

**IBB MODUL AIR KG**

**HEIDEWEG 28**

**53604 BAD HONNEF**

**Entwicklung eines innovativen Aktiv- Kühl-  
und Heizboden unter Ausnutzung des  
Latentspeicherprinzips**

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 23836 – 24/2 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

**VON**

Dr. Ing. Christian Lerche, Dipl. Ing. Helmut Siegmund, Dipl. Ing. Karl Brands, Lothar Kossack  
.....

Oktober 2010

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



<b>Az</b>	<b>23836</b>	<b>Referat</b>	<b>24/2</b>	<b>Fördersumme</b>	<b>125.000,00 €</b>
-----------	--------------	----------------	-------------	--------------------	---------------------

**Antragstitel**                      **Entwicklung eines innovativen Aktiv-Kühl- und Heizbodens unter Ausnutzung des Latentspeicherprinzips**

**Stichworte**                      Energie, Kühlung, Heizung

<b>Laufzeit</b>	<b>Projektbeginn</b>	<b>Projektende</b>	<b>Projektphase(n)</b>
<b>18 Monate</b>	<b>23.12.2005</b>	<b>31.07.2010</b>	

<b>Zwischenberichte</b>	27.06.06	01.10.09
	23.07.09	30.06.10

<b>Bewilligungsempfänger</b>	ibb Modul Air KG	neue Adresse ab 01.10.10	Tel	02683-943960
	Heideweg 28	Industriepark Nord II 76	Fax	02683-9439699
	53604 Bad Honnef	53567 Buchholz/Ww.	<b>Projektleitung</b>	
			Dipl.Ing. Helmut Siegmund	
			<b>Bearbeiter</b>	
			Dipl.Ing. Helmut Siegmund	

**Kooperationspartner**      ./.

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Entwicklung eines innovativen Aktiv-Kühl- und Heizbodens mit Latentspeichermaterialien zur thermischen Selbstregelung von Gebäuden.

Durch die von uns geplante Entwicklung eines innovativen Aktiv-Kühl- und Heizbodens mit Latentspeichermaterialien zur Verbesserung der thermischen Selbstregelung von Gebäuden sollen technologische, ökologische und ökonomische Nachteile bisheriger –energieaufwendiger- Systeme (Klimaanlagen, Eisspeicher) aufgehoben werden und eine Lösung erzielt werden, die sowohl in der Baupraxis als auch vom Nutzer akzeptiert wird. Vor diesem Hintergrund soll eine modellhafte Lösung entwickelt werden, die im Neubaubereich als auch im Sanierungssektor eine weite Verbreitung erfahren soll.

Die hierdurch erwirkte Kühlung (sowie Wärmebereitstellung in der Übergangszeit) soll folgende umweltwirksame Ziele erfüllen:

- ◇ Reduzierung des Energieaufwandes zur Klimatisierung durch Stärkung der Selbstregulierung
- ◇ Reduzierung von Belastungsspitzen und Vermeidung von Netzüberlastungen durch Stromeinsparung
- ◇ Beschränkung der knappen Ressource „fossile Brennstoffe“
- ◇ Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes
- ◇ Verbesserung der Energiebilanz: Ressourcenschonung und hoher energetischer Wirkungsgrad
- ◇ Verbesserung bisher grundsätzlich bekannter Latentspeichermaterialien, die allerdings vorwiegend zum Heizen entwickelt wurden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Siehe separate Textung unter „Einleitung“

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Siehe Seite 9 – Zusammenfassung

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Es ist vorgesehen, die Ergebnisse in konzentrierter Form in Publikationen und Fachvorträgen bei den Anwenderzielgruppen Gebäudedefachplaner und Gebäudeinvestoren zu verbreiten.

Parallel werden Kostensimulationen beginnend bei Feldprojekten erarbeitet.

## ***Fazit***

Siehe Seite 9 und 10 – Zusammenfassung

0. VERZEICHNIS .....	5
0.1. Verzeichnis Abbildungen .....	5
0.2. Verzeichnis Tabellen .....	5
0.3. Verzeichnis Diagramme .....	6
0.4. Verzeichnis Begriffe, Abkürzungen.....	8
ZUSAMMENFASSUNG.....	9
1. EINLEITUNG.....	11
2. ZIELSETZUNG DES PROJEKTES .....	13
3. THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR MATERIALAUSWAHL UND ZU MÖGLICHEN ESTRICHKONSTRUKTIONEN.....	17
3.1. Vorbemerkungen zur Materialauswahl .....	17
3.2. Prüfung der Festigkeit .....	20
3.3. Theoretische Untersuchungen zu möglichen Kombinationen PCM - Estrich mit Fußbodenkühlung .....	21
3.3.1. Allgemeine Vorbemerkungen .....	21
3.3.1.1. Beschreibung des Aufbaus der Fußbodenheizung.....	21
3.3.1.2. Aufbau des Simulationsraumes .....	23
3.3.2. Varianten zum Einbringen PCM .....	24
3.3.2.1. Noppenfüllung – Variante A.....	24
3.3.2.2. Rondenfüllung – Variante B.....	28
3.3.3. Berechnung Schmelz- und Erstarrungsenthalpie .....	30
3.3.4. Weiterentwicklung der Rondenvariante zur Erhöhung der Volumenprozentanteile des Latentspeichermaterials am Estrichvolumen.....	36
4. MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG DER PLATTEN .....	37
4.1. Herstellung der Platten und Versuchsaufbau .....	37
4.2. Auswertung der 1. Messreihe .....	41
4.2.1. Allgemeines.....	41
4.2.2. Darstellung der Eigenschaften der unterschiedlichen Probekörper.....	41
4.2.3. Analyse des Abkühlvorganges .....	43
4.2.3.1. Analyse des zeitlichen Temperaturverlaufes auf und im Probekörper....	43
4.2.3.2. Auswertung des Vergleiches Abkühlvorgang .....	48
4.2.3.3. Auswertung der gespeicherten Energie im Abkühlvorgang .....	50
4.2.4. Analyse des Aufheizvorganges .....	53
4.2.4.1. Analyse des zeitlichen Temperaturverlaufes auf und im .....	53
Probekörper.....	53
4.2.4.2. Auswertung des Vergleiches Aufheizvorgang .....	58
4.2.4.3. Auswertung der abgegebenen Energie im Entladungsprozess .....	59
4.2.5. Zusammenfassung der Auswertung der ersten Versuchsreihe .....	62
4.3. Auswertung für die 2. Versuchsreihe.....	63
4.3.1. Allgemeines und Versuchsaufbau .....	63
4.3.2. Auswertung Mittelwertbildung.....	67
4.3.3. Auswertung Aufheizvorgang.....	68
4.3.4. Auswertung des Abkühlvorganges .....	71

4.3.4.1. Auswertung des Abkühlvorganges ohne Estrich .....	71
4.3.4.2. Analyse Abkühlvorgang mit Estrich .....	72
4.3.5. Analyse der aufgenommenen und abgegebenen Energie.....	73
4.3.6. Zusammenfassung der Auswertung der 2. Versuchsreihe .....	77
5. SIMULATION DER SPEICHERPLATTE .....	77
5.1. Berechnungsprogramm „Wärmespeicher mit mediendurchströmten Festkörpern und Adaption für die vorliegenden Messungen .....	77
5.2. Simulationsrechnung und Vergleich mit Messergebnissen .....	79
6. FAZIT .....	82
LITERATURVERZEICHNIS .....	85
7. ANLAGEN .....	86
7.1. Anlage A1 Prüfbericht.....	86
7.2. Anlage A 2 1. Simulation für verschiedene PCM - Stoffe .....	95
7.3. Anlage A 3 Kriterien für Zuordnung Fußbodenheizungssystem .....	105
7.4. Anlage A 4 Angaben zum Simulationsraum .....	108
7.5. Anlage A 5 maximal erreichbare Volumenprozent an PCM.....	112
7.6. Anlage A 6 Schmelz- und Erstarrungsenthalpie für Stoffgemische .....	134
7.6.1. Anlage A 6.1 Stoffgemische mit Fließestrich und PCM.....	135
7.6.2. Anlage A 6.2 Stoffgemische mit Zementestrich und PCM.....	141
7.6.3. Anlage A 6.3 Markteingeführte Stoffgemische und Verbundbaustoffe mit PCM 146	
7.7. Anlage A7 Messergebnisse 1. Versuchsreihe .....	149
7.7.1. Anlage A 7.1 Skizze Versuchsaufbau.....	149
7.7.2. Anlage A 7.2 – Messergebnisse Lupo 43 A.....	151
7.7.3. Anlage A 7.3 – Messergebnisse Lupo 43 B.....	153
7.7.4. Anlage A 7.4 – Messergebnisse AL 13 B .....	155
7.7.5. Anlage A 7.5 – Messergebnisse AL 262 B .....	157
7.7.6. Anlage A 7.6 – Messergebnisse AL 262 A .....	159
7.7.7. Anlage A 7.7 – Messergebnisse Lupo 13 A.....	161
7.8. Anlage A8 Auswertung der Kurvenanalyse .....	163
7.9. Anlage A9 Messergebnisse 2. Versuchsreihe .....	167
7.9.1. Anlage A9.1. Messungen ohne Estrich.....	167
7.9.1.1. Anlage A 9.1.1 .....	167
7.9.1.2. Anlage A 9.1.2 .....	169
7.9.2. Anlage A9.2. Messung mit Estrich.....	171
7.9.2.1. Anlage A 9.2.1 .....	171
7.9.2.2. Anlage A 9.2.2 .....	173
7.9.2.3. Anlage A 9.2.3.....	175
7.9.2.4. Anlage A 9.2.4 .....	177
7.9.2.5. Anlage A 9.2.5.....	179
7.9.2.6. Anlage A 9.2.6.....	181
7.9.2.7. Anlage A 9.2.7 .....	183
7.9.2.8. Anlage A 9.2.8.....	185
7.9.2.9. Anlage A 9.2.9.....	187
7.9.2.10. Anlage A 9.2.10.....	189
7.9.2.11. Anlage A 9.2.11 .....	191
7.9.2.12. Anlage A 9.2.12.....	193
7.9.2.13. Anlage A 9.2.13.....	195

7.9.2.14. Anlage A 9.2.14.....	197
7.10. Anlage A10 Stoffdaten Latentspeichermaterial .....	199
7.10.1. Anlage A10.1. Micronal 23 .....	199
7.10.2. Anlage A 10.2 Paraffin RT 18/20 .....	212
7.11. Anlage A11 Ergebnisse Simulationsrechnung.....	215
7.12. Anlage A12 Ergebnisse Simulation Raum.....	222

# 0. Verzeichnis

## 0. 1. Verzeichnis Abbildungen

Abbildung 1 Entwicklung des Kältemarktes Italien [SCH08] .....	11
Abbildung 2 Temperaturverlauf mit und ohne Latentspeicher.....	13
Abbildung 3 Schmelzenthalpie für unterschiedliche Latentspeichermaterialien [KNÖ08]	18
Abbildung 4 Schematischer Aufbau einer Fußbodenheizung (Tackersystem) [EHT07] ..	21
Abbildung 5 Schematischer Überblick System "Proklima" [EHT10] .....	22
Abbildung 6 Detaillierter Aufbau "Proklima" - System .....	23
Abbildung 7 Simulationsraum mit Orientierung und Abmaße .....	24
Abbildung 8 verlegte Noppenplatte mit Heizungsrohr .....	25
Abbildung 9 Schematischer Fußbodenaufbau mit Noppenplatte .....	25
Abbildung 10 Schematische Anordnung von PCM - gefüllten Ronden .....	29
Abbildung 11 Programm für die generisch Ermittlung der Enthalpie von Stoffgemischen .....	30
Abbildung 12: Einbausituation mit Latentspeicherplatte.....	37
Abbildung 13 Aufbau der Probekörper .....	38
Abbildung 14 Metallschaum .....	38
Abbildung 15 Sichtbemerkerung auf Probekörper.....	39
Abbildung 16: Montierte Rohrschleife auf Probekörper.....	39
Abbildung 17 Wärmedämmung ober- und unterhalb Probekörper.....	40
Abbildung 18: Messpunkte am Probekörper .....	41
Abbildung 19 Modifizierung der Platte für Verbesserung des Wärmeüberganges Rohr - Platte .....	44
Abbildung 20 Schematischer Aufbau für die 2.Versuchsreihe .....	64
Abbildung 21 Detail A mit Bezeichnung .....	64
Abbildung 22 Lage der Messpunkte.....	65
Abbildung 23 Fußbodenaufbau des Simulationsprogrammes [GLÜ07] .....	66
Abbildung 24 Hauptmaske des Simulationsprogrammes.....	78

## 0. 2. Verzeichnis Tabellen

Tabelle 1 Gegenüberstellung Volumen- und Masseanteile für unterschiedliche Estricharten und unterschiedliche Varianten für PCM – Befüllung.....	30
Tabelle 2 mechanische Eigenschaften der Probekörper.....	42
Tabelle 3 Wärmetechnische Eigenschaften der verwendeten Materialien.....	42
Tabelle 4 Zeiten für die Funktionsanalyse - Abkühlvorgang .....	44
Tabelle 5 Funktionsanalyse mit Angaben der Fehler-Varianz und dem Bestimmtheitsmaß R2 .....	46
Tabelle 6 Faktoren aus der Funktionsanalyse für die Probe Lupo 43 B - Abkühlvorgang	48
Tabelle 7 Gespeicherte Gesamtkühlenergie in Abhängigkeit vom PCM-Material.....	52
Tabelle 8 Zeitkonstanten für die Proben – Aufheizvorgang .....	54
Tabelle 9 Funktionsanalyse der Messstelle Zentrum mit Angabe der Fehler-Varianz und dem Bestimmtheitsgrad R2 .....	56
Tabelle 10 Faktoren für die einzelnen Messpunkte entsprechend der Funktionsanalyse .....	58

Tabelle 11 Vergleich der Verbesserung der Behaglichkeit im Versuchsraum durch Einsatz von PCM.....	62
Tabelle 12 Wichtigsten Merkmale Versuchsplatten 2. Versuchsreihe .....	65
Tabelle 13 Daten der Platten der 2. Versuchsreihe .....	65
Tabelle 14 Durchgeführte Versuchsreihen.....	67
Tabelle 15 Beginn und Ende Phasenwandel für unterschiedliche Plattenstärke und Masse Latentspeichermaterial .....	72
Tabelle 16 Aufgenommene und Abgegebene Energie je Platte .....	74
Tabelle 17 Erzielbare Speichermengen in Abhängigkeit der Plattenart und Anzahl .....	75
Tabelle 18 Auszug aus den Ergebnissen der Simulation.....	80

### 0. 3. Verzeichnis Diagramme

Diagramm 1 Raumlufttemperaturverlauf für Gebäude mit unterschiedlicher Bauart.....	12
Diagramm 2 Entwicklung des Kühlbedarfs in der EU [WIN08].....	12
Diagramm 3 Raumtemperaturverlauf mit und ohne PCM - Material in den Innenwänden (passiv).....	14
Diagramm 4 Raumtemperaturverlauf mit und ohne PCM - Material in den Innenwänden (aktiv).....	14
Diagramm 5 Flächenbezogene Speicherfähigkeit für unterschiedliche Latentspeichermaterialien .....	19
Diagramm 6 Volumenanteile des Latentspeichermaterials bei der Verfüllung der Noppen in Abhängigkeit von Rohrabstand und Rohrdurchmesser .....	26
Diagramm 7 Volumenanteile des PCM - Materials in Abhängigkeit von der Estrichgüte ..	26
Diagramm 8 Einfluss der Druckfestigkeit auf die Volumenanteile des PCM - Materials ..	27
Diagramm 9 Volumenanteile bei gleichem Rohrdurchmesser und Druckfestigkeit bei unterschiedlichen Estrichgüte und - arten .....	27
Diagramm 10 Masseanteil PCM an Fließestrich CAF 7 für Druckfestigkeit 5 kN in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Verlegeabstand .....	28
Diagramm 11 Variante A mit Zementestrich CT 5, 5kN, VA 10 cm und Rohrdurchmesser 17 mm .....	31
Diagramm 12 Variante B mit zusätzlichen Ronden Zementestrich CT 5, 5 kN, VA 10 und Rohrdurchmesser 17 mm.....	32
Diagramm 13 Variante A mit Fließestrich CAF 7, 5 kN, VA 10 und Rohrdurchmesser 17 mm .....	32
Diagramm 14 Variante B mit zusätzlichen Ronden, Fließestrich CAF 7, 5 kN, VA 10 und Rohrdurchmesser 17 mm.....	33
Diagramm 15 Vergleich der vorhandenen marktreifen Produkte gegenüber der Originalsubstanz.....	33
Diagramm 16 Vergleich Variante B mit Smartboard 21 .....	34
Diagramm 17 Tagesgang für Raumtemperatur mit und ohne PCM (Variante B Fließestrich, Flächenkühlung) .....	35
Diagramm 18 Gegenüberstellung Tagesgang von Konstruktion A und Konstruktion B... ..	35
Diagramm 19 Messdaten für Versuch Lupo 43 B .....	40
Diagramm 20 Messwerte für Abkühlvorgang Probe Lupo 43 B mit Messstellen Wassereintritt, Rohraußenwand, Oben .....	43
Diagramm 21 Temperaturverlauf für Probe Lupo 43 B für Messstellen, Wassereintritt, Rohraußenwand, Mitte, Unten, Zentrum, Boden.....	45
Diagramm 22 Darstellung verschiedener Funktionen für die Messstelle Zentrum Probe Lupo 43 B.....	46



Diagramm 23 Vergleich zwischen Messwerten und ermittelter Funktion für die Messstellen Rohraußenwand, Oben, Zentrum, Boden für Probe Lupo 43 B .....	47
Diagramm 24 Darstellung des zeitlichen Temperaturverlaufes für unterschiedliche Schaumarten .....	48
Diagramm 25 Zeitlicher Temperaturverlauf für unterschiedliche Plattendicken .....	49
Diagramm 26 Gespeicherte Kühlenergie in Abhängigkeit der Zeit für die Probe AL 13 B .....	50
Diagramm 27 Darstellung des zeitlichen Verlaufes der gespeicherten Kühlenergie für Probe AL 13 B.....	51
Diagramm 28 Gespeicherte Kühlenergie in Abhängigkeit des PCM-Materials für Probe AL 13 B.....	52
Diagramm 29 Zeitlicher Verlauf der gespeicherten Energie im Probe Lupo 13 A bei unterschiedlichen Materialien.....	52
Diagramm 30 Gespeicherte Kühlenergie in Abhängigkeit der Zeit und der Masse des Latentspeichermaterials .....	53
Diagramm 31 Zeitlicher Temperaturverlauf für die Messstelle Wassereintritt, Rohraußenwand, Oben für Probe Lupo 43 B – Aufheizvorgang .....	54
Diagramm 32 Zeitlicher Temperaturverlauf für Messstelle Rohraußenwand, Mitte, Unten, Zentrum, Boden der Probe Lupo 43 B – Aufheizvorgang .....	55
Diagramm 33 Darstellung der unterschiedlichen Funktionen für Messstelle Zentrum - Probe Lupo 43 A - Aufheizvorgang .....	56
Diagramm 34 Temperaturverlauf für Probe Lupo 43 B - Messwerte und Kurvenanalyse	57
Diagramm 35 Gegenüberstellung Metall- und Graphitschaum für den Aufheizvorgang	58
Diagramm 36 Zeitlicher Verlauf für Energieaufnahme - Probe AL 13 B – Aufheizvorgang .....	59
Diagramm 37 Aufgenommene Wärme in Abhängigkeit des PCM-Materials für Probe AL 13 B.....	60
Diagramm 38 Aufgenommene Wärme bei Aufheizvorgang bei Probe AL 13 B.....	60
Diagramm 39 Aufgenommene Wärme bei Aufheizvorgang Probe AL 13 B in Abhängigkeit von der Temperatur .....	61
Diagramm 40 Aufgenommene - Abgegebene Energie der Platte AL 13 B in Abhängigkeit von der Temperatur .....	61
Diagramm 41 Schmelz- und Erstarrungsenthalpie für Platte AL 13 B .....	62
Diagramm 42 Temperaturverlauf innerhalb der Platte und des Mittelwertes .....	67
Diagramm 43 1.Ableitung für Polynome Anpassung Temperaturverläufe .....	68
Diagramm 44 Temperaturverlauf des Aufheizvorganges der 2.Versuchsreihe mit Estrich .....	69
Diagramm 45 1.Ableitung der polynomen Anpassung für den Temperaturverlauf.....	69
Diagramm 46 Vergleich Temperaturverlauf 1. und 2. Versuchsreihe .....	70
Diagramm 47 1.Ableitung der Polynomen Anpassung für Probe der 1. und 2. Versuchsreihe .....	70
Diagramm 48 Temperaturverlauf Abkühlvorgang ohne Estrich 2.Versuchsreihe.....	71
Diagramm 49 1. Ableitung der Polynomen Anpassung Abkühlvorgang.....	71
Diagramm 50 Temperaturverlauf mit und ohne Estrich für Platte A oben .....	72
Diagramm 51 1.Ableitung der polynomen Anpassung für den Abkühlvorgang mit und ohne Estrich .....	73
Diagramm 52 Zeitlicher Verlauf der gespeicherten Energie in der Platte A unten .....	74
Diagramm 53 Verlauf der Schmelz und Erstarrungsenthalpie für Kombination Platte A oben und unten .....	75
Diagramm 54 Verteilung der Raumtemperatur mit der Kombination 2 Platte A unten + 2 Platte A oben.....	76
Diagramm 55 Vergleich Simulation mit Messwerten.....	80

## 0. 4. Verzeichnis Begriffe, Abkürzungen

### Begriffe

Erstarrungsenthalpie	Notwendige Energie zum Phasenwandel flüssig – fest (kJ/kg)
Generische Ermittlung	Materialbasierende Berechnung auf der Grundlage von Klassen
Kühlenergie	Gesamte gespeicherte Energie des Phasenwandels beim Abkühlvorgang (Wh)
Latentspeicher	Speicher der Energie bei gleichbleibender Temperatur speichert durch Ausnutzung des Phasenwandels, gefüllt Latentspeichermaterial
Micronal	spezielles Latentspeichermaterial der BASF – Mikrokapsel mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen
Metallschaum	offenporiger Aluminiumschaum der m - pore GmbH
Lupo	Grafitummantelter Polyurethanschaum der m - pore GmbH
Phase Change Material	PCM, Latentspeichermaterial
proKLIMA	spezielle Fußbodenheizungs-, -kühl- und – lüftungssystem der EHT Siegmund GmbH
Schmelzenthalpie	Notwendige Energie zum Phasenwandel fest – flüssig (kJ/kg)
Smartboard	Latentspeichermaterial der Knauf Gips KG

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschung wurde eine aktive Speicherplatte für den Heiz- und Kühlfall entwickelt, die in bestehende Fußbodenheiz- und –kühlsysteme integriert werden kann. Es wurden in mehreren Versuchreihen die thermischen Parameter untersucht. In gleichzeitig durchgeführten Simulationen wurde die Auswirkung des Materials auf die Raumtemperatur erforscht. Die Simulation der entwickelten Platte wurde an Hand der durchgeführten Messungen validiert.

Die wesentlichen Vorzüge des Systems sind:

1. Durch eine enge thermische Kopplung dieses Speichermediums sowohl an das medienführende Rohrsystem als auch an den Baukörper, zeichnet es sich durch eine hohe Effizienz und schnelle Reaktion aus.
2. Durch Kombination von unterschiedlichen Latentspeichermaterialien können sowohl die Lastspitzen für die Kühlung als auch für die Heizung abgedeckt werden. Dies ist bisher vollkommen neuartig und bisher nicht am Markt vorhanden.
3. Durch das entwickelte System kann für den Kühlfall bis zum 4-fachen der Energie eines herkömmlichen Estrichs speichern.
4. Das System zeichnet sich durch einen guten Selbstregelleffekt aus. Dieser muss aber noch weiter untersucht werden.
5. Die durch die Simulation gewonnenen Ergebnisse konnten durch die Messungen bestätigt werden.
6. Das System ist leicht handhabbar auf der Baustelle. Es erfordert keine zusätzliche Technik oder Werkzeug.
7. Durch den Einsatz von Metallschaum konnte der große Nachteil der schlechten Wärmeleitung innerhalb der Latentspeichermaterialien beseitigt werden.

Das Forschungsvorhaben „Entwicklung eines innovativen Aktiv- Kühl- u. Heizbodens unter Ausnutzung des Latentspeicherprinzips“ wurde durch die IBB

Modul Air KG, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 23836-24/2, in dem Zeitraum 2005 – 2010 durchgeführt

Das entwickelte System hat noch wesentliche Potenziale, die es in einer weiterführenden Forschung zu erschließen gilt. In Kombination mit anderen technischen Vorrichtungen könnte aus diesem Speicherplattensystem ein aktives, leicht regelbares Spitzenlastkühl- und –heizgerät entwickelt werden, dass sich in allen Sanierungsobjekten ohne Fußbodenerneuerung einbauen lassen könnte bei gleichzeitiger Nutzung von Umweltwärme bzw. – kälter.

# 1. Einleitung

Die Heizung und Kühlung verursacht in Deutschland einen wesentlichen Teil des Energieverbrauches. Zurzeit werden dafür noch überwiegend fossile Energieträger verwendet, wenngleich regenerative Quellen zunehmend zum Einsatz kommen.

Es wird in der EU mit einer Vervielfachung der klimatisierten Büroflächen bis zum Jahr 2020 gerechnet.

Diese Entwicklung des Klimatisierungsbedarfes ist vorrangig zweier Entwicklungstendenzen

- zunehmender Einsatz von Leichtbau zur Erhöhung der Nutzerflexibilität
- steigende Komfortansprüche

geschuldet.

Dies wird deutlich durch das nachfolgende Diagramm aus einer Studie der BASF [SCH08] unterlegt.

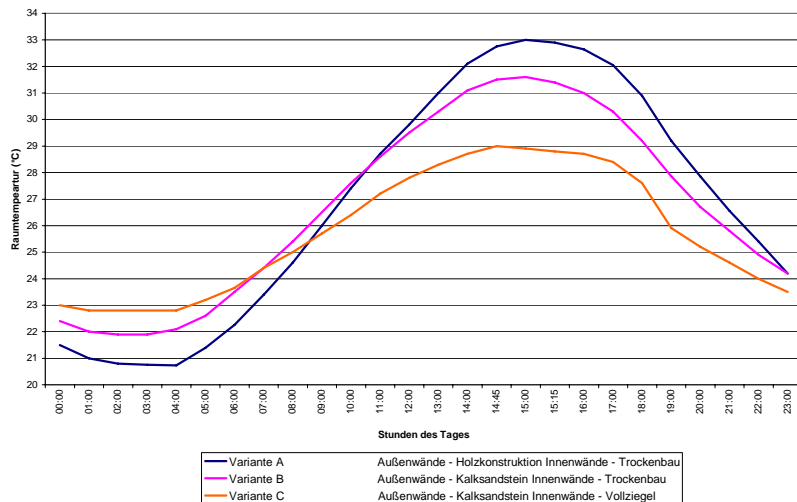
- Vervielfachung der klimatisierten Büroflächen in EU erwartet 1996 to 2020 (Quelle: EERAC-Studie)
- Global bereits 15% des Stromverbrauchs in 2002 zur Produktion von Kälte oder Klimatisierung von Gebäuden (Quelle: IIR)
- Klimatisierte Flächen im tertiären Sektor derzeit: Europa 27%, USA 80%, Japan >95 % (Quelle: EERAC-Studie)



Abbildung 1 Entwicklung des Kältemarktes Italien [SCH08]

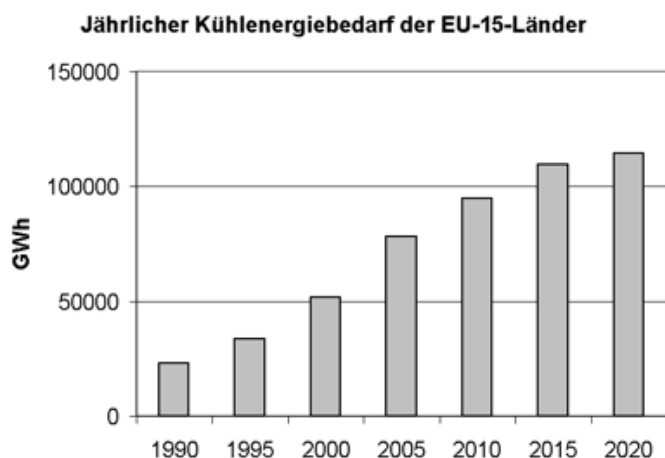
Ein Gebäude mit hohem Leichtbauanteil reagiert auf den Lastgang der äußeren und inneren Lasten mit wesentlich stärkeren Temperaturschwankungen als ein schweres Gebäude.

Bei einem Bürogebäude aus Holzleichtbaukonstruktion mit Innenwände aus Trockenbau (Kurve a) mit lediglich massiven Decken würde sich auf der Grundlage des Referenzjahres für Deutschland für den 12.8. der folgende Raumlufttemperaturverlauf in einem Raum ohne Kühlung einstellen. Gleichzeitig ist der Temperaturverlauf für diesen Raum mit Außenwänden mit Kalksandstein (Kurve b) und mit Innenwände aus Vollziegel (Kurve c) dargestellt.



**Diagramm 1 Raumlufttemperaturverlauf für Gebäude mit unterschiedlicher Bauart**

Deutlich wird, dass die heutige leichte Bauweise, insbesondere in Büro- und Verwaltungsgebäuden zu sehr hohen Raumtemperaturen in den Sommer führen. Diese liegen weit über den zulässigen Werten. Um ein behagliches und dem Arbeitsprozess geschuldete Temperatur einzuhalten, ist eine Kühlung zwingend notwendig. Aus diesem Diagramm wird auch ersichtlich, dass die Temperaturspreizung (Tag zu Nacht) ebenfalls von der Bauweise stark abhängig ist. Die häufig anzutreffende Bauweise aus Stahl – Glas und Trockenbau führt gleichzeitig zu wesentlich höherem Energieverbrauch sowie zu einer deutlich höheren zu installierenden Leistung.



**Diagramm 2 Entwicklung des Kühlbedarfs in der EU [WIN08]**

Laut Ch. Winkler [WIN08] wird sich die Fläche mit aktiver Kühlung wie folgt entwickeln: „Im Jahr 1990 betrug die gekühlte Gebäudefläche der EU-Staaten (EU-15) 540 Millionen Quadratmeter. Bis 2005 stieg die Zahl auf 1.800 Mio. m<sup>2</sup> und eine Prognose für 2020 sagt eine Zunahme dieser Fläche auf 2.700 Mio. m<sup>2</sup> voraus [3].“

Nach den Prognosen wird der Energiebedarf für die Kühlung 2020 in Europa höher sein als für die Heizung.

Um einen Einsatz von regenerativen Energiequellen zur Lösung des Widerspruchs sowie zur nachhaltigen Senkung des Energiebedarfes zu ermöglichen, sind intelligente Systeme mit niedrigen Temperaturdifferenzen zwischen Heiz-/Kühlmedien und der gewünschten Raumtemperatur gefragt.

Diese Systeme werden infolge der besseren Energieausnutzung auch als Low Ex-Systeme bezeichnet. Ein wesentlicher Bestandteil dieser neuartigen Heiz- und Kühlsysteme ist die Zwischenspeicherung der Energiespitzen und ihre kontinuierliche Abführung in der Nichtnutzungszeit. Diese Speicherung wird vorrangig mit Latentspeichern (d.h. Ausnutzung des Phasenwandels) realisiert.

## 2. Zielsetzung des Projektes

Ein bedingter Speichereffekt ist in jedem Gebäude bereits durch die Wärmekapazität der Bauteile gegeben, wobei derartige Effekte in modernen Gebäuden deutlich eingeschränkt sind. Die Pufferwirkung wird dort im zeitlichen Verlauf durch den schnellen Anstieg der Materialtemperatur immer geringer und ist bei Erreichen der einzuhaltenden Raumtemperatur nicht mehr wirksam. (s. *Diagramm 1 Raumlufthemperaturverlauf für Gebäude mit unterschiedlicher Bauart*)

Durch den zusätzlichen Einsatz thermischer Wärmespeicher in Form von „Latentwärmespeichern“, die ihren Phasenzustand durch die Zu- oder Abfuhr von Kälte bzw. Wärme verändern, ohne dass es während der „Zwischenphase“ zu einer Temperaturveränderung eines mit dem Speichermedium angereicherten Fußbodens kommt, könnte das Ziel der wesentlichen Erhöhung der thermischen Speicherung und damit zu einer Glättung des Temperaturprofils des Raumes erreicht werden. Die Auswirkung des Einsatzes von Latentspeichermaterial auf den Temperaturanstieg wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

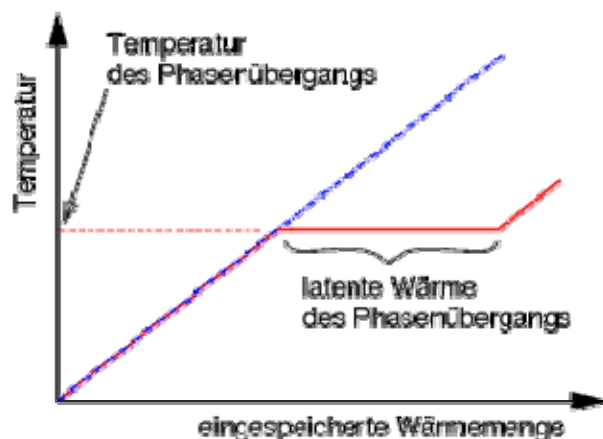
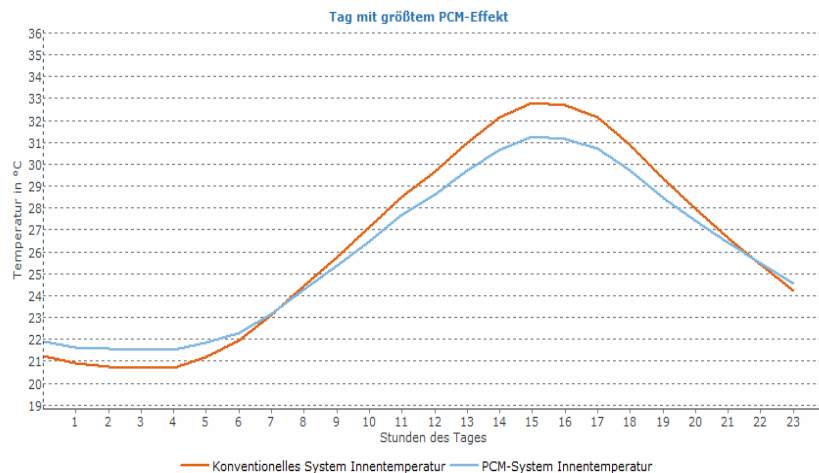


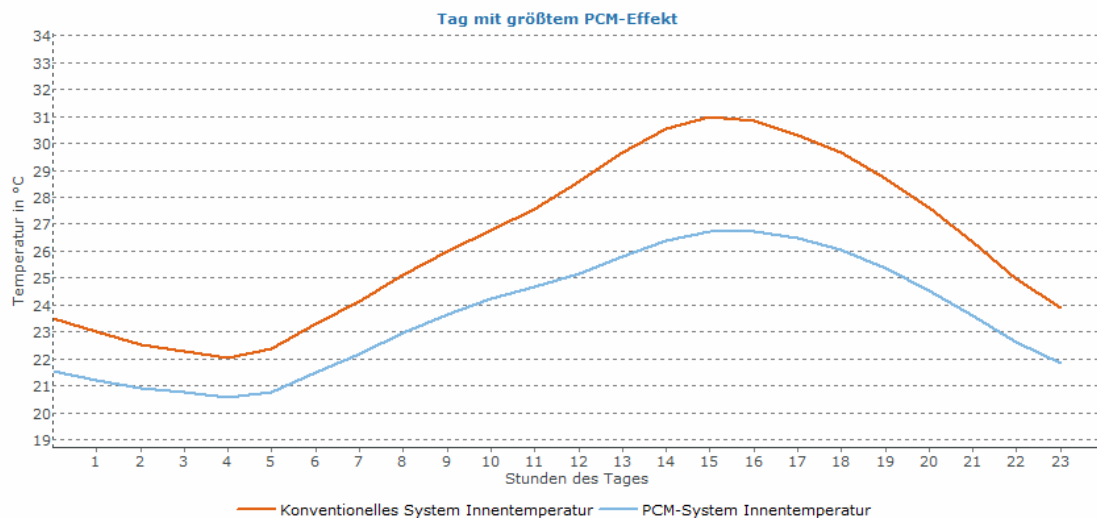
Abbildung 2 Temperaturverlauf mit und ohne Latentspeicher

Die Nutzung des Phasenwechsels führt zu einer Glättung des zeitlichen Verlaufes der Raumtemperatur. Stellvertretend ist dies für den Raum aus *Diagramm 1* nachfolgend dargestellt.



**Diagramm 3 Raumtemperaturverlauf mit und ohne PCM - Material in den Innenwänden (passiv)**

Wenn die im *Diagramm 3* vorhandenen Innenwände mit PCM – Material auch noch aktiv gekühlt werden, wird der nachfolgend dargestellte Temperaturverlauf erreicht.



**Diagramm 4 Raumtemperaturverlauf mit und ohne PCM - Material in den Innenwänden (aktiv)**

Vor diesem Hintergrund soll eine in der Baustellenpraxis einsetzbare Lösung entwickelt werden, die im Estrich ein integriertes Speichermedium zulässt. Dieser Estrich sollte in folgender Form einsetzbar sein:

- als Ummantelung einer konventionellen Fußbodenheizung/-kühlung
- als Ummantelung einer Fußbodenheizung/- kühlung in Kombination mit einem luftgekühlten Hohlboden (Effizienzsteigerung)



- als kombinierte Kälte- und Wärmespeicherung bei vorgegebener (eingebauter) Phasenwechseltemperatur

Zur Erreichung einer breiten Marktakzeptanz soll es sich zunächst nicht um einen Fertigestrich handeln, sondern auslegungsgemäß soll die Anmischung bauseitig erfolgen. Sie muss daher auch den Arbeitsgewohnheiten der Zielgruppe (Estrichleger) entsprechen. Das Speichermedium muss deshalb entweder in flüssiger Form (ähnlich heutiger flüssiger Zusatzstoffe), in Pulverform (ähnlich heute: Zement) oder in kleinster Körnung (ähnlich heute: Sand bis 1 mm Körnung) vorliegen. Zur Erreichung eines „aktiven“ Systems ist es darüber hinaus erforderlich, eine entsprechende Systemsteuerung zu entwickeln bzw. zu integrieren, die fallspezifisch ausgelegt werden muss.

Dieser innovative Fußboden muss folgende technische Eigenschaften ausweisen:

- Hohe Tragfähigkeit/Bodenbelastbarkeit
- (Zeitlich) lange Speicherkapazität
- Gleichmäßige Temperaturverteilung
- Hohe energetische Effizienz
- Guten Brandschutzeigenschaften
- Toxikologische Unbedenklichkeit
- Phasenwechsel/Schmelztemperatur des Speichermediums im Bereich 16° bis 19° C
- Effiziente Wärme- bzw. Kälteübertragung
- Vollständige Einbettung des Speichermediums

Bereits durch andere Unternehmen durchgeführte Forschungsvorhaben weisen auf die Problematik dieses Prozess hin. Durch die Firma Maxit wurde in Zusammenarbeit mit der BASF die Anreicherung von Putzen und Estrichen mit PCM untersucht [ZOE08].

In dieser Forschungsarbeit [ZOE08] musste festgestellt werden, dass

1. verstärkte Rissbildungen bei gleichzeitig Nutzung der Fläche zum heizen und Kühlen auftreten können – aus diesem Grunde Einsatz von Glasfasergewebe
2. Einsatz von herkömmlichen Fußbodenheizungsrohr bei geringer Überdeckung führt zu starker Temperaturwelligkeit – aus diesem Grunde Beschränkung auf Kapillarrohrmatten und Minirohrfolienelemente
3. Latentspeichermaterial lässt sich leichter in Gips als in Zementestrich integrieren.
4. Die schlechte Wärmeleitung innerhalb des PCM wurde als sehr nachteilig für die Speichervorgänge erkannt. Es wurden Maßnahmen durch Einsätzen von Graphit zur Verbesserung untersucht. Jedoch stand der Aufwand in keinem Verhältnis zu dem Ergebnis.

Zusammenfassend wurde festgestellt [ZOE08]:

*„Das in den Estrich integrierte PCM führt zu einer Erhöhung der*

*Wärmespeicherfähigkeit von ca. 25%. Ziel sollte eine Erhöhung um ca. 100% sein. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität des Estrichs, der großen Dichte und des relativ großen Temperaturbereiches müsste der PCM Anteil auf rd. 30% erhöht werden, um dieses Ziel zu erreichen. Aufgrund von zu starken Änderungen in der Materialeigenschaft ist dies momentan nicht möglich.“*

Folgende technische Lösungen werden heute marktseitig angeboten:

- Speichermaterialien/-medien

Speichermaterialien stehen heute in folgender Form zur Verfügung, wobei vorzugsweise Paraffine zum Einsatz kommen:

- Grobkörnige Granulate (Durchmesser ca. 1 – 3 mm): Fa. Rubitherm
- Flüssige Speichermedien sowie pulver- und kleinstkörnige (bis 1 mm Durchmesser) in Form von Mikrokapseln: Fa. BASF

Derartige Speichermedien werden bereits in der Medizintechnik (z.B. Wärmetherapie) als auch im Bausektor eingesetzt.

- Bauseitige Lösungen

Bauseitig werden folgende Lösungskonzepte angeboten:

- „Passivsysteme“ durch Einmischung von Speichermedien in Putz- bzw. Gipskartonplatten. Es erfolgt keine aktive Regelung als Heiz- bzw. Kühlsystem, der Phasenwechsel wird lediglich durch die Außentemperatur erwirkt.
- Fußboden-Heizsystem (Fa. Rubitherm in Zusammenarbeit mit der Fa. Zimmermann Electronic) mit folgendem Aufbau: Umschüttung der Heizrohre mit grobkörnigen Granulaten
- Bedeckung der Granulate mit Trockenestrich-Elementen (z.B. Fa. Fermacell)

Die bislang bauseitig realisierten Lösungen weisen aber folgende **technologische Schwachstellen** auf, die einer Verbreiterung des (positiven) Grundgedankens noch entgegenstehen.

