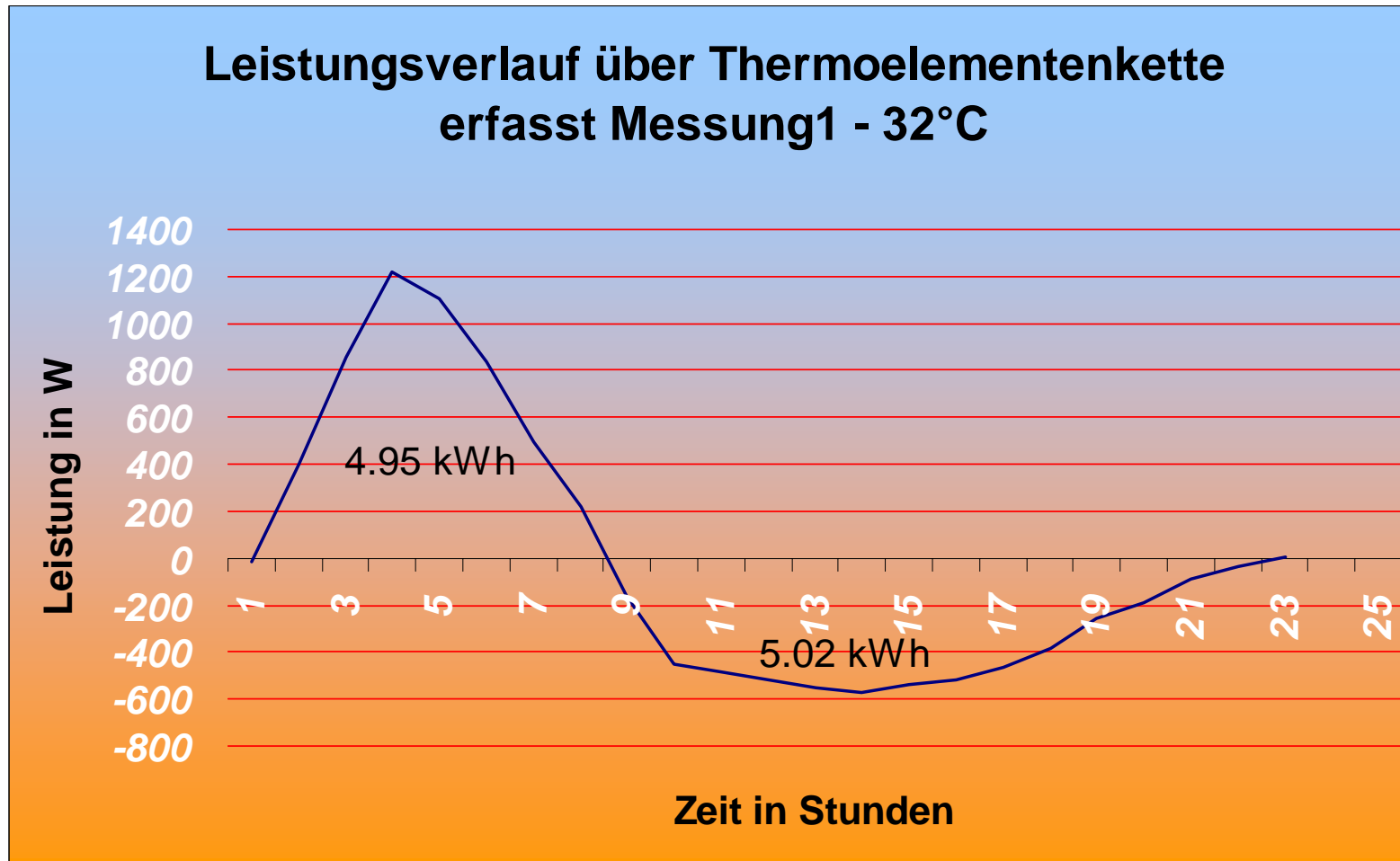
$$\Rightarrow 10,05 \text{ FE} * 0,5 \text{ kWh} = \underline{\underline{5,02 \text{ kWh}}}$$

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik gilt. Die Abweichung wird durch Messungenauigkeiten und Messunsicherheiten der Messgeräte hervorgerufen.