- Wandkühlung bzw. – heizung:
  - Geringe Effizienz, da sie nach dem Zufallsprinzip erfolgt (keine Regelung) und eine „Mischung“ auch nicht raum- bzw. bauseitig ausgelegt ist.
- Fußbodentemperatursystem
  - Zu geringe Tragfähigkeit: Relativ groß dimensionierte Granulate werden im Übergang zum flüssigen Zustand weich, so dass es bei stärkerer mechanischer Belastung zu „Eindellungen“ kommt

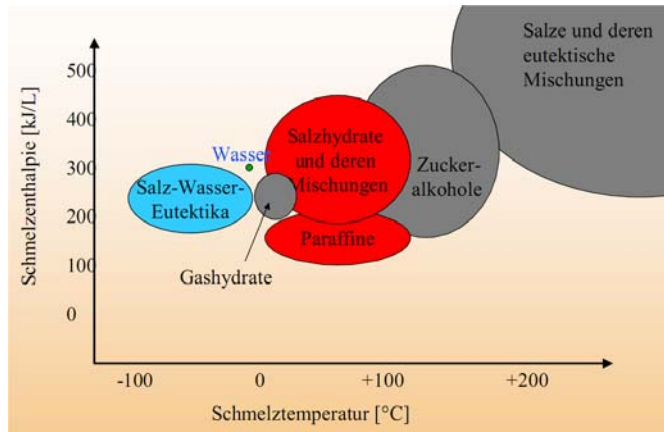
- Schlechte Leitfähigkeit, da Latentspeicher materialbedingt selbst eine schlechte Leitfähigkeit besitzen und eine Kälte- bzw. Wärmeleitfähigkeit nur durch eine möglichst homogene Materialintegration/Vermischung (z.B. in Estrich) erreicht wird.
  - Die Auslegung erfolgte bislang nicht für den Kühlfall sondern nur für den Heizfall
- Ergänzende Kühlsysteme in Form von Eisspeichern:
- Als Latentspeicher finden in der Klimatechnik heute bereits sog. „Eisspeicher“ Verwendung. Problematisch ist, dass, neben einem zusätzlichen Platzbedarf in der zentralen Klimatechnik, ihr Nutztemperaturniveau mit 0°C sehr weit von den angestrebten Betriebstemperaturen entfernt ist. Dadurch werden erheblich niedrigere Leistungszahlen als eigentlich angestrebt erreicht. Darüber hinaus müssen zusätzliche Aggregate zur Eisbildung (Umwälzpumpen, Sprudlereinrichtungen etc.) eingesetzt werden, so dass ein hoher Strombedarf entsteht. Eine Verbesserung der Energiebilanz wird daher trotz des preiswerten Ausgangsmaterials kaum erreicht.

Durch die von der Fa. IBB geplante Entwicklung sollen diese technologischen, ökologischen und ökonomischen Nachteile aufgehoben und eine Lösung erzielt werden, die sowohl in der Baupraxis als auch vom Nutzer akzeptiert wird. Vor diesem Hintergrund soll eine modellhafte Lösung entwickelt werden, die im Neubaubereich als auch im Restaurierungs- und Sanierungssektor eine weite Verbreitung erfahren soll. Um eine schnelle und breite Einführung dieser Lösung zu ermöglichen, wurde angestrebt, die Simulationsrechnungen mit einem frei zugänglichen Tool zu realisieren. Es wurde als Programm „PCM-Express 1.0“ von Valentin - Software angewendet. Dieses wurde im Rahmen einer Forschung in Zusammenarbeit zwischen der BASF, dem ISE Fraunhofer Institut und der Valentin-Software GmbH entwickelt. Alle in diesem Bericht vorkommenden Simulationsrechnungen sind sofern nichts anderes bemerkt, auf diesem Programm durchgeführt.

### **3. Theoretische Untersuchungen zur Materialauswahl und zu möglichen Estrichkonstruktionen**

#### **3.1. Vorbemerkungen zur Materialauswahl**

Zu den möglichen einsetzbaren Latentspeichermaterialien gibt es eine Reihe von Veröffentlichungen u. a. [KNÖ08]



**Abbildung 3 Schmelzenthalpie für unterschiedliche Latentspeichermaterialien [KNÖ08]**

Auf Grund ihrer Eigenschaften wurden die Paraffine bevorzugt und einer ersten Untersuchung unterzogen. Sie sind gekennzeichnet durch folgende Eigenschaften:

- wachsartig,
- brennbar,
- geruch- und geschmacklos,
- ungiftig
- elektrisch isolierend,
- wasserabstoßend,
- gegenüber vielen Chemikalien reaktionsträge (innert).
- große Volumenänderung beim Phasenwechsel

Im Rahmen einer ersten Simulation wurden folgende mögliche PCM-Materialien untersucht:

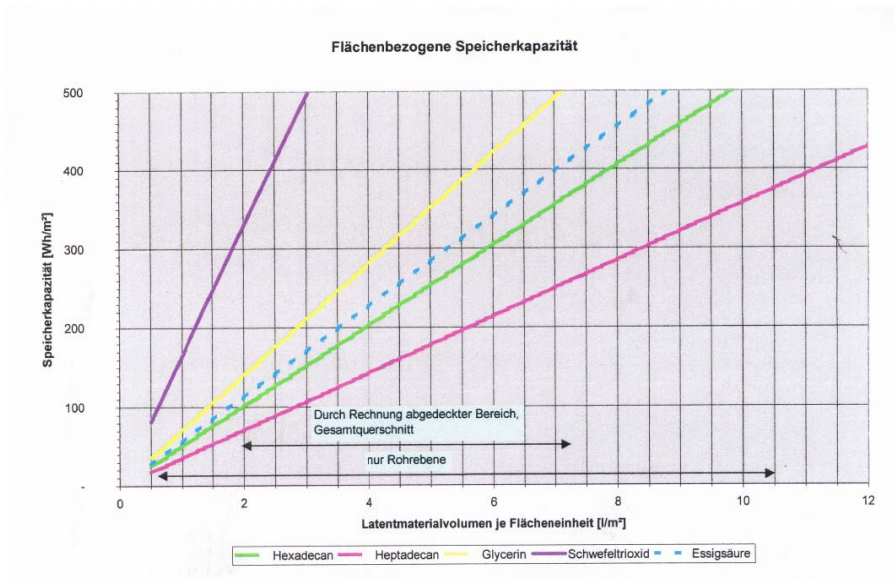
- Hexadecan
- Heptadecan
- Glyzerin
- Schwefeltrioxid
- Essigsäure

Gleichzeitig wurde diese Untersuchung für die Varianten

- Aktivierung nur in der Rohrebene
- Aktivierung des gesamten Estrichs

durchgeführt.

Die Ergebnisse über die überschlägige Speicherfähigkeit sind im nachfolgenden Bild dargestellt.



**Diagramm 5 Flächenbezogene Speicherkapazität für unterschiedliche Latentspeichermaterialien**

Die ausführlichen Berechnungen für den Stoff Heptadecan sind in *Anlage A 2 1. Simulation für verschiedene PCM - Stoffe* für die unterschiedlichen Rohrabstände enthalten.

Hauptproduzenten in Deutschland sind die Firma Rubitherm GmbH und die BASF.

Rubitherm bietet folgende Materialien an:

- Ungebundenes Speichermaterial
  - Paraffin RT
  - Salzhydrat SP
- Gebundenes Speichermaterial
  - Latentwärmepulver PX
  - Latentwärmegranulat PG
  - Latentwärmecompound PK

BASF [BAS10] bietet die folgenden Materialien an:

Produktbezeichnung	Produkttyp	Schmelztemperatur ca.	Anwendung	Gesamtspeicherkapazität ca.	Latentwärmekapazität ca.	Feststoffgehalt	Dichte	Visk.
DS 5000	Dispersion	26 °C	Sommerl. Überhitzungsschutz	59 kJ/kg	45 kJ/kg	ca. 42 %	ca. 0,98	ca. 200–600 mPas
DS 5007	Dispersion	23 °C	Stabilisierung d. Raumtemperatur im Komfortbereich Passive und aktive Anwendung	55 kJ/kg	41 kJ/kg	ca. 42 %	ca. 0,98	ca. 200–600 mPas
DS 5030	Dispersion	21 °C	Flächenkühlsysteme	51 kJ/kg	37 kJ/kg	ca. 42 %	ca. 0,98	ca. 200–600 mPas
DS 5001	Pulver	26 °C	Sommerl. Überhitzungsschutz	145 kJ/kg	110 kJ/kg	pulverförmig	ca. 250–350 kg/m <sup>3</sup>	
DS 5008	Pulver	23 °C	Stabilisierung d. Raumtemperatur im Komfortbereich Passive und aktive Anwendung	135 kJ/kg	100 kJ/kg	pulverförmig	ca. 250–350 kg/m <sup>3</sup>	
DS 5029	Pulver	21 °C	Flächenkühlsysteme	125 kJ/kg	90 kJ/kg	pulverförmig	ca. 250–350 kg/m <sup>3</sup>	

Für die weiteren Bearbeitungen wurde der PCM-Stoff Micronal 23 – DS 5008 der BASF gewählt. Nach Durchführung der Simulation wurde eine Beimischung von 12 % Masse PCM als Optimum ermittelt. Die zu erwartenden Speicherkapazitäten liegen zwischen Hexadecan und Heptadecan und sind abhängig vom Mischverhältnis der beiden Stoffe.

### 3.2. Prüfung der Festigkeit

In einem zweiten Schritt wurde durch die Materialprüf- und Versuchsanstalt Neuwied die Festigkeit von Estrich unter Einbringung von Additiven in Zement-Estrichmischungen geprüft. Der Prüfbericht liegt in *Anlage A1 Prüfbericht* bei. Deutlich wird, dass eine Zumischung zur Verminderung der Druckfestigkeit führt. Bei einer 12 % Zumischung weist der Estrich nur noch  $\frac{1}{4}$  der in der Probemischung erreichten Druckfestigkeit oder 32 % der notwendigen Druckfestigkeit auf. Bei 4,4 % Beimischung verringert sich die Druckfestigkeit auf 64 % gegenüber der Probemischung oder 84 % der notwendigen Druckfestigkeit. Gleichzeitig weist der Estrich nach 7 Tagen nur  $\frac{1}{10}$  der Druckfestigkeit der Vergleichsmischung auf. Dies ist für den Baustellenprozess sehr negativ und führt zu nicht unwesentlichen Bauzeitverlängerungen.

Gleichzeitig wurde durch MPVA Neuwied auch festgestellt, dass dieser Estrich nicht mehr verarbeitbar ist. Diese Ergebnisse stimmen mit denen der Maxit GmbH überein [ZOE08]. Im Rahmen der Abstimmung mit dem Forschungsträger wurde die Zielrichtung geändert. Der Weg der Beimischung auf der Baustelle wurde verlassen und die Zugabe des Materials in vorgefertigten Ronden oder Kassetten in Angriff genommen. Diese Änderung hat beträchtliche Zeit in Anspruch genommen und führte zu einer Verlängerung der Forschungsarbeit.

### 3.3. Theoretische Untersuchungen zu möglichen Kombinationen PCM - Estrich mit Fußbodenheizung

#### 3.3.1. Allgemeine Vorbemerkungen

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, sind klare Definitionen der Randbedingungen notwendig. Aus diesem Grunde werden nachfolgend einige Erklärungen zur Fußbodenheizung sowie zu dem Simulationsraum, der bereits den *Diagramm 1, Diagramm 3 und Diagramm 4* zu Grunde liegt, abgehandelt. Sie dienen dem Verständnis für die weiteren Abhandlungen. Sie beruhen nicht auf Vollständigkeit, sondern sind auf die wesentlichen Punkte beschränkt.

#### 3. 3.1.1. Beschreibung des Aufbaus der Fußbodenheizung

Der Aufbau einer Fußbodenheizung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

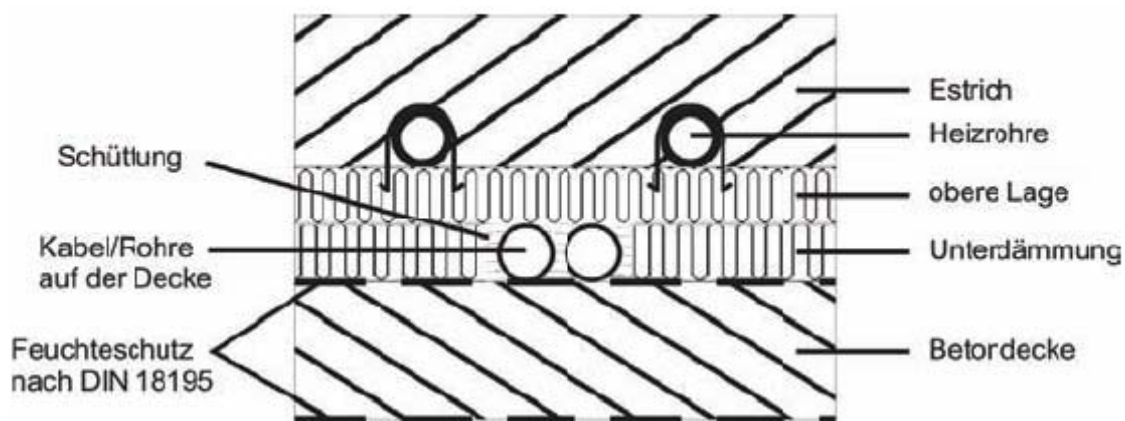


Abbildung 4 Schematischer Aufbau einer Fußbodenheizung (Tackersystem) [EHT07]

In der Praxis werden die Fußbodenheizungssysteme nach folgenden Kriterien unterschieden

- Estrichart
- Haltesystem des Rohres
- Rohrart
- Rohrabstand
- Rohrdurchmesser

Eine genaue Aufstellung der Kriterien befindet sich in *3. Anlage A 3 Kriterien für Zuordnung Fußbodenheizungssystem*.

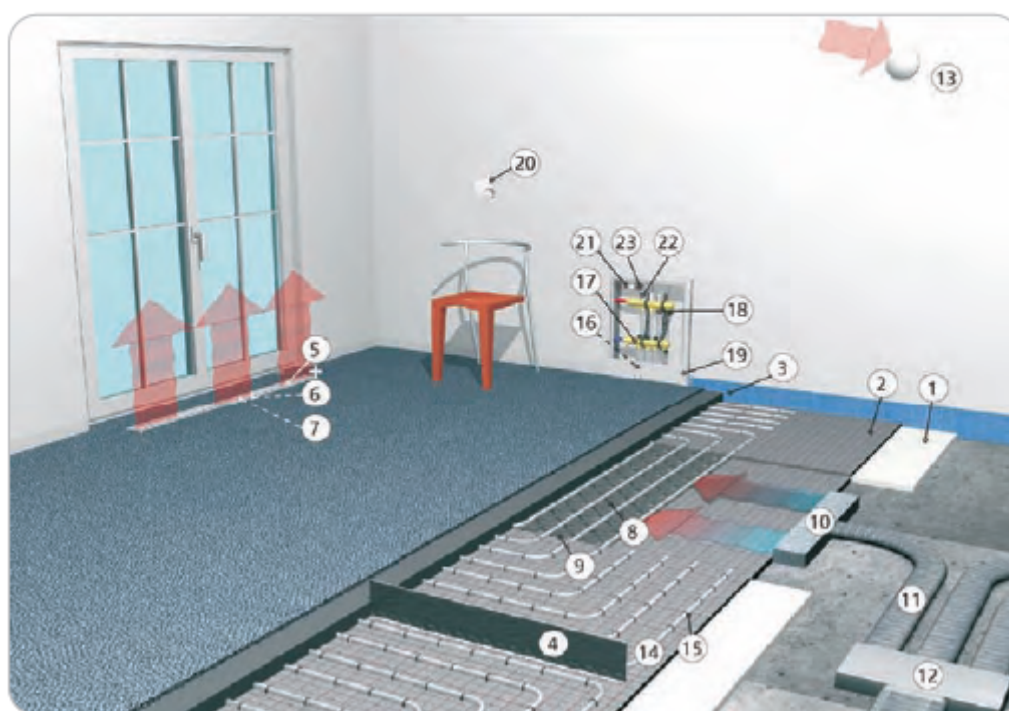
Im Rahmen dieser Forschung werden die Estricharten Zement- und Fließestrich in Kombination mit einem Noppensystem und Polyäthylenrohren näher untersucht.

Vorrangig wird in diesem Bericht sich auf 17 mm Rohr konzentriert. Bei abweichenden Rohrdimensionen wird dies im Text explizit erwähnt. Aus der Wahl des Rohres, der Estrichart und der notwendigen Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Nutzungsart ergibt sich die notwendige Überdeckung. Diese ist für die zwei Estricharten ebenfalls im Anhang 3. Anlage A 3 Kriterien für Zuordnung **Fußbodenheizungssystem** enthalten.

Die Firma IBB sowie EHT Siegmund GmbH zeichnen sich durch das patentierte Fußbodenheizungssystem „proKLIMA“ aus. Dieses System vereint Heizen, Kühlen und Lüften in einem.

## proKLIMA® Flächenheiz-, Kühl- und Lüftungsboden

In der Systempreisübersicht enthaltene Anlage-Teile



### Systemteile

Pos.	6, 7, 8, 9, 10	proKLIMA® KWL-Pakete
Pos.	11	Zuluft-Bodenkanäle
Pos.	12	Zuluft-Bodenverteiler
Pos.	1, 2, 3, 4	Systemflächen
Pos.	14, 15, 16, 17, 18	Rohrregister
Pos.	5	Zuluftauslassgitter
Pos.	19, 20, 21, 22, 13	Regelung / Wandschränke

Abbildung 5 Schematischer Überblick System "ProKLIMA" [EHT10]



Aus dieses System wird im Rahmen dieser Arbeit ein besonderes Augenmerk gelegt Durch die Kombination von Fußbodenheizung bzw. – kühlung mit einer Lüftung ist die Reaktionszeit dieses Systems gegenüber normalen Fußbodenheizungen / - kühlungen bedeutend kürzer. Nachfolgend bereits ein Ausschnitt aus dem speziell entwickelten Rechenprogramm für dieses System.

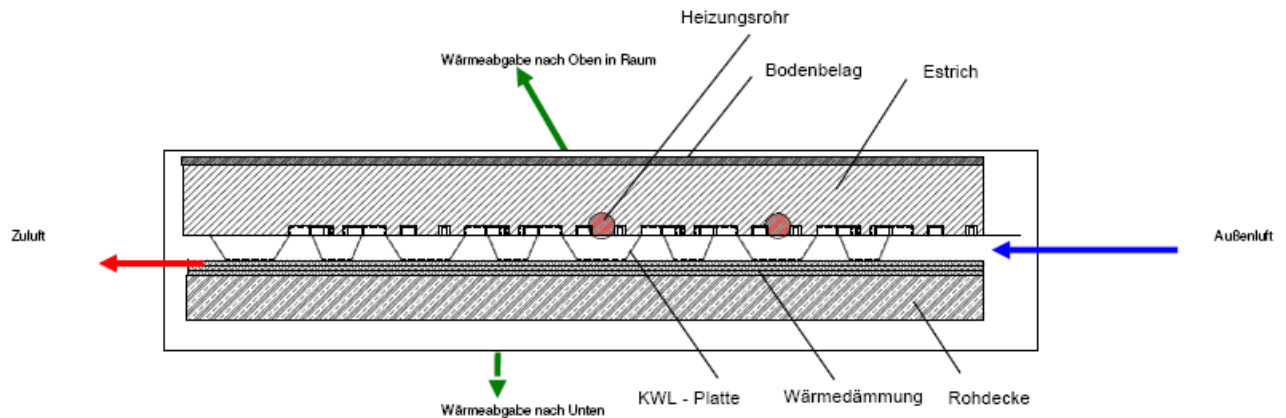
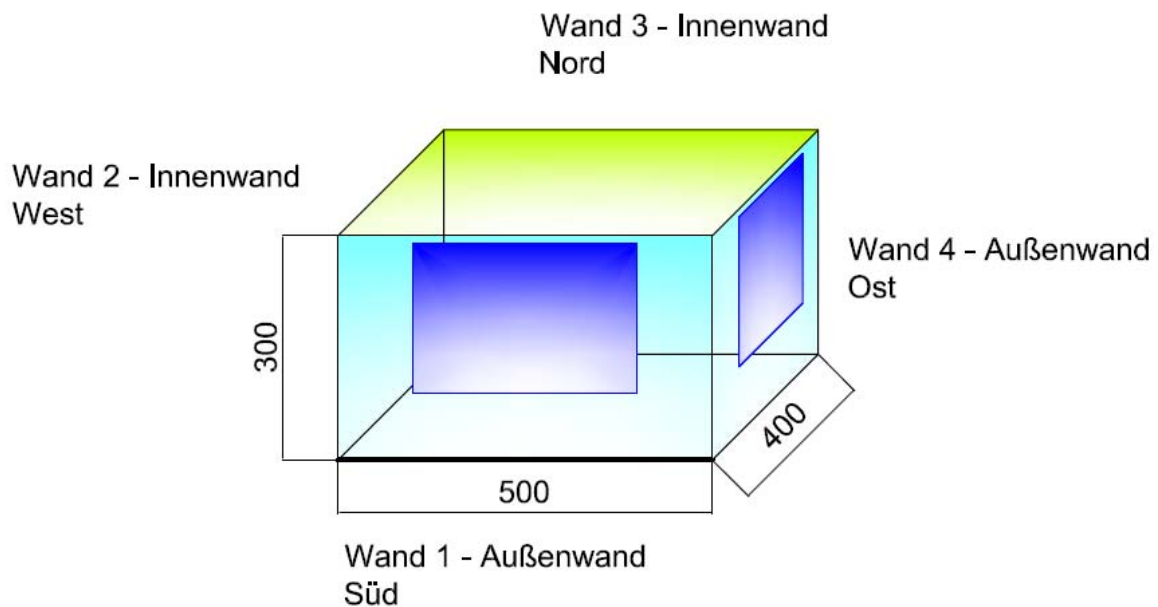


Abbildung 6 Detaillierter Aufbau "ProKLIMA" - System

### 3. 3.1.2. Aufbau des Simulationsraumes

Die Simulation wird mit zwei unterschiedlichen Programmen durchgeführt. Für die Ermittlung des zeitlichen Verhaltens eines Fußbodens auf der Grundlage der Messergebnisse wird ein Programm von Prof. Glück [GLÜ07] genutzt. Es liefert den Temperaturverlauf bei definierter Wärmeabgabe für die Kühlung. Mit den Ergebnissen aus den Messungen wird im Programm „PCM – Express Version 1.0“ [VAL08] weiter gerechnet. Um eine einheitliche, vergleichbare Grundlage zu haben, wurde ein Simulationsraum definiert. Seine wichtigsten Eigenschaften zeigt die nachfolgende Darstellung.



**Abbildung 7 Simulationsraum mit Orientierung und Abmaße**

Die wichtigsten Eigenschaften in Kurzfassung sind:

- Büronutzung
- Fensteranteil je Außenwand 40 %
- Lüftungsanlage vorhanden – 100 % Tag; 30 % Nacht
- Fußbodenheizung
- Flächenkühlung
- Innenwände, Decke und Fußboden grenzen an Räume mit gleicher Temperatur
- Außenwand – Holzleichtbaukonstruktion
- Innenwand – Trockenbau

Die detaillierte Aufschlüsselung mit den Angaben der einzelnen Baustoffe und der getroffenen Annahmen sind im Anhang in der *4. Anlage A 4 Angaben zum Simulationsraum* enthalten

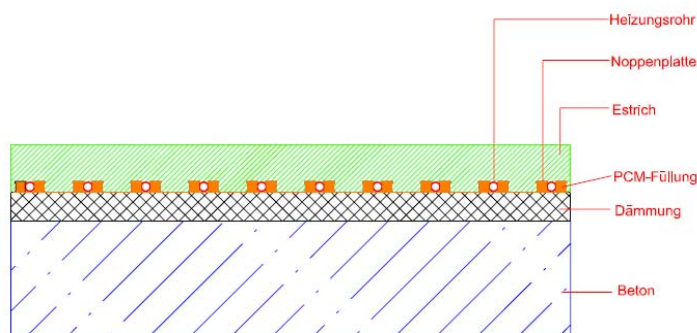
### 3.3.2. Varianten zum Einbringen PCM

#### 3.3.2.1. Noppenfüllung – Variante A

Unter den Ergebnissen von Abschnitt 3.1. *Vorbemerkungen* und 3.2. *Prüfung der Festigkeit* wurde nach neuen Lösungsansätzen zum Einbringen des PCM-Materials gesucht. Als Variante A wird das im *Abbildung 9 Schematischer Fußbodenaufbau mit Noppenplatte* dargestellte Verfüllen der Noppen mit PCM untersucht.



**Abbildung 8 verlegte Noppenplatte mit Heizungsrohr**



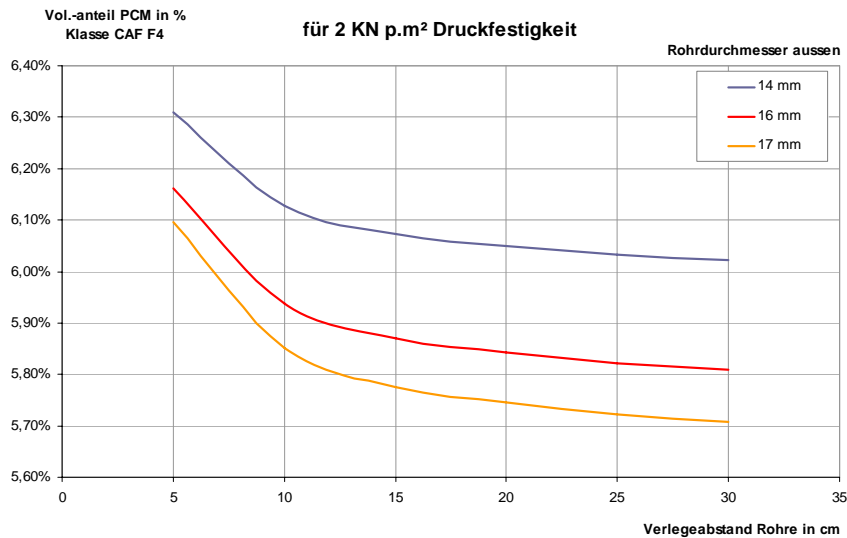
**Abbildung 9 Schematischer Fußbodenaufbau mit Noppenplatte**

Diese Noppen haben ein Volumen von  $0,00304 \text{ m}^3/\text{m}^2$  Fußbodenfläche. Infolge der unterschiedlichen Überdeckung der Rohre (abhängig von der Belastung, Estrichgüte, Estrichqualität und Verlegeabstand) ergeben sich verschiedene Volumenanteile.

Diese sind in *Anlage A 5 maximal erreichbare Volumenprozent an PCM* in Abhängigkeit von:

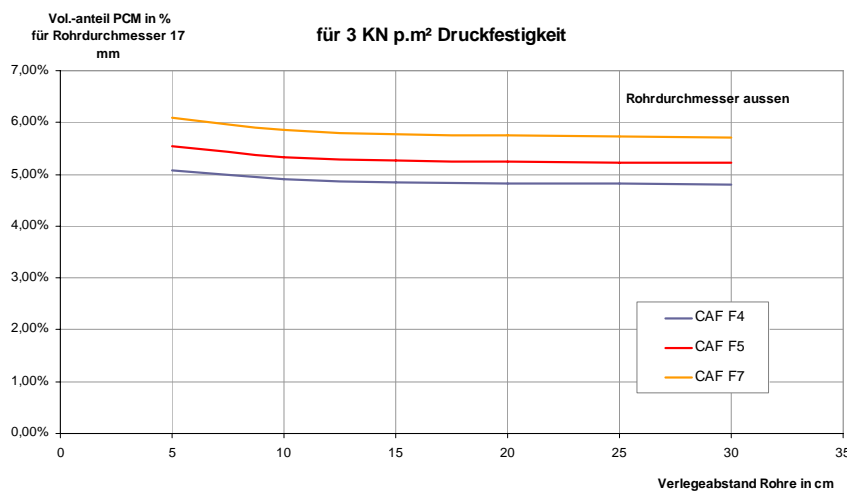
- Estrichmaterial
- Festigkeit des Estrichs
- Verlegeabstand
- Rohrdurchmesser

dargestellt. Als erstes wurde der Zusammenhang von Rohrabstand und Rohrdurchmesser für Fließestrich untersucht.



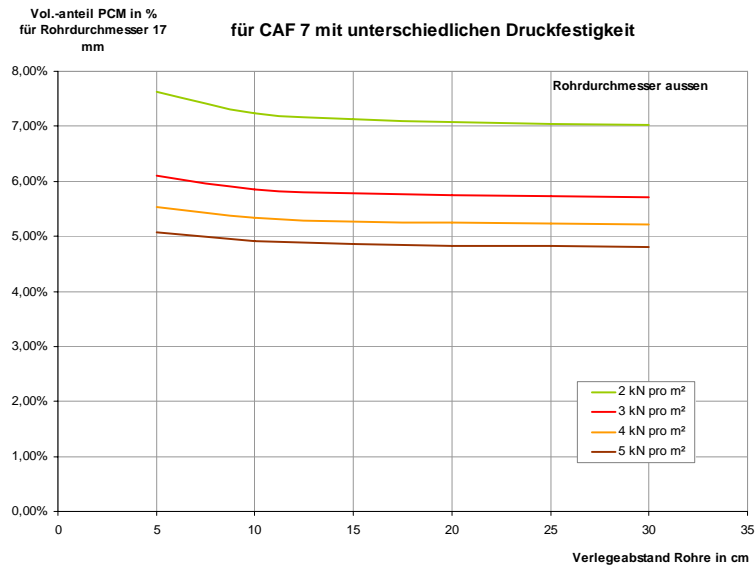
**Diagramm 6 Volumenanteile des Latentspeichermaterials bei der Verfüllung der Noppen in Abhängigkeit von Rohrabstand und Rohrdurchmesser**

Mit zunehmendem Rohrabstand sinken die Volumenanteile des PCM – Materials am Estrich. Den gleichen Effekt erreicht man mit kleiner werdenden Rohrdurchmessern. Danach erfolgt die Untersuchung für verschiedene Estrichgüte.



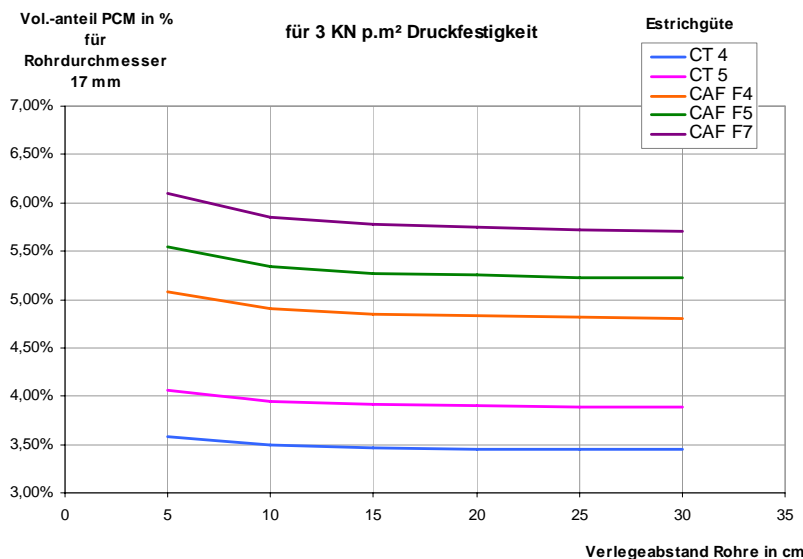
**Diagramm 7 Volumenanteile des PCM - Materials in Abhängigkeit von der Estrichgüte**

Die Estrichhöhe nimmt mit steigender Estrichgüte ab und der Volumenanteil des Latentspeichermaterials zu. Der Einfluss der Druckfestigkeit bei konstanter Estrichqualität ergab folgendes Diagramm.



**Diagramm 8 Einfluss der Druckfestigkeit auf die Volumenanteile des PCM - Materials**

Es erfolgt die gleiche Untersuchung für die Estrichart Zementestrich. Sie lieferte adäquate Ergebnisse. Jedoch sind die Volumenanteile um ca. 1 – 2,5 % niedriger infolge der höheren notwendigen Überdeckung. Dies geht auch der Gegenüberstellung von Fließ- und Zementestrich hervor.



**Diagramm 9 Volumenanteile bei gleichem Rohrdurchmesser und Druckfestigkeit bei unterschiedlichen Estrichgüte und - arten**

Folgende Schlussfolgerungen ergeben sich:

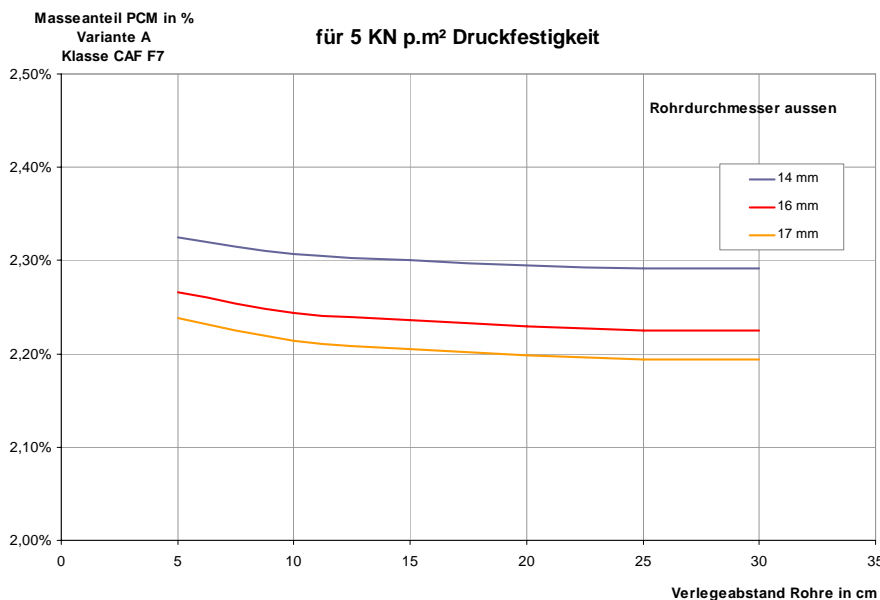
- Volumenanteil in Fließestrich ist infolge niedrigerer Überdeckung höher als bei Zementestrich
- Volumenanteil steigt mit Abnahme des Verlegeabstands
- Volumenanteil steigt mit Rohrdurchmesser

Um für die weiteren Berechnungen die Anzahl der möglichen Simulationen in Grenzen zu halten, wurde festgelegt:

- Fließestrich mit 5 %; 6 %; 7 %; 8 % Volumenanteil PCM
- Zementestrich mit 3 %; 4 %; 5 % Volumenanteil PCM

zu berechnen. Für diese Stoffgemische wird die Schmelz- und Erstarrungsenthalpie ermittelt. Die Ergebnisse sind in *Abschnitt 3.3.2.* beschrieben. Bei der Berechnung der Schmelz und Erstarrungsenthalpie muss im Vorfeld noch eine Umrechnung der Volumenprozent in Masseprozent erfolgen.

Nachfolgend zeigt das *Diagramm 10* Masseanteil PCM an Fließestrich CAF 7 für Druckfestigkeit 5 kN in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Verlegeabstand. Auf Grund der um rund die Hälfte geringeren Dichte des PCM-Materiales gegenüber den Estricharten nimmt der Anteil der Masse am Gesamtestrich gegenüber dem Volumenanteil ab.

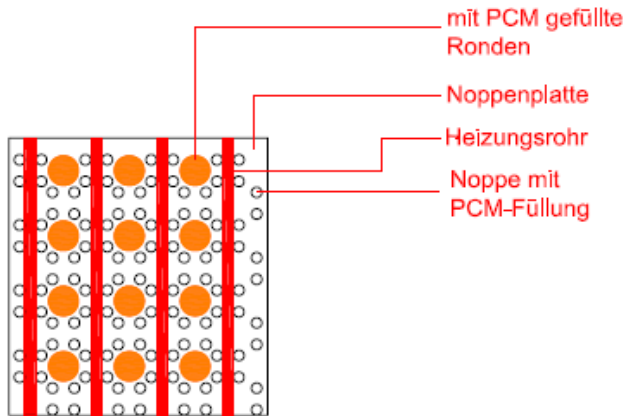


**Diagramm 10 Masseanteil PCM an Fließestrich CAF 7 für Druckfestigkeit 5 kN in Abhängigkeit von Rohrdurchmesser und Verlegeabstand**

### 3.3.2.2. Rondenfüllung – Variante B

Der Standardeinsatzfall ist in Büro- und Verwaltungsgebäuden. In diesen Bereichen wird die Fußbodenheizung/ -kühlung in der Regel mit einem Verlegeabstand von 10 cm und einer Druckfestigkeit von 5 kN/m<sup>2</sup> installiert. Da auf Grund der niedrigen nutzbaren Temperaturdifferenz im Kühlfall ein bedeutend höherer Wasservolumenstrom gegenüber des Heizfalles durch die Fußbodenheizungsrohre strömt, werden vorrangig Rohre mit einem Durchmesser 17 cm und größer eingesetzt.

Für diese Verlegung wurde konzipiert die im Bild 3 dargestellte Variante B mit zwischen den Rohren mit PCM gefüllten Ronden von 45 mm Durchmesser und 19 mm Höhe einzubringen.



**Abbildung 10 Schematische Anordnung von PCM - gefüllten Ronden**

Insgesamt sind maximal 100 Ronden dieser Art auf 1 m<sup>2</sup> Fläche montierbar. Um aber den Unwägbarkeiten im Bau wie z.B.

- Ecken
- Versprüngen
- Anbindeleitungen

Rechnung zu tragen, wurde die Annahme getroffen, 75 Stck./m<sup>2</sup> zu installieren. Ein Ronde hat ein Volumen von

$$30,202 \text{ cm}^3$$

Durch diese Variante kann somit insgesamt zusätzlich 0,002265 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> PCM Material installiert werden.

Bei der ausgewählten Variante (VA 10 cm, 17 mm Rohrdurchmesser, 5 kN/m<sup>2</sup>) würden sich folgende Volumen- und Masseanteile ergeben:

Estrichvariante	Variante	Volumenanteil	Masseanteil
Zementestrich CT 5 65 mm Überdeckung	Variante A	3,95 %	1,73 %
Zementestrich CT 5 65 mm Überdeckung	Variante B	6,60 %	3,07 %
Fließestrich CAF 7 50 mm Überdeckung	Variante A	5,08 %	2,21 %
Fließestrich CAF 7 50 mm Überdeckung	Variante B	8,20 %	3,98 %

**Tabelle 1 Gegenüberstellung Volumen- und Masseanteile für unterschiedliche Estricharten und unterschiedliche Varianten für PCM – Befüllung**

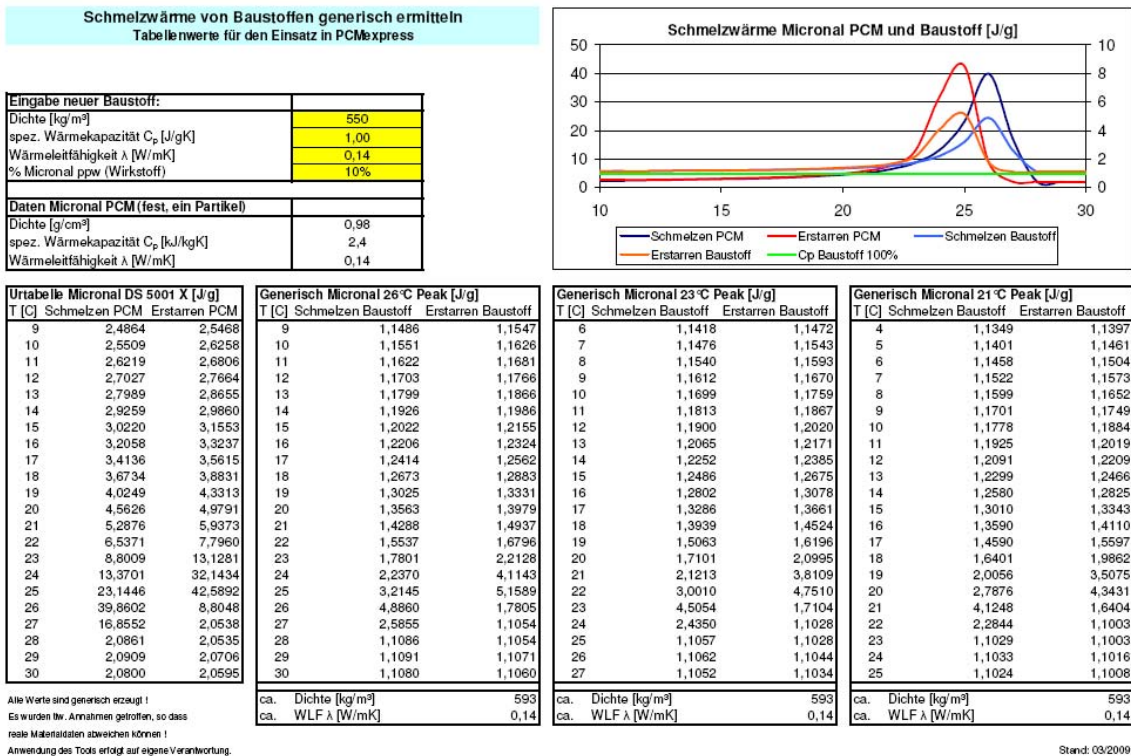
Für diese Varianten wird ebenfalls die Schmelz- und Erstarrungsenthalpie berechnet. Unter Zuhilfenahme der ersten überschlägigen Simulationsrechnung (s. 3.1. *Vorbemerkungen zur Materialauswahl*) kann bei Zementestrich für die obige Kombination mit einer Speicherkapazität von 100 – 150 Wh/m<sup>2</sup> gerechnet werden. Dies würde als Äquivalent einer 12 cm dicken Betonwand entsprechen.

**3.3.3. Berechnung Schmelz- und Erstarrungsenthalpie**

Wesentliche Grundlage für alle weiteren Simulationen ist die Berechnung der Schmelz- und Erstarrungsenthalpie für die einzelnen Stoffgemische. Auf der Grundlage der durch die BASF zur Verfügung gestellten Kennlinie für

- Micronal DS 5005
- Micronal 26 Peak
- Micronal 23 Peak
- Micronal 21 Peak

wurden für die jeweiligen Gemische die Verläufe generisch ermittelt in Abhängigkeit der Temperatur. Das Berechnungsprogramm wurde von Herrn Schmidt BASF zur Verfügung gestellt.