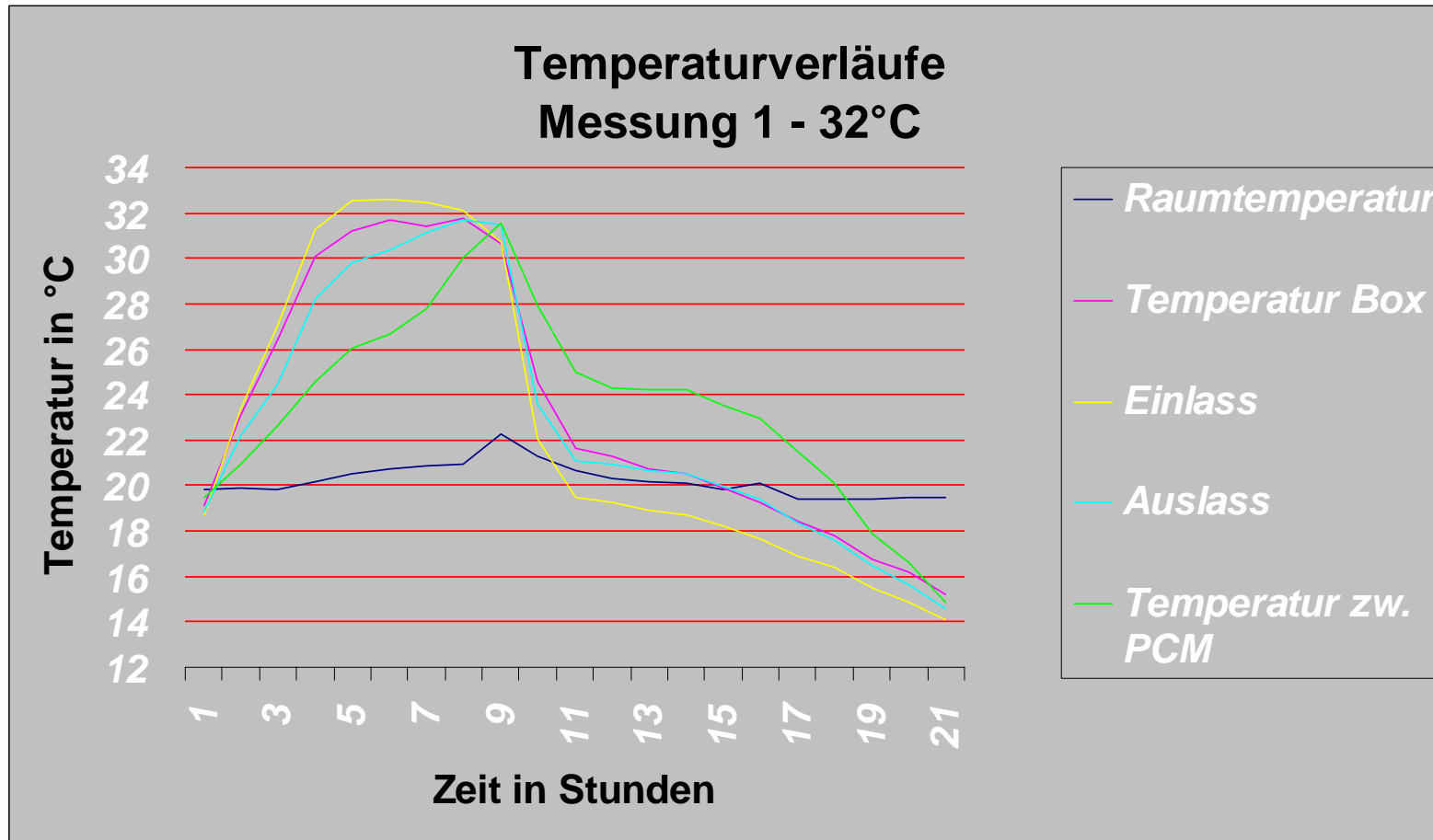
Resultate

Zeit in St.	Zeit in s	Raumtemperatur in °C	Temp. Box in °C	Einlasstemp. In °C	Auslasstemp. In °C	Temp. Zw.PCM in °C	Th.-Kette in mV	Umrechnung in K	Leistung Room- Cooler in W
0	0	19.8	19.11	18.73	18.83	19.44	-0.0048	-0.01882353	-14.98277647
1	3600	19.86	23.12	23.4	22.22	20.94	0.1288	0.50509804	402.0378353
2	7200	19.79	26.41	27.02	24.43	22.63	0.27552	1.08047059	860.0113694
3	10800	20.17	30.12	31.29	28.18	24.56	0.38976	1.52847059	1216.601449
4	14400	20.54	31.23	32.56	29.81	26.06	0.35336	1.38572549	1102.982061
5	18000	20.74	31.67	32.63	30.38	26.69	0.26768	1.04972549	835.5395012
6	21600	20.87	31.4	32.44	31.11	27.81	0.15792	0.61929412	492.9333459
7	25200	20.93	31.79	32.13	31.72	30	0.07112	0.27890196	221.9948047
8	28800	22.29	30.66	30.75	31.52	31.56	-0.0532	-0.20862745	-166.0591059
9	32400	21.3	24.55	22.06	23.59	27.94	-0.14504	-0.56878431	-452.7295624
10	36000	20.67	21.67	19.5	21.09	25	-0.15624	-0.61270588	-487.6893741
11	39600	20.29	21.29	19.25	20.95	24.31	-0.16576	-0.65003922	-517.4052141
12	43200	20.17	20.73	18.94	20.69	24.25	-0.1764	-0.69176471	-550.6170353
13	46800	20.12	20.54	18.69	20.5	24.19	-0.18424	-0.7225098	-575.0889035
14	50400	19.79	19.86	18.19	19.94	23.5	-0.17304	-0.67858824	-540.1290918
15	54000	20.11	19.23	17.69	19.37	22.94	-0.1652	-0.64784314	-515.6572235
16	57600	19.43	18.4	16.88	18.39	21.5	-0.1484	-0.58196078	-463.2175059
17	61200	19.4	17.79	16.38	17.59	20.13	-0.12376	-0.48533333	-386.30592
18	64800	19.42	16.74	15.5	16.44	17.88	-0.08288	-0.32501961	-258.7026071
19	68400	19.5	16.2	14.84	15.63	16.63	-0.06104	-0.23937255	-190.5309741
20	72000	19.44	15.23	14.11	14.56	14.88	-0.02856	-0.112	-89.14752
21	75600	19.5	15.3	14.52	14.52	14.47	-0.01176	-0.04611765	-36.70780235
22	79200	19.49	15.27	14.48	14.48	14.39	0.0005	0.002	1.59192