### Abbildung 11 Programm für die generisch Ermittlung der Enthalpie von Stoffgemischen

In der linken Tabelle stehen die vom IRB Fraunhofer Institut ermittelten Originalstoffwerte. In den daneben angeordneten 3 Tabellen stehen jeweils die Stoffdaten für die unterschiedlichen Schmelzpunkte von 26 °C, 23°C und 21°C.

In die gelb hinterlegten Felder werden die Stoffwerte des Beimischstoffes, in unserem Fall die für Anhydrit - und Zementestrich eingeben. Das Diagramm veranschaulicht die Stoffgemische gegenüber dem Originalmaterial. Für die ausgewählten Kombinationen wurden diese Berechnungen durchgeführt. Sie sind im Abschnitt *Anlage A 6 Schmelz- und Erstarrungsenthalpie für Stoffgemische*

- Abschnitt 1 - Fließestrich
- Abschnitt 2 - Zementestrich

enthalten.

Für die beiden ausgewählten Varianten im *Abschnitt 3.3.1. Variante B* sind nachfolgend die Diagramm mit und ohne Ronden dargestellt.

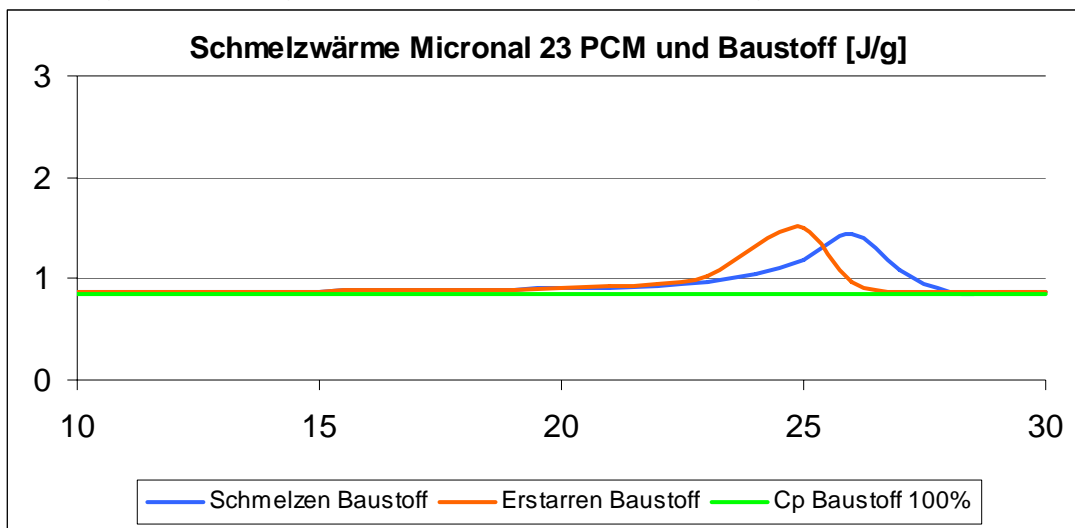
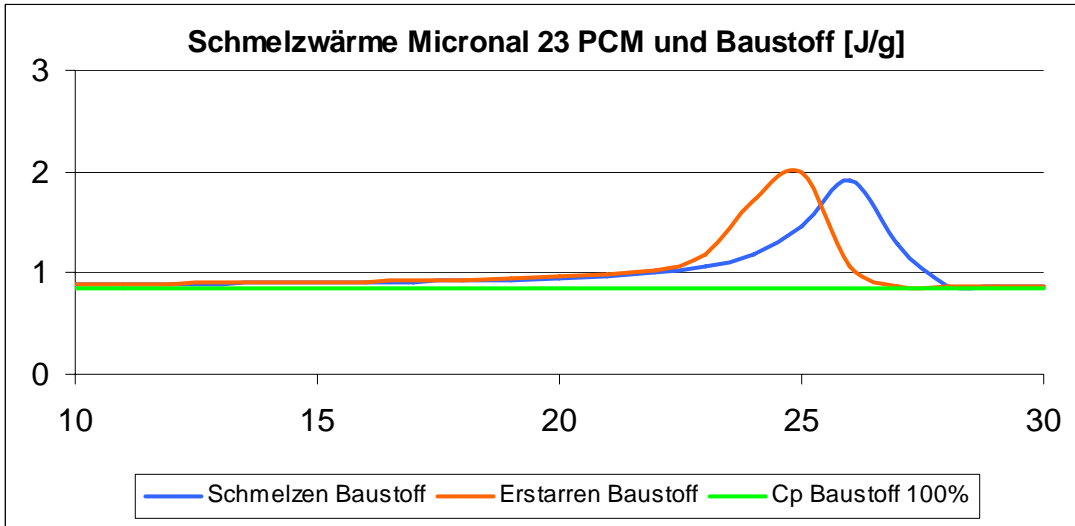
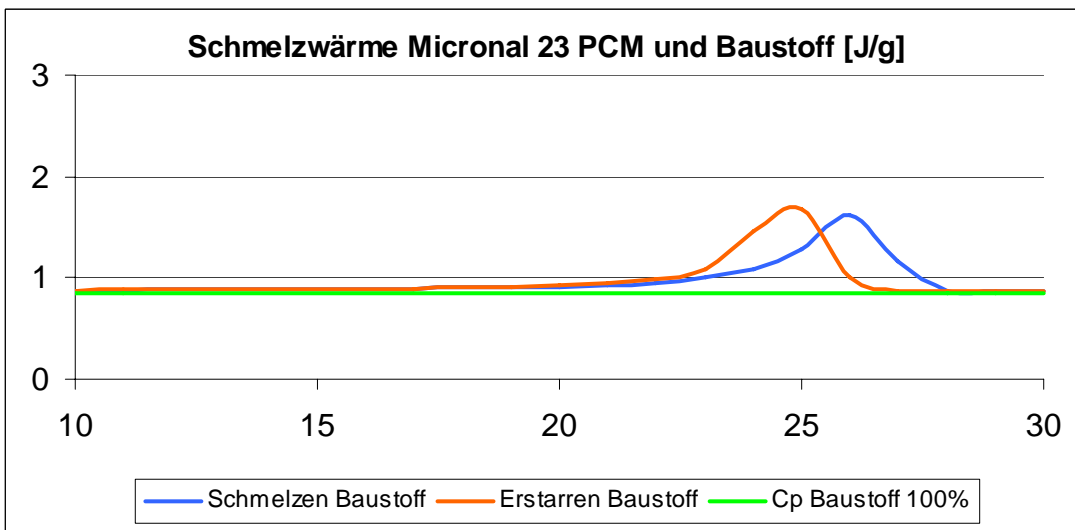


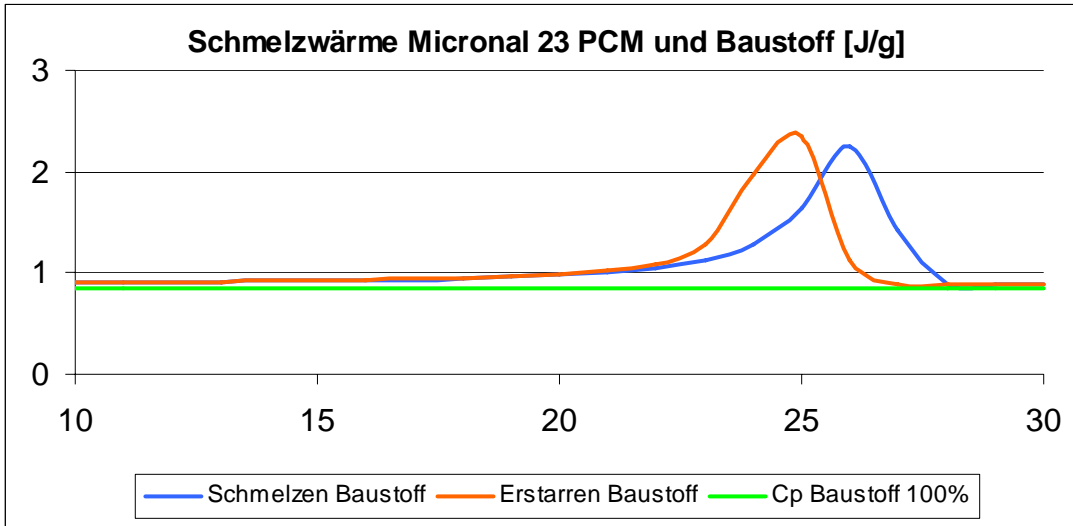
Diagramm 11 Variante A mit Zementestrich CT 5, 5kN, VA 10 cm und Rohrdurchmesser 17 mm



**Diagramm 12 Variante B mit zusätzlichen Ronden Zementestrich CT 5, 5 kN, VA 10 und Rohrdurchmesser 17 mm**

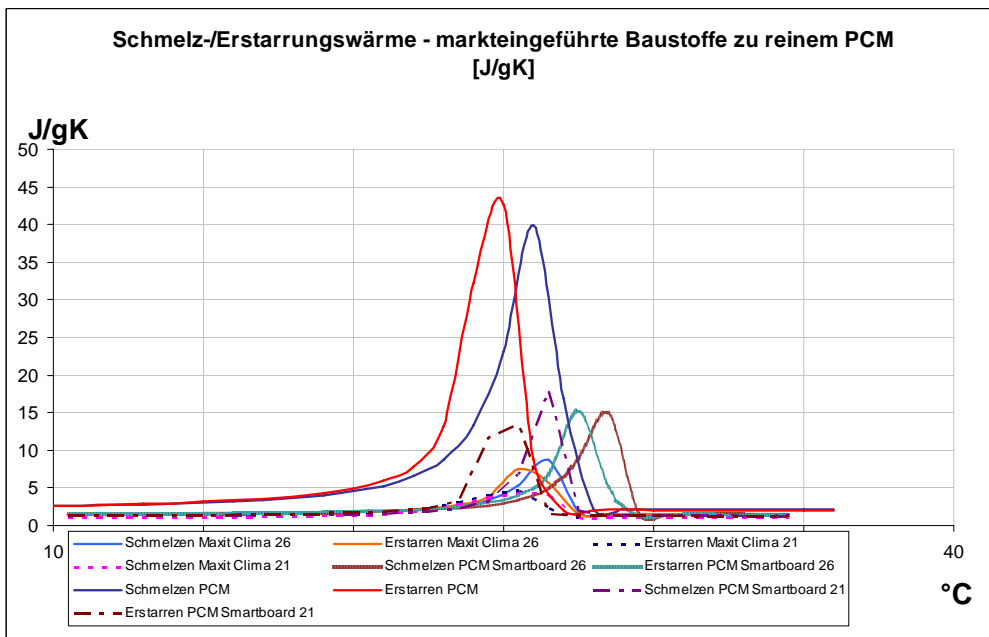


**Diagramm 13 Variante A mit Fließestrich CAF 7, 5 kN, VA 10 und Rohrdurchmesser 17 mm**



**Diagramm 14 Variante B mit zusätzlichen Ronden, Fließestrich CAF 7, 5 kN, VA 10 und Rohrdurchmesser 17 mm**

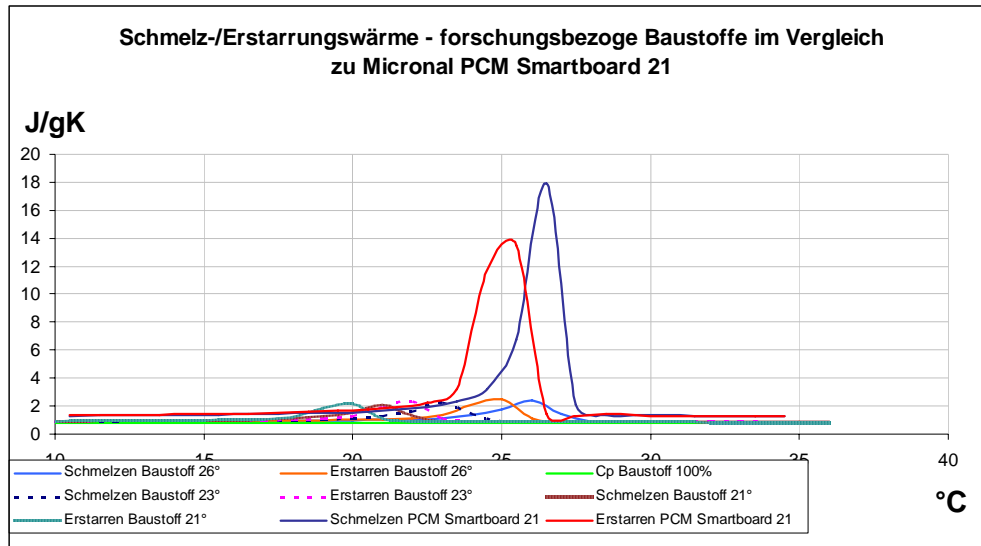
In der 6.3. Anlage A 6.3 Markteingeführte Stoffgemische und Verbundbaustoffe mit PCM sind die bereits auf dem Markt vorhandenen Materialien dargestellt.



**Diagramm 15 Vergleich der vorhandenen marktreifen Produkte gegenüber der Originalsubstanz**

Deutlich wird in diesem Diagramm, dass alle vorhandenen marktfähigen Stoffe deutlich gegenüber der reinen PCM-Substanz an Funktion einbüßen. Der beste Stoff zurzeit ist Smartboard 21.

Im *Diagramm 16 Vergleich Variante B mit Smartboard 21* ist eine Gegenüberstellung von dem Estrich mit dem maximalen prozentualen Anteil an PCM (Variante B mit Fließestrich) gegenüber dem besten am Markt anzutreffenden PCM-Material Smartboard 21 dargestellt.



**Diagramm 16 Vergleich Variante B mit Smartboard 21**

Aus ihr wird ersichtlich, dass mit der Kombination gefüllte Noppen + Ronden trotzdem noch weit von dem marktreifen Produkt entfernt sind. Diese Diagramme sind ebenfalls in 6.3. *Anlage A 6.3 Markteingeführte Stoffgemische und Verbundbaustoffe mit PCM* enthalten. Jedoch muss bei dieser Betrachtung immer mit berücksichtigt werden, dass der Estrich als Gemisch in einem Raum über bedeutend mehr Masse als eine Wand aus Smartboard verfügt. Als Vergleich stehen auf der einen Seite die Dichten

Estrich - PCM - Gemisch	2055 kg/m <sup>3</sup> (bei 3,98 % PCM – Fließestrich)
Smartboard 21	12 kg/m <sup>2</sup> Platte

Überdeckung Estrich - Rohr	30 – 50 mm (50mm gewählt)
Smartboard 21	15 mm

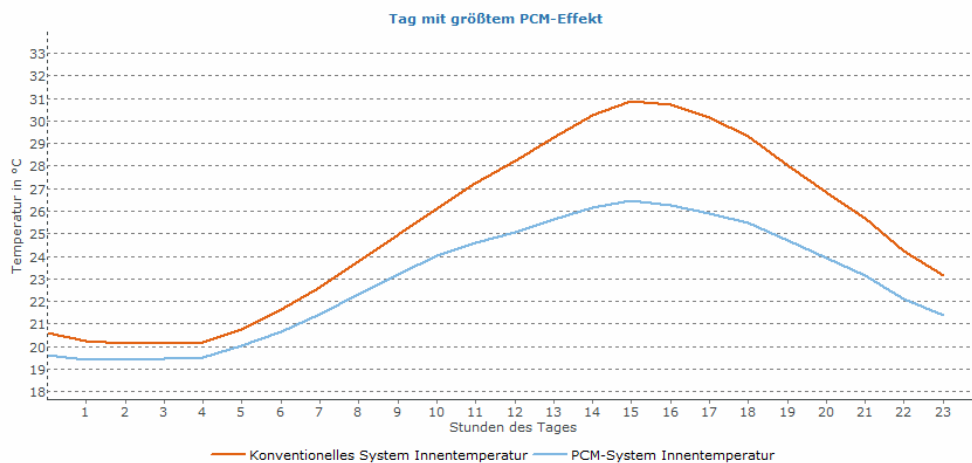
und somit ergibt sich ein für einen Bereich von 16 – 28 °C mit Erstarrungsenthalpie von

Estrich – PCM – Gemisch	14,34 J/g
Smartboard 21	43,28 J/g

eine gespeicherte Kühlenergie für

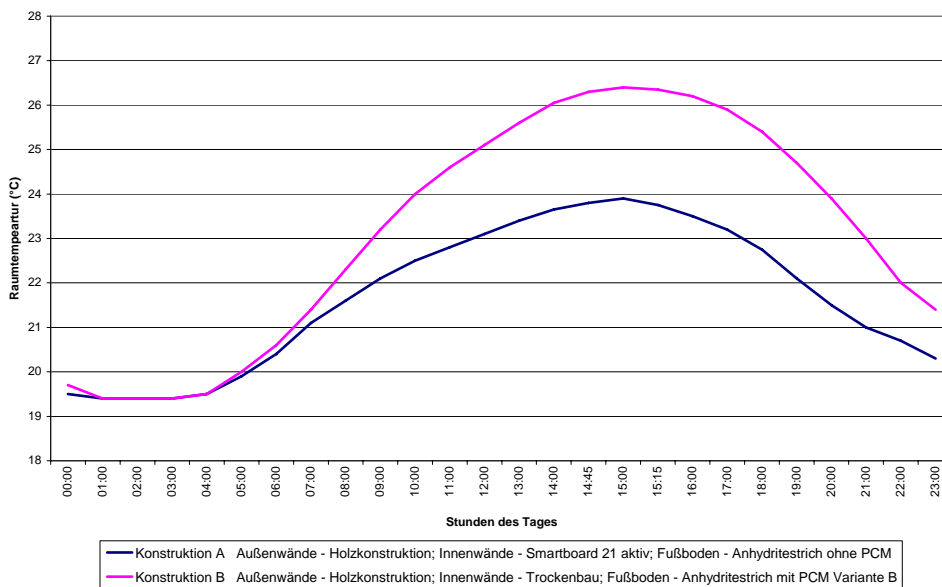
Estrich – PCM – Gemisch	409 Wh/m <sup>2</sup> Estrich
Smartboard 21	144 Wh/m <sup>2</sup> Platte

Der beschriebene Raum im Abschnitt 3.3.1.2. *Aufbau des Simulationsraumes* wurde mit der Variante B – Fließestrich berechnet und dem Tagesverlauf (s. *Diagramm 4 Raumtemperaturverlauf mit und ohne PCM - Material in den Innenwänden (aktiv)*) gegenübergestellt.



**Diagramm 17 Tagesgang für Raumtemperatur mit und ohne PCM (Variante B Fließestrich, Flächenkühlung)**

Die vorgeschlagene Variante (Konstruktion B) bringt bereits eine deutliche Reduzierung des Spitzenwertes der Raumlufttemperatur sowie eine gesamte Absenkung des Temperaturprofils bei gleichzeitiger Vereinheitlichung des Verlaufes. Nachfolgend wurde dieser Tagesgang dem mit der Variante Smartboard 21 – aktiv (Konstruktion A) in zwei Innenwänden gegenübergestellt.



**Diagramm 18 Gegenüberstellung Tagesgang von Konstruktion A und Konstruktion B**

Mit der vorgeschlagenen Variante wird eine deutliche Verbesserung erreicht, sie bleibt aber jedoch hinter den bereits am markteingeführten Baustoffen zurück. Es muss im Rahmen der Forschung ein neuer Weg gegangen werden, um das geplante Ziel zu erreichen.

Auf Grund der Anordnung im Estrich und bei dessen Dicke muss mit großen Beharrungszeiten gerechnet werden. Aus diesem Grunde sollte unbedingt ebenfalls, die Variante Trockenestrich mit untersucht werden.

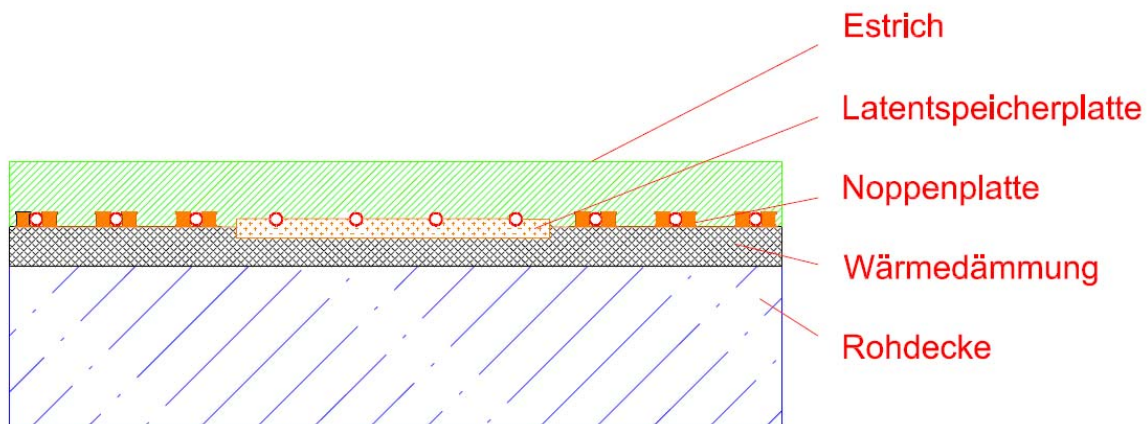
### **3.3.4. Weiterentwicklung der Rondenvariante zur Erhöhung der Volumenprozentanteile des Latentspeichermaterials am Estrichvolumen**

Die im Abschnitt *Rondenfüllung – Variante B* vorgeschlagene Verlegung (vgl. *Abbildung 10 Schematische Anordnung von PCM - gefüllten Ronden*) hat noch nicht den Zuwachs an Latentspeichermaterial erbracht wie erhofft. Dieser Weg zur Einbringung wird aber als baustellentauglich erachtet und wurde deshalb weiterentwickelt.

Bei der Dichte des Latentspeichermaterials ( $980 \text{ kg/m}^3$ ) ergibt sich für die Ronden (Volumen  $0,0022 \text{ m}^3$ ) eine Latentspeichermasse von  $2,21 \text{ kg/m}^2$ . Um auf ähnliche Ergebnisse zu kommen, wurde Latentspeicherplatte konzipiert. Nach dem mehrere Abmessungen diskutiert wurden, haben wir uns für eine Platte  $50 \times 50$  entschieden. In einer ersten Versuchsreihe wurden diese Platten mit  $3 \text{ cm}$  Dicke realisiert. In dieser Platte könnten theoretisch  $7,35 \text{ kg PCM}$  – Material eingebracht werden. Damit entspricht eine Platte mit einer Fläche von  $0,25 \text{ m}^2$  vergleichsweise 250 Ronden (3-fache der angesetzten Ronden). Durch konstruktive Einbauten aus Stabilitätsgründen geht aber in der Platte Volumen verloren, so dass mit einer PCM-Beladung von  $3 \text{ kg}$  gerechnet werden kann. Aus einer ersten statischen Untersuchung kann gesagt werden, dass zwei Platten auf  $1 \text{ m}^2$  ohne Abstriche an der Tragfähigkeit für den Estrich eingesetzt werden können. Unter diesen Bedingungen könnten überschlägig bei einer latenten Speicherkapazität von  $115 \text{ kJ/kg}$  eine Speicherwirkung von  $100 \text{ Wh / Platte}$  erreicht werden.

Nach einer Überschlagsrechnung benötigt ein Raum ( $20 \text{ m}^2$ ) ungefähr  $1,0 \text{ kW}$  über  $10 \text{ h}$ . Eine vorhandene Kühlung (notwendig zum Beladen der Platten) bringt aus Erfahrung  $30 \text{ W/m}^2$ . Damit stellt sie eine Kühlenergie von  $6 \text{ kWh}$  über die angegebene Dauer zur Verfügung. Um die restlichen  $4 \text{ kWh}$  zu erzeugen, benötigt man nach dem Überschlag 40 Platten oder 2 Platten auf die Fläche von  $1 \text{ m}^2$ .

Diese neue Einbauvariante zeigt die nachfolgende Abbildung.



**Abbildung 12: Einbausituation mit Latentspeicherplatte**

Diese Variante wurde weiterverfolgt und messtechnisch untersucht.

## 4. Messtechnische Untersuchung der Platten

### 4.1. Herstellung der Platten und Versuchsaufbau

Während der ersten Versuche musste festgestellt werden, dass die Wärmeleitung innerhalb der Platte derart schlecht ist, dass ein Aufheiz- bzw. Erstarrungsvorgang mehrere Tage dauerte.

Um dieses Problem der schlechten Wärmeleitung innerhalb des Latentspeichermaterials zu umgehen, wurde die entwickelte Speicherplatte aus verzinktem Blech in der Größe 50 x 50 cm mit unterschiedlichen Höhen (1,5; 2 und 3 cm) im Inneren modifiziert.

Auf der Oberseite sind Rillen für die Einbettung der Rohre vorgesehen, um so einen direkten Kontakt zum Wärmeträgermedium zu erhalten. Um eine Lösung für den Widerspruch zwischen schlechter Wärmeleitung und großer Speicherwirkung zu finden, werden die Platten im Inneren mit Metallschaum gefüllt. Dieser Baustoff hat folgende Vorteile:

- Hohe Druckfestigkeit
- Sehr gute Wärmeleitung
- Offene Poren zur Aufnahme des Latentspeichers

Für diesen Baustoff liegen hinreichende Ergebnisse für das Zusammenwirken mit Latentspeichermaterial vor. [GIR05]

Nachfolgende Fotos zeigen den Aufbau der Platten sowie des Metallschaums:



**Abbildung 13 Aufbau der Probekörper**



**Abbildung 14 Metallschaum**

Die Metallschaumplatte wurde an das Deckblech mit den Rohrführungen mit Thermokleber angeklebt. Über eine seitliche Öffnung wurde in die Platte das Micronal eingefüllt. Die Platte wurde über den gesamten Zeitraum der Montage gewogen, um für die spätere Auswertung die entsprechenden Daten der unterschiedlichen Massen zu haben. Auf dieser Grundlage wurde die spezifische Wärmeleitfähigkeit und –kapazität ermittelt. Um die identischen Platten unterscheiden zu können, wurden diese Daten auf die Platten notiert, wie das nächste Foto zeigt.



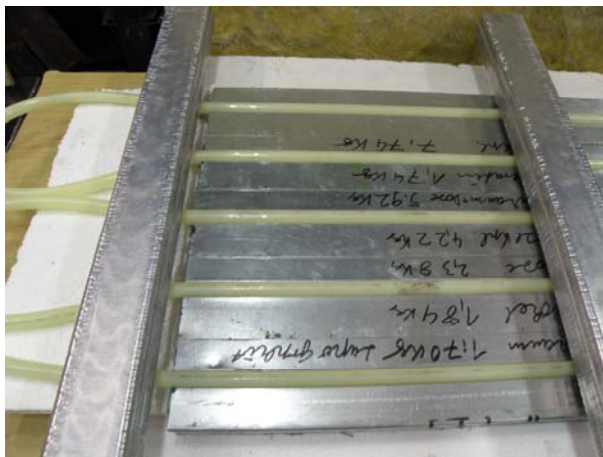


**Abbildung 15** Sichtbemerung auf Probekörper

Für die 1. Untersuchungen stand das Latentspeichermaterial Micronal 23 zur Verfügung

Als Rohrmaterial wurde ein PEx-Rohr der Firma eht – Siegmund GmbH verwendet.

Dieses Material kommt bei Fußbodenheizung und – kühlung standardmäßig zum Einsatz. Nachfolgendes Foto zeigt die montierten Rohre auf der Platte



**Abbildung 16: Montierte Rohrschleife auf Probekörper**

Die Rohrleitung wurde an eine bauseitige Heizung und Kühlung angeschlossen.

Die Anlage kann sowohl Heizungswasser (in unserem Fall von 28°C) und Kühlwasser von (13 °C) zur Verfügung stellen. Sie ist manuell umschaltbar.

Die Platten wurden während der Versuchsdauer auf allen Seiten mit 50 mm Polystyrolschaum gedämmt, um die Umgebungseinflüsse größtmöglich zu mindern. Dies zeigt auch die *Abbildung 17 Wärmedämmung ober- und unterhalb Probekörper.*

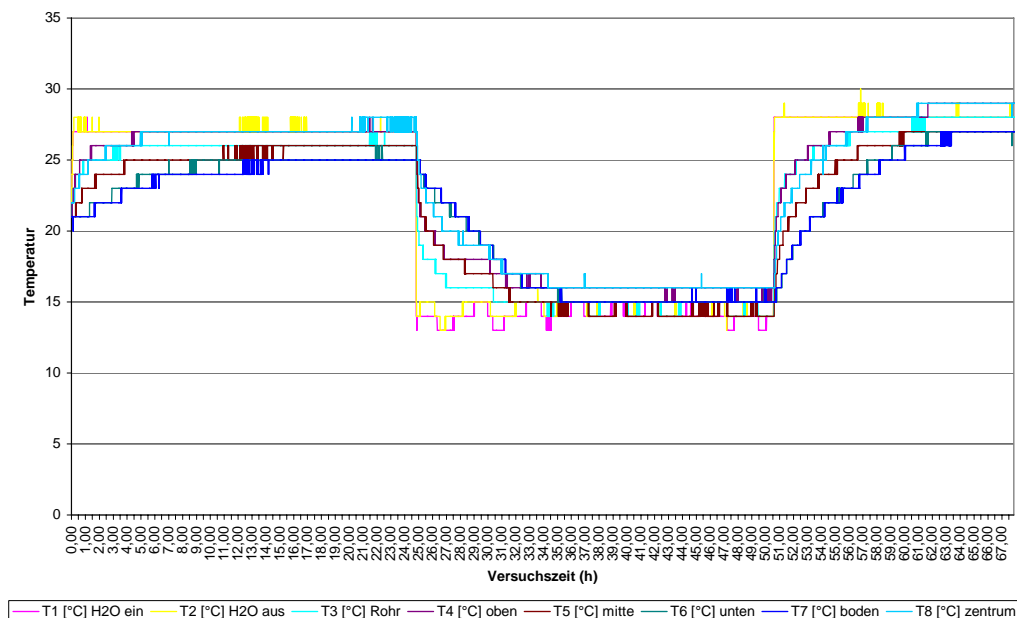


**Abbildung 17 Wärmedämmung ober- und unterhalb Probekörper**

Diese Platten wurden in dem Versuchstand folgenden Behandlung unterzogen:

- Aufheizen bis der gesamte Latentspeicher flüssig ist
- Sprunghafte Umstellung auf Kühlung und Messung bis gesamte Speicher erstarrt ist
- Sprunghafte Umstellung auf Heizung und Messung bis gesamte Speicher geschmolzen ist

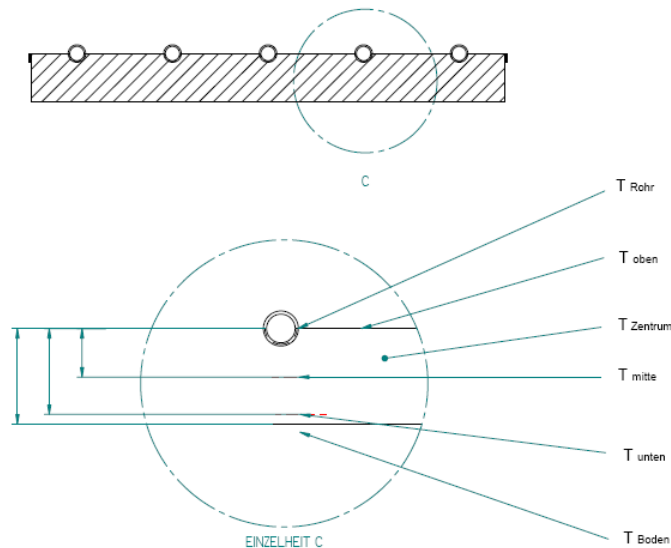
Durch diese Vorgehensweise kann die Speicherkapazität, das thermische Verhalten der Platten und die Schwachstellen des Systems ermittelt werden. Nachfolgendes Diagramm zeigt stellvertretend die gewonnenen Messergebnisse.



**Diagramm 19 Messdaten für Versuch Lupo 43 B**

Diese Diagramme werden für die unterschiedlichen Kombinationen näher diskutiert im *Abschnitt 3.2.3.* für den Abkühlvorgang und im *Abschnitt 3.2.4.* für den Aufheizvorgang

Die einzelnen Messpunkte an der Platte zeigt nachfolgende Grafik



**Abbildung 18: Messpunkte am Probekörper**

Die jeweiligen Abschnitte Abkühlung und Aufheizung werden einer Funktionsanalyse unterzogen und entsprechend ausgewertet. Durch diese Betrachtungsweise können auch Schwachstellen im Trägersystem festgestellt werden.

Nach erfolgter Auswertung wurde eine Simulation mit unterschiedlichen Speichermaterialien durchgeführt.

## 4.2. Auswertung der 1. Messreihe

### 4.2.1. Allgemeines

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Messungen vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Für die Auswertung der Messergebnisse wurde das Programm „Flexpro 8“ der Firma Weisgang sowie das Programm „SciDavis“ verwendet.

### 4.2.2. Darstellung der Eigenschaften der unterschiedlichen Probekörper

Nachfolgend sind die unterschiedlichen Versuchskörper mit ihren wesentlichen Eigenschaften aufgeführt.

Eigenschaft	Lupo 43 A	Lupo 43 B	AL 13 B	Lupo 13 A
Schaumart	Graphitschaum mit Kleber	Pur-Schaum	Alu-Schaum	Graphitschaum
Dicke des Schaums	15 mm	30 mm	30 mm	30 mm
Masse PCM	2,07 kg	2,68 kg	2,14 kg	1,74 kg
Masse Hülle	4,22 kg	4,22 kg	4,22 kg	4,22 kg
Masse Schaum	0,86 kg	0,82 kg	1,44 kg	1,7 kg

**Tabelle 2 mechanische Eigenschaften der Probekörper**

Folgende wärmetechnischen Eigenschaften liegen den Berechnungen zu Grunde:

Baustoff	Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	Spez. Wärmekapazität J/(kg K)	Dichte kg/m <sup>3</sup>
Verzinktes Stahlblech	14,5	464	7200
Lupo	10	1300	72
Aluminiumschaum	180	912	192
Micronal 23	0,14	2400	980
PUR Schaum	0,03	1500	35

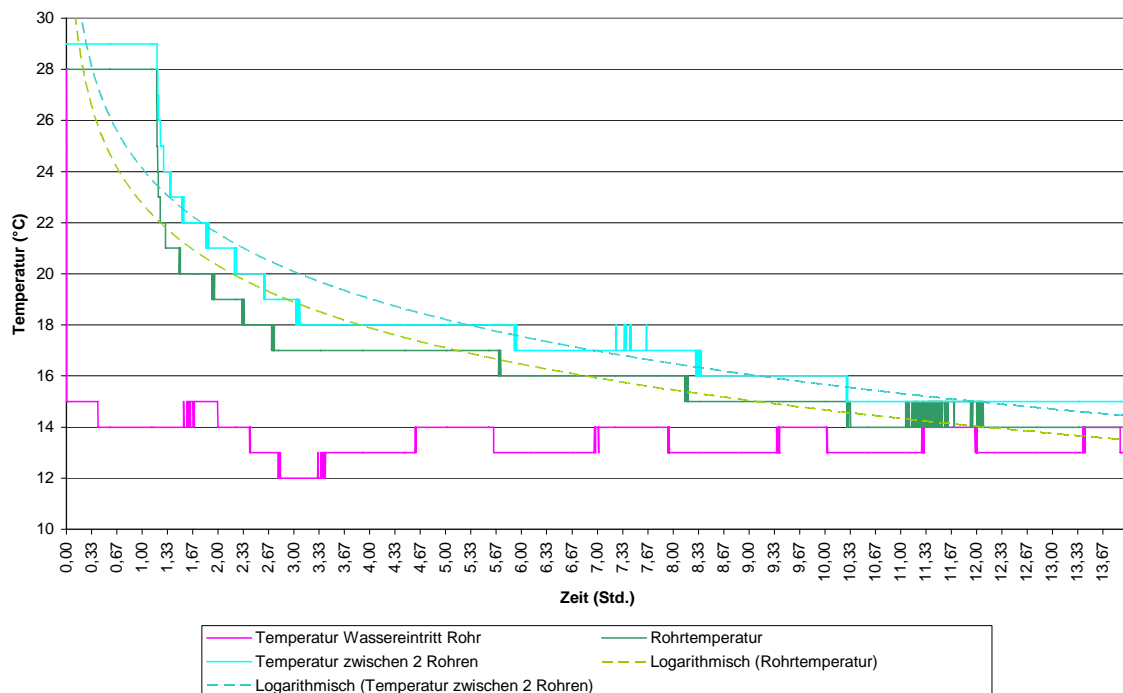
**Tabelle 3 Wärmetechnische Eigenschaften der verwendeten Materialien**

Die Werte für die Schaumarten – Lupo, Aluminiumschaum und Pur-Schaum - wurde durch den Lieferanten – m - pore GmbH, Enderstr. 94 Haus G, 01277 Dresden – geliefert.

### 4.2.3. Analyse des Abkühlvorganges

#### 4.2.3.1. Analyse des zeitlichen Temperaturverlaufes auf und im Probekörper

Der Verlauf der Messkurven ist für alle Messungen relativ gleich. Aus diesem Grunde wird an Hand der Messprobe Lupo 43 B die Ergebnisse dargestellt. Nach dem die Vorlauftemperatur des Wassers von Heizen auf Kühlen umgestellt worden ist, konnte der im *Diagramm 20* dargestellte Verlauf für den Abkühlvorgang an der Rohraußenwand und auf Probekörper zwischen zwei Rohren aufgezeichnet werden.



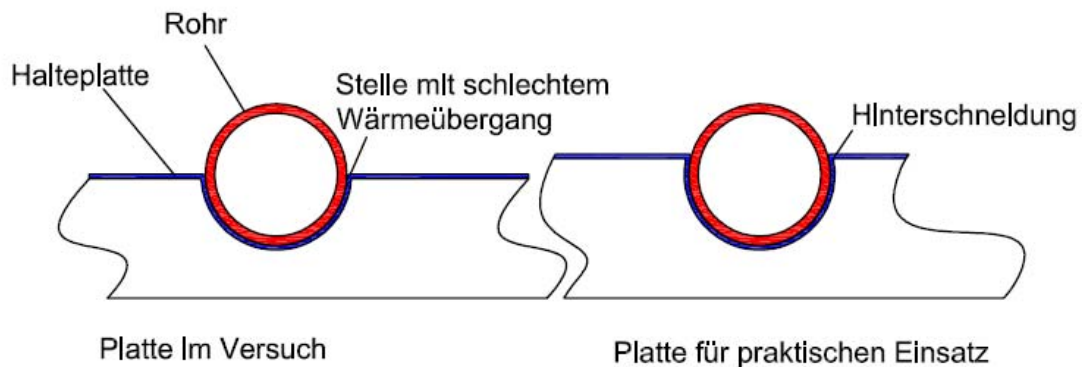
**Diagramm 20 Messwerte für Abkühlvorgang Probe Lupo 43 B mit Messstellen Wassereintritt, Rohraußenwand, Oben**

Es wird an diesem Diagramm bereits deutlich, dass der Wärmeübergang zwischen Medium und Rohraußenwand sehr zeitverzögert (ca. 1,3 Std. bis zur Reaktion) erfolgt. Die Wärmeleitung zwischen Rohraußenwand und der Mitte zwischen den beiden Rohren ist dagegen wesentlich besser. Nach ca. 12 Stunden liegt im gesamten Probekörper ein eingeschwungener Zustand vor. Diese zwei Zeiten sind für die richtige Approximation der Funktionen wichtig. Für alle Messproben sind die bei der späteren Auswertung genutzten Zeiten in der *Tabelle 4* aufgeführt.

Probe	Reaktionszeit Wasser - Rohraußenwand	Eingeschwungener Zustand
Lupo 13 A	1,79 h	7,11 h
AL 13 B	0,02 h	7,64 h
Lupo 43 A	0,02 h	7,33 h
Lupo 43 B	1,19 h	10,83 h

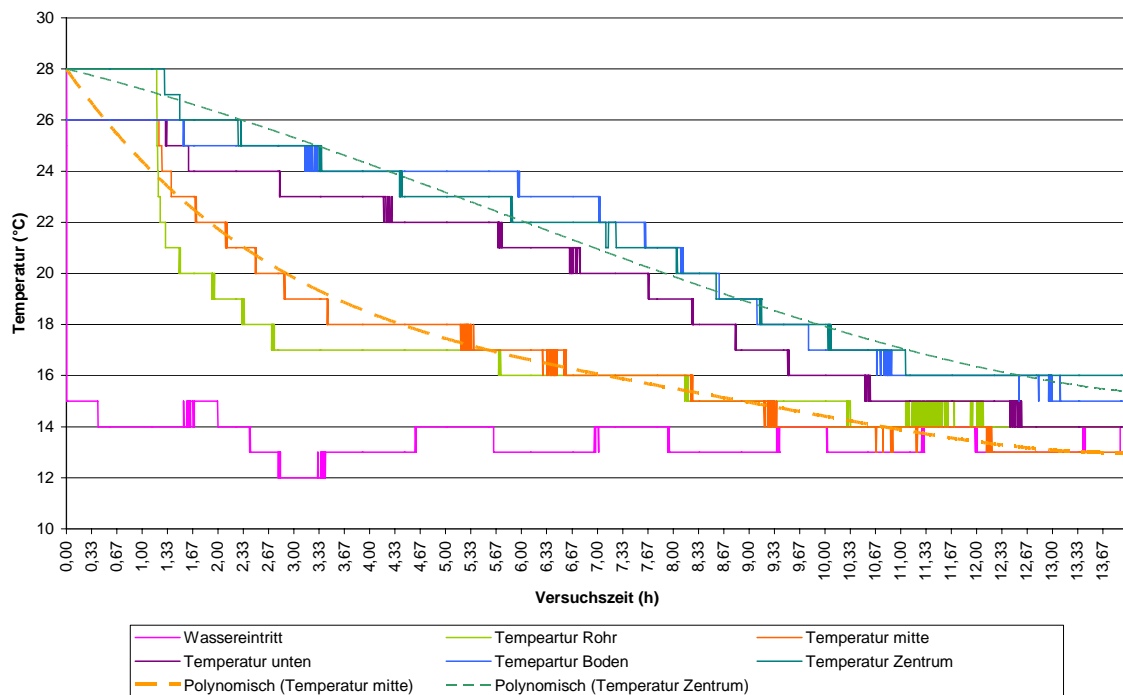
**Tabelle 4 Zeiten für die Funktionsanalyse - Abkühlvorgang**

Aus dieser Tabelle wird deutlich, dass die Reaktionszeit Wasser – Rohraußenwand stark von der Befestigung des Rohres an der Speicherplatte abhängt. Hier ist für den praktischen Einsatzfall eine entsprechende Vorkehrung zu treffen, analog den Wärmeleitblechen bei Trockenestrichsystemen. Die Einkerbungen für die Rohre sind im Gegensatz zu den Versuchsplatten als hinterschnittene Einbuchtungen herzustellen.