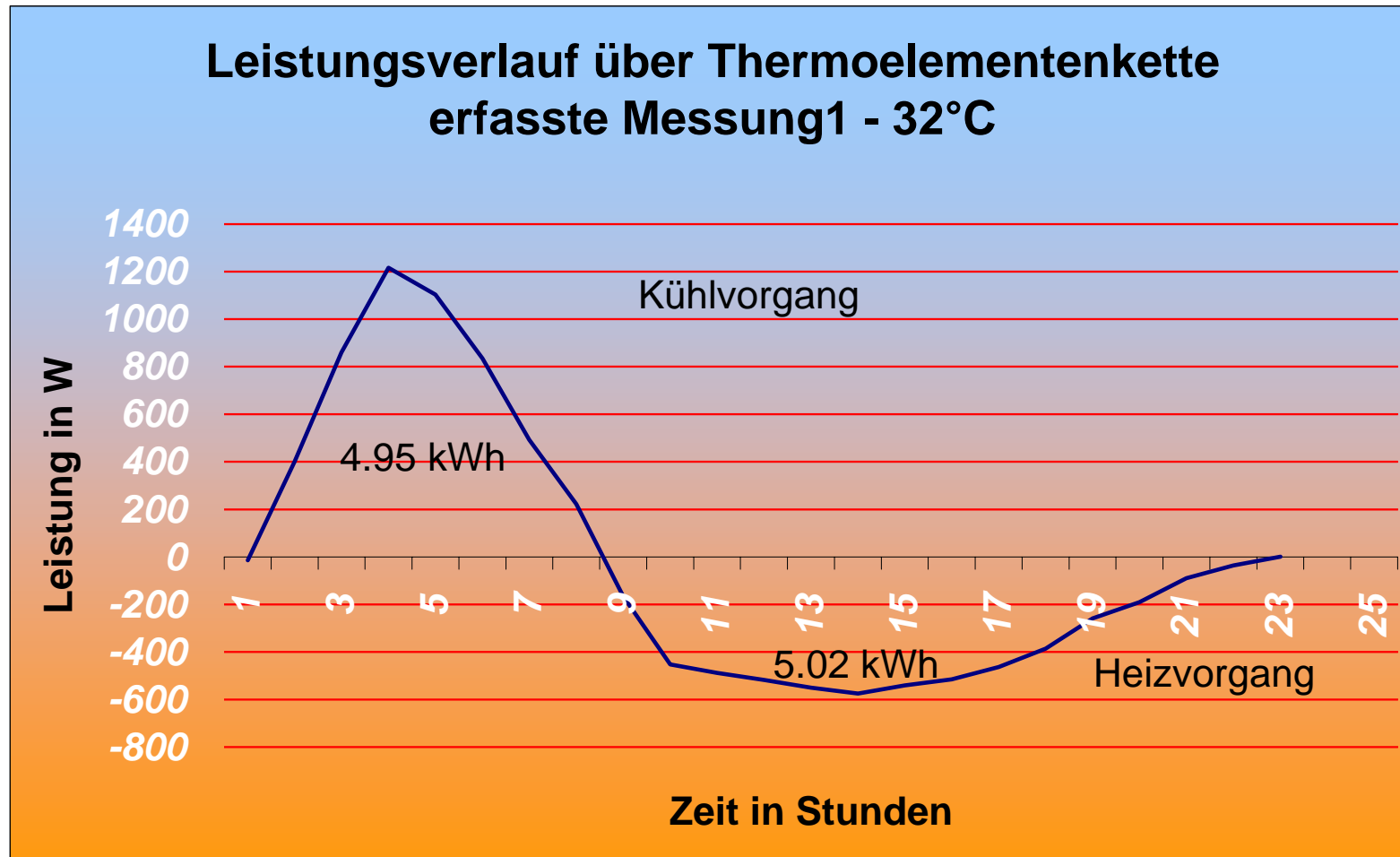
Leistungsverlauf



Temperaturverläufe



Leistungsverlaufdiagramm



4.4. Messungen in bestehendem Gebäude

4.4.1. Allgemein

Bevor die Labormessungen an der FH Esslingen gemacht wurden, wurden Feldmessungen durchgeführt (Aug./Sept. 2002).

Obwohl das Resultat nicht den Erwartungen entsprach, konnten einige Erkenntnisse gewonnen werden.

Gebäude, Standort: Eye-Catcher (Arch. Felix Knobel) im Dreispitz-Areal, Basel. Ehemaliges Ausstellungsgebäude der Baumesse 2000 mit innovativen Lösungen. Die Konstruktion und die Böden bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Ein typischer Leichtbau mit hohem Glasanteil. Als Messraum wurde im 2.OG eine Wohngalerie (Laden), welche praktisch nicht benutzt wurde, ausgewählt.

Dieses Gebäude ist für den Winterfall optimiert, im Sommer infolge des Leichtbaus problematisch, d.h. sehr heiße Räume bis 40°C.