**Abbildung 19 Modifizierung der Platte für Verbesserung des Wärmeüberganges Rohr - Platte**

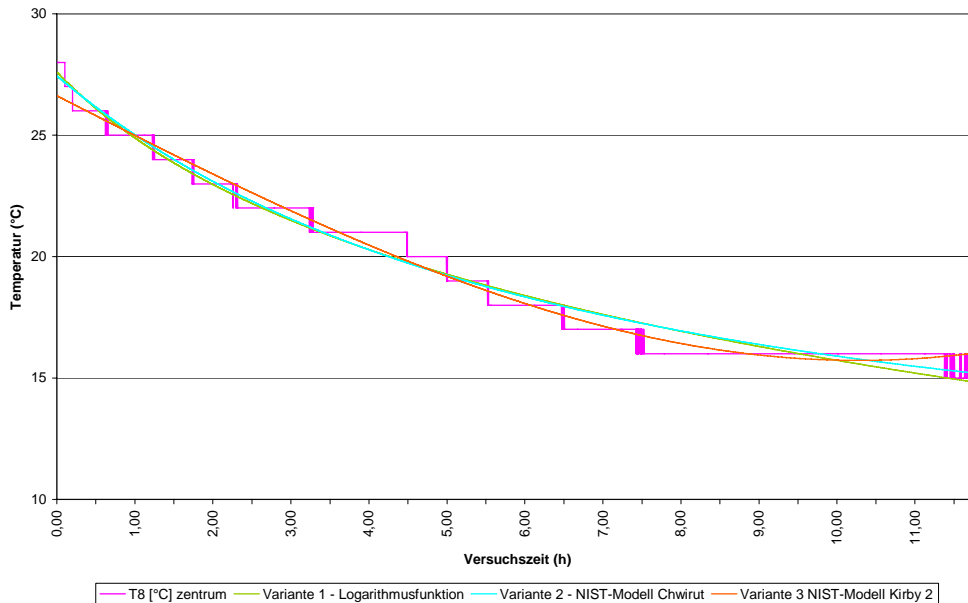
Im Anschluss wurden die anderen Messergebnisse in gleicher Weise in Abhängigkeit von der Zeit analysiert. Sie sind stellvertretend für die Probe Lupo 43 B im *Diagramm 21* dargestellt.



**Diagramm 21 Temperaturverlauf für Probe Lupu 43 B für Messstellen, Wassereintritt, Rohraußenwand, Mitte, Unten, Zentrum, Boden**

Während die Temperatur in der Mitte ein ähnliches Verhalten wie die Rohraußenwand und die Messstelle oben aufweist, ist der zeitabhängige Verlauf der anderen Messergebnisse deutlich träger. In allen Messungen ist der Verlauf für die Messstellen Zentrum und Boden nahezu deckungsgleich. Dies ist auf die Trägheit des Latentspeichermaterials während des Phasenwandels zurück zu führen. Für die weiteren Betrachtungen werden die Messstellen – Rohr; oben; Zentrum und Boden weiter analysiert. Mit dem eingeschwungenen Zustand an der Messstelle Boden wird die Annahme getroffen, dass der Phasenwandel im gesamten Probekörper abgeschlossen ist.

Als nächstes wurden mehrere verschiedene Varianten der Funktionsanalyse durchgeführt, um die Funktion mit der niedrigsten Varianz für die vorliegenden Messergebnisse zu finden. Ein Vergleich für die Messung Zentrum ist im *Diagramm 22* dargestellt.



**Diagramm 22 Darstellung verschiedener Funktionen für die Messstelle Zentrum Probe Lupu 43 B**

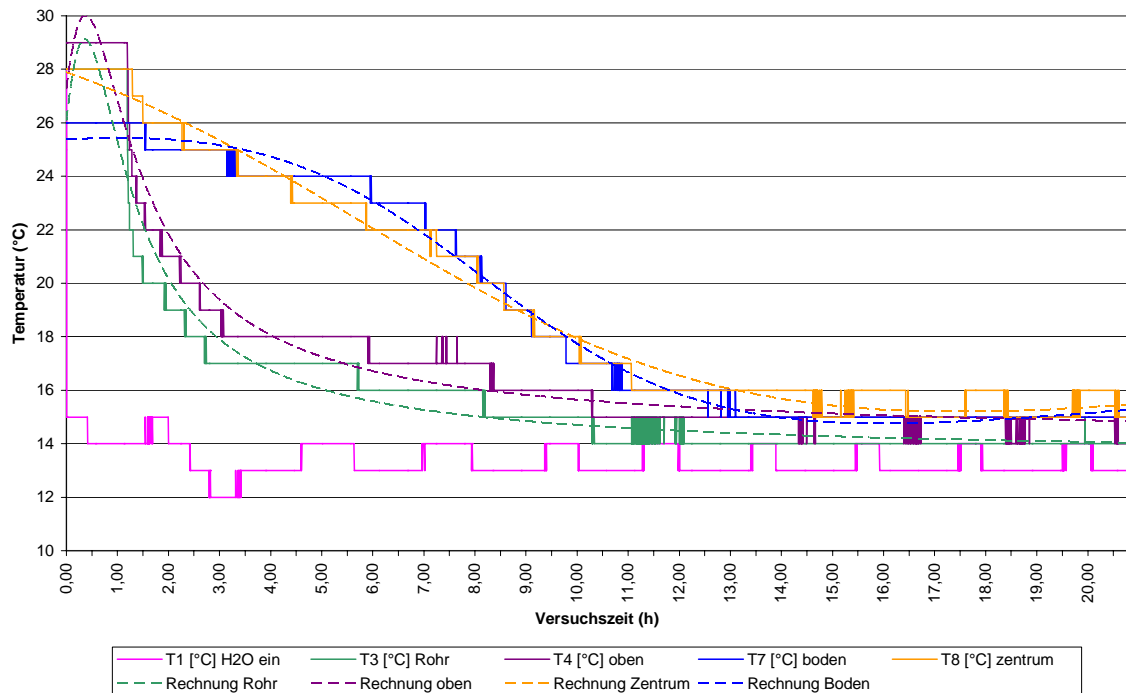
Die Ergebnisse für diesen Vergleich sind in der nachfolgenden Tabelle enthalten.

Funktionsname	Funktion	Varianz	R2
Logarithmusfunktion	$y = p_0 - p_1 \cdot \ln(x + p_2)$	0,323	0,9733
NIST – Modell CHWIRUT	$y = e^{(-p_0 x)} / (p_1 + p_2 \cdot x)$	0,2779	0,976162
NIST – Modell Kirby 2	$y = (p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2) / (1 + p_3 \cdot x + p_4 \cdot x^2)$	0,1711	0,98537

**Tabelle 5 Funktionsanalyse mit Angaben der Fehler-Varianz und dem Bestimmtheitsmaß R2**

Auf der Grundlage dieses Vergleiches wurde für die weiteren Betrachtungen die Variante 3 – NIST Modell Kirby 2 – gewählt. Die Umsetzung dieses Ergebnisses für den Versuch Lupu 43 B zeigt die nächste grafische Darstellung.





**Diagramm 23 Vergleich zwischen Messwerten und ermittelter Funktion für die Messstellen Rohraußenwand, Oben, Zentrum, Boden für Probe Lupu 43 B**

Das leichte Überschwingen am Anfang für die Funktionen Rohr und oben werden in Anbetracht des Totzeitverhaltens in dieser Phase als nicht gravierend betrachtet. Deutlich wird der grundsätzlich verschiedene Verlauf der Kurven Rohr; Oben und Zentrum; Boden. Ursache dafür ist das Verhalten des Füllmaterials PCM. Deutlich wird das der Phasenwandel sämtlich in das System eingebrachte Energie benötigt und erst nach Abschluss dessen es zu einer Temperaturveränderung an diesen beiden Messstellen kommt. In der *Anlage A8 Auswertung der Kurvenanalyse* sind die Formeln und ihre Koeffizienten für alle Versuche aufgeführt. Stellvertretend an dieser Stelle die Funktionen für das oben dargestellte Diagramm.

$$y = \frac{(p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2)}{(1 + p_3 \cdot x + p_4 \cdot x^2)}$$

Kurve	p <sub>0</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>
Rohr	26,069605	17,95626	20,386825	0,032576408	1,5131934
Oben	27,25954	21,389464	17,742759	0,21829863	1,2557346
Zentrum	27,893382	-2,3763358	0,11085159	-0,06079794	0,00455996
Boden	25,383255	-3,3008988	0,16532527	-0,13374836	0,00839483

## Tabelle 6 Faktoren aus der Funktionsanalyse für die Probe Lupo 43 B - Abkühlvorgang

### 4.2.3.2. Auswertung des Vergleiches Abkühlvorgang

Auf der Grundlage der vorher beschriebenen Auswertung für alle Versuche wurde nun ein Vergleich der einzelnen Versuchskörper untereinander durchgeführt, um einen Rückschluss über den Einfluss des Schaums, der Masse des PCM-Materialies und der Plattendicke zu erhalten.

In den nachfolgenden Diagrammen werden die Messpunkte Rohr, Oben, Zentrum und Boden an Hand der ermittelten Funktionen dargestellt.

#### ▪ Auswertung Schaum

Die Untersuchungen wurden wie im *Abschnitt 3.2.* beschrieben mit Aluminiumschaum und Polyurethan- Graphit - Schaum durchgeführt. Der Polyurethan – Graphit - Schaum ist wesentlich preiswerter und wäre bei ähnlichen Messergebnissen eine wirtschaftliche Alternative.

Nachfolgendes Diagramm zeigt die Gegenüberstellung für den Abkühlvorgang.

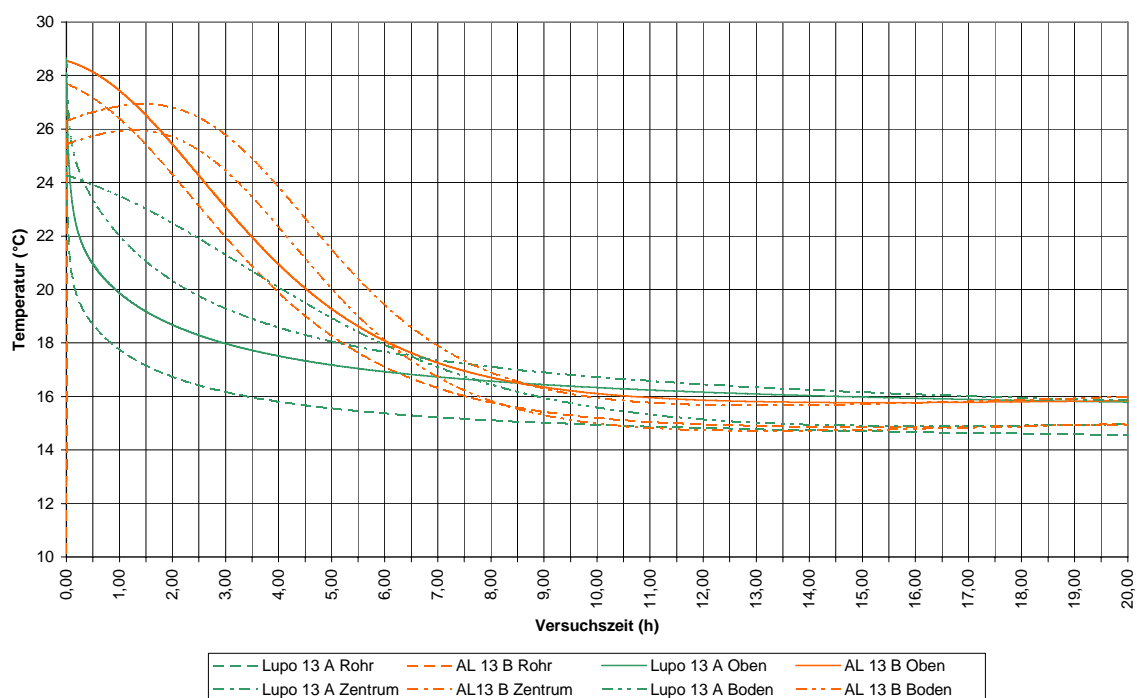


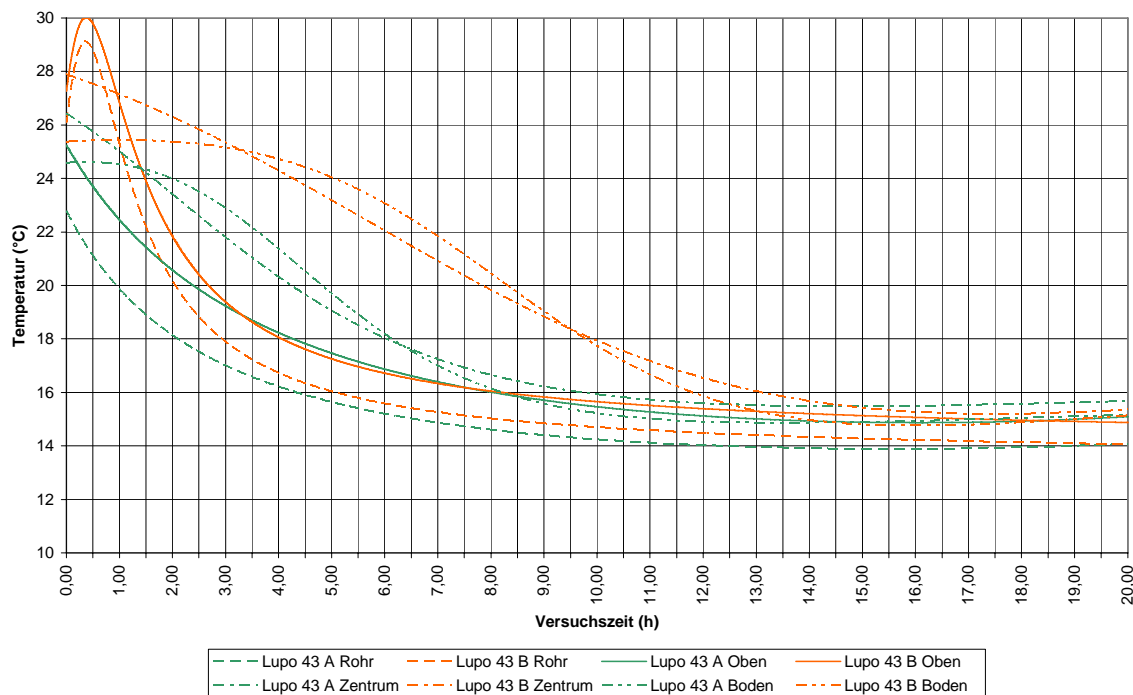
Diagramm 24 Darstellung des zeitlichen Temperaturverlaufes für unterschiedliche Schaumarten

Deutlich wird an den Verläufen für den Messpunkt Rohr, dass der Graphitschaum wesentlich eher auf den Abkühlvorgang reagiert als der Aluminiumschaum.

Bereits nach wenigen Minuten hat sich das Rohr um 5-6 Kelvin abgekühlt. Bei der Aluminiumvariante dauert es bis ein Abfall einsetzt. Danach fallen im inneren des Probekörpers mit Aluminiumschaum die Messwerte schneller als in der Gegenprobe. Während der Graphitschaum nach 6 Stunden einen nahezu 100% igen Phasenwechsel vollzogen hat, dauert es beim Metallschaum unter Abziehung der Totzeit am Anfang nur 5 Stunden. Die bessere Wärmeleitfähigkeit des Aluminiumschaums wird noch zusätzlich bekräftigt durch die Tatsache, dass in der Aluminiumschaumvariante 2,14 kg PCM-Material enthalten war, während der andere Probekörper mit Graphitschaum nur 1,74 kg beinhaltete. Beide Platten hatten eine Stärke von 30 mm.

### ▪ Auswertung Plattendicke

Das nachfolgende Diagramm enthält die Messergebnisse für eine 15 mm dicke Schaum (Lupo 43 A) und eine 30 mm dicke Schaum (Lupo 43 B).

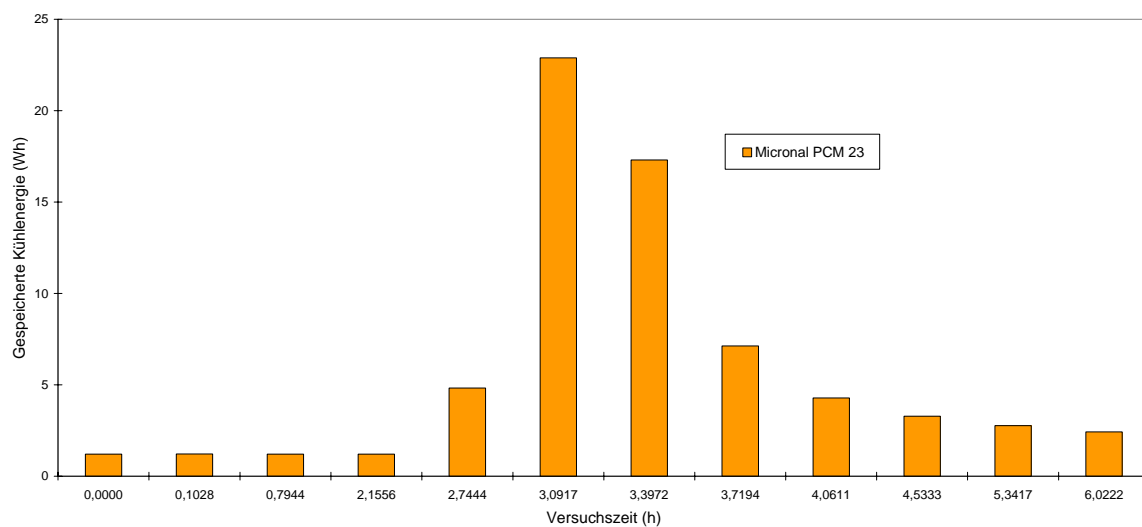


**Diagramm 25 Zeitlicher Temperaturverlauf für unterschiedliche Plattendicken**

Die dickere Platte benötigt deutlich mehr Zeit (vgl. Kurvenverlauf Boden). Während die oberen Bereiche der Platten (Rohr, Oben) in annähernd der gleichen Zeit die Abkühlung vollziehen, ergeben sich bei den Verläufen im Zentrum und am Boden deutliche Unterschiede. Die Füllungen in den Platten betragen bei der 15 mm Platte 2,07 kg und bei der 30 mm Platte 2,68 kg PCM-Material.

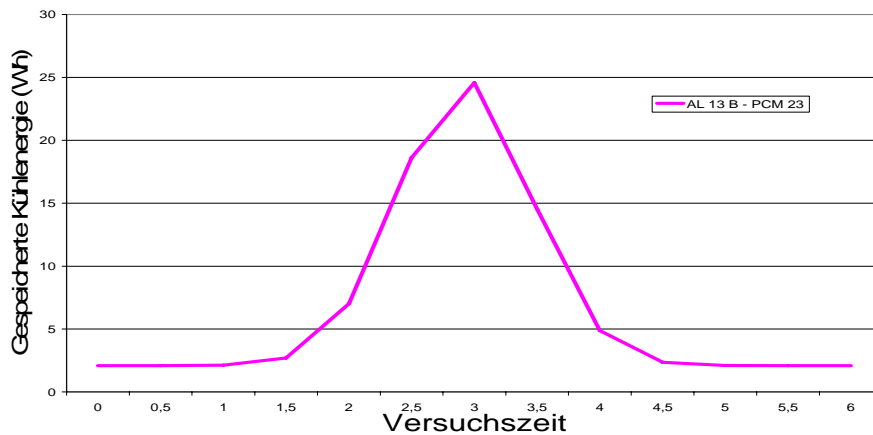
### 4.2.3.3. Auswertung der gespeicherten Energie im Abkühlvorgang

Auf der Grundlage der wärmetechnischen Daten des PCM-Materiales (s.3.3.3. *Berechnung Schmelz- und Erstarrungsenthalpie*) wurde der zeitliche Verlauf der Energiespeicherung ermittelt. Für die Probe AL 13 B ist sie nachfolgend dargestellt.



**Diagramm 26 Gespeicherte Kühlenergie in Abhängigkeit der Zeit für die Probe AL 13 B**

Diese Funktion, welche auf Grund der unterschiedlichen Zeitabschnitte schlecht handhabbar ist, wurde einer weiteren Analyse mit dem Ziel, eine direkte Zuordnung zum zeitlichen Verlauf zu erhalten, unterzogen. Das Ergebnis zeigt das nächste Diagramm.



**Diagramm 27 Darstellung des zeitlichen Verlaufes der gespeicherten Kühlenergie für Probe AL 13 B**

Auf dieser Grundlage wurden mögliche Speicherwirkungen mit anderen PCM-Materialien dargestellt.

Es wurden folgende Stoffe verglichen:

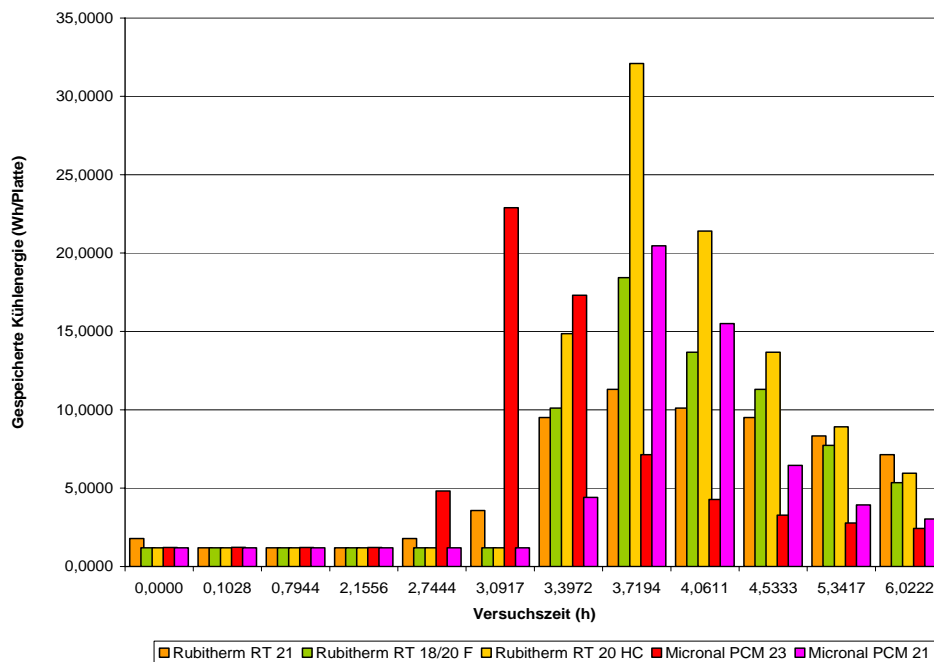
Rubitherm 18/20 F

Rubitherm 21

Rubitherm 20 HC

Micronal 21

Für die Probe AL 13 B sind die Ergebnisse des Vergleiches im Diagramm ... veranschaulicht.



**Diagramm 28 Gespeicherte Kühlenergie in Abhängigkeit des PCM-Materials für Probe AL 13 B**

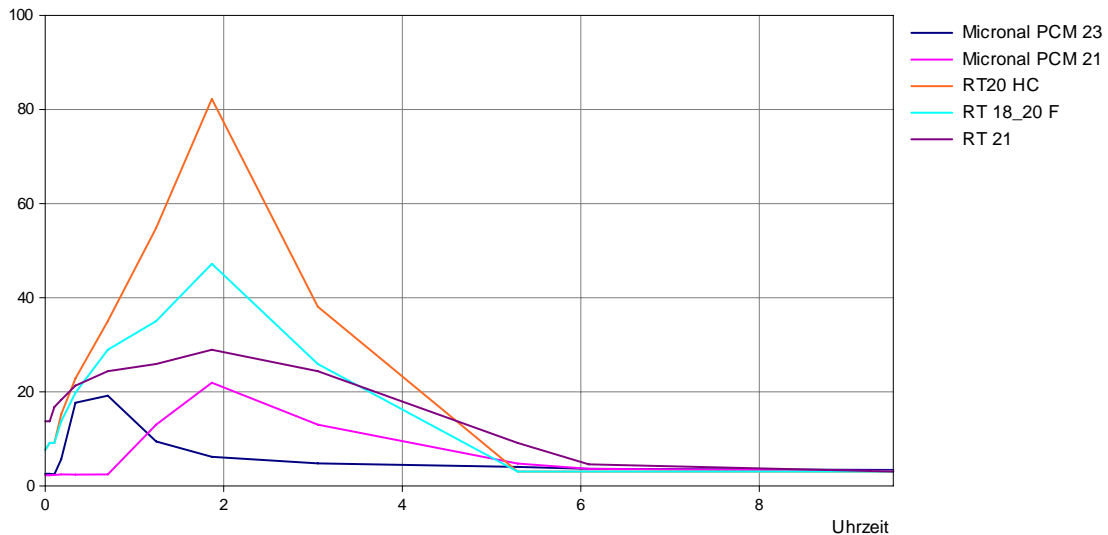
Deutlich wird, dass bei Ausfüllung des vorhandenen Volumens im Probekörper mit anderen Paraffinen eine höhere Leistung als mit Micronal 23 zu erzielen ist. In der nachfolgenden Tabelle sind die Summenwerte für die einzelnen PCM-Materialien dargestellt.

PCM-Material	Gespeicherte Kühlenergie (Wh/Platte)
Micronal 23	69,7
Micronal 21	58
Rubitherm 18/20F	71
Rubitherm 20 HC	101
Rubitherm 21	63

**Tabelle 7 Gespeicherte Gesamtkühlenergie in Abhängigkeit vom PCM-Material**

Gleichzeitig kann festgestellt werden, dass mit den unterschiedlichen Materialien eine unterschiedliche Zeit für die Spitze erreichbar ist.

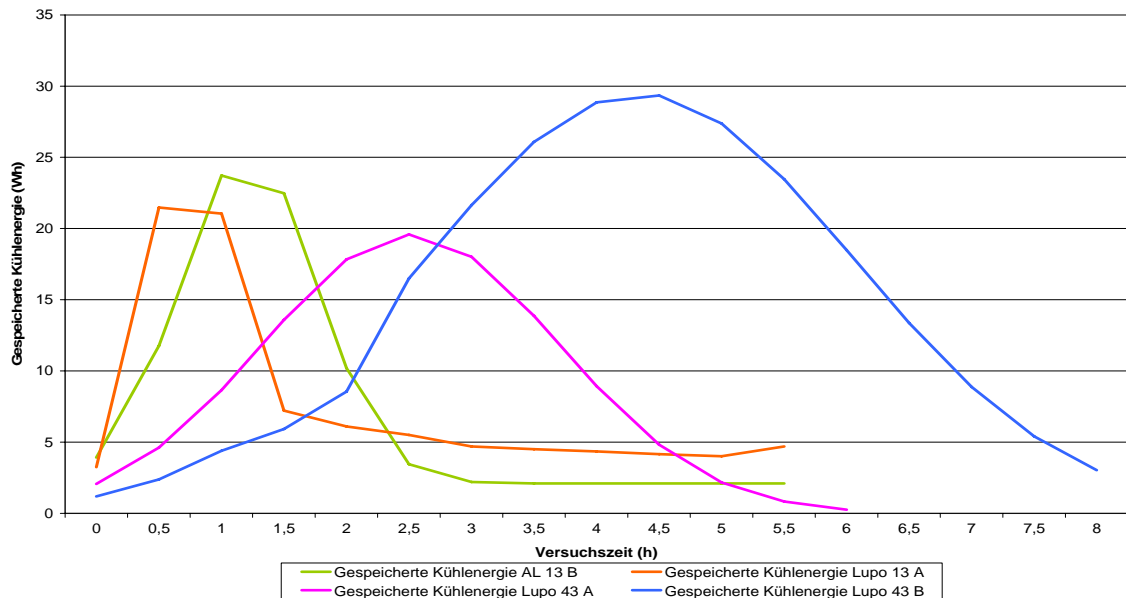
Um diese Tatsache näher zu untersuchen, wurde ebenfalls wieder eine Analyse über die Zeit angefertigt. Dieses Verhalten ist für den Probekörper Lupo 13 A im nächsten Diagramm dargestellt



**Diagramm 29 Zeitlicher Verlauf der gespeicherten Energie im Probe Lupo 13 A bei unterschiedlichen Materialien**

Während das Micronal 23 bereits nach 1 Stunden nach Beginn der Beladung die meiste Energie speichert, liegt dieser Werte für die anderen Materialien bei 2 Stunden. Besonders interessant ist das Verhalten des Materials RT 21. Es weist kein eindeutiges Maximum auf, sondern hat eine relativ gleichmäßige Abgabe über einen längeren Zeitraum von 3 Stunden.

Für die unterschiedlichen Proben wurden die gewonnenen Funktionen grafisch im *Diagramm 30* dargestellt.



**Diagramm 30 Gespeicherte Kühlenergie in Abhängigkeit der Zeit und der Masse des Latentspeichermaterials**

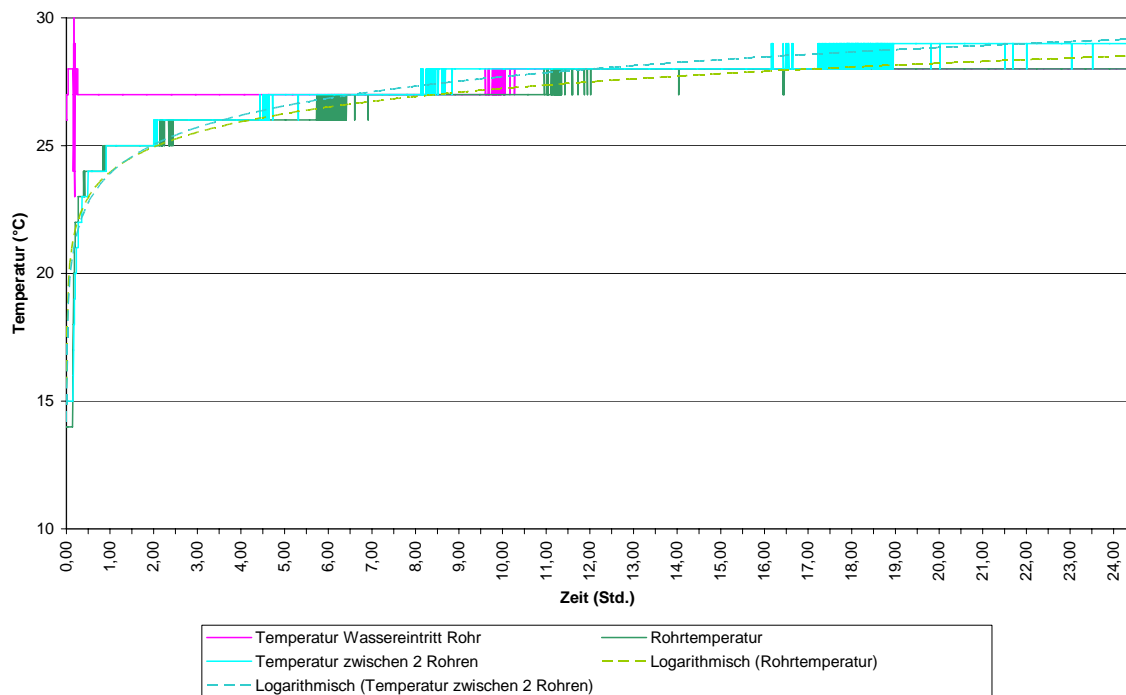
Diese Darstellung zeigt die Abhängigkeit von der Masse des Latentspeichermaterials (vgl. *Tabelle 2*).

#### 4.2.4. Analyse des Aufheizvorganges

Die Analyse des Aufheizvorganges wurde in der gleichen Reihenfolge wie beim Abkühlvorgang vorgenommen.

##### 4.2.4.1. Analyse des zeitlichen Temperaturverlaufes auf und im Probekörper

Nach Abschluss des Abkühlvorganges wurde die wärmetechnische Anlage auf Heizen umgeschaltet. Diese Sprungfunktion und die gemessenen Reaktionen an den unterschiedlichen Messstellen zeigen die nachfolgenden Diagramme.



**Diagramm 31 Zeitlicher Temperaturverlauf für die Messstelle Wassereintritt, Rohraußenwand, Oben für Probe Lupu 43 B – Aufheizvorgang**

In dieser Abbildung ist der Verlauf für die Messstelle Rohraußenwand und zwischen den Rohren dargestellt. Im Gegensatz zum Abkühlprozess (s. *Diagramm 20 Messwerte für Abkühlvorgang Probe Lupu 43 B mit Messstellen Wassereintritt, Rohraußenwand, Oben*) konnten bereits nach 15 Minuten Veränderungen der Temperaturen an den Messorten festgestellt werden. Der Verlauf beider Kurven liegt dicht bei einander.

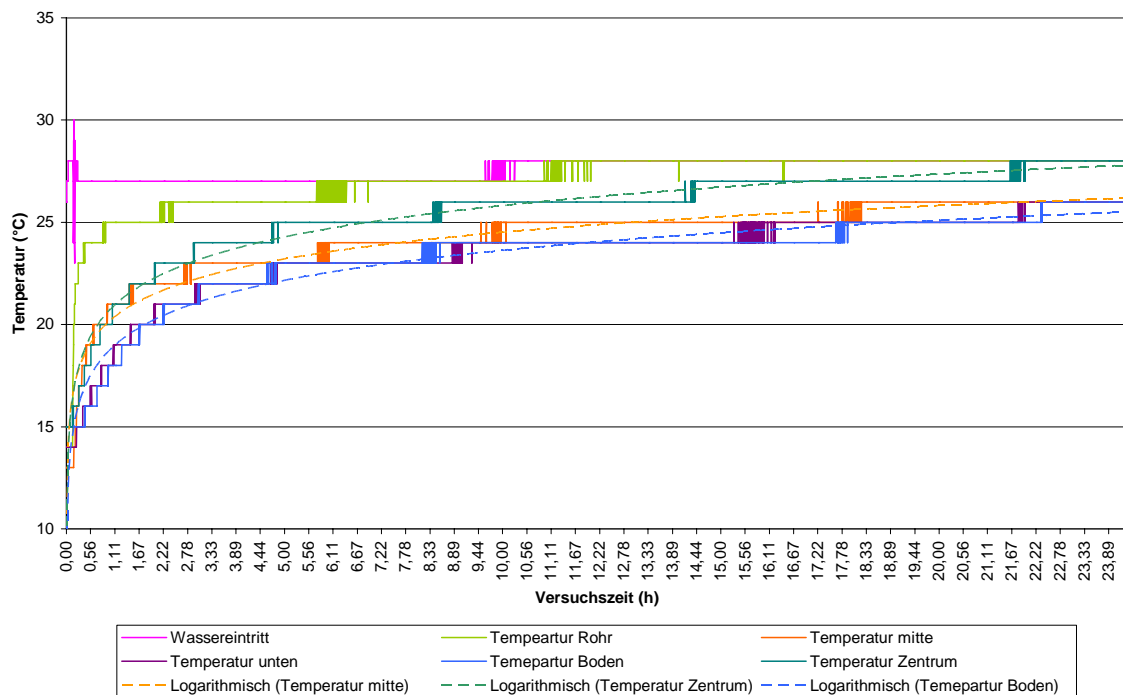
Für alle Messproben sind die bei der späteren Auswertung genutzten Zeiten in der *Tabelle 8 Zeitkonstanten für die Proben – Aufheizvorgang* aufgeführt.

Probe	Reaktionszeit Wasser - Rohraußenwand	Eingeschwungener Zustand
Lupo 13 A	0,16 h	9,51 h
AL 13 B	0,02 h	12,06 h
Lupo 43 A	0,02 h	16,79 h
Lupo 43 B	0,14 h	18,39 h

**Tabelle 8 Zeitkonstanten für die Proben – Aufheizvorgang**

Das nachfolgende *Diagramm 32* zeigt die anderen Messstellen.

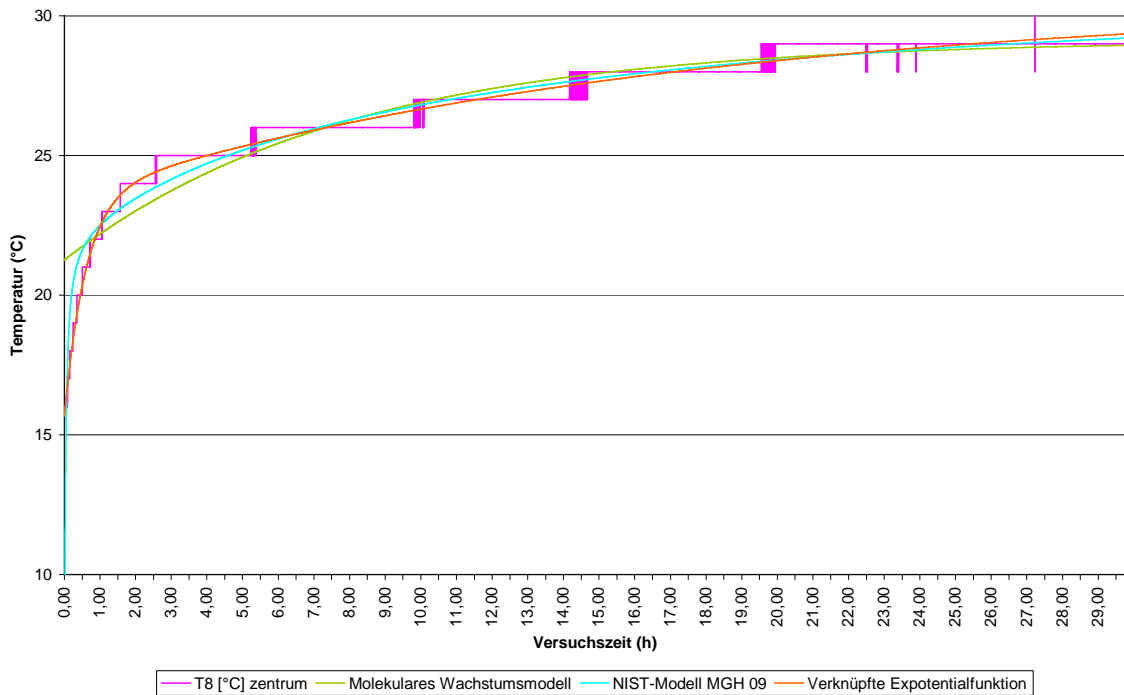




**Diagramm 32 Zeitlicher Temperaturverlauf für Messstelle Rohraußenwand, Mitte, Unten, Zentrum, Boden der Probe Lupu 43 B – Aufheizvorgang**

An diesen Verläufen wird sichtbar, dass der Boden wieder am langsamsten reagiert. Auch wird deutlich, dass es zwischen der Reaktion an der Rohraußenwand und den Messungen im Inneren des Probekörpers deutliche Unterschiede im Zeitverhalten gibt. Der Anstieg im Inneren ist geringer. Dies wird in der späteren Funktionsanalyse ebenfalls sichtbar.

Als nächstes wurden mehrere verschiedene Varianten der Funktionsanalyse durchgeführt, um die Funktion mit der niedrigsten Varianz für die vorliegenden Messergebnisse zu finden. Ein Vergleich für die Messung Zentrum ist im *Diagramm 33* dargestellt.



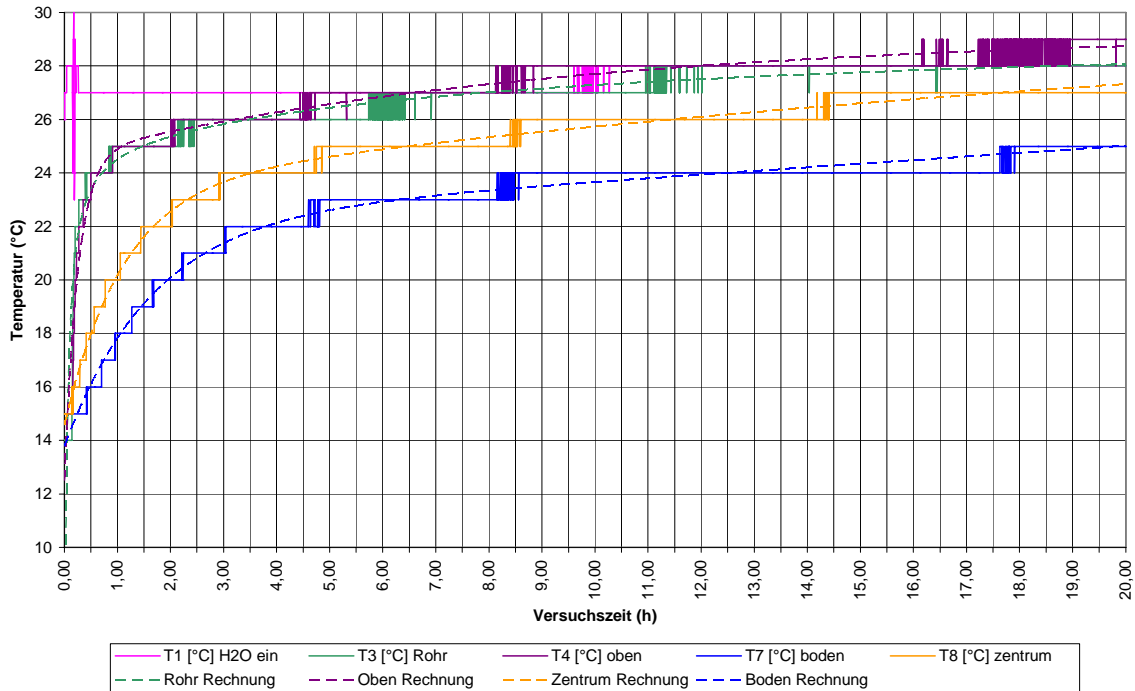
**Diagramm 33 Darstellung der unterschiedlichen Funktionen für Messstelle Zentrum - Probe Lupo 43 A - Aufheizvorgang**

Funktionsname	Funktion	Varianz	R2
Molekulares Wachstumsmodell	$y = p_0 * (1 - e^{-p_2 * (x - p_1)})$	0,42676	0,9045596
NIST – Modell MHG 09	$y = p_0 * (x^2 + p_1 * x) / (x^2 + p_2 * x + p_3)$	0,267	0,9434
Verknüpfte Exponentialfunktion	$y = p_0 + p_1 * (1 - e^{-x/p_2}) + p_3 * (1 - e^{-x/p_4})$	0,08862	0,98018

**Tabelle 9 Funktionsanalyse der Messstelle Zentrum mit Angabe der Fehler-Varianz und dem Bestimmtheitsgrad R2**

Für die weiteren Betrachtungen wurde die Funktion – verknüpfte Exponentialfunktion – gewählt. In zwei Fällen konnten mit dieser Variante keine

Konvergenz erreicht werden. Für diese Kurven wurde dann die Funktion nach dem NIST-Modell MGH 09 ermittelt.  
 Sämtliche Funktionen für die Aufheizvorgänge sind in der *Anlage A8 Auswertung der Kurvenanalyse* enthalten.  
 Die Anwendung dieser Analyse auf den Probekörper Lupo 43 B wird im nächsten Diagramm für die Messstellen – Rohr, Oben, Zentrum und Boden – dargestellt.