"Eye-Catcher" Dreispitz Basel
Messung in der Wohngalerie, 2.OG

Das Gerät Comfort-Cooler: Der Comfort-Cooler wurde im Ladenlokal (Wohngalerie, 2.OG) gegen die Südseite aufgestellt.

Funktion: Der Comfort-Cooler funktioniert als Umluftkühlgerät mit PCM Climsel 24. Während der Nacht wurden 2 Fenster geöffnet. Die Fensteröffnung ist sehr knapp, die Fenster öffnen nach aussen und sind mit einem Motorantrieb versehen. Wir haben deshalb eine zusätzliche Öffnung ($\varnothing \approx 30 \text{ cm}$) in die Fassade eingebaut, mit motorisierter Klappe. Grundsätzlich wurden 4 Temperaturverläufe während 3 Tagen gemessen

4.4.2. Messungen

Aussentemperatur, Raumtemperatur, Eintritts- und Austrittstemperatur beim Comfort-Cooler.

Es wurden 3 Messreihen durchgeführt:

1. Vormessung eines einzelnen Climsel 24-Beutels. Eine Messsonde befand sich in der Mitte des Materials und die andere Sonde in der Aussenluft. Vormessung siehe Register

2. Messung des Raumes ohne Comfort-Cooler

3. Messung 3 mit dem Comfort-Cooler

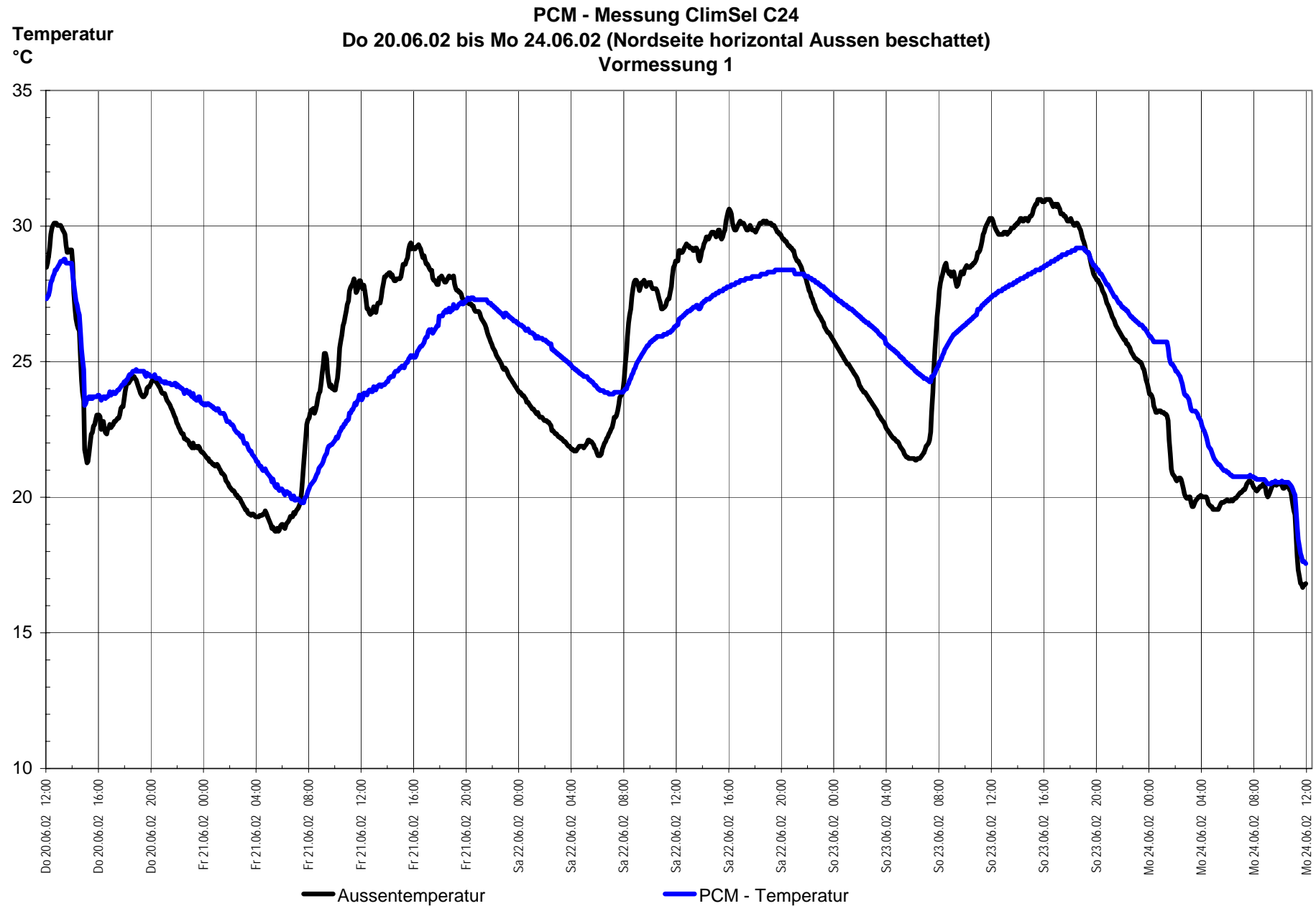
Zeitprogramm

Fenster und Klappe AUF 01.00 – 06.00h

Comfort-Cooler EIN 02.00 – 07.00h (Wärmeabgabe), 11.00 – 17.00h (Kühlen)