**Diagramm 34 Temperaturverlauf für Probe Lupo 43 B - Messwerte und Kurvenanalyse**

Stellvertretend an dieser Stelle die Funktionen für das oben dargestellte Diagramm.

$$y = p_0 + p_1 * (1 - e^{-x/p_2}) + p_3 * (1 - e^{-x/p_4})$$

Kurve	p <sub>0</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>
Rohr <sup>*1</sup>	29,513507	7,7787933	9,188349	0,38364646	-
Oben	12,489593	4,62527	9,286687	12,163364	0,2524495
Zentrum	14,574531	7,4733052	27,297503	8,8703325	1,0882908
Boden	13,776267	12785723	953315491	8,5609706	1,63433027

## Tabelle 10 Faktoren für die einzelnen Messpunkte entsprechend der Funktionsanalyse

\*1: Diese Kurve lieferte mit Variante „Verknüpfte Exponentialfunktion“ keine Konvergenz und wurde deshalb mit der Variante NIST – Modell MGH 09 bestimmt.

### 4.2.4.2. Auswertung des Vergleiches Aufheizvorgang

Auf der Grundlage der vorher beschriebenen Auswertung für alle Versuche wurde nun ein Vergleich der einzelnen Versuchskörper untereinander durchgeführt, um einen Rückschluss über den Einfluss des Schaums, der Masse des PCM-Materialies und der Plattendicke zu erhalten.

In den nachfolgenden Diagrammen werden die Messpunkte Rohr, Oben, Zentrum und Boden an Hand der ermittelten Funktionen dargestellt.

#### ▪ Auswertung Schaum

Die Untersuchungen wurden wie im *Abschnitt 3.2.* beschrieben mit Aluminiumschaum und Polyurethan- Graphit - Schaum durchgeführt. Nachfolgendes *Diagramm 35* zeigt die Gegenüberstellung

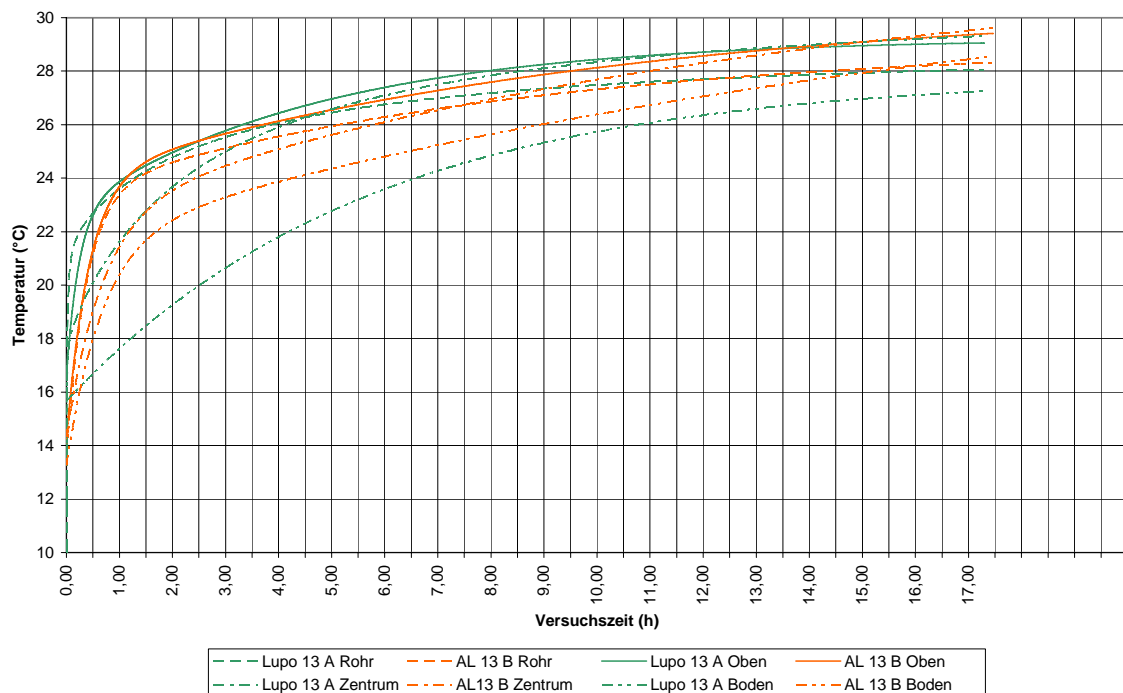


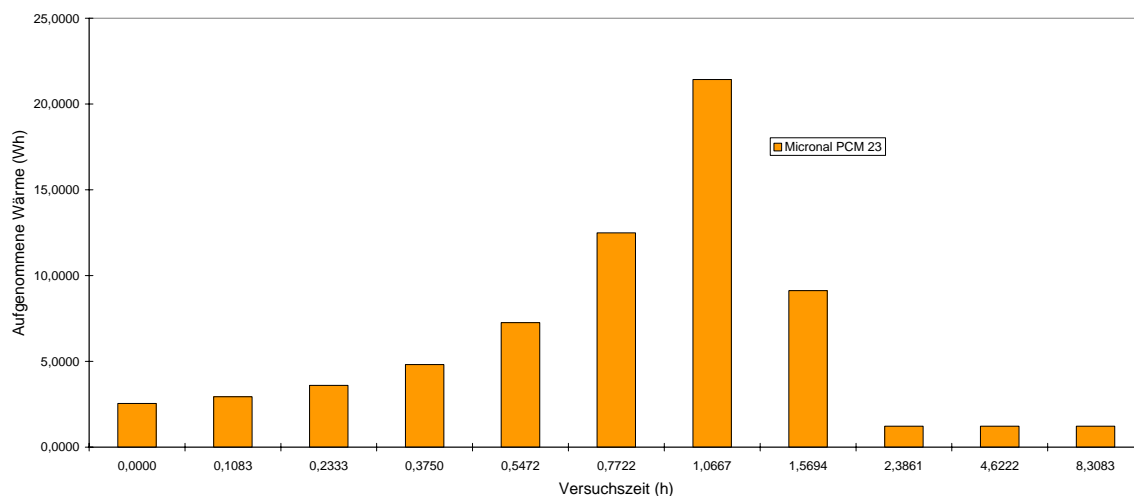
Diagramm 35 Gegenüberstellung Metall- und Graphitschaum für den Aufheizvorgang

Deutlich wird an diesem Diagramm, dass im Gegensatz zum Abkühlvorgang, beim Aufheizen oder Entladen des Speichers die Schaumart zwar einen Einfluss hat, dieser aber bei weitem nicht so gravierend ist. Deutlich wird aber auch, dass für die Entladung wesentlich mehr Zeit benötigt wird. Dieses Verhalten kommt dem späteren Einsatz zu Gute. Für die Abkühlphase stehen nur die Nachtstunden mit wesentlich weniger Zeit – ca. 6 – 7 Stunden) zur Verfügung.

Die Untersuchung der Plattenstärke wurde im Rahmen der späteren versuche durchgeführt. Aus den Diagrammen wir ersichtlich, dass die Plattenstärke einen kleineren Einfluss auf den Aufheizvorgang als beim Abkühlprozess aufweist. Deutlich wird aber auch, dass die Platten sehr lange für die gesamte Durchwärmung benötigen. Um diesen Prozess innerhalb des Tagzyklus einordnen zu können, sollten für den Aufheizvorgang nicht mehr als 12 Stunden benötigt werden. Aus diesem Grunde sind die dünneren Platten zu bevorzugen.

#### 4.2.4.3. Auswertung der abgegebenen Energie im Entladungsprozess

Analog dem Abkühlprozess wird ebenfalls der Aufheizvorgang hinsichtlich der abgegebenen Energie untersucht. Für die Probe AL 13 B ist das Ergebnis im *Diagramm 36* nachfolgend aufgezeichnet.

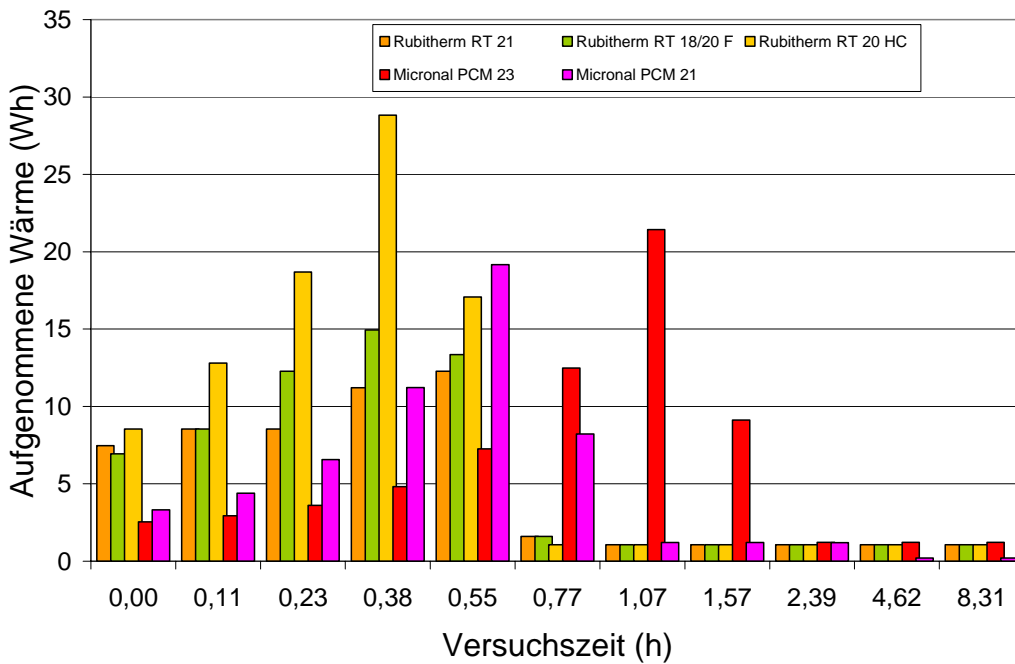


**Diagramm 36 Zeitlicher Verlauf für Energieaufnahme - Probe AL 13 B – Aufheizvorgang**

Diese Diagramme wurden für alle Proben erarbeitet. Analog zum Abkühlprozess wurden ebenfalls Berechnungen für die unterschiedlichen Materialien durchgeführt.

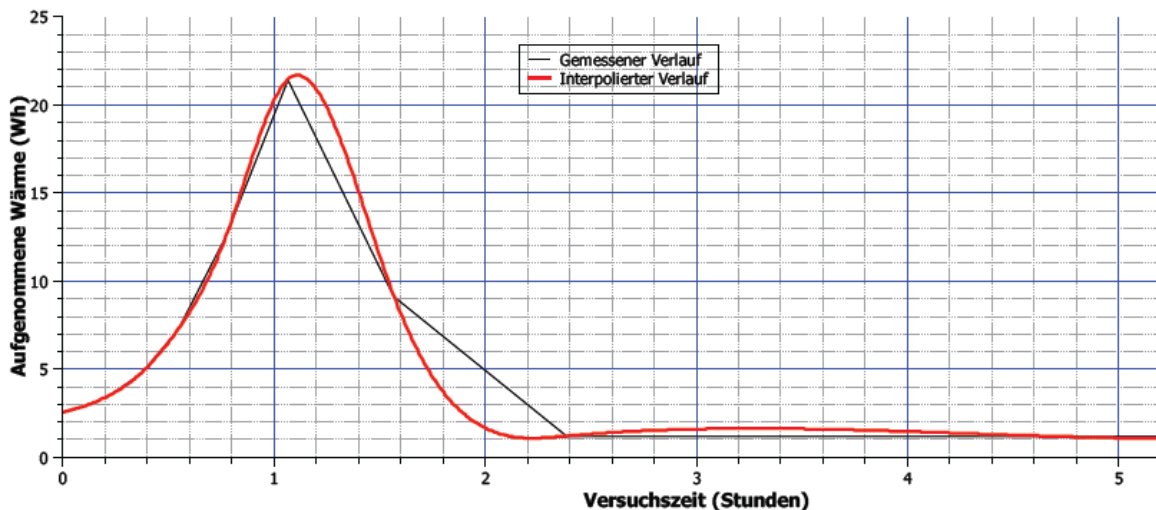
Sie liefern ein analoges Ergebnis wie bei der Abkühlung. Jedoch sind die zeitlichen Spitzen für die Materialien in umgekehrter Reihenfolge zu dem Abkühlvorgang. Während bei der Abkühlung das Micronal 23 als erstes seinen Maximalwert erreicht hat, ist es beim Aufheizvorgang an letzter Stelle. Diese Kenntnisse können bei unterschiedlichen Einsatzfällen angewendet werden.

Durch die Technologie der Platten können somit unterschiedliche Zeitglieder bei annähernd gleicher gespeicherter Energie erreicht werden.



**Diagramm 37 Aufgenommene Wärme in Abhängigkeit des PCM-Materials für Probe AL 13 B**

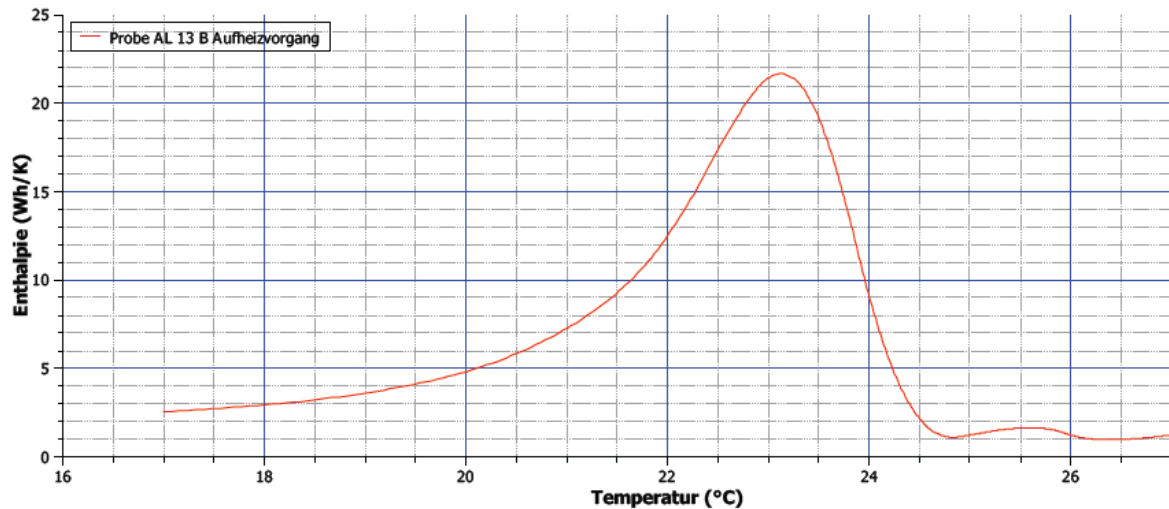
Analog dem Vorgehen beim Abkühlprozess werden ebenfalls die zeitlichen Verläufe der Schmelzperiode einer Funktionsanalyse unterzogen. Für das Beispiel AL 13 B sind sie im *Diagramm 38 Aufgenommene Wärme bei Aufheizvorgang bei Probe AL 13 B* abgebildet.



**Diagramm 38 Aufgenommene Wärme bei Aufheizvorgang bei Probe AL 13 B**

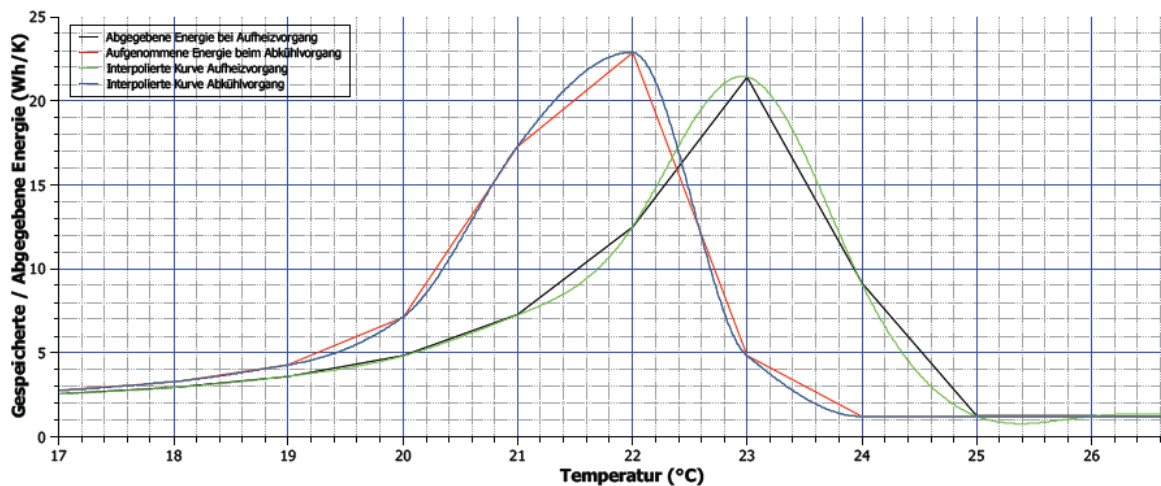
Für die weiteren Berechnungen sind jedoch diese Auswertungen in Abhängigkeit von den Temperaturen notwendig. Im Abschnitt 3.3.3. *Berechnung Schmelz- und*

Erstarrungsenthalpie sind die Diagramme für die vorhandenen Baustoffe dargestellt. Sie sind die grundlegende Voraussetzung, um das Simulationsprogramm für eigene Konstruktionen nutzen zu können. Als Beispiel wird im Diagramm 39 Aufgenommene Wärme bei Aufheizvorgang Probe AL 13 B in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.



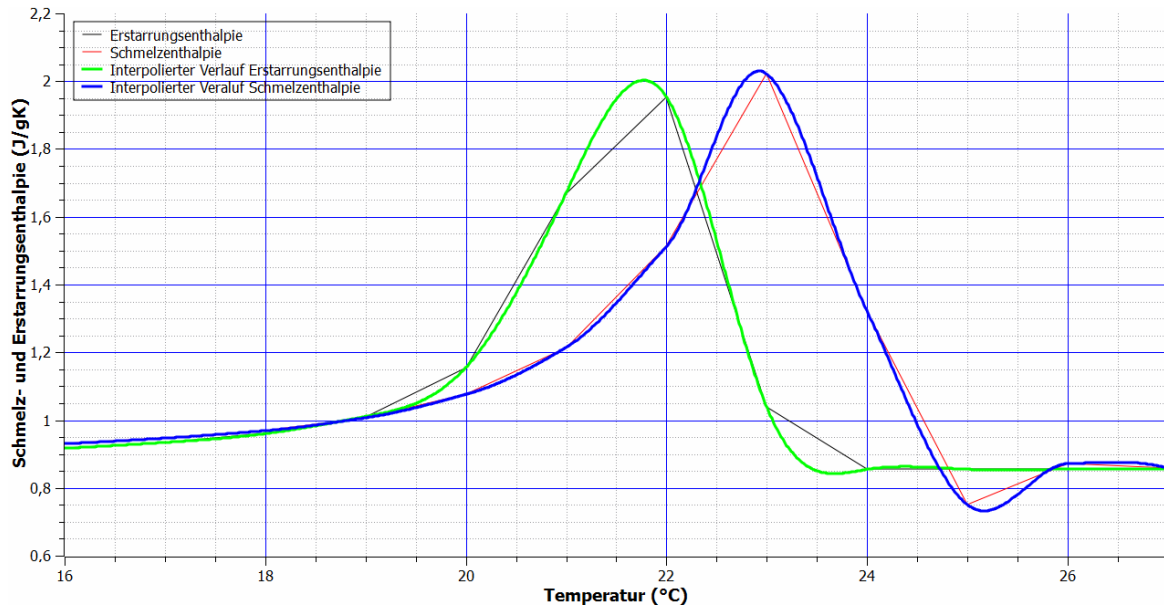
**Diagramm 39 Aufgenommene Wärme bei Aufheizvorgang Probe AL 13 B in Abhängigkeit von der Temperatur**

Für die Nutzung in der Simulationssoftware werden die Verläufe für Abkühl- und Aufheizvorgang benötigt. Sie müssen jedoch im weiteren Verlauf massebezogen dargestellt werden.



**Diagramm 40 Aufgenommene - Abgegebene Energie der Platte AL 13 B in Abhängigkeit von der Temperatur**

Diese Umrechnung erfolgte und ergab danach folgendes Diagramm.



**Diagramm 41 Schmelz- und Erstarrungsenthalpie für Platte AL 13 B**

Mit diesen Werten wurde jetzt ein Baustoff im Simulationsprogramm angelegt und eine entsprechende Konstruktion entwickelt. Die Simulation ergab eine Verbesserung gegenüber der Rondenvariante und auch eine Verbesserung gegenüber der Smartboard - Variante.

Variante	Stunden innerhalb Raumtemperatur (21 – 26 °C)	Stunden über 26 °C
Ursprungsvariante ohne PCM	5344 Stunden	254 Stunden
Ronden mit PCM	6056 Stunden	68 Stunden
Smartboard in 2 Innenwänden	6176 Stunden	44 Stunden
Anhydritestrich mit 2 Platten AL 13 B je m <sup>2</sup> Fußboden	6190 Stunden	36 Stunden

**Tabelle 11 Vergleich der Verbesserung der Behaglichkeit im Versuchsraum durch Einsatz von PCM**

#### 4.2.5. Zusammenfassung der Auswertung der ersten Versuchsreihe

Zusammenfassend können folgende Vorteile aufgezeigt werden:



- durch die gewählte Plattenkonstruktion wurde ein für die Baustelle leicht handhabbares Element entworfen
- Der große Nachteil der Festigkeit konnte damit beseitigt werden. Die Kombination von Schutzhülle und Schaum weist eine höhere Festigkeit als der Estrich auf.
- Die Simulationswerte für die Raumtemperatur im Versuchsraum sind besser als mit Smartboard

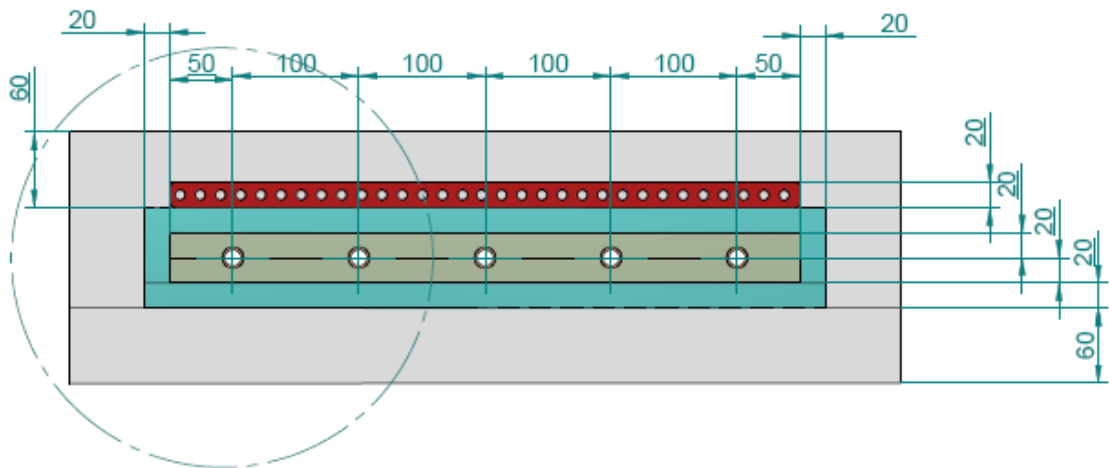
Die Messungen haben aber auch folgende Schwachstellen aufgezeigt:

- Schlechte thermische Anbindung des Rohres an die Platten
- Schwankende Anbindung des Schaums an die Platte
- Nach Berechnung des freien Volumens sind nicht alle Freiräume mit Micronal 23 gefüllt sind

## **4.3. Auswertung für die 2.Versuchsreihe**

### **4.3.1. Allgemeines und Versuchsaufbau**

Das Grundprinzip der Plattenstruktur mit Hülle und Schaum wurde beibehalten. Jedoch wurde zur Verbesserung des Wärmeüberganges zwischen Rohr und Platte eine 2. Platte auf der Oberseite befestigt. Für den späteren Einsatz könnte die obere Platte auch durch ein Deckblech, welches an der unteren Platte befestigt wird, ersetzt werden. Um nähere Aufschlüsse über das Verhalten der Platten zu erhalten, wurden sie in einer nachfolgenden Messreihe mit Estrich umgeben. Der Versuchsaufbau ist in der *Abbildung 20* dargestellt.



A

Abbildung 20 Schematischer Aufbau für die 2.Versuchsreihe

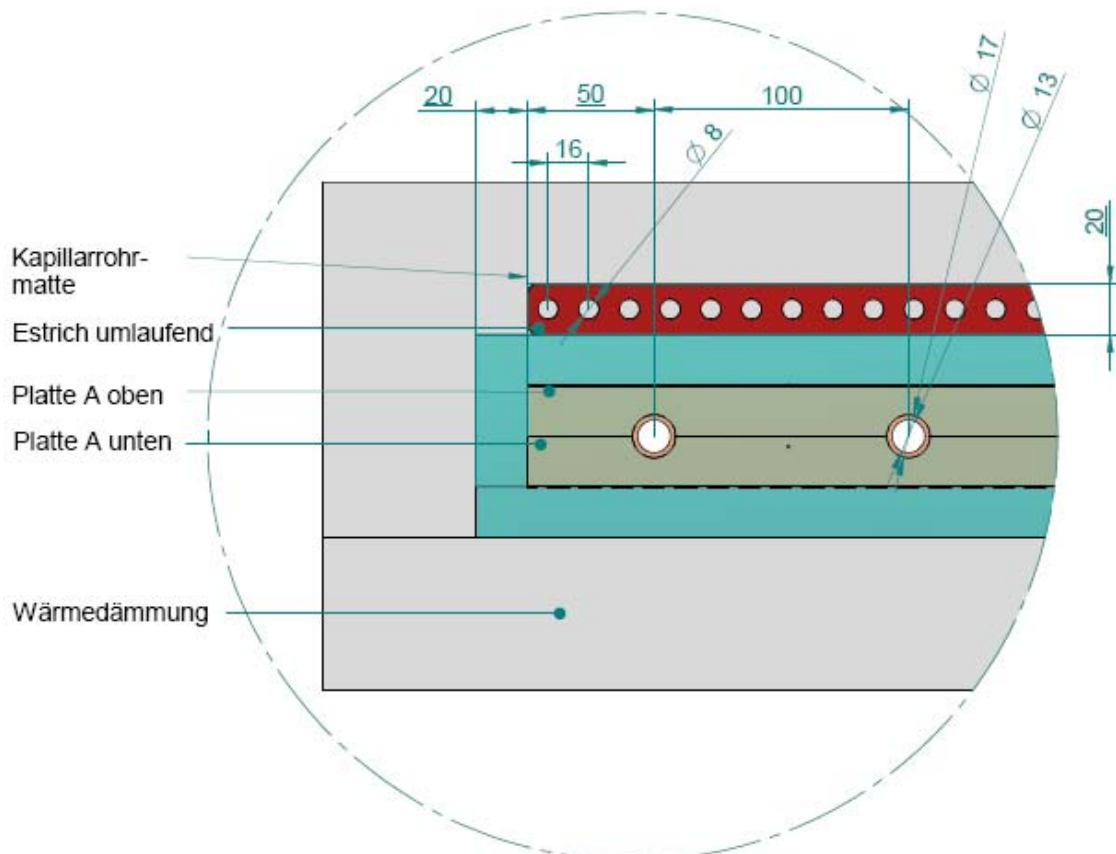


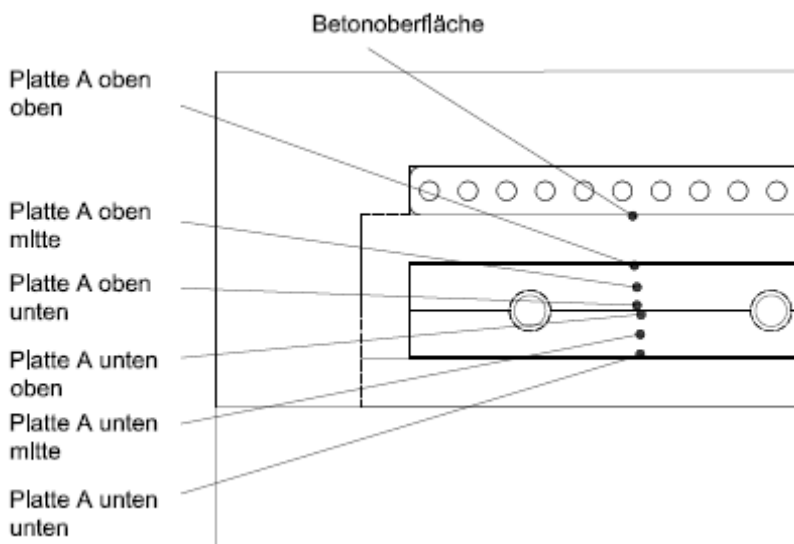
Abbildung 21 Detail A mit Bezeichnung

Es wurden mehrere Platten gleichzeitig untersucht. Die wichtigsten Merkmale sind in der nachfolgenden Tabelle enthalten

Bezeichnung	Latentmaterial	Dicke	Lage
Platte A	Parafin RT 18/20	20 mm	unten
Platte A	Micronal 23	20 mm	oben
Platte B	Parafin RT 18/20	15 mm	unten
Platte B	Micronal 23	15 mm	oben

**Tabelle 12 Wichtigsten Merkmale Versuchsplatten 2. Versuchsreihe**

Bei jeder Platte wurden mehrere Messpunkte aufgenommen. Ihre Lage kann der *Abbildung 22* entnommen werden.



**Abbildung 22 Lage der Messpunkte**

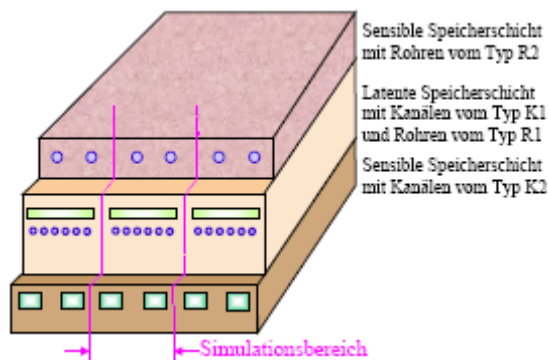
Durch die Verwendung der unterschiedlichen Dicken und Latentspeichermaterialien unterscheiden sich die Speichermasse je Platte deutlich.

	Platte A unten	Platte A oben	Platte B unten	Platte B oben
Masse Hülle	4,02 kg	4,01 kg	4,13 kg	4,00 kg
Masse Schaum	0,93 kg	0,94 kg	0,62 kg	0,75 kg
Masse Parafin	3,50 kg	1,50 kg	2,54 kg	1,15 kg
Masse Platte	8,45 kg	6,45 kg	7,29 kg	5,90 kg

**Tabelle 13 Daten der Platten der 2. Versuchsreihe**

Der verwendete Schaum ist in allen Platten von der Struktur her gleich. Die Dichte des Micronal 23 ist größer als die des Parafin RT 18/20 (s.7.10). Dadurch wird bewiesen, dass nicht alle Hohlräume des Schaums mit Micronal ausgefüllt sein können. Die Vermutung der ersten Versuchsreihe konnte damit bewiesen werden. Aus diesem Grunde sollten für die industrielle Nutzung unbedingt Paraffin genutzt werden, da durch das Einbringen im flüssigen Zustand sämtliche Hohlräume des Schaums ausgefüllt werden.

In der 2. Versuchsreihe wurden die Platten mit einer 2 cm dicken Estrichschicht ummantelt. Diese Vorgehensweise ergab sich aus dem ausgewählten Validierungsprogramm für die Messungen. Es wurde nach mehreren Untersuchungen das Programm Speicherplatte von Prof. Dr. Ing. habil B. Glück als am besten geeignet betrachtet. In dem diesem Programm zu Grunde liegenden Fußbodenaufbau liegen die Heizungs- und Kühlrohr in der Speicherschicht. Dies entspricht genau unserem Messaufbau.



**Abbildung 23 Fußbodenaufbau des Simulationsprogrammes [GLÜ07]**

Im Rahmen der zweiten Messreihe (mit Estrich) lag auf den untersuchten Platten eine 20 mm dicke Platte - bestehend aus einer Kapillarrohrmatte und Estrich – zur Simulation von äußeren Lasten. Diese Platte war ebenfalls an den Heiz- und Kühlkreislauf angeschlossen. Durch sie konnten thermische Lasten von bis zu 100 W/m<sup>2</sup> nachgebildet werden.

Durch einen Softwarefehler gingen leider zwei Versuchsreihen für die Platten ohne Estrich verloren. In der *Anlage A9.1. Messungen ohne Estrich* sind die Ergebnisse für den Abkühlprozess dargestellt. Auf Grund der immensen Datenmenge – eine Messreihe für ein Plattenpaar beträgt bis zu 220 DIN A4 Seiten – sind in der Anlage jeweils nur die erste Seite der Messreihe enthalten. Die kompletten Messreihen sind auf der beiliegenden CD als pdf - Datei gespeichert.

In der *Anlage A9.2. Messung mit Estrich* sind folgende Messungen dargestellt:

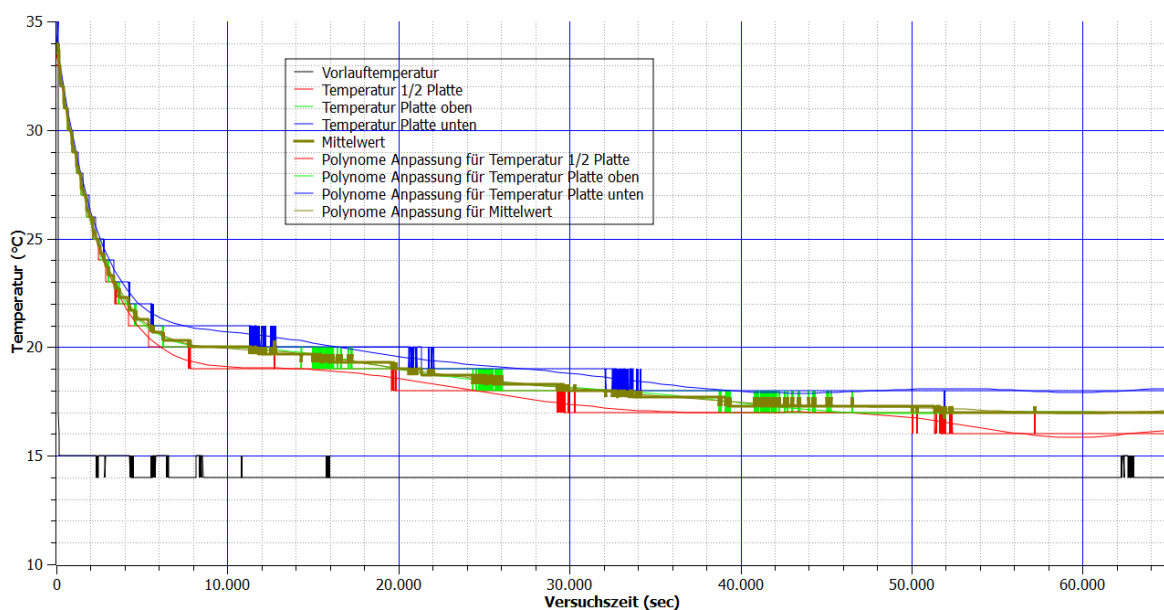
Versuchsreihe	Medium Rohr	Medium Kapillarrohrmatte
1	Heizen 30 °C	aus
2	Kühlen 15 °C	aus
3	Kühlen 15°C	Heizen 30°C
4	Heizen 30°C	Kühlen 15 °C
5	Kühlen 15°C	Kühlen 15°C – 3l/min
6	Kühlen 15°C	Heizen 30°C – 3l/min
7	Heizen 30°C	aus

**Tabelle 14 Durchgeführte Versuchsreihen**

#### 4. 3.2. Auswertung Mittelwertbildung

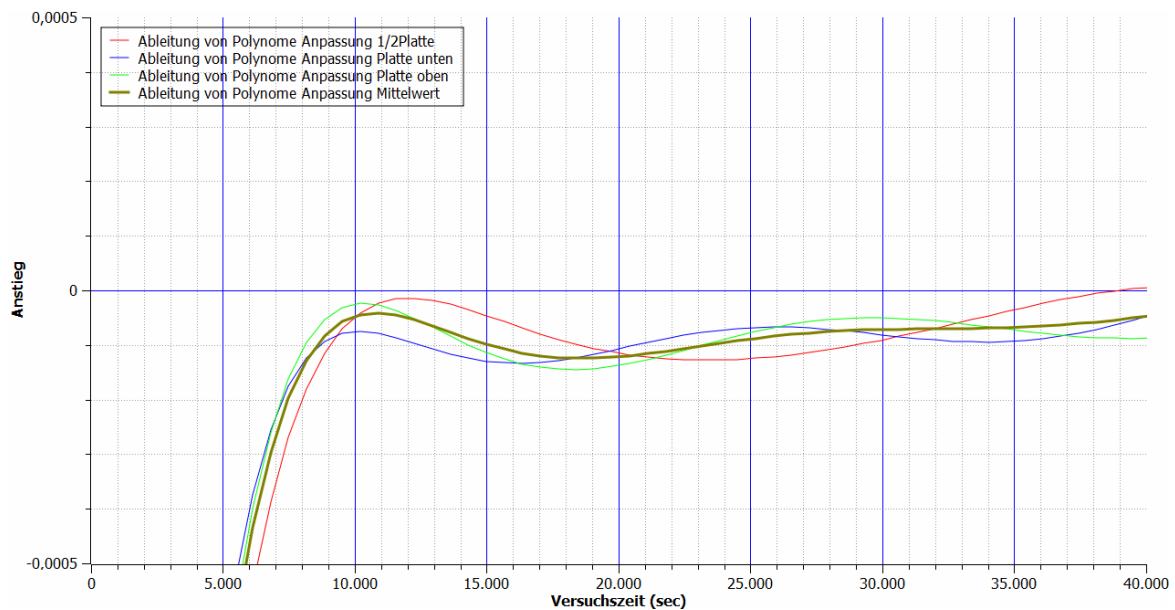
Um eine einfachere Nutzung der Messwerte zu ermöglichen, wurde ein Vergleich betreffs einer arithmetischen Mittelwertbildung über die Temperaturmessung durchgeführt

Die Ergebnisse sollen stellvertretend für die Platte B unten – Abkühlvorgang aufgezeigt werden.



**Diagramm 42 Temperaturverlauf innerhalb der Platte und des Mittelwertes**

Aus diesem Diagramm wird zwar eine Differenz zwischen den einzelnen Messwerte und dem Mittelwert deutlich, jedoch sind die Abweichungen bei der Dauer des Versuches und der vorhandenen Messgenauigkeit ( $\pm 0,5$  K) als vernachlässigbar an zu sehen. Jedoch für die weitere Betrachtung entscheidend ist die 1. Ableitung der Polynome. Sie zeigt den Beginn und das Ende des Phasenwandels an.



**Diagramm 43 1.Ableitung für Polynome Anpassung Temperaturverläufe**

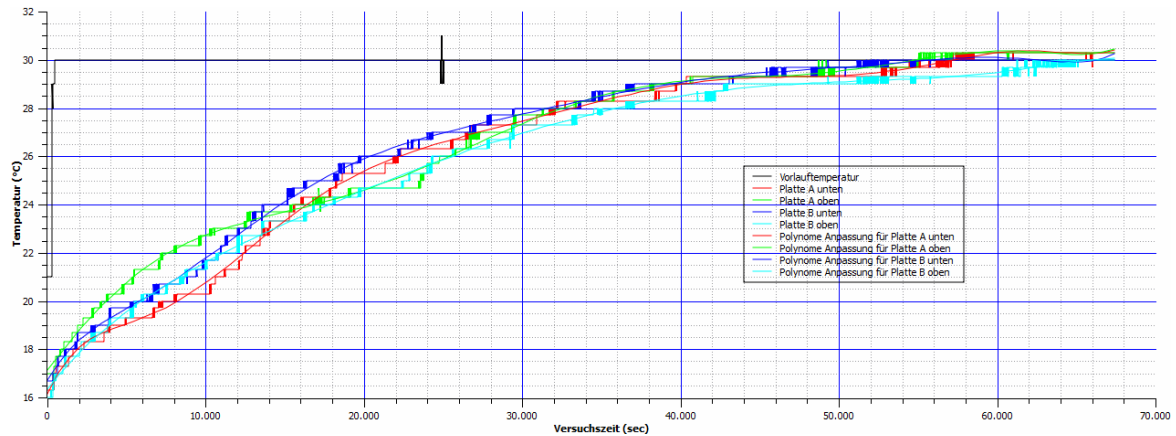
Aus dem *Diagramm 43* wird deutlich, dass an beiden Plattenränder der Beginn des Phasenwandels zur gleichen Zeit erfolgt. Der Versuchsaufbau ist analog der 1. Versuchsreihe, d.h. ohne Estrich – Abkühlvorgang. Es werden deutlich Unterschiede zwischen der 1. und 2. Messung erkennbar:

- Reaktionszeit ist deutlich gesunken – thermische Anbindung Rohr an Platte wesentlich verbessert
- Reaktionszeit an der unteren Plattenseite deutlich verbessert – thermische Anbindung des Schaums an die Platte wesentlich verbessert

Deutlich wird aber auch, dass in der Plattenmitte der Erstarrungsvorgang bedeutend später einsetzt (Plattenrand – 2,65 Stunden, Plattenmitte - 3,3 Stunden). In gleicher Weise verlängert sich das Ende des Erstarrungsprozesses (Plattenrand – 4,7 Stunden, Plattenmitte – 6,8 Stunden).