Vormessung 1 an einem PCM-Beutel Climsel 24
(Aussentemperatur und PCM-Temperatur)

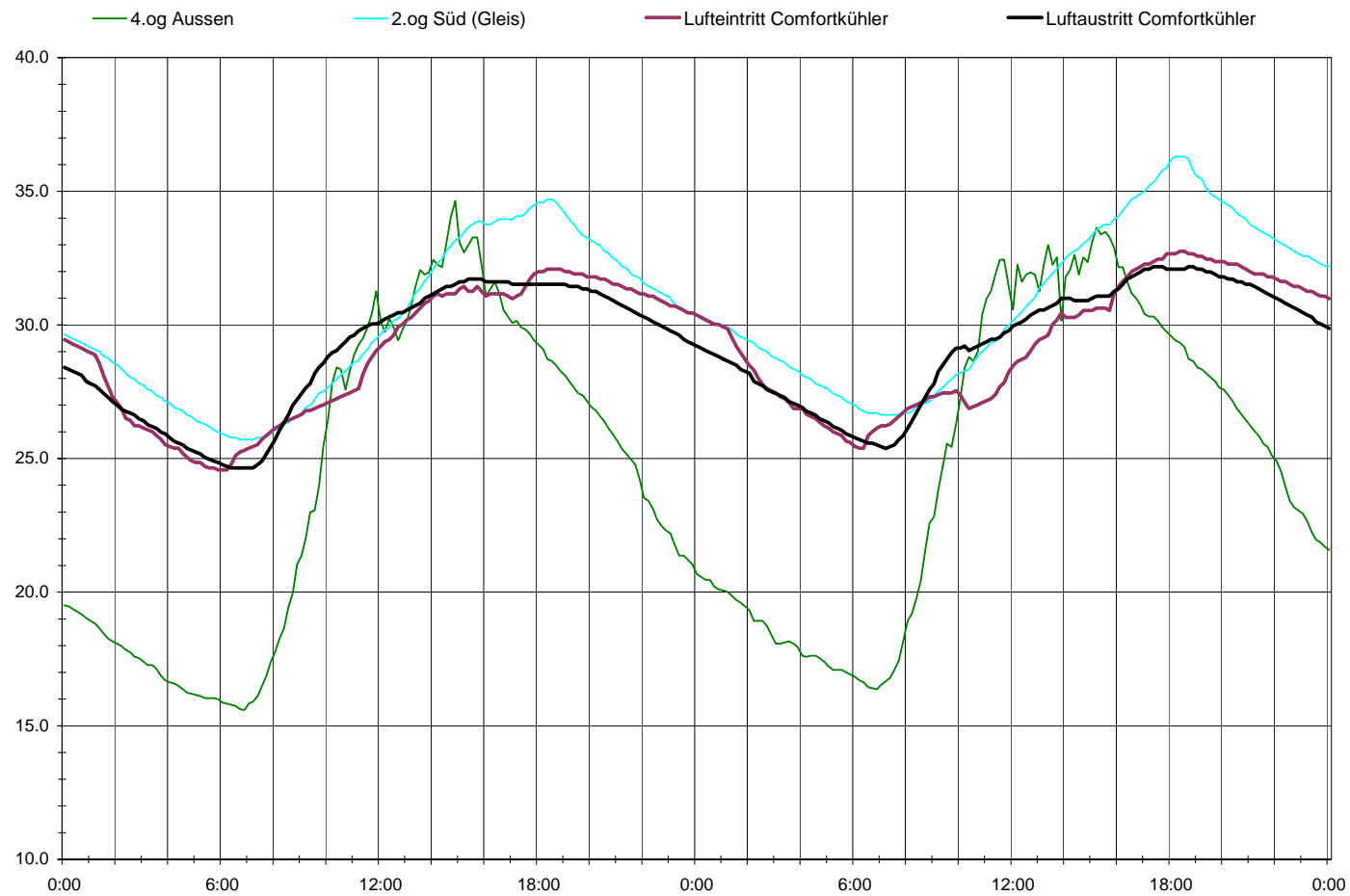


Messung ohne PCM
Donnerstag 01.08.02
Freitag 02.08.02
Messung 2 im Eye-Catcher, Wohngalerie

Messung mit PCM



Messung mit PCM
Freitag 16.08.02
Samstag 17.08.02
Messung 3 im Eye-Catcher, Wohngalerie



4.4.3. Auswertung

a) Vormessung eines einzelnen Beutels:

Die PCM-Temperatur in der Mitte des Materials folgt mit einer Verzögerung von 4 bis 5 Stunden der Aussentemperatur. Die Materialtemperatur erreicht bis zu $\pm 2^\circ$, die höchste resp. tiefste Aussentemperatur

Fazit: Ohne erzwungene Luftströmung sind die verwendeten Beutel sehr träge.

b) Ohne PCM:

Die Raumtemperatur liegt fast immer über der Aussentemperatur. Bei einer nächtlichen Aussentemperatur von $17^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ bleibt die Raumtemperatur bei $26^\circ \pm 1^\circ\text{C}$. Die Nachtauskühlung funktioniert schlecht. Die Öffnungen von Fenster und Klappe sind zu klein. Die anderen Fenster sind fest verglast und leider nicht offenbar.

c) mit PCM

Die Raumtemperatur sinkt auch nachts nicht unter 22°C , und daher kann das PCM nicht mehr erstarren. die Aussentemperatur steigt am Tag (16. und 17.08.02) über 30°C an und kühlt nachts bis 16°C ab. Der Comfort-Cooler könnte nur funktionieren, wenn er direkt an die Aussenluft angeschlossen wäre, was aber eine Neukonstruktion bedingen würde.