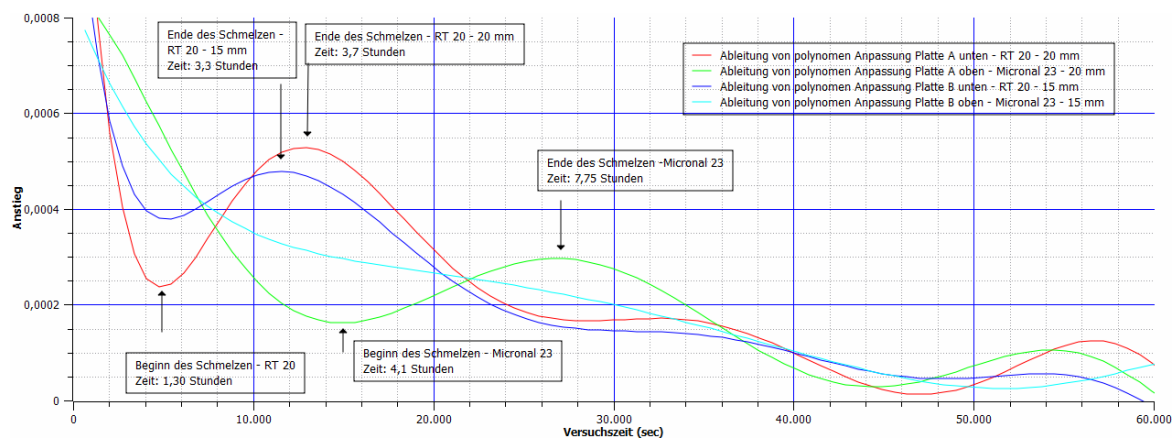
#### 4. 3.3 Auswertung Aufheizvorgang

Die Auswertung des Aufheizvorganges erfolgt analog der 1. Versuchsreihe. Leider liegen aus dem bereits erwähnten Softwareproblem keine Messergebnisse für die Platten ohne Estrich vor.



**Diagramm 44 Temperaturverlauf des Aufheizvorganges der 2. Versuchsreihe mit Estrich**

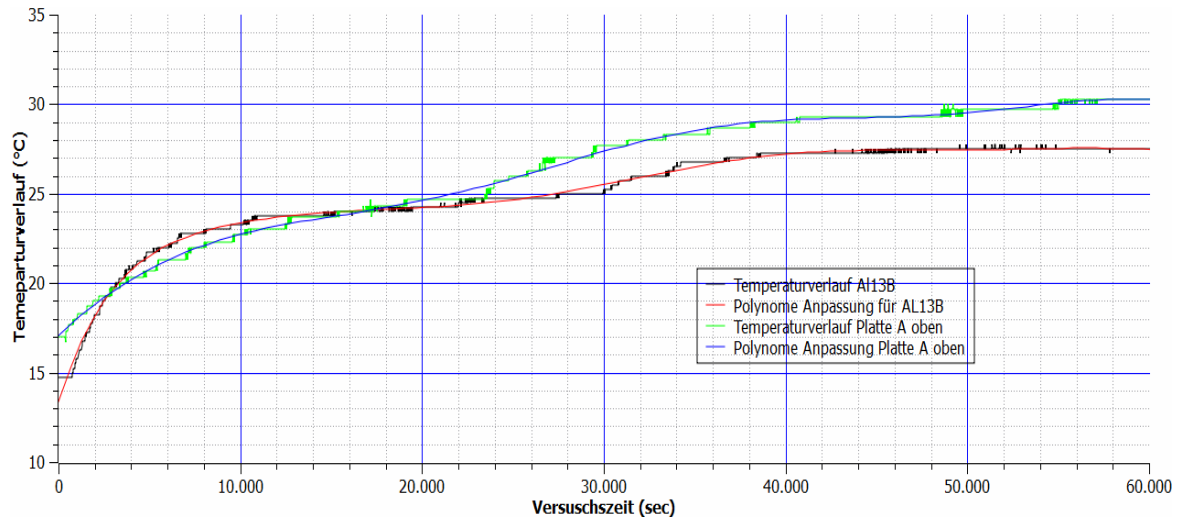
Der allgemeine Verlauf ist mit den Ergebnissen der 1. Versuchsreihe analog. Es wird bereits in dieser Darstellung sichtbar, dass die mit Micronal gefüllten Platten (Platte A oben, Platte B oben) einen anderen Verlauf haben als die mit Paraffin gefüllten Platten. Dies wird bei der ersten Ableitung der Polynome Anpassungen für die Messreihen besonders deutlich.



**Diagramm 45 1. Ableitung der Polynome Anpassung für den Temperaturverlauf**

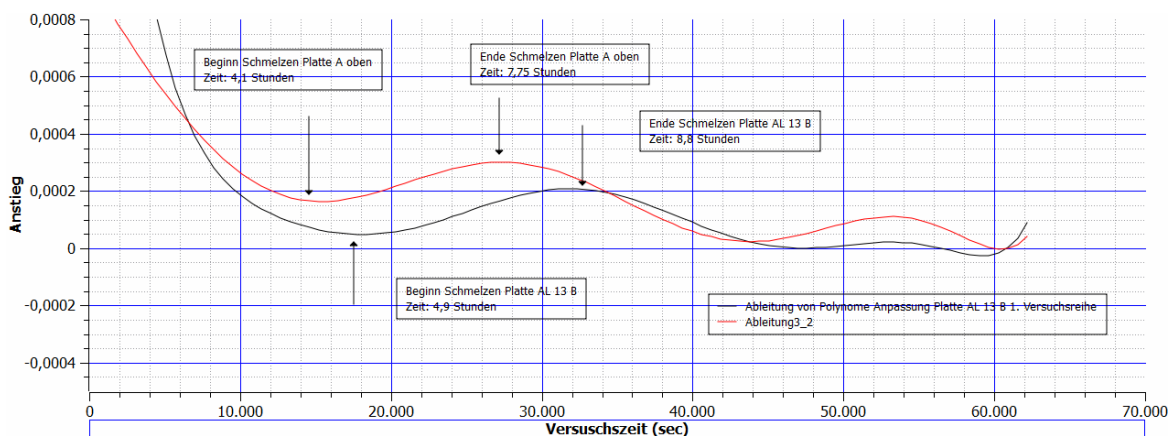
Für die Platten mit Paraffin konnte der Beginn des Schmelzprozesses mit 1,3 Stunden ermittelt werden. Die unterschiedliche Dicke der Platten (Platte A 20 mm – Platte B 15 mm) spielt bei dieser Variante keine Rolle. Das Ende des Schmelzprozesses wird von dem Inhalt an Paraffin beeinflusst. Der Unterschied von 0,4 Stunden ist aber nicht gravierend.

Für die mit Micronal gefüllten Platten ergaben sich bedeutend längere Zeiten. Die gleiche Analyse wurde noch einmal für die Platte AL13 B der 1. Versuchsreihe durchgeführt, um Rückschlüsse auf den Einfluss der Plattendicke zu gewinnen.



**Diagramm 46 Vergleich Temperaturverlauf 1. und 2. Versuchsreihe**

Der Verlauf ist bei beiden Proben im ersten Bereich annähernd gleich. Im weiteren Verlauf wird der Einfluss des Estrichmantels sowie der niedrigeren Vorlauftemperatur in der 2. Versuchsreihe deutlich. Die 1. Ableitung liefert das erwartete Ergebnis betreffs der Zeiträume für den Phasenwandel.



**Diagramm 47 1. Ableitung der Polynome Anpassung für Probe der 1. und 2. Versuchsreihe**

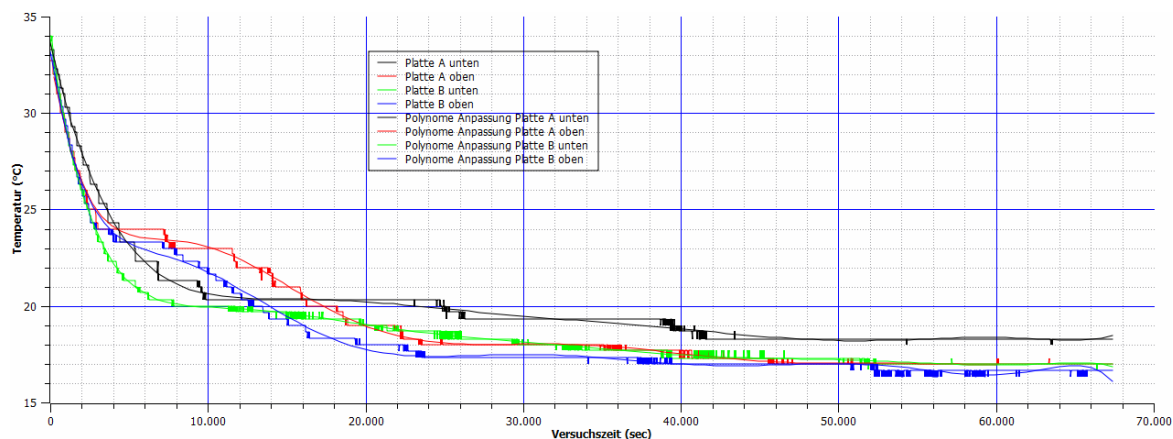
Mit Zunahme der Plattendicke kommt es zu einer beträchtlichen Erhöhung der Zeit für Phasenwandel. Auf der Grundlage dieses Ergebnisses wird vorgeschlagen, die Plattenstärke nicht größer als die 20 mm zu wählen. Bei der Analyse der 2. Versuchsreihe wurde auch auf die Untersuchung zu den verschiedenen Funktionen verzichtet und dafür nur mit einer Polynome Anpassung 9. Grades gearbeitet. Diese Funktion liefert eine hinlänglich genaue Widerspiegelung der Messwerte.



## 4. 3.4. Auswertung des Abkühlvorganges

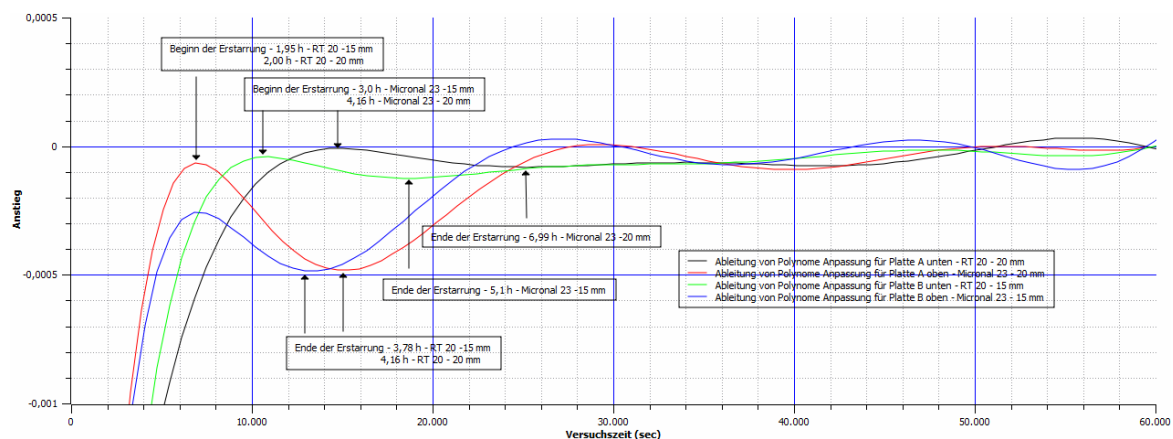
### 4. 3.4.1. Auswertung des Abkühlvorganges ohne Estrich

Für den Abkühlvorgang liegen Messwerte ohne Estrich vor. Diese Messwerte sind in *der Anlage A9.1. Messungen ohne Estrich* enthalten. Nachfolgendes Diagramm stellt den aufgenommenen Temperaturverlauf dar.



**Diagramm 48 Temperaturverlauf Abkühlvorgang ohne Estrich 2. Versuchsreihe**

Auch beim Abkühlvorgang wird das gleiche Erscheinungsbild sichtbar, wie beim Aufheizvorgang. Die mit Paraffin gefüllten Platten einen deutlich an deren Verlauf als die Platten mit Micronal 23. In diesem Diagramm werden auch die unterschiedlichen Speichertemperaturen der Medien sichtbar. Während für das Paraffin RT 18/20 ein Temperaturbereich von 18 - 22 °C angegeben wird, liegt diese beim Micronal 23 bei zwischen 21 – 24 °C. Auch in diesem Fall wurde die 1. Ableitung zur Analyse des Phasenwandels durchgeführt.



**Diagramm 49 1. Ableitung der Polynomen Anpassung Abkühlvorgang**

Für die Platten mit Paraffin gilt wie bereits beim Aufheizvorgang, dass der Beginn für das Erstarren nahezu unabhängig von der Plattenstärke ist. Der Abschluss

des Erstarrungsprozesses ist wieder um den Betrag von 0,4 h verschieden. Demgegenüber weist der Vorgang für die Platten mit Micronal 23 eine Abhängigkeit von den Plattenstärken und dem in der Platte enthaltenen Latentspeichermaterial auf.

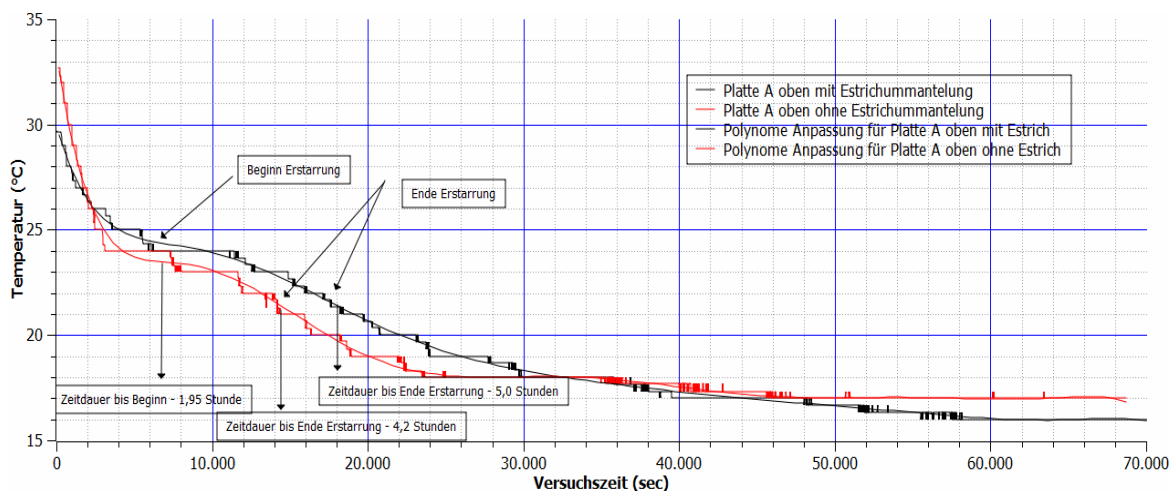
Plattenstärke	Masse PCM	Beginn des Erstarrens	Ende des Erstarrens
15 mm	1,15 kg	3,78 h	5,10 h
20 mm	1,50 kg	4,16 h	6,99 h

**Tabelle 15 Beginn und Ende Phasenwandel für unterschiedliche Plattenstärke und Masse Latentspeichermaterial**

Diesen Zustand gilt es in einer weiterführenden Arbeit näher zu untersuchen. Für die ersten Einführungen wird vorgeschlagen, sich auf Platten mit Paraffin zu konzentrieren.

#### 4. 3.4.2. Analyse Abkühlvorgang mit Estrich

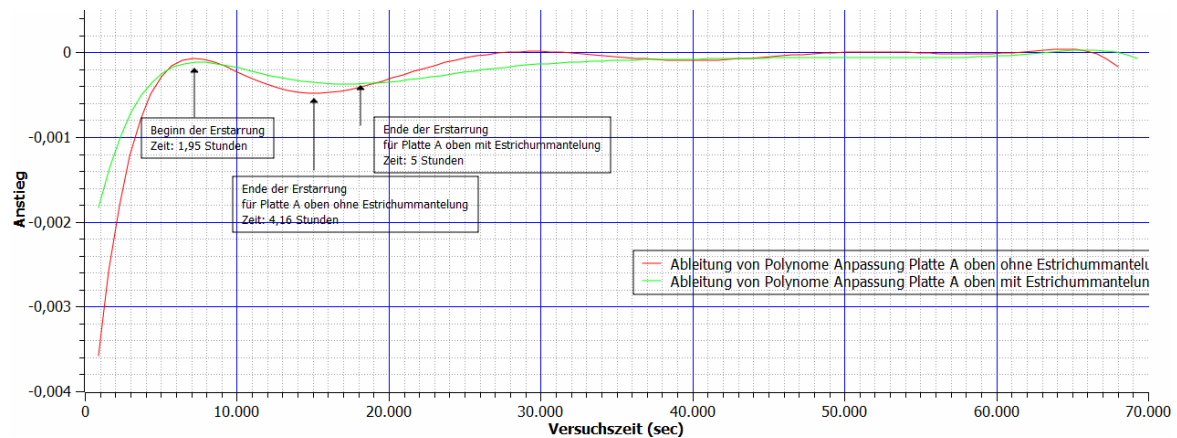
Als erstes erfolgt bei dieser Auswertung eine Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Platten mit Estrich und ohne Estrich. Stellvertretend sind die Ergebnisse für die Platte A oben dargestellt im *Diagramm 50 Temperaturverlauf mit und ohne Estrich für Platte A oben*.



**Diagramm 50 Temperaturverlauf mit und ohne Estrich für Platte A oben**

Der Einfluss des Estrichmaterials auf den Temperaturverlauf ist gegeben. Während in den ersten drei Stunden die Kurven innerhalb der Maßtoleranzen abweichen, unterscheiden sie sich im weiter deutlich. Der Beginn des Erstarrungsprozesses ist bei beiden Versuchen gleich und liegt bei 1,95 Stunden. Das Ende ist um 0,9 Stunden verschoben. Durch die thermische Ankopplung des

Estrichs an die Platte muss dieser mit abgekühlt werden. Dieser Vorgang wird ebenfalls deutlich in der 1. Ableitung der Polynome Anpassung.



**Diagramm 51 1. Ableitung der Polynome Anpassung für den Abkühlvorgang mit und ohne Estrich**

Der Temperaturverlauf der untersuchten Platten unterscheidet sich im gesamten Verlauf nur geringfügig.

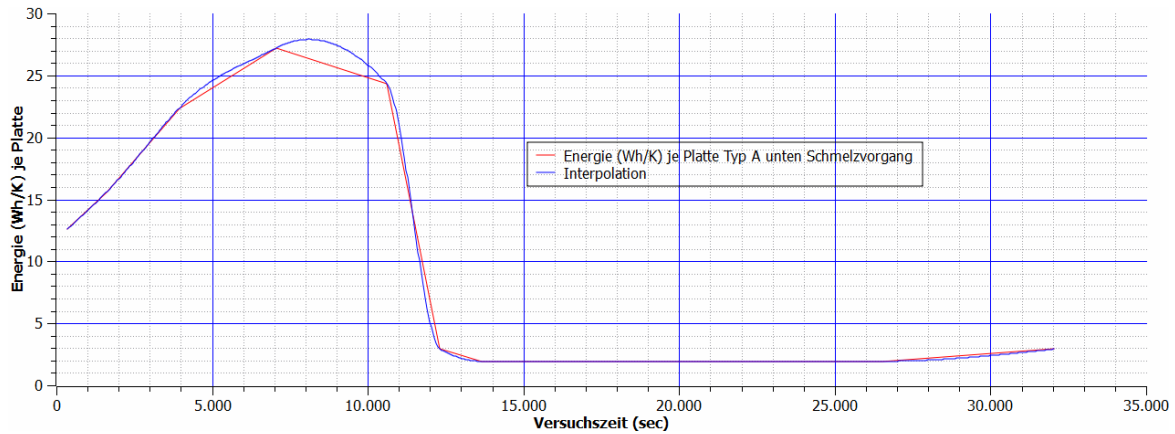
Folgende wesentliche Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Das Paraffin eignet sich wesentlich besser zum ausfüllen der Schaumhöhlräume
- Der Abkühlvorgang ist vom verwendete Latentspeichermaterial abhängig jedoch nur gering von der Plattenstärke und der Materialmenge
- Durch die thermische Ankopplung verlängert sich der Prozess um 1 Stunde.

#### 4. 3.5. Analyse der aufgenommenen und abgegebenen Energie

Ebenfalls für die Messergebnisse der 2. Versuchsreihe wurden die Schmelz- und Erstarrungsenthalpie ermittelt. Bei diesen Messungen wurde ein besonderes Augenmerk auf die unterschiedlichen Latentspeichermaterialien gelegt.

Es wird ebenfalls wieder beide Estricharten – Zement- und Anhydritestrich – untersucht. Die entsprechenden Ausgangsdaten für das Volumen entstammen der *Anlage A 5 maximal erreichbare Volumenprozente an PCM*.



**Diagramm 52 Zeitlicher Verlauf der gespeicherten Energie in der Platte A unten**

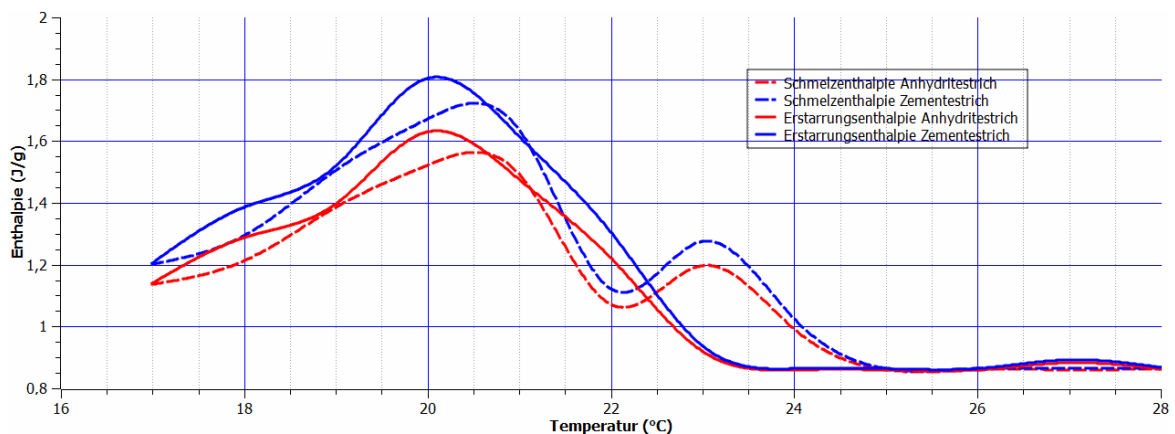
Durch Integration des Kurvenverlaufes wurden die jeweiligen gespeicherten Energien je Platte und Phasenwandel ermittelt.

Plattentyp	Schmelzvorgang (Wh/Platte)	Erstarrungsvorgang (Wh/Platte)	Temperaturbereich (°C)
Platte A unten	102,08	100,14	17 - 21
Platte A oben	38,64	36,55	20 - 24
Platte B unten	74,08	72,07	17 - 21
Platte B oben	29,62	28,02	20 - 24

**Tabelle 16 Aufgenommene und Abgegebene Energie je Platte**

Deutlich wird der Einfluss des Füllverhaltens des Latentspeichermaterials. Analog der 1. Versuchsreihe wurde ebenfalls für die Simulationsrechnung der Verlauf in Abhängigkeit von der Temperatur für alle Platten erarbeitet. Sie weisen einen analogen Verlauf auf.

Im Weiteren wurden diese Untersuchungen für die Verläufe der Platten mit Estrich durchgeführt. Entsprechend der durchgeführten Messungen wurden die Kombinationen der Platte A oben und unten untersucht. Es wurde davon ausgegangen, dass sich ein Plattenpaar auf 1 m<sup>2</sup> Fußbodenfläche befindet.



### Diagramm 53 Verlauf der Schmelz und Erstarrungsenthalpie für Kombination Platte A oben und unten

Der Verlauf weicht besonders im Schmelzvorgang – d.h. bei der Kühlung von Räumen – von den üblichen Verläufen ab. Damit ermöglicht die entwickelte Variante erstmalig auch eine Kombination von Latentspeichermaterialien mit unterschiedlichen Funktionen. Es könnten somit auch eine Platte mit einem Latentspeichermaterial für die Heizung versehen werden und eine Platte wie im vorliegenden Fall mit einem Material für die Kühlung. Damit ist ein wesentlicher Punkt für die innovative Lösung erreicht worden.

Auf der Grundlage der *Tabelle 16 Aufgenommene und Abgegebene Energie je Platte* und den Ergebnissen der vorliegenden Verläufe konnte für folgende Kombinationen folgende Enthalpie ermittelt werden

Kombination	Anhydrit-Estrich	Anhydrit-estrich	Zement-estrich	Zement-estrich	Temperaturbereich
	Aufheizvorgang (Wh/m <sup>2</sup> )	Abkühlvorgang (Wh/m <sup>2</sup> )	Aufheizvorgang (Wh/m <sup>2</sup> )	Abkühlvorgang (Wh/m <sup>2</sup> )	(°C)
1 x Platte A unten 1 x Platte A oben	308	336	353	381	17 - 24
2 x Platte A unten	287	335	318	366	17 - 21
2 x Platte A oben	195	213	226	245	20 - 24
2 x Platte A unten 2 Platte A oben	404	460	447	503	17 - 24
4 x Platte A unten	368	535	404	567	17 - 21
4 x Platte A oben	256	295	287	326	20 - 24

**Tabelle 17 Erzielbare Speichermengen in Abhängigkeit der Plattenart und Anzahl**

Zum Vergleich die gespeicherte Energie im reinen Estrich:

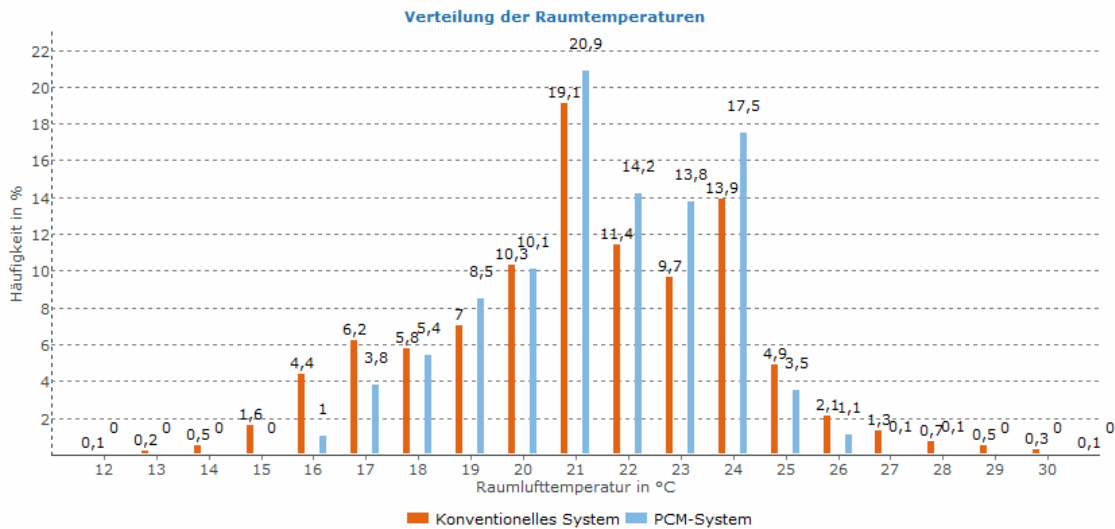
Anhydritestrich : 141 Wh/m<sup>2</sup>  
Zementestrich : 148 Wh/m<sup>2</sup>

An dieser Aufstellung wird deutlich, dass die Platten vom Typ A unten genauso viel Energie speichern wie 70 % des Estrichs. Mit diesem entwickelten System ist

es möglich in einem Raum von 20 m<sup>2</sup> im Fußboden bis zu 11,3 kWh zu speichern. Durch die unterschiedliche Materialwahl kann auch eine Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten erfolgen.

Zum Abschluss dieser Analyse wurde ebenfalls die Simulationsrechnung mit dem Programm PCM-Express durchgeführt.

Für alle oben aufgeführten Kombinationen wurden die Berechnungen durchgeführt. Das beste Ergebnis wurde mit der Kombination 2 Platten A unten und 2 Platten A oben erreicht.



**Diagramm 54 Verteilung der Raumtemperatur mit der Kombination 2 Platte A unten + 2 Platte A oben**

Zum Vergleich mit der *Tabelle 11 Vergleich der Verbesserung der Behaglichkeit im Versuchsraum durch Einsatz von PCM* ergaben sich für die Kombination folgende Werte:

Variante	Stunden innerhalb Raumtemperatur (21 – 26 °C)	Stunden über 26 °C
Kombination 2 Platte A unten 2 Platte A oben	6220 Stunden	18 Stunden

Die anderen Kombinationen lagen zwischen dem besten Ergebnis mit der Versuchsreihe 1 und dem hier dargestellten Ergebnis. Auch dieses Ergebnis ist entsprechend der Zielvorgabe sehr gut.

## 4. 3.6. Zusammenfassung der Auswertung der 2. Versuchsreihe

Folgende zusammenfassende Punkte können angeführt werden:

- Durch den Einsatz des Paraffins RT 18/20 konnte eine bedeutend größere Energie in einer dünneren Platte gespeichert werden.
- Durch Kombination von Platten mit unterschiedlichem Latentmaterial sind verschiedene Anwendungen mit einem Fußbodenaufbau realisierbar.
- Es konnte eine weitere Verbesserung der Qualität der Raumtemperatur im Versuchsraum erreicht werden.
- Die Speicherkapazität einer Platte entspricht 70 % der Kapazität von 1 m<sup>2</sup> Estrich.
- Mit der entwickelten Konstruktion können durch die Kombination auch größere Temperaturbereiche für die latente Speicherung abgedeckt werden.

## 5. Simulation der Speicherplatte

### 5. 1. Berechnungsprogramm „Wärmespeicher mit mediendurchströmten Festkörpern und Adaption für die vorliegenden Messungen

Um für die weiteren Arbeiten ein geeignetes Simulationsprogramm nutzen zu können wurde im Rahmen der weiteren Auswertung der Messergebnisse der 2. Versuchsreihe das Softwareprogramm

**„Wärmespeicher mit mediendurchströmten Festkörper“  
von Prof. Dr. Ing. habil. B. Glück  
[GLÜ07]**

das in Zusammenarbeit mit ...

im Rahmen der Forschung erarbeitete wurde.

Dieses Berechnungsprogramm ist geeignet für Simulationsberechnungen an thermisch aktiven Bauteilen – Speicherplatte bei instationärem Betrieb durchzuführen. Es gibt in diesem Programm drei wesentliche Eingabemasken:

- Hauptmaske für den Fußbodenaufbau
- Maske für die Daten der Speicherschicht – thermisch aktiv
- Maske für den zeitlichen Verlauf (Medien und Umgebungstemperaturen)

Um einen Überblick zu erhalten, ist nachfolgend die Hauptmaske abgebildet.

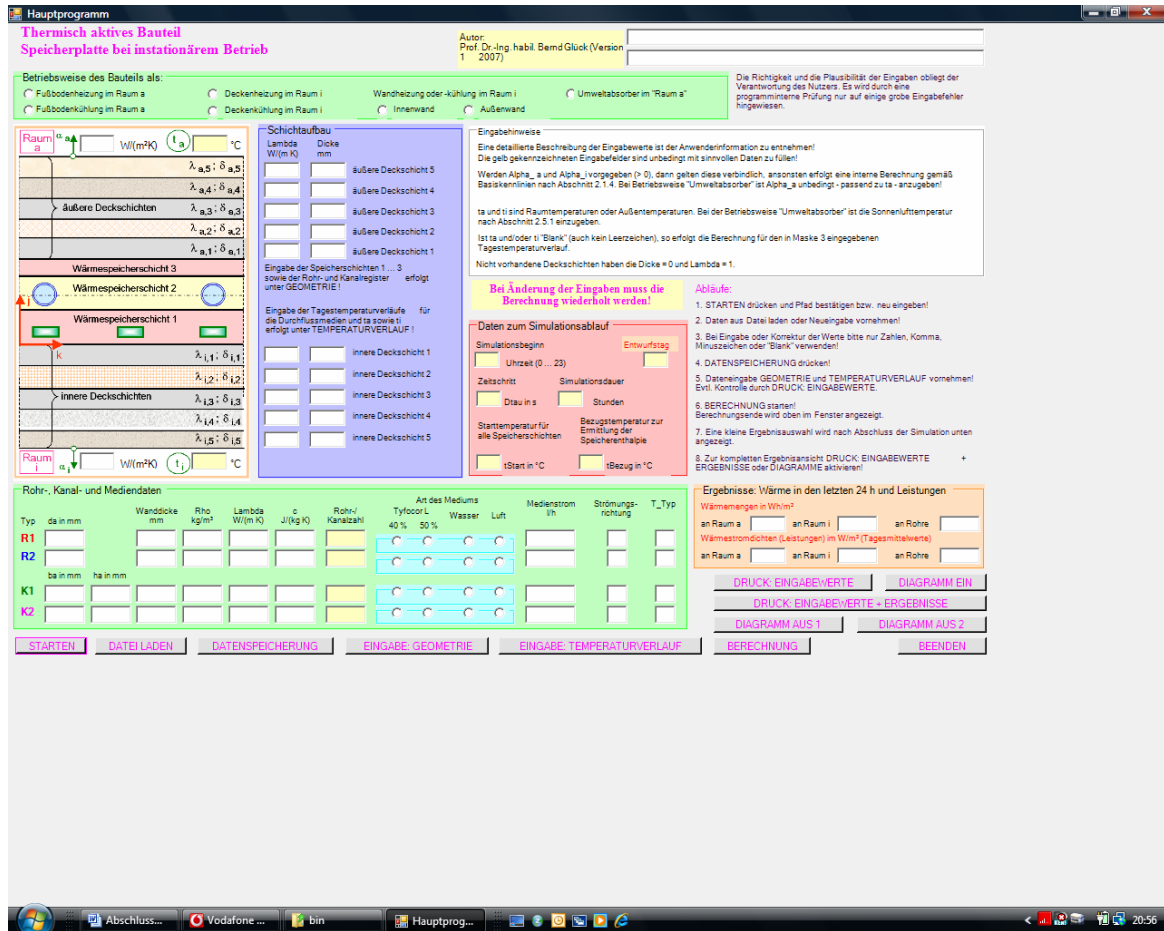


Abbildung 24 Hauptmaske des Simulationsprogrammes

Die Hauptmaske und auch die Maske für den zeitlichen Verlauf der Medien sind bei der Handhabung unproblematisch.

In der Maske für die Speicherschicht müssen neben den Koordinaten und Gitternetzlinien, die Lage der Rohre und der Kontrollelemente sowie die thermischen und andere physikalische Daten der Speicherschicht angegeben werden.

Neben den physikalische Daten der Speicherschicht :

- Dichte
- Dicke
- Gitterraster über die Höhe

sind folgende thermische Daten der Speicherschicht erforderlich:

- Temperaturbereich des Phasenwandels
- Schmelzenthalpie
- Wärmeleitkoeffizient für fest und flüssig
- Spezifische Wärmekapazität für fest und flüssig.



Besonders die beiden unteren notwendigen Daten erwiesen sich als nur eingeschränkt ermittelbar.

Der Wärmeleitkoeffizient für den flüssigen und festen Phasenzustand wurde aus den Versuchen Nr.4 und 6 der 2. Versuchsreihe stellvertretend für die Platte A unten aus der Temperaturdifferenz zwischen den Messstellen Platte unten und Platte oben ermittelt.

Auf Grund der Temperaturmessungen mit 1 Grad Genauigkeit führt dies bei der Berechnung des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten  $\lambda$  schnell zu größeren Abweichungen. Für unseren Fall wurden folgende Werte ermittelt:

Flüssig  $\lambda = 0,66 \text{ W/mK}$

Fest  $\lambda = 1,56 \text{ W/mK}$

Diese Werte sind in weiterführenden genaueren Messungen noch einmal zu ermitteln.

Für das Paraffin RT 18/20 wird im angenommenen Bereich von 16 °C bis 23 °C durch den Hersteller eine Schmelzenthalpie von 112 kJ/kg angegeben. (s.7.10)

Die spezifische Wärmekapazität für die feste Phase wurde für die Platte generisch aus den vorliegenden Messdaten ermittelt. Es ergab sich ein Wert von 4048 J/kgK.

Für die flüssige Phase wurde der Wert des Paraffins angenommen. Er stammt ebenfalls vom Hersteller. Im Rahmen der nachfolgenden Messungen sind diese Werte messtechnisch noch einmal zu untersetzen.

## 5. 2. Simulationsrechnung und Vergleich mit Messergebnissen

Die Simulationsrechnung wurde unter folgenden Temperaturen durchgeführt:

- die gesamte Speicherschicht hat am Beginn 30 °C
- das Medium wird zu Start mit 15 °C betrieben
- die Temperaturen in der Umgebung sind 20°C (Versuchshalle)
- die Speicherschicht ist von 20 mm Estrich umgeben
- der Probekörper aus Speicher und Estrich ist von 60 mm Wärmedämmung umgeben

Folgende Kontrollelement wurden angelegt:

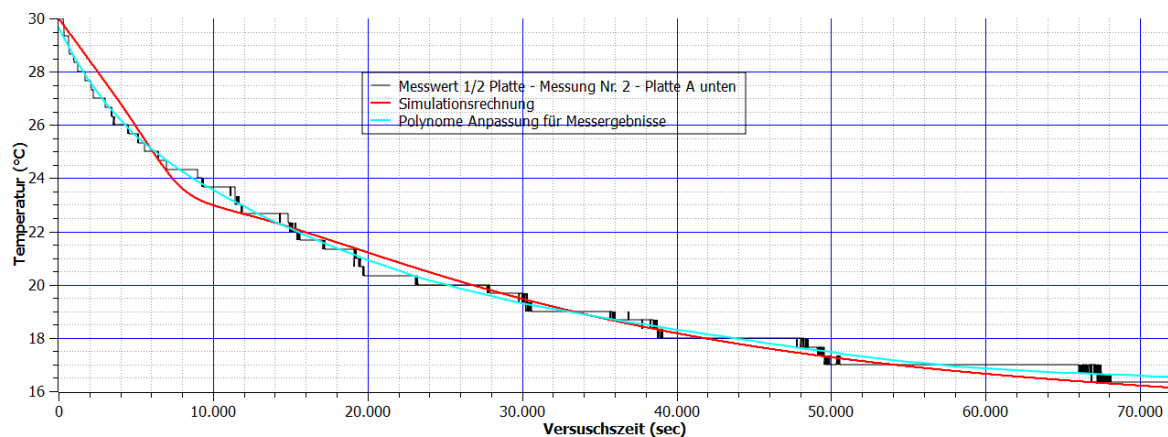
- E1 – am Rohr 1 anliegend
- E2 – zwischen 2 Rohren auf Rohrmitte
- E3 – zwischen 2 Rohren am Boden der Speicherschicht
- E4 – zwischen 2 Rohren an der Oberseite der Speicherschicht

Die Ergebnisse der Simulationsrechnung sind in der *Anlage A11 Ergebnisse Simulationsrechnung* enthalten. Nachfolgend die wichtigsten:

Stunden		Element E1		Element E2		Element E3		Element E4	
BS	TZ	t	Phase	t	Phase	t	Phase	t	Phase
		°C	-	°C	-	°C	-	°C	-
1	1	15,0	0,000	27,1	1,000	27,2	1,000	27,2	1,000
2	2	15,0	0,000	24,1	1,000	24,2	1,000	24,2	1,000
3	3	15,0	0,000	22,8	0,978	22,9	0,986	22,9	0,986
4	4	15,0	0,000	22,3	0,894	22,3	0,906	22,3	0,906
5	5	15,0	0,000	21,6	0,799	21,7	0,808	21,7	0,808
6	6	15,0	0,000	20,9	0,701	21,0	0,708	21,0	0,708
7	7	15,0	0,000	20,3	0,608	20,3	0,614	20,3	0,614
8	8	15,0	0,000	19,7	0,523	19,7	0,528	19,7	0,528
9	9	15,0	0,000	19,1	0,446	19,2	0,450	19,2	0,450
10	10	15,0	0,000	18,6	0,378	18,7	0,382	18,7	0,382
11	11	15,0	0,000	18,2	0,317	18,3	0,322	18,3	0,321
12	12	15,0	0,000	17,9	0,265	17,9	0,269	17,9	0,269
13	13	15,0	0,000	17,5	0,218	17,6	0,222	17,6	0,222
14	14	15,0	0,000	17,2	0,178	17,3	0,182	17,3	0,182
15	15	15,0	0,000	17,0	0,143	17,0	0,146	17,0	0,146
16	16	15,0	0,000	16,8	0,112	16,8	0,115	16,8	0,115
17	17	15,0	0,000	16,6	0,085	16,6	0,088	16,6	0,088
18	18	15,0	0,000	16,4	0,061	16,4	0,064	16,4	0,064
19	19	15,0	0,000	16,3	0,039	16,3	0,043	16,3	0,043
20	20	15,0	0,000	16,1	0,019	16,2	0,022	16,2	0,022

### Tabelle 18 Auszug aus den Ergebnissen der Simulation

Diese Ergebnisse wurden den Messungen gegenübergestellt. Es wurden die Daten von Simulationspunkt E2 mit den Messwerten Platte A unten Mitte der Messung 2 verglichen.