Fazit: Eine Kühlwirkung ist im Messraum des Eye-Catchers nicht möglich. Die Einstrahlung am Tag ist zu gross und die nachts offenbare Fensterflächen und Klappen sind zu klein. Wir mussten deshalb diesen Versuch abbrechen.

4.5. Erkenntnisse

Der Comfort-Cooler als reines Umluftgerät mit Nachtauskühlung funktioniert in unseren Breitengraden nicht. Die nächtlichen Raumtemperaturen sind im Sommer zu hoch.

Das Gerät muss mit zusätzlichen Klappen und Regulierung ausgerüstet werden, so dass die Aussenluft direkt durch das PCM strömen kann. Es ist dies die gleiche Funktion wie beim Phoenix-Doppelrohr.

5. Erkenntnisse aus dem Laborversuch

Ergebnis bezüglich der Speicherkapazität des Materials:

Anhand der Labormessung wurde eine Speicherkapazität des Materials *Climsel C24* in dem Raumkühlgerät von ca. **5 kWh** ermittelt. (siehe Leistungsverlaufdiagramm Abb.)

D.h. das Gerät verbraucht 77 W/h Primärenergie und liefert dabei 5 kWh Passivenergie.

Weitere Erkenntnisse:

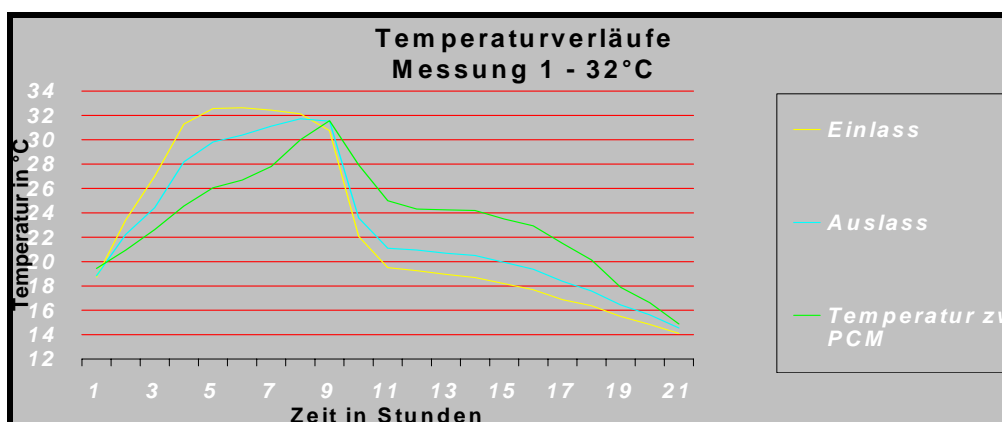
Wie man anhand des Temperaturverlaufdiagramms sehen kann beginnt das Material erst ab 24 °C, wo auch sein Schmelzpunkt liegt, Wirkung zu zeigen. Wie man hier sehen kann laufen die Kurven von Einlass (gelb) und Auslass (hellblau) erst ab 24 °C langsam auseinander.

Erkenntnis aus dem Temperaturverlaufdiagramm:

Sollte das Material zum **Kühlen** eingesetzt werden so bringt es seine beste Kühlleistung im Bereich von 26°C – 35°C. Hier kann man anhand der Temperaturverläufe ermitteln, dass in diesem Temperaturbereich das Material durchschnittlich eine **Temperaturspreizung zwischen Ein- und Auslass von 2 K leistet d.h. eine durchschnittliche Kühlleistung von ca. 1,59 kW.**

Wenn man diesen Kühlvorgang noch detaillierter betrachtet erkennt man, dass die **Leistungsspitze im Bereich von 28°C – 35°C** liegt. Hier sind **zeitweise über ca. 2 Stunden bis zu 3 K Temperaturspreizung zwischen Ein- und Auslass zu erkennen** entsprechend einer durchschnittlichen Kühlleistung von 2,39 kW.

Im Realfall bzw. im Sommerfall, welcher bei dieser Messung auch simuliert wurde, würde dies bedeuten, dass in Räumen, in welchen im Sommer nicht mehr als 26 °C herrschen das Gerät bzw. das Material keine wesentliche Kühlleistung bringt. Dieses Material bzw. Gerät würde sich also nur als sinnvoll und relevant erweisen für Räume in welchen im Sommer 28°C – 35°C herrschen. Diese Temperaturen sind bei Räumen von Leichtbauten mit entsprechender Himmelsrichtung durchaus möglich.