### Diagramm 55 Vergleich Simulation mit Messwerten

Die gefundenen Messergebnisse und die Simulationsrechnung stimmen im Zeitintervall von 3,5 – 20 Stunden sehr gut überein. Im Anfangsbereich (0 – 3,5 Stunden) kommt es zu Abweichungen. Die Ursachen sind:

- Ungenaue thermische Daten für die Platte infolge der eingesetzten Messtechnik
- In der ersten Stunde stimmt der Temperaturverlauf des Mediums zwischen Simulation und Messung nicht überein (Simulation ist benötigt eine Zeit zum Erreichen der Solltemperatur)

Trotzdem kann die Annahme, dass mit diesem Programm die vorhandenen Speicherplatten ausreichend genau simuliert werden können, bestätigt werden. In einem weiteren Schritt wurde die Speicherschicht mit einem realen Fußbodenaufbau sowie einem realen Temperaturverlauf im Raum kombiniert und eine Simulation über 24 Stunden durchgeführt. Das Ergebnisprotokoll ist in der *Anlage A12 Ergebnisse Simulation Raum* enthalten. Es hat den gleichen Aufbau wie das von der Speicherschicht. Nachfolgend die wichtigsten Ergebnisse:

Simulationsergebnisse für den Zeitraum der letzten 24 Stunden bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Speicherplatte:

Wärme an die äußere Umgebung: -840,1 Wh/m<sup>2</sup>  
 Wärme an die innere Umgebung: -50,1 Wh/m<sup>2</sup>

Mittlere Leistung an die äußere Umgebung: -35,0 W/m<sup>2</sup>  
 Mittlere Leistung an die innere Umgebung: -2,1 W/m<sup>2</sup>

Unter der äußeren Umgebung ist der betrachtete Raum zu verstehen. Die innere Umgebung bezieht sich auf den Raum in der Etage tiefer. Damit kann über dieses Programm eine ordnungsgemäße Dimensionierung der notwendigen Anzahl an Speicherelementen erfolgen. Die nicht belegten Flächen sind nach gültiger technischer Regel aus zu legen.

## 6. Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden viele Wegabschnitte beschritten, um das gesteckte Ziel zu erreichen. Mehrere Wege führten zu unbefriedigende Lösungen, wie die ursprünglich geplante Beimischung des Latentmaterials zum Estrich. Erst die intensive Beschäftigung mit dem Fußbodenaufbau und den maximal erreichbaren Volumenprozenten führte zu der Lösung des Einbringens mit Hilfe von Speicherplatten. Auch die anfänglich auf diesem Weg angedachte Rondenlösung war keine Lösung für den Praxiseinsatz. Jedoch die kontinuierliche Weiterentwicklung dieses Weges führte zu einer praktikablen und ökonomisch vertretbaren Lösung. Diese vielen Abschnitte waren ein Hauptgrund für die lange Bearbeitungszeit des Forschungsvorhabens.

Die Entwicklung einer Speicherplatte, bestehend aus einer Blechhülle mit Sicken für die Heizungsrohre, gefüllt mit Metallschaum und Latentspeichermaterial, erwies sich als erfolgversprechend. Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe (Heizen – Kühlen – Heizen) wurden dieser Speicher in unterschiedlichen Höhen, mit verschiedenen Schäumen und dem Latentspeichermaterial Micronal 23 untersucht.

Folgende Ergebnisse wurden dabei gewonnen:

- durch die gewählte Plattenkonstruktion wurde ein für die Baustelle leicht handhabbares Element entworfen
- Der große Nachteil der Festigkeit konnte damit beseitigt werden. Die Kombination von Schutzhülle und Schaum weist eine höhere Festigkeit als der Estrich auf.
- Die Simulationswerte für die Raumtemperatur im Versuchsraum sind besser als mit Smartboard (das Beste bisher auf dem Markt vorhandenen Material)
- Der reine Metallschaum erbringt bessere Werte als der Pur-Schaum bzw. der untersuchte preisgünstige Graphitschaum Lupo.

Die Messungen haben aber auch folgende Schwachstellen aufgezeigt:

- Schlechte thermische Anbindung des Rohres an die Platten
- Schwankende Anbindung des Schaums an die Platte
- Nach Berechnung des freien Volumens sind nicht alle Freiräume mit Micronal 23 gefüllt sind

Auf dieser Grundlage wurde die Plattenkonstruktion weiterentwickelt. Im Rahmen einer 2.Versuchsreihe wurden 2 Platten miteinander verbunden, um die thermische Anbindung der Rohre zu erhöhen. Gleichzeitig wurde die Plattenhöhe und das Latentmaterial variiert. Als Schaum wurde in Auswertung der 1.Versuchsreihe nur Metallschaum verwendet. Die Anbindung des Schaums wurde ebenfalls wesentlich verbessert. Des Weiteren wurden diese Platten im Verlauf der Messreihe mit Estrich ummantelt. Das verwendete

Simulationsprogramm untersucht eine Speicherplatte von diesem Aufbau. Mit den gewonnenen Messungen erfolgte die Validierung des Simulationsprogrammes. Folgende Ergebnisse für die 2. Versuchsreihe konnten gewonnen werden:

- Durch den Einsatz des Paraffins RT 18/20 konnte eine bedeutend größere Energie in einer dünneren Platte gespeichert werden.
- Durch Kombination von Platten mit unterschiedlichem Latentmaterial sind verschiedene Anwendungen mit einem Fußbodenaufbau realisierbar.
- Es konnte eine weitere Verbesserung der Qualität der Raumtemperatur im Versuchsraum erreicht werden.
- Die Speicherkapazität einer Platte entspricht 70 % der Kapazität von 1 m<sup>2</sup> Estrich.
- Mit der entwickelten Konstruktion können durch die Kombination auch größere Temperaturbereiche für die latente Speicherung abgedeckt werden.

Die Zielstellungen des Forschungsvorhabens (s. 2. Zielsetzung des Projektes) werden nach Abschluss der Arbeiten wie folgt eingeschätzt:

Zielstellung	Einschätzung
Hohe Tragfähigkeit	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Höher als Estrichtragfähigkeit</li> </ul>
Lange Speicherfähigkeit	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auf- u. Entladungsprozess bis zu 8 Stunden</li> <li>▪ Steuerbar durch Materialwahl</li> </ul>
Gleichmäßige Temperaturverteilung	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Innerhalb der Speicherplatte nur geringe Unterschiede durch Metallschaum</li> </ul>
Hohe energetische Effizienz	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine Platte erreicht bei einer Abmessung von 0,5 m x 0,5 m 0,02 m eine Speicherfähigkeit bis zu 70 % der im Estrich gespeicherten Energie</li> </ul>
Gute Brandschutzeigenschaften	wurde nicht untersucht wird aber durch Metallkassette wesentlich verbessert gegenüber der Beimischung zum Estrich
Toxikologische Unbedenklichkeit	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch Hersteller bestätigt</li> </ul>
Phasenwechsel zwischen 16-19 °C	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Temperaturspreizung ist bei Kombinationen der Platten im Bereich von 17 – 24 °C erreichbar</li> <li>▪ Es sind auch alle anderen Kombinationen denkbar. Z.B. ein Latentspeichermaterial für Kühlen</li> </ul>

	und ein Weiteres für den Heizfall
Vollständige Einbettung des Speichermediums	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch die Konstruktive Lösung ist Speicherplatte komplett im Estrich eingebettet</li> </ul>
Effiziente Wärme- und Kälteübertragung	Erfüllt <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Totzeiten bis zum Beginn des Phasenwandels konnten im Rahmen der Forschung deutlich verkürzt werden.</li> <li>▪ Durch die Kombination der Platten in Dicke und Inhalt können unterschiedliche Lastspitzen abgedeckt werden</li> </ul>

**Tabelle 19 Einschätzung der Erfüllung der Zielstellung**

Zu dem letzten Anstrich kann folgendes ergänzt werden. Durch einen Fehler in der Temperatursteuerung bei einem Versuch ziemlich zum Ende kam es zu einer Erhöhung der Vorlauftemperatur der Kapillarrohrmatten. Dabei konnte beobachtet werden, dass sich die obere Platte entlädt, während die untere in der Phase ihre Energie behalten hat. Erst nach dem die obere Platte komplett entladen war und die Fußbodenkühlung nicht ausreichte, begann die untere Platte ihre Energie ab zu geben. Dieser Vorgang sollten bei der Fortführung der Arbeit näher untersucht werden.

Durch die geschickte Kombination von unterschiedlichen Materialien in Kombination mit einer anders gearteten Heiz- und Kühltechnik kann ein System entwickelt werden, was Lastspitzen aktiv begegnet und das seine Aktivitäten geregelt ablaufen lässt.

Bei der Auswertung der gespeicherten Energiemengen konnten Ergebnisse ermittelt werden, die deutlich über den bisher üblichen am Markt vorhandenen Produkten liegen. Bei einer Anordnung von 4 Platten auf einen 1 m<sup>2</sup> Fußbodenfläche kann bis zum 4-fach an Energie gespeichert werden gegenüber dem normalen Estrich. Mit diesem System können bei einem 20 m<sup>2</sup> großen Raum mehr als 11 kWh gespeichert werden. Es wurde eine weitere Verbesserung der Bewertung der Raumtemperatur im Simulationsraum erreicht.

Die Ergebnisse der Berechnungen mit Hilfe des Simulationsprogramms konnten durch die Messungen validiert werden. Hier gilt es jedoch kritisch zu bemerken, dass die notwendigen thermischen Eigenschaften der Platten mit Hilfe höherwertiger Messtechnik noch exakter zu bestimmen sind. Dies sollte in den fortführenden Arbeiten erfolgen. Auf der Grundlage der verwendeten Simulationsprogramme können die Auslegungen für die einzelnen Anwendungsfälle erfolgen.

## Literaturverzeichnis

- [BAS10] BASF: *Technische Daten für Micronal*  
[http://worldaccount.basf.com/wa/EU~de\\_DE/Catalog/ACIndustry/pi/BASF/segment/new\\_building\\_materials](http://worldaccount.basf.com/wa/EU~de_DE/Catalog/ACIndustry/pi/BASF/segment/new_building_materials)
- [EHT07] EHT SIEGMUND GMBH: *Preisliste 2007/2008 interLINE, proVENT, proKLIMA, proSOL*  
2007
- [EHT10] EHT SIEGMUND GMBH: *Preisliste 2010/2011 proKLIMA, proVENT, proOXION*  
2010
- [GIR05] GIRLICH, D.; HACKESCHMIDT, K.; KHELIFA, N.: *Verbesserung der nutzbaren Wärmeleitung in Latentspeichern durch offenporige Metallschäume*  
[http://www.m-pore.de/Download/Veroeffentlichung\\_KI.pdf](http://www.m-pore.de/Download/Veroeffentlichung_KI.pdf)  
2005
- [GLÜ07] GLÜCK, B.: *Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper Kurzbericht*  
2007  
<http://berndglueck.de/waermespeicher.php>
- [KNÖ08] KNÖRNSCHILD, B.: *Phase Change Materials [PCM]*  
[www.ac2.uni-bayreuth.de/.../hs/.../ss08b-22-knoernschild.ppt](http://www.ac2.uni-bayreuth.de/.../hs/.../ss08b-22-knoernschild.ppt)  
Vortrag 24.06.2008
- [SCH08] SCHMIDT: *Temperaturmanagement in seiner leichtesten Form – Micronal PCM der BASF, 08/2008 - BASF*
- [VAL08] DR.VALENTIN ENERGIESOFTWARE GMBH: *Planungs- und Simulationsprogramm für den Einsatz von Phasenwechselmaterial (PCM) – PCM Express 1.0*  
[http://www.valentin.de/index\\_de\\_page=pcm\\_express](http://www.valentin.de/index_de_page=pcm_express)  
2008
- [WIN08] WINKLER, Ch.: *Sommerkomfort im Büro und Verwaltungsbau*  
[www.ace.at/publikationen/zeitun/2008-02/01.php](http://www.ace.at/publikationen/zeitun/2008-02/01.php)
- [ZOE08] ZOELLER, A.; SCHOSSIG, P.; HAUSMANN, T.: *Wassergestützte Latentwärmespeicher in Putz- und Dünnbettestrichsystemen*  
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben; Projektpartner:  
Maxit Deutschland GmbH;  
Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme  
Badenova 2008

## **7. Anlagen**

### **7.1. Anlage A1 Prüfbericht**




**Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied**

 Forschungsinstitut für vulkanische Baustoffe GmbH  
 Sandkauler Weg 1, 53634 Neuwied

 Baustoffprüfanstalt mit P. A. für Beton-,  
 und Zementmörtel  
 Chemisches Untersuchungsamt nach DIN 1160,  
 58-tägige Feuchtigkeitsbestimmung  
 Prüfanstalt anerkannt nach RAB 90  
 (entsprechend DIN EN 12601)

## Prüfbericht

(1. Ausfertigung)

 Prüfzeichen: **53/0027/07**

 Auftraggeber: **ibb  
 Modul Air KG  
 Heideweg 28  
 53604 Bad Honnef**

 Gegenstand des Antrags: **Versuche zur Einbringung von Additiven in Zement-  
 Estrichmischungen**

 Prüfmaterial: **Wässrige Paraffin-Suspension (Additiv)  
 Feststoffanteil (lt. Angabe) 42 %**

 Probenkennzeichnung: **ohne**

 Datum des Antrages: **04.01.2007**

 Probenherstellung am: **19.01.2007**

 Datum der Ausfertigung: **08.03.2007**

 Textseiten: **8**

 Anlagen: **--**


Die Prüfungsergebnisse sind nur für den Auftraggeber gültig. Die Unterlagen dürfen nicht weitergegeben werden, wenn hier keine anderweitigen Anweisungen getroffen werden. Die Anforderungen der  
 gültigen Richtlinien. Die Wiederholbarkeit der Prüfungen ist durch die Prüfanforderungen des Auftraggebers zu gewährleisten.

Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied

Telefon: 02201 1233-0 Fax: 02201 1233-40  
 E-Mail: info@mpva.de

53634 Neuwied, Tel. 02201 1233-0 Fax 02201 1233-40  
 Bankverbindung: Sparkasse Rheinland (BLZ 38 60 123) Kto. 11607

Geschäftsbereich Neuwied  
 Bad Honnef, Heideweg, 53604

## **0 INHALTSVERZEICHNIS**

1	AUFTRAGSGEGENSTAND.....	2
2	DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE.....	3
2.1	Ausgangsstoffe / Estrichzusammensetzung.....	3
2.2	Herstellung der Estrichmischungen.....	3
2.3	Festmörteluntersuchungen - Biegezug- und Druckfestigkeit.....	6
3	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	8

## **1 AUFTRAGSGEGENSTAND**

Mit Datum vom 04. Januar 2007 wurde die MPVA Neuwied von der IBB Modul Air KG, Heideweg 28 in 53604 Bad Honnef - vertreten durch Herrn Grafe - beauftragt, Estrichversuchsmischungen unter Verwendung einer wässrigen Paraffin-Suspension durchzuführen. Es sollten Estrichmischungen ohne und mit Zusatz einer wässrigen Paraffin-Suspension (nachfolgend Additiv genannt) hergestellt werden. Aus den Mischungen sollten anschließend Probekörper für die spätere Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit hergestellt werden.



## 2 DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

### 2.1 Ausgangsstoffe / Estrichzusammensetzung

Als Ausgangsstoffe zur Herstellung der Estrichmischungen wurden Quarzsand (CEM-Normersand) nach DIN EN 196-1, Portlandzement (CEM I 42,5 N) sowie Leitungswasser verwendet.

Für die Vergleichsmischung wurde eine handelsübliche Zusammensetzung gewählt. Die Ausgangsmischung sollte bzgl. der Druckfestigkeit die Anforderungen an einen GT 20 gemäß DIN EN 13813 „Estrichmörtel und Estrichmassen“, Ausgabe Januar 2005 erfüllen. Die Rezeptur ist in Tabelle 1 genannt.

Für die Prüfmischungen sollten bei Verwendung sonst gleicher Ausgangsstoffe bestimmte Anteile des Additives zugegeben werden. Der Feststoffmaterialanteil an Paraffin beträgt angabegemäß 42 Masseprozent. Die Rezepturen sind in den Tabellen 2 und 3 aufgeführt.

### 2.2 Herstellung der Estrichmischungen

Die Herstellung der Estrichmischungen erfolgte in einem Mörtelmischer nach EN 196-1. Sämtliche Feststoffe wurden dafür vorab in den Mischer gegeben. Die Zugabe der Wassermenge bzw. der Menge an Additiv erfolgte innerhalb der ersten 15 sec., wobei der Mischer mit niedriger Geschwindigkeit lief. Das Mischen wurde weitere 45 sec. fortgesetzt. Anschließend wurde weitere 60 sec. mit hoher Geschwindigkeit gemischt.

Zum Erreichen der erforderlichen Verarbeitbarkeit wurde eine Wassermenge (Ausgangsmischung) dosiert, die einen Estrich erdfeuchter Konsistenz ergab.

Bei Herstellung der beiden Prüfmischungen 1 bzw. 2 unter Verwendung des Additives wurde die verflüssigende Wirkung berücksichtigt und der Anteil des Zugabewassers entsprechend reduziert. Bei der Herstellung wurden die Frischmörtelröhrichtigkeiten ermittelt. Die Werte sind in den Tabellen 1 bis 3 angegeben.

Die Herstellung aller Estrichmischungen erfolgte am 19.01.2007.



**Tabelle 1: Estrichzusammensetzung und Frischmörtelkennwerte  
(Vergleichsmischung)**

Ausgangsstoff	Menge (pro m <sup>3</sup> )
Zement (CEM I 42,5 N Dyckerhoff)	310 kg
Quarzsand (CEN Normensand)	1550 kg
Leitungswasser	160 kg
Frischmörtelrohddichte	2016 kg

**Tabelle 2: Estrichzusammensetzung und  
Frischmörtelkennwerte (Prüfmischung 1)**

Ausgangsstoff	Menge (pro m <sup>3</sup> )
Zement (CEM I 42,5 N Dyckerhoff)	287 kg
Quarzsand (CEN Normensand)	1430 kg
Additiv (gesamt)	205 g
Materialanteil Feststoff	85 kg
Additiv (gesamt)	10,4 Masse-%
Materialanteil Feststoff (bez. auf 1000 dm <sup>3</sup> verdichteten Estrichs)	4,4 Masse-%
Leitungswasser	47 kg
Frischmörtelrohddichte	1969 kg



**Tabelle 3: Estrichzusammensetzung und  
Frischmörtelkennwerte (Prüfmischung 2\*)**

Ausgangsstoff	Menge (pro m <sup>3</sup> )
Zement (CEM I 42,5 N Dyckerhoff)	200 kg
Quarzsand (CEN Normensand)	998 kg
Additiv (gesamt)	475 kg
Materialanteil Feststoff	200 kg
Additiv (gesamt)	28,5 Masse-%
Materialanteil Feststoff (bez. auf 1000 dm <sup>3</sup> verdichteten Estrichs)	12,0 Masse-%*
Leitungswasser	0 kg
Frischmörtelrohichte	1661 kg

\*Aufgrund des beabsichtigt hohen Zugabeanteiles an Additiv, war eine zusätzliche Zugabe von Leitungswasser nicht erforderlich. Der angemischte, frische Estrichmörtel war sehr unbeweglich zäh und pastös. In derartiger Konsistenz ist eine Estrichmasse nicht verarbeitbar bzw. kann erfahrungsgemäß keine manuelle Einbringung erfolgen.



## 2.2 Festmörteluntersuchungen - Biegezug- und Druckfestigkeit

Für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit wurden drei Prismen mit den Abmessungen 160 mm x 40 mm x 40 mm gemäß *DIN 18 555* hergestellt. Die Lagerung der Prismen sowie die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit im Prüfalalter von 7 bzw. 28 Tagen erfolgte nach *DIN 18555-3*. Die ermittelten Prüfungsergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 4 den Anforderungen der *DIN EN 13813* zementgebundener Estrichmassen bzw. Estrichmörtel C20 gegenübergestellt.

**Tabelle 4: Biegezug- und Druckfestigkeiten (Vergleichsmischung)**

Probe	Abmessungen [mm]			Gewicht [g]	Festmörtel- rohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Biegezug- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Länge	Breite	Höhe					
1*	160,2	40,1	40,0	508,4	1,98	2,8	10,3	10,9
2	160,0	39,9	40,0	502,8	1,97	4,1	22,4	24,9
3	159,9	40,0	40,0	507,0	1,98	4,8	26,3	24,0
Mittelwerte					—	—	—	
Anforderungen nach DIN EN 13813 für C20 (Attributprüfung - Einzelwert) (bei Prüfalalter 28 Tage)					—	—	≥ 20	

\* Prüfalalter 7 Tage



**Tabelle 5: Biegezug- und Druckfestigkeiten (Prüfmischung 1)**

Probe	Abmessungen [mm]			Gewicht [g]	Festmörtel- rohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Biegezug- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe				[N/mm <sup>2</sup> ]	
1*	159,7	39,9	40,0	496,2	1,95	2,1	7,3	6,4
2	159,6	39,9	40,0	498,7	1,96	4,5	18,0	17,7
3	159,5	39,9	39,9	482,8	1,90	3,9	16,3	16,8
Mittelwerte					--	--	--	
Anforderungen nach DIN EN 13813 für C20 (Attributprüfung Einzelwert) (bei Prüfaller 28 Tage)					--	--	≥ 20	

\* Prüfaller 7 Tage

**Tabelle 6: Biegezug- und Druckfestigkeiten (Prüfmischung 2)**

Probe	Abmessungen [mm]			Gewicht [g]	Festmörtel- rohddichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Biegezug- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit	
	Länge	Breite	Höhe				[N/mm <sup>2</sup> ]	
1*	159,6	40,6	40,0	425,3	1,64	0,6	1,1	1,1
2	159,7	40,5	39,7	382,2	1,50	2,6	6,6	6,4
**	-	-	-	-	-	-	-	-
Mittelwerte					--	--	--	
Anforderungen nach DIN EN 13813 für C20 (Attributprüfung Einzelwert) (bei Prüfaller 28 Tage)					--	--	≥ 20	

\* Prüfaller 7 Tage

 \*\* Aufgrund des geringen Volumens der Mischung wurden nur zwei  
hergestellt.


### 3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Mit Datum vom 04. Januar 2007 wurde die MPVA Neuwied von der Ibb Modul Air KG, Heideweg 28 in 53604 Bad Honnef - vertreten durch Herrn Grafe - beauftragt, Estrichversuchsmischungen unter Verwendung einer wässrigen Paraffin-Suspension (Additiv) durchzuführen. Es sollten Estrichmischungen ohne und mit Zusatz des Additives hergestellt werden. Aus den Mischungen sollten anschließend Probekörper für vergleichende Bestimmungen der Biegezug- und Druckfestigkeit hergestellt werden.

Bei der Erstellung der Prüfmischungen war beabsichtigt möglichst hohe massebezogene Anteile des flüssigen Additives (wässrige Paraffin-Suspension) in Estrichmasse üblicher Zusammensetzung einzubringen.

Im vorliegenden Fall war dafür die Zugabe erheblicher Volumenteile bezogen auf das Gesamtvolumen der Estrichmasse erforderlich. Andere beinhaltete Ausgangsstoffe wurden dabei zwangsläufig verdrängt, was zu erheblichen Verschiebungen der Stoffanteile führt. Die beabsichtigte Einbringung sehr hoher Anteile (Prüfmischung 2) des verwendeten Additives führte gleichzeitig zu einem zähen, nicht verarbeitbarem Gemenge.

Die Versuchsreihen ergaben folgende Ergebnisse:

1. Die Festigkeiten der beiden Prüfmischungen mit Additiv liegen unterhalb der Werte der Vergleichsmischung
2. Die Druckfestigkeit der Prüfmischungen 1 und 2 erreichten nicht die erforderlichen Werte an einen Zementestrich der Druckfestigkeitsklasse C 20
3. Bei Einsatz hoher Zugabemengen an Additiv ergibt sich keine verarbeitbare Estrichmischung

Wir empfehlen weitere Testversuche mit modifizierten Suspensionen (evtl. mit höheren Feststoffanteilen) durchzuführen, um bei hohen Zugabemengen die Verarbeitungseigenschaften und die Biegezug- bzw. Druckfestigkeitswerte möglichst zielgenau einzustellen.

Neuwied, 08. März 2007

Sachbearbeiter

(Matthias Hörter)



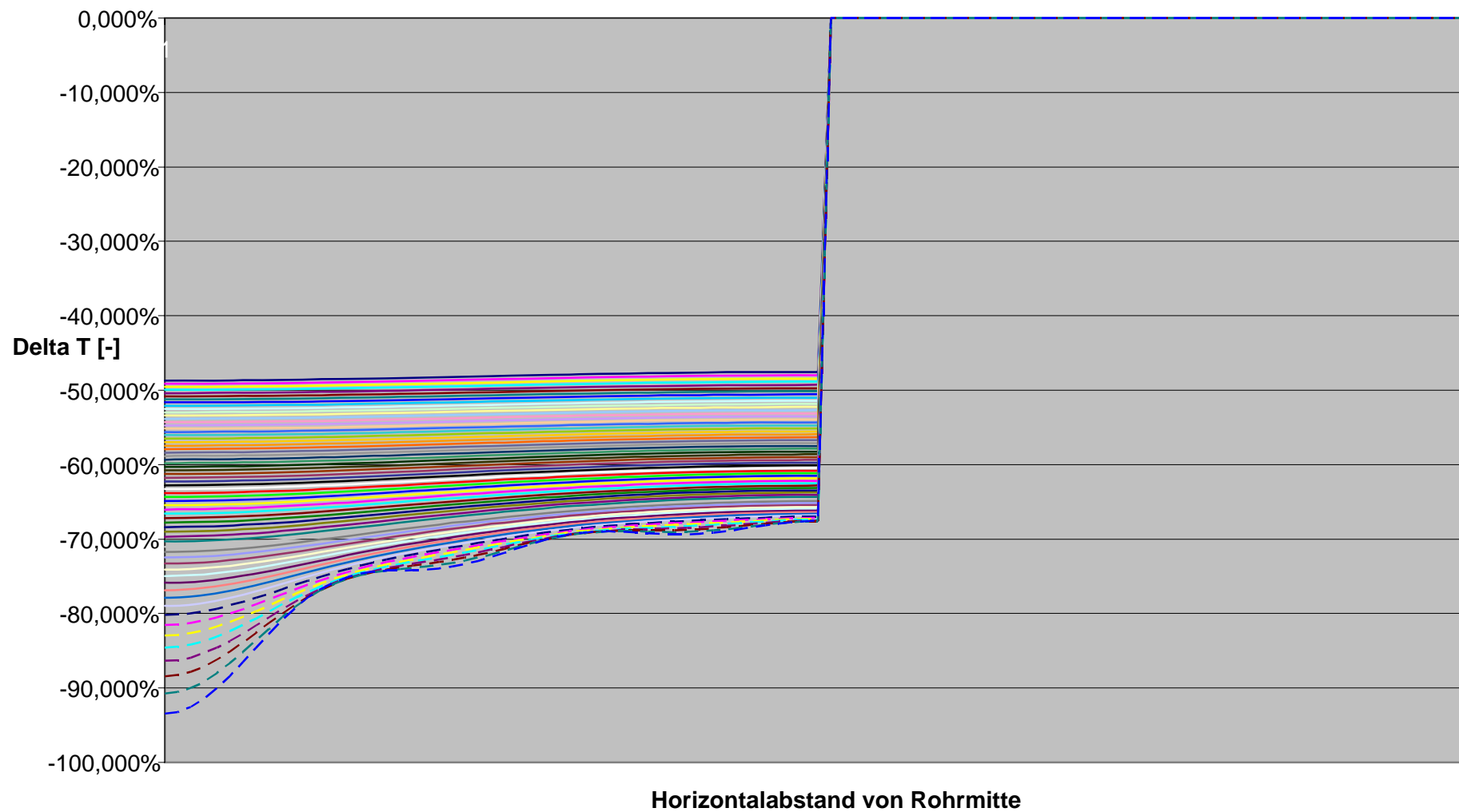
Institutsleitung

(Dr. rer. nat. Karl-Uwe Voß)

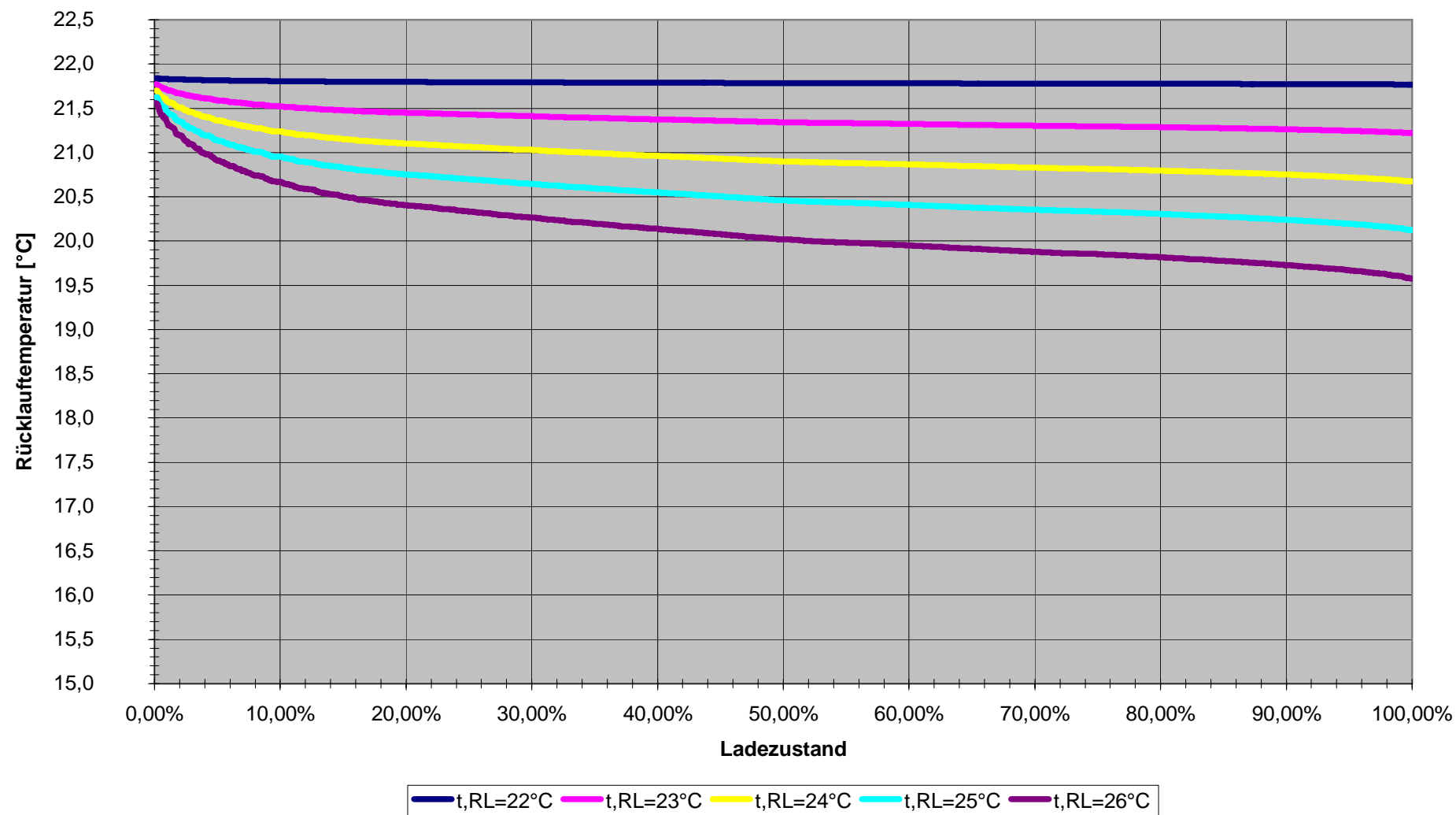


## **7.2. Anlage A 2 1.Simulation für verschiedene PCM - Stoffe**

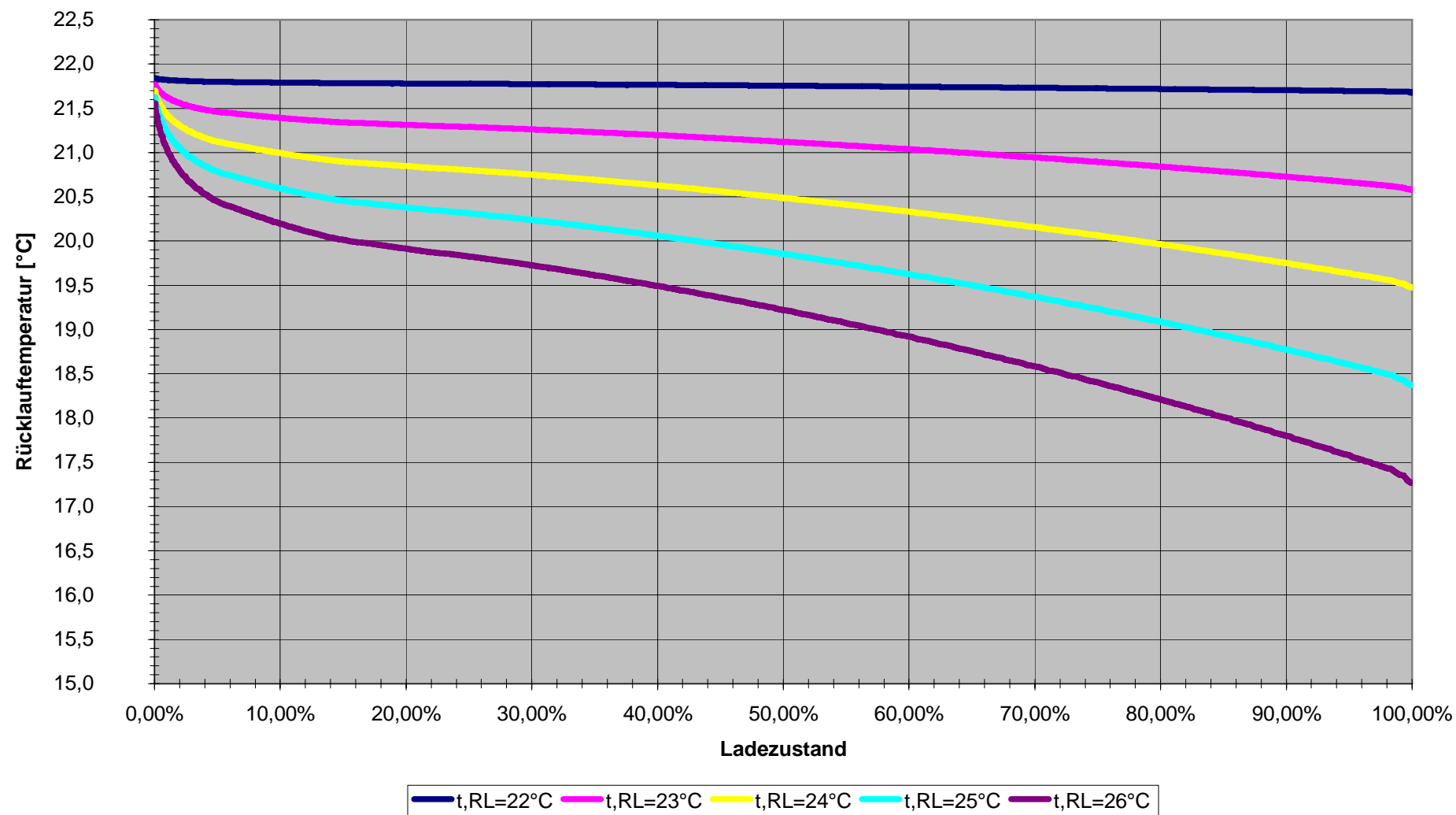
### Temperaturprofile RA 10, Lambda 0,97 W/mK



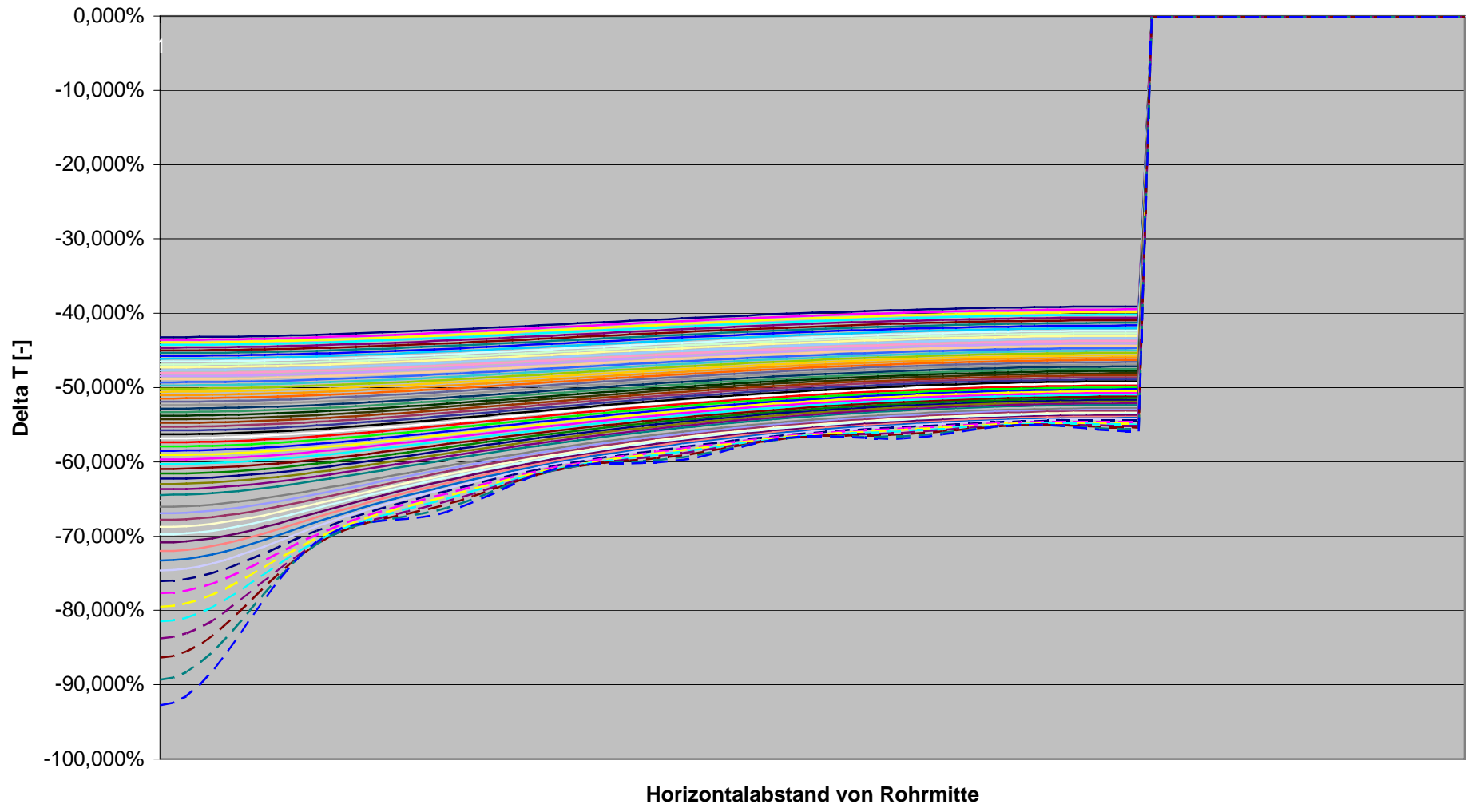
## Speicherauslegung Heptadecan, Rohrebene aktiv, RA 10



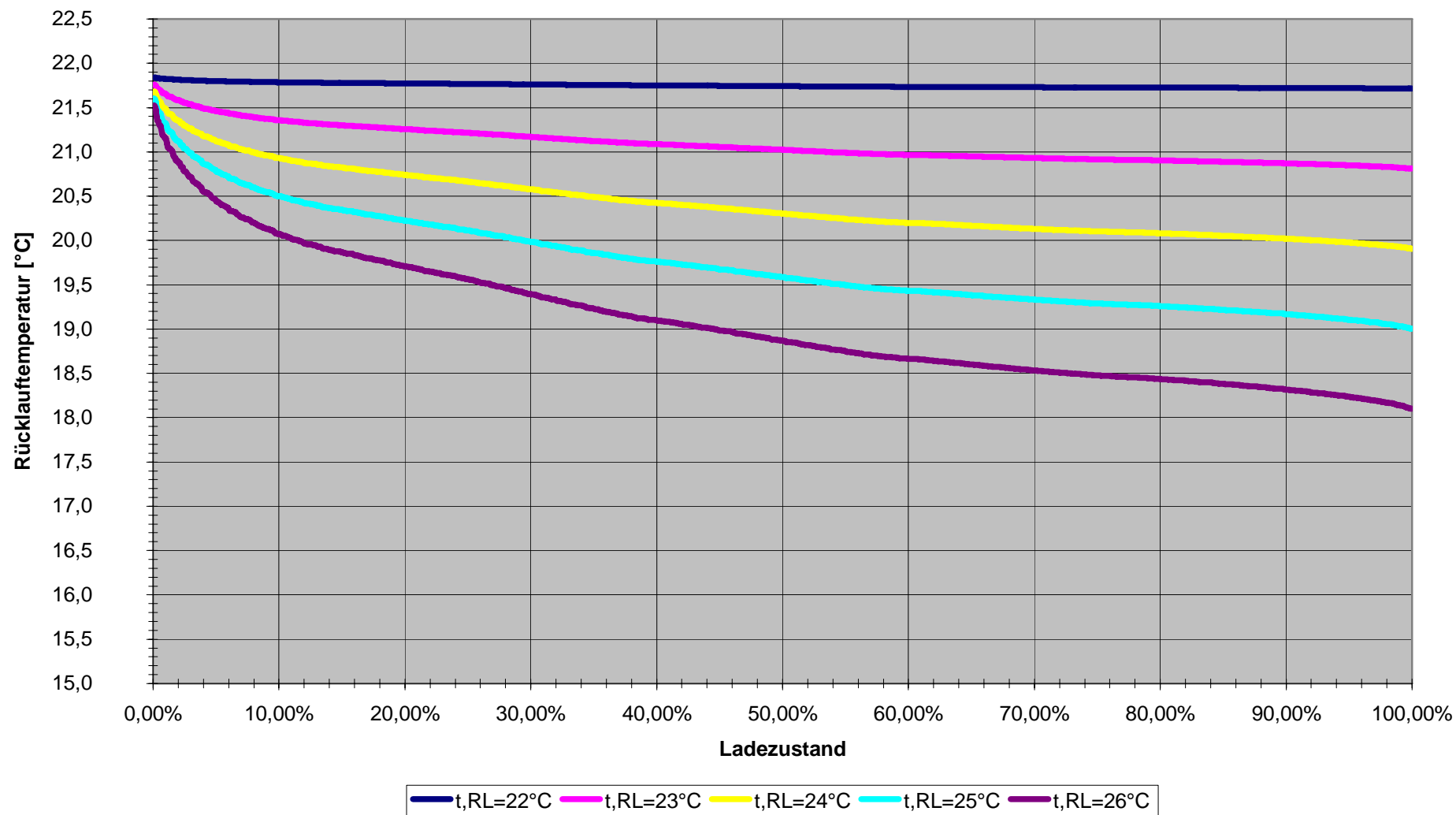
## Speicherauslegung Heptadecan, Gesamtquerschnitt aktiv, RA 10