Beim **Heizvorgang** erkennt man, dass das Material nach seiner Verflüssigung erst wieder Wirkung unterhalb von dessen Schmelzpunkt bei 24 °C zeigt. Hier laufen die Kurven von Ein- und Auslass wieder auseinander und das Material beginnt zu heizen bzw. gespeicherte Wärmeenergie abzugeben.

Die **durchschnittliche Temperaturspreizung ist hier geringer als beim Kühlvorgang bei ca. 1,5 K entsprechend einer Heizleistung von 1,19 kW**. Dies erklärt sich aber durch den geringeren Temperaturbereich beim Abkühlen (32 °C – 16 °C).

Die gesamte Abkühlzeit beginnend mit dem Zeitpunkt an welchem das Material vollständig verflüssigt ist bis zur vollständigen Verfestigung erstreckt sich über 12 Stunden. Das Material wurde langsam von 32 °C über ca. 5 Stunden auf 18 °C abgekühlt und dort bei 18 °C solange gehalten bis es vollständig verfestigt war.

Bei diesem gesamten Abkühlprozess kann man erkennen, dass das Material unter diesen Randbedingungen die beste **Heizleistung im Bereich von 24 °C – 14°C abgibt**. Betrachtet man diesen Abkühlvorgang etwas detaillierter erkennt man, dass die **Heizleistungsspitzen sich im Bereich von 21 °C – 17 °C über eine Dauer von 7 Stunden** befinden, entsprechend einer **durchschnittlichen Heizleistung von 1,59 kW** und einer **durchschnittlichen Temperaturspreizung von ca. 2K**.

Nachteil:

Bei Sommernächten in unseren Klimazonen in welchen die Raumtemperaturen nicht weiter als 18 °C sinken würde das bedeuten, dass das Material weit über 12 Stunden Verfestigungszeit braucht um wieder Kühlfähig zu sein.

Diese lässt sich schlecht realisieren. Wichtig ist für den kommenden Tag, dass das Material vollständig eingespeichert ist um wieder die komplette Kühlleistung abzugeben!

⇒ **Einspeicherungszeit des Materials unter Sommernachtsbedingungen von ca. 18 °C ist zu lange.**

Energieübertragung von PCM zu Luft:

Als weiterer Nachteil erweist sich anhand des Temperaturverlaufdiagramms die schlechte Energieübertragung. Hier kann man erkennen, dass die Temperatur welche zwischen den PCM Päckchen herrscht immer günstiger liegt beim Kühlen oder Heizen als die Auslasstemperatur (siehe Abb. oben grüne Kurve)

Durch Optimierung dieser Energieübertragung lässt sich wie man dem obigen Temperaturverlaufdiagramm entnehmen kann eine noch bessere Geräteleistung erzielen.

6. Optimierung

Das Funktionsprinzip dieses Raumklimagerätes „Clima-Cooler“ erscheint noch nicht ganz ausgereift und vollständig.

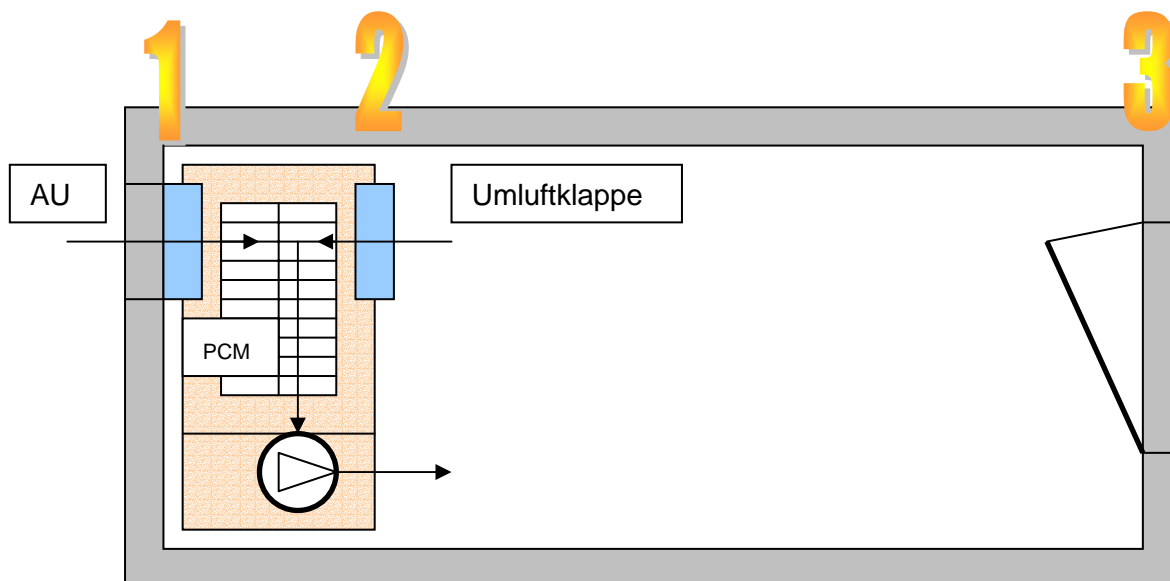
Begründung:

1. die zu lange Abkühlzeit bzw. Einspeicherungszeit des Materials
2. schlechte Energieübertragung zwischen PCM-Päckchen und Luft.
3. Materialverbesserung => Schmelzpunkt bei 21°C!

Vorschlag zur Geräteoptimierung:

Zu 1.:

Um nachts eine bessere Abkühlung des Raumes zu erhalten und somit auch eine kürzere Abkühlzeit des Materials könnte man ein sich automatisch öffnendes Fenster integrieren. Ausserdem eine Aussenluftklappe an das Gerät anbauen und diese über Nacht öffnen und dem Gerät kühle Aussenluft zuführen. Zusätzlich muss eine Umluftklappe an das Gerät gebaut werden, welche dann bei Tag geöffnet ist. Erforderlich wäre dann noch eine entsprechende Einlasstemperaturgeführte Regelung der Klappen und des Fensters.



NR.	Funktion	Tag	Nacht
1	Aussenluftklappe	0	1
2	Umluftklappe	1	0
3	Automatisches Fenster- öffnen	0	1
0 = ZU , 1 = OFFEN			

Ausserdem müsste das Gerät noch in geeigneteren Bauformen hergestellt werden. Es müssten je nach Einbausituation 2-3 Typen auf den Markt kommen.

Zum Beispiel:

- Hoch als Schrank an der Wand
- Liegend für unter die Fensterbrüstung
- In Verbindung mit Kühldecken (wie schon einmal getestet an einem Bürogebäude in England siehe S.)

Zu 2.:

Um nun die Energieübertragung zu verbessern, wäre eine Verbesserung der Luftführung in Betracht zu ziehen. Dies könnte durch eine Änderung des Auftreffwinkels der Luft auf die Päckchen realisiert werden bzw. durch noch mehr turbulente Strömung. Andere Anordnung der Päckchen im Gerät.



Die Luft wird hier unten vom Axialventilator schlangenlinienförmig durch die Päckchen transportiert und oben wieder ausgeblasen.

Jetzt könnte man eine Verbesserung der Energieübertragung dadurch erreichen, dass man gerade diesen Luftweg ändert bzw. die Päckchen so anordnet, dass man eine noch turbulenter Strömung erreicht, da so die Energieübertragung besser ist.

Zu 3.:

Da man, wie oben schon erklärt, erkannt hat, dass das Material *Climsel C24* sich nur gut oberhalb einer Raumtemperatur von 28 °C eignet und es natürlich auch viele Tage gibt an denen die Temperatur um die 26 °C ist, wäre ein PCM mit der Schmelztemperatur von 21 °C geeigneter, weil dieses eine bessere Leistung in diesem Temperaturbereich bringen würde als das C24.

Trotzdem würde dieses PCM auch wieder einen Nachteil mit sich bringen, da aufgrund des tiefer liegenden Schmelzpunktes von 21 °C der Effekt der zu langen Einspeicherung bzw. Abkühlung des Materials noch verstärkt wird.

Man müsste beim Beschleunigen des Abkühlprozesses und beim tieferen Schmelzpunkt als 24 °C ansetzen um die Materialeigenschaften zu verbessern (beide Eigenschaften müssten erreicht werden).

7. Ausblick – PCM's und deren Zukunft in der Heizungs- und Klimatechnik

7.1. Noch bestehende Probleme auf dem Gebiet der Phase Change Materials:

Eines der Probleme die derzeit auf dem PCM Sektor vorhanden sind, ist der fehlende Markt. Im Internet kann man zwar relativ viel finden aber wenig Konkretes zu viel Allgemeines. Vor allem bei Salzen wird es schwierig.

Im Bereich „Paraffin“ wird mehr geforscht, allerdings sind die Anwendungsbereiche im Innenraum wegen der Brandgefahr fraglich.

Wie schon erwähnt fehlt ein funktionierender Anbietermarkt für PCM. Die bisher bekannten Anbieter sind äusserst zurückhaltend, sei es aus Gründen der Geheimhaltung oder aus anderen Gründen.

7.2. Vorschlag für weiteres Vorgehen

- Erarbeitung von PCM-Kennwerten für die praktische Anwendung
- Messungen, einheitliche Messmethode
Es fehlen vor allem:
 - In welchem Temperaturbereich schmilzt resp. erstarrt ein bestimmtes PCM?
 - Korrosions- und Brandverhalten ?
 - Richtpreise, Lieferantenadressen ?
- Weiterentwicklung des Prototyps *Comfort- Cooler* gemäss Vorschlag

8. Anhang

8.1. Quellenverzeichnis

- [1] ZAE – Symposium 2001:
Vortrag der Firma *Climator (Suiselectra intern)*
- [2] Fallstudie von Nick Barnard, *FaberMaunsell*:
Thermal Mass and Night Ventilation (*Suiselectra*)
- [3] Studie des Solar-Institut Jülich
„Improvement of the Heat Transfer in a PCM-Storage“ (*Suiselectra Ordner H.Hächler*)
- [4] Bericht aus 6. Europäische Passivhaustagung 2002 (Basel)
„Hightech-Materialien“ Prof. Armin Binz (*Suiselectra*)
- [5] Bericht von: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy
„Phase Change Drywall“ (*Suiselectra*)
- [6] Internet-Quellen siehe Diplomarbeit S.
- [7] Grundlagen der Technischen Thermodynamik
Doering/Schedwill, Teubner Verlag Stuttgart