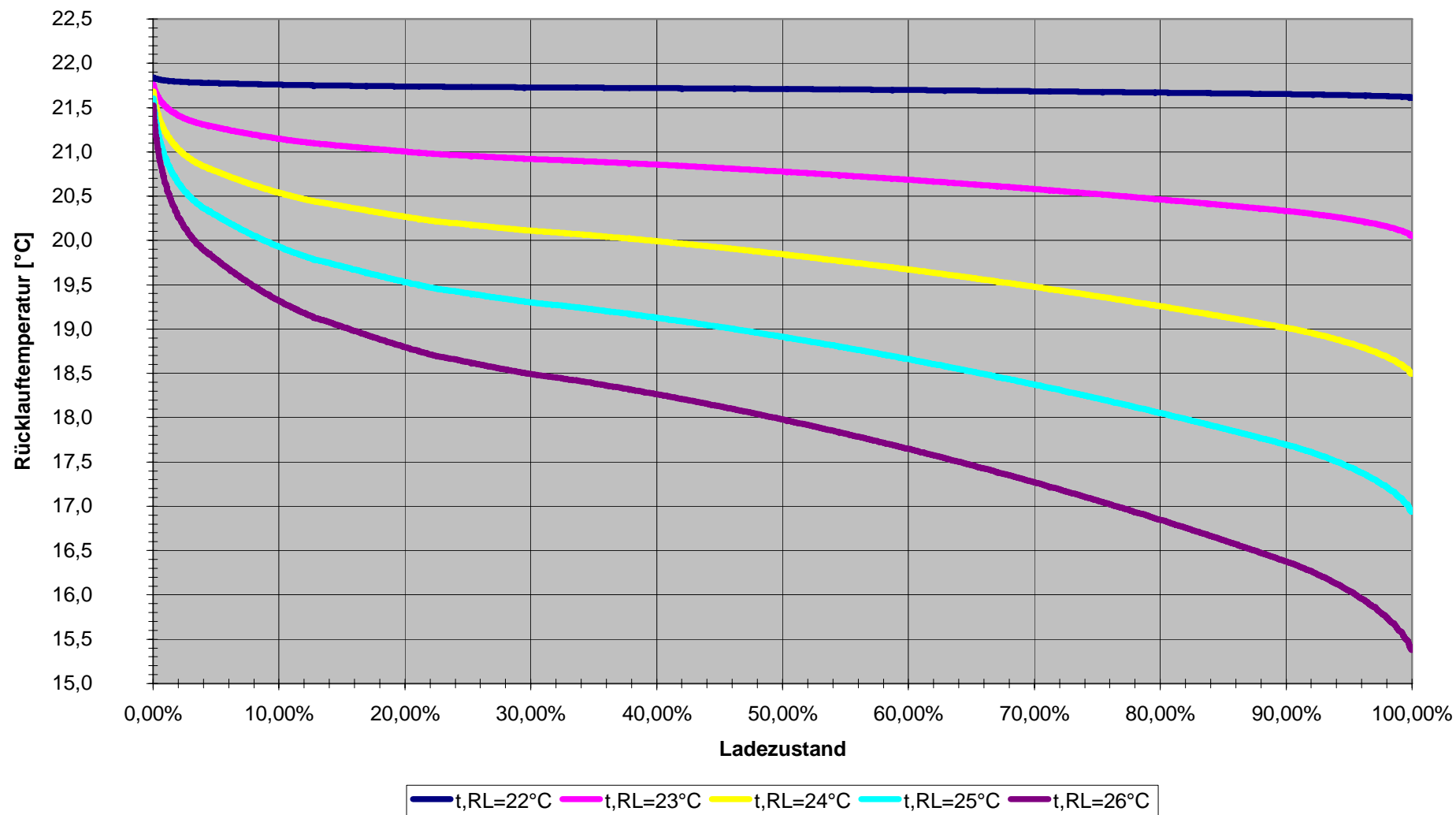
### Temperaturprofile RA 15, Lambda 0,97 W/mK



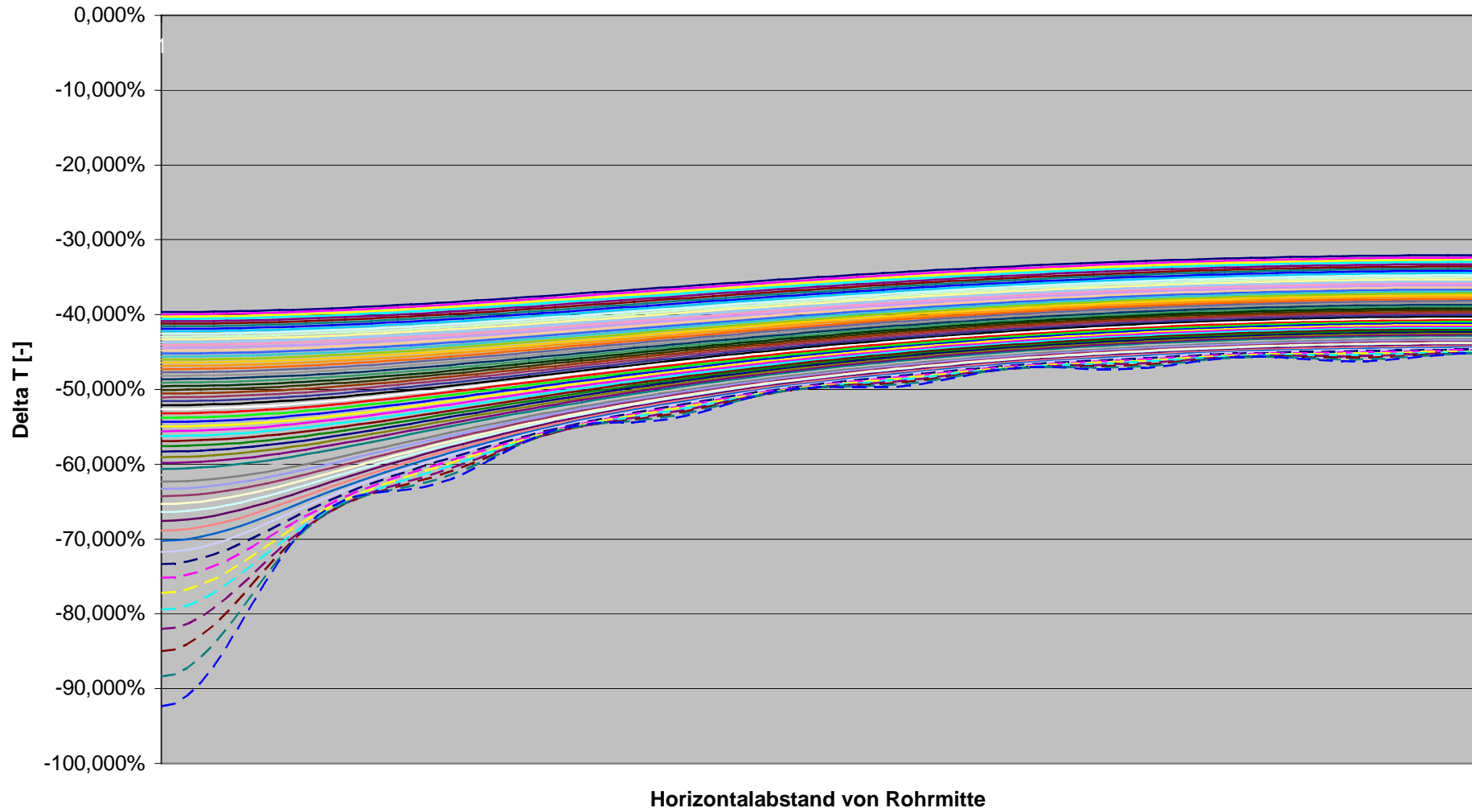
### Speicherauslegung Heptadecan, Rohrebene aktiv, RA 15



### Speicherauslegung Heptadecan, Gesamtquerschnitt aktiv, RA 15

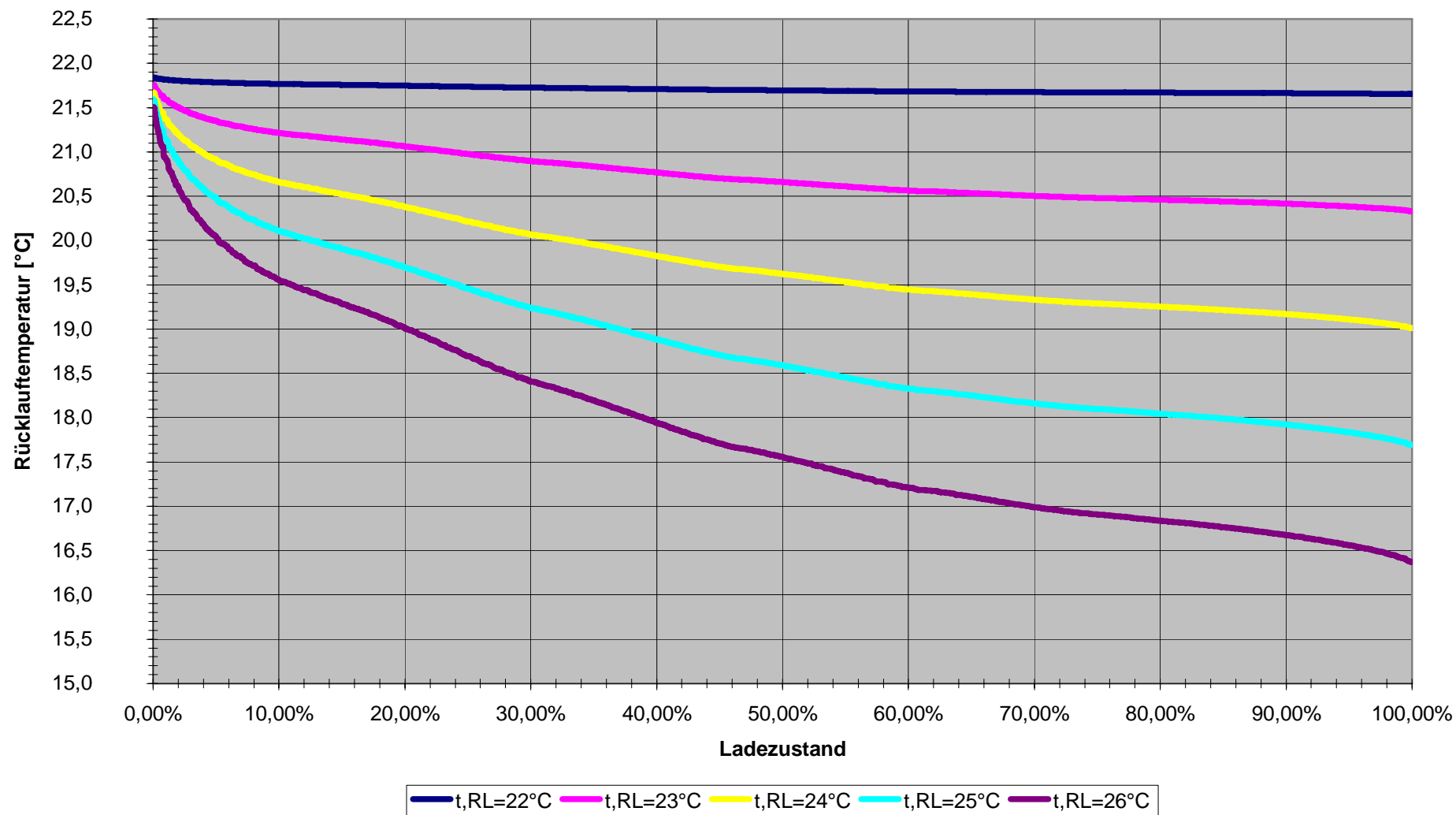


### Temperaturprofile RA 20, Lambda 0,97 W/mK

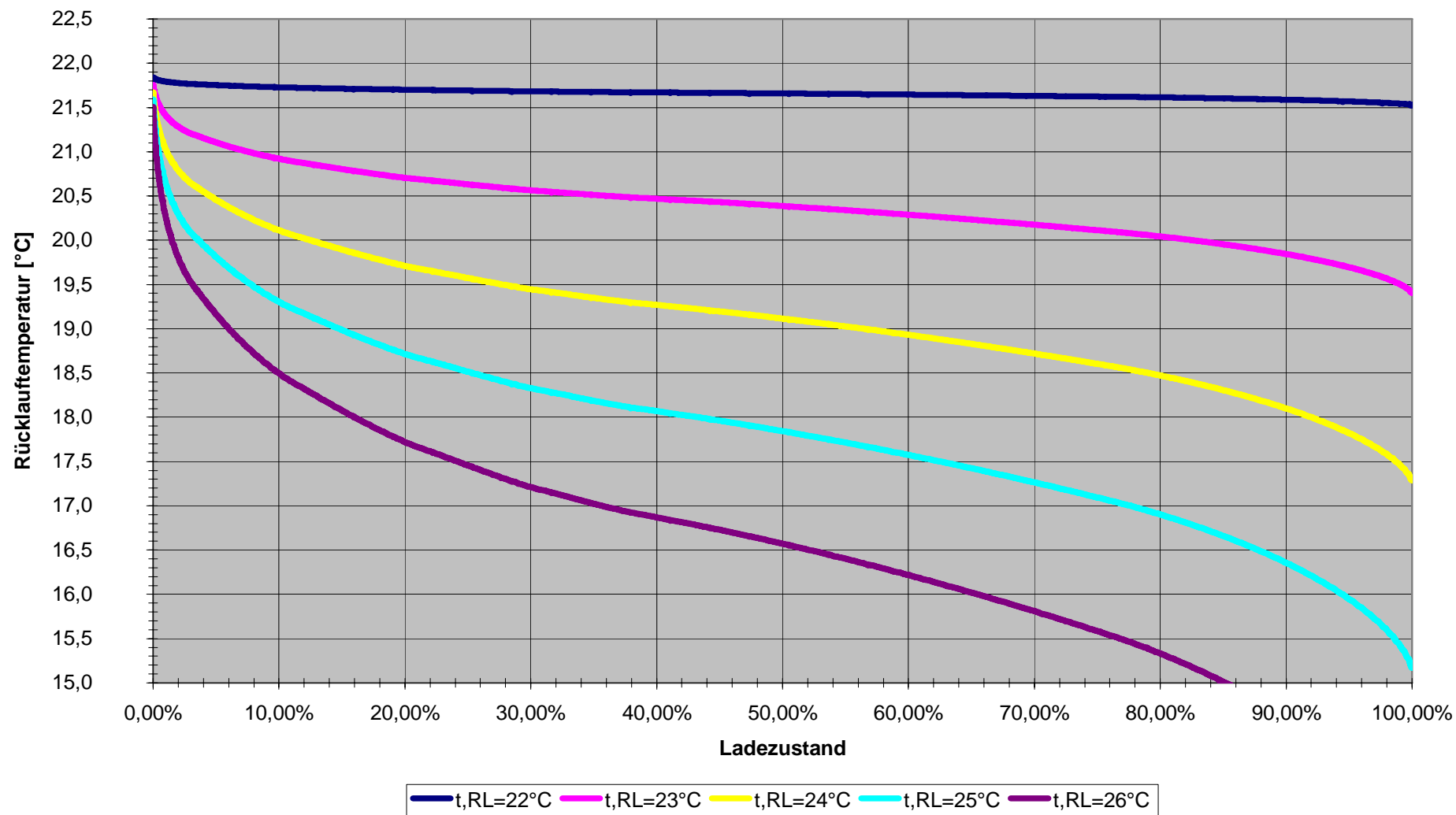




### Speicherauslegung Heptadecan, Rohrebene aktiv, RA 20



### Speicherauslegung Heptadecan, Gesamtquerschnitt aktiv, RA 20



## **7. 3. Anlage A 3 Kriterien für Zuordnung Fußbodenheizungssystem**

## Anlage A 3 Kriterien für Zuordnung Fußbodenheizungssysteme

**1. Kriterium****Estrichart****Möglichkeiten**

Zementestrich  
 Anhydritestrich  
 im Sanierungsbau – Trockenestrich  
 in Ausnahmen – Gussasphalt

**2. Kriterium****Haltesystem****Möglichkeiten  
gefunden werden.)**

Tackersystem (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)  
 Noppensystem (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)  
 Bindsystem an Bewehrungsmatten (sehr selten)

**3. Kriterium****Rohrarten****Möglichkeiten**

Polyäthylen – Rohr Typ PeX – c  
 Polyäthylen – Rohr Typ RT  
 Mehrschichtverbundrohr  
 Kupferrohr  
 Kapillarrohrmatten

**4. Kriterium****Rohrdurchmesser****Möglichkeiten**

14 mm  
 16 mm  
 17 mm  
 Für den Sanierungsbereich werden heute auch Rohre mit Durchmessern von 8 – 10 mm hergestellt.

## 5. Kriterium Überdeckung in Abhängigkeit der Estrichart und Tragfähigkeit

### 1. Zementestrich

Flächenlast kN/m <sup>2</sup>	Estrichart	Zementestrich CT						Fußbodenheizungssysteme Tacker/Noppe Typ A	
	Estrichklasse	CT F4			CT F5				
	Heizrohr-Ø DA in mm	14	16	17	14	16	17		
≤ 2	a - Überdeckung	45	45	45	40	40	40		
	b - Gesamt	59	61	62	54	56	57		
≤ 3	a - Überdeckung	65	65	65	55	55	55		
	b - Gesamt	79	81	82	69	71	72		
≤ 4	a - Überdeckung	70	70	70	60	60	60		
	b - Gesamt	84	86	87	74	76	77		
≤ 5	a - Überdeckung	75	75	75	65	65	65		
	b - Gesamt	89	91	92	79	81	82		

Angaben a + b in mm

**Tabelle 1 Überdeckung für Zementestrich /7/**

### 2. Fließestrich

Flächenlast kN/m <sup>2</sup>	Estrichart	Calciumsulfat-Fließestrich CAF								
	Estrichklasse	CAF F4			CAF F5			CAF F7		
	Heizrohr-Ø DA in mm	14	16	17	14	16	17	14	16	17
≤ 2	a - Überdeckung	40	40	40	30	30	30	30	30	30
	b - Gesamt	54	56	57	44	46	47	44	46	47
≤ 3	a - Überdeckung	50	50	50	45	45	45	40	40	40
	b - Gesamt	64	66	67	59	61	62	54	56	57
≤ 4	a - Überdeckung	60	60	60	50	50	50	45	45	45
	b - Gesamt	74	76	77	64	66	67	59	61	62
≤ 5	a - Überdeckung	65	65	65	55	55	55	50	50	50
	b - Gesamt	79	81	82	69	71	72	64	66	67

Angaben a + b in mm

**Tabelle 2 Überdeckung für Fließestrich /7/**

## 7. 4. Anlage A 4 Angaben zum Simulationsraum

## Anlage A 4 Angaben zum Simulationsraum

### 1. Angaben zum Baukörper – leichte Bauart

#### 1.1. Boden/Decke des Raumes (von außen nach innen) - Holzkonstruktion

Baustoff	Dicke (mm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Gipskartonplatte	12,5	0,25
Luftschicht	150,0	0,28
Beton	250,0	1,6
Luftschicht	150,0	0,28
Holzfaserverplatte	30,0	0,05

#### 1.2. Außenwand (von außen nach innen) - Holzkonstruktion

Baustoff	Dicke (mm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Mineralischer Putz	10,0	0,8
Mineralfaserdämmung	60,0	0,04
OSB-Platte	16,0	0,13
Glaswolle	160,0	0,038
Pressspanplatte	15,0	0,11

#### 1.3. Innenwand - Trockenbau

Baustoff	Dicke (mm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Gipskartonplatte	12,5	0,25
Mineralfaserdämmung	75,0	0,04
Gipskartonplatte	12,5	0,25

### 2. Angaben zum Baukörper – schwere Bauart

#### 2.1. Boden/Decke des Raumes (von außen nach innen) - Kalksandsteinkonstruktion

analog der leichten Bauart

#### 2.2. Außenwand (von außen nach innen) - Kalksandsteinkonstruktion

Baustoff	Dicke (mm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Mineralischer Putz	10,0	0,8
Mineralfaserdämmung	80,0	0,04
Kalksandstein	240,0	1,0
Putz	15,0	0,2

## 2.3. Innenwand - Vollziegel

Baustoff	Dicke (mm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Putz	15,0	0,2
Vollziegel	115,0	0,6
Putz	15,0	0,2

## 3. Angaben zum Baukörper – PCM aktive Innenwände – Smartboard 21

## 3.1. Boden/Decke des Raumes (von außen nach innen) – PCM-Konstruktion

analog der leichten Bauart

## 3.2. Außenwand (von außen nach innen) – PCM-Konstruktion

analog der leichten Bauart

## 3.3. Innenwand – PCM-aktive Innenwände

Baustoff	Dicke (mm)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Smartboard 21	15,0	0,196
Flächenaktivierung	-	-
Mineralfaserdämmung	75,0	0,04
Flächenaktivierung	-	-
Smartboard 21	15,0	0,196

## 4. Angaben zum Fenster (gilt für alle Varianten)

40 % Fensterflächenanteil je Außenwand

Wärmeschutzverglasung  $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$

Rahmenanteil 30 %

Energiedurchlassgrad  $g = 0,6$

Verschattung vorhanden; Verschattungsfaktor am Tag  $f_s = 0,2$

## 5. Angaben zur Haustechnik

## 5.1. Lüftung

Technische Beschreibung	Konventionelles System	PCM aktivierter Raum
Natürliche Nachtlüftung	Ja	Ja
Maschinelle Lüftung	Ja	Ja
Sommernachtkühlung	Ja	Ja
Erdwärmetauscher	Nein	Nein
Wärmerückgewinnung	Nein	nein



## 5.2. Heizung

Technische Beschreibung	Konventionelles System	PCM aktivierter Raum
Nachtabsenkung	Ja	Ja
Solltemperatur	20°C	20°C
Heizperiode	1.9. – 31.05.	1.9. – 31.05
Flächenheizung	Ja	Ja
Versorgungstemperatur	28 °C	28 °C
Heizregister Lüftung	Ja	Ja

## 5.3. Kühlung

Technische Beschreibung	Konventionelles System	PCM aktivierter Raum
Kältetechnik	Ja	Ja
Solltemperatur	20°C	20°C
Angabe Solltemperatur	Absolut	Absolut
Kälteerzeugung	Kompressionskältemaschine	Kompressionskältemaschine
Flächenkühlung	Ja	Ja
Versorgungstemperatur	18°C	18°C
Kühlregister Lüftung	Ja	Ja

## 6. Nutzung und innere Lasten

Büronutzung – 100 % Tag; 0% Nacht

Mechanische Lüftung – 0,8 h<sup>-1</sup>

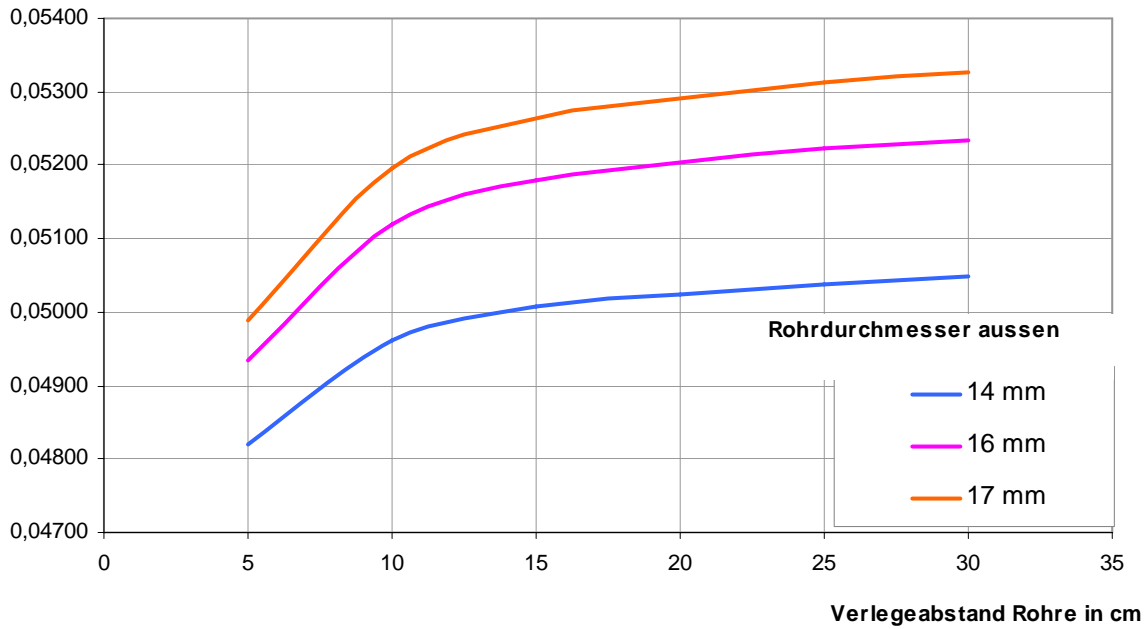
Innere Lasten – 16 W/m<sup>2</sup> (Beleuchtung – PC) – 100 % Tag , 0% Nacht

## **7.5. Anlage A 5 maximal erreichbare Volumenprozent an PCM**

Zementestrich CT 5

**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 5**

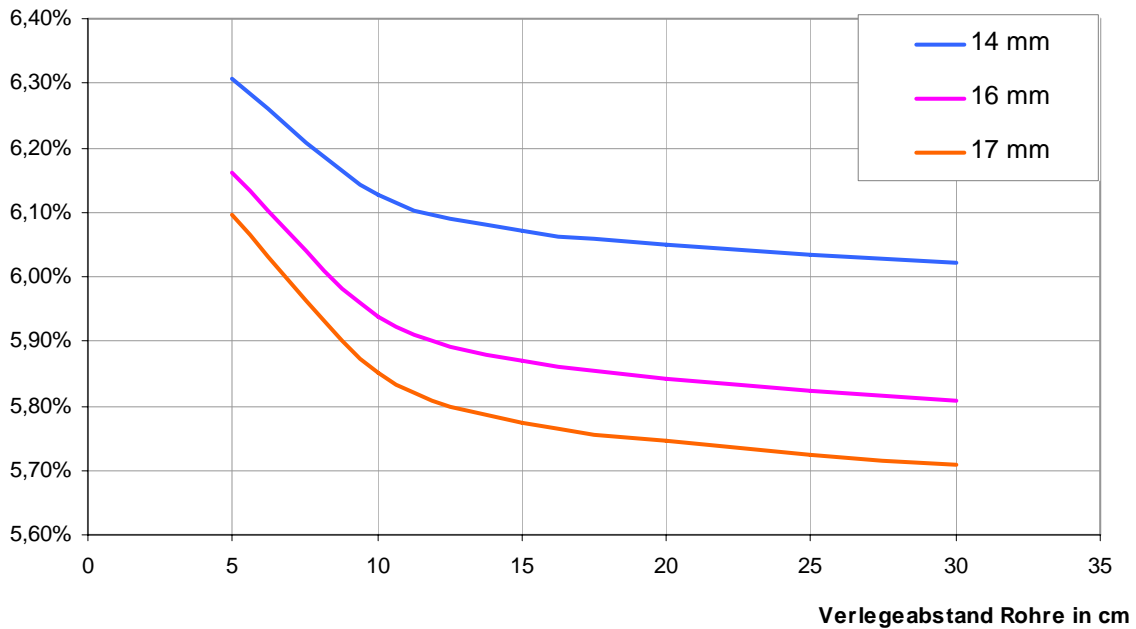
**für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 5**

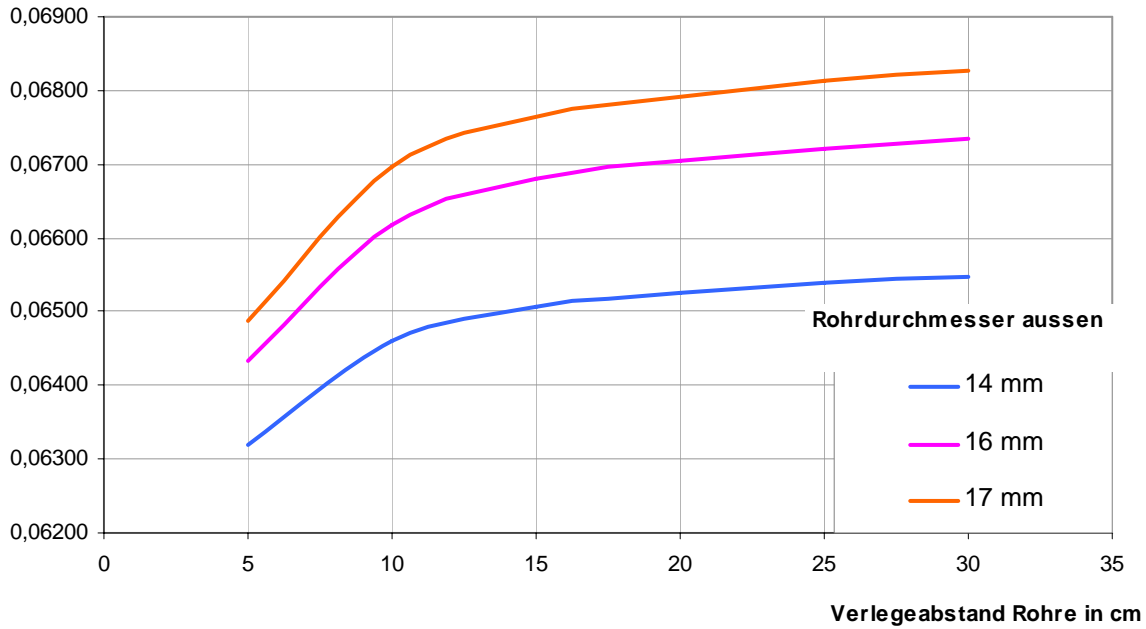
**für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**

**Rohrdurchmesser  
ausser**



**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 5**

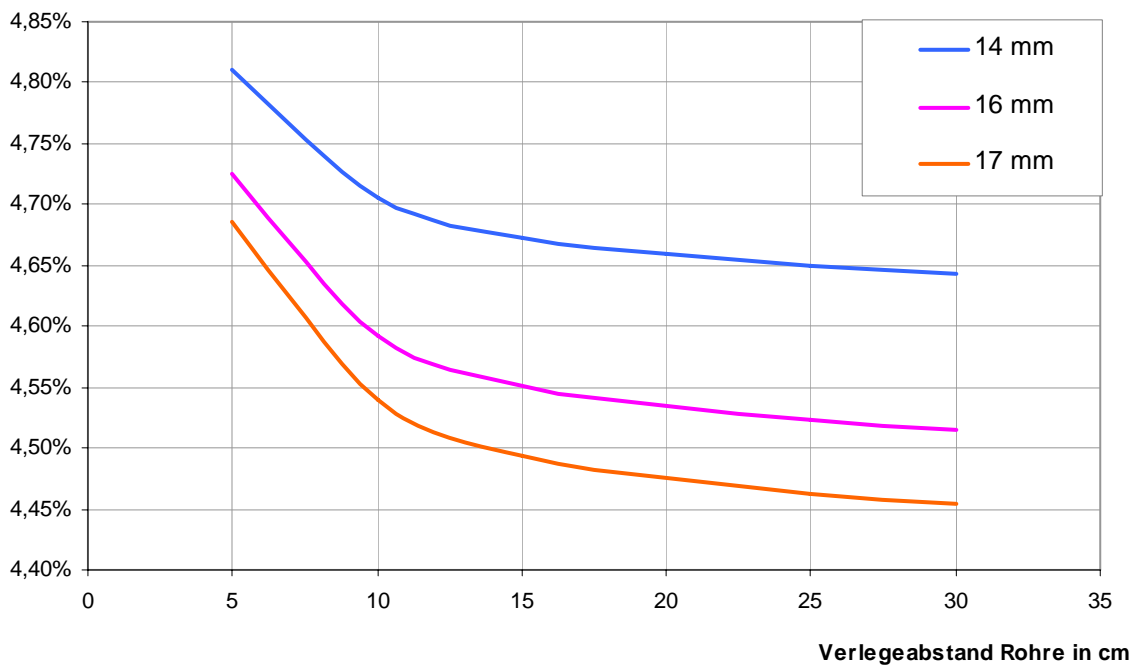
**für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 5**

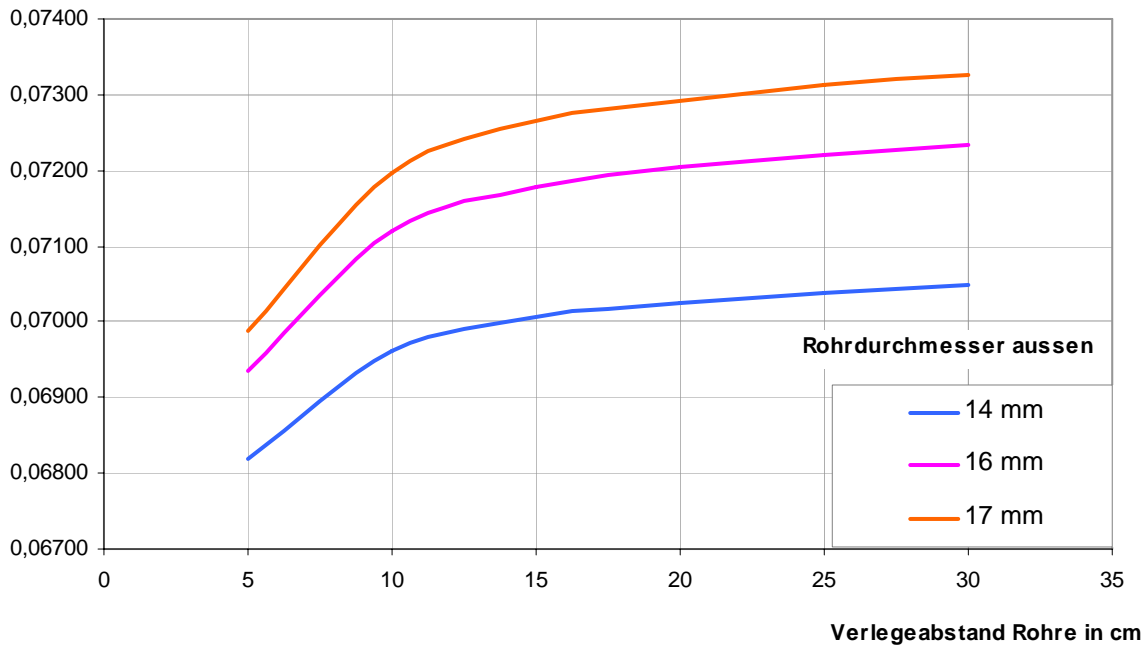
**für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**

**Rohrdurchmesser aussen**



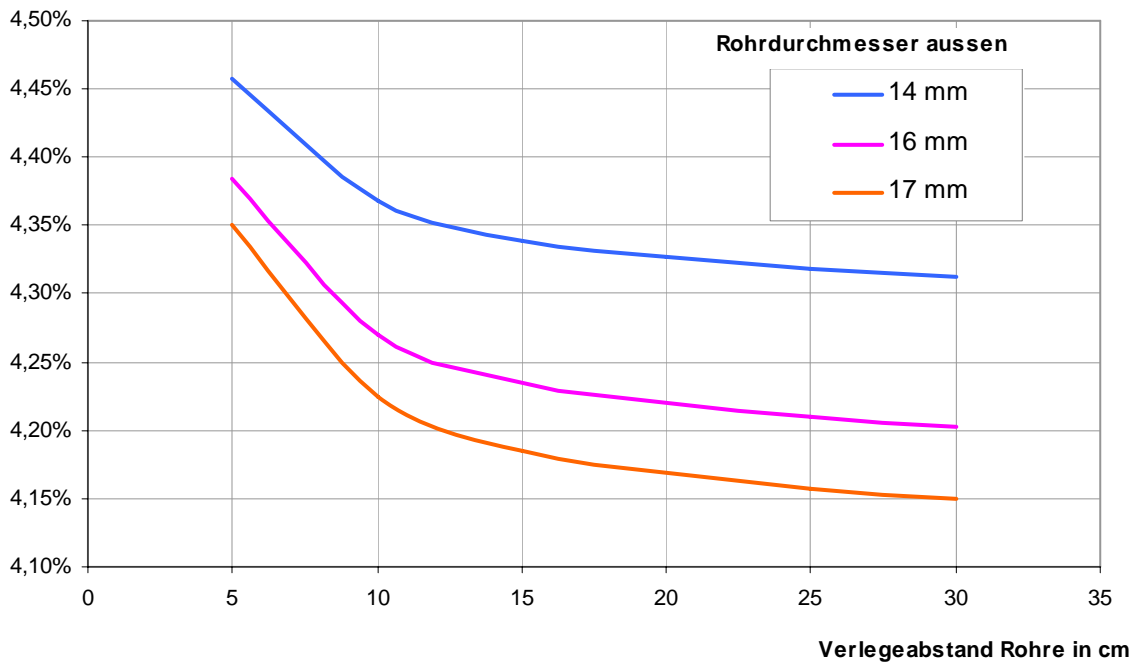
**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 5**

**für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



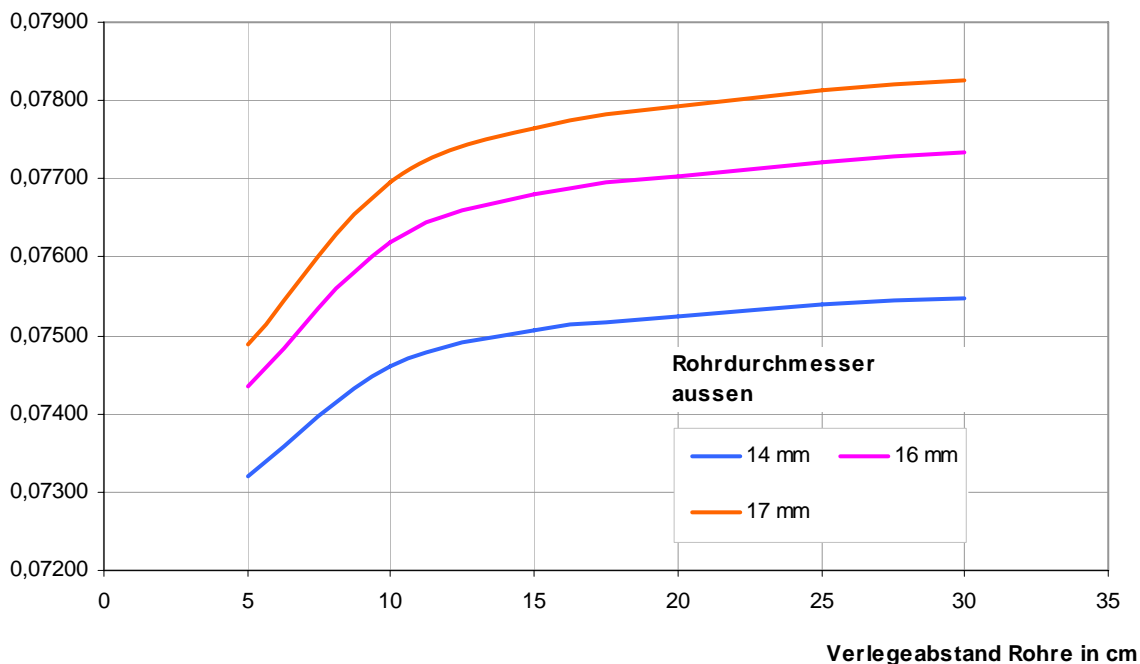
**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 5**

**für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



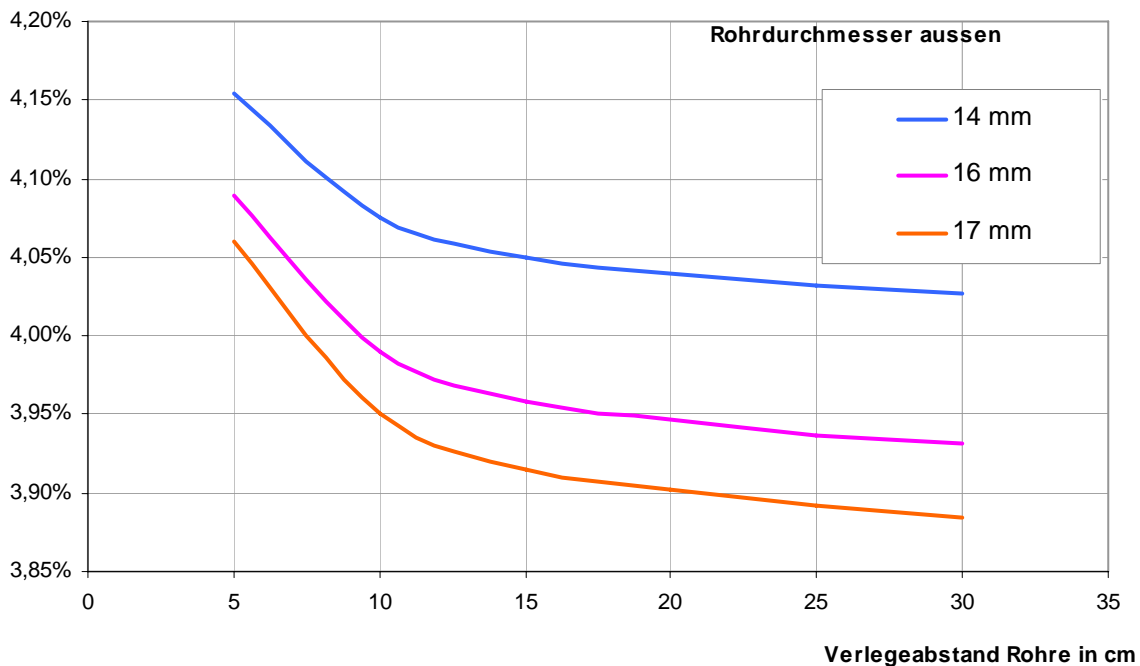
**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 5**

**für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 5**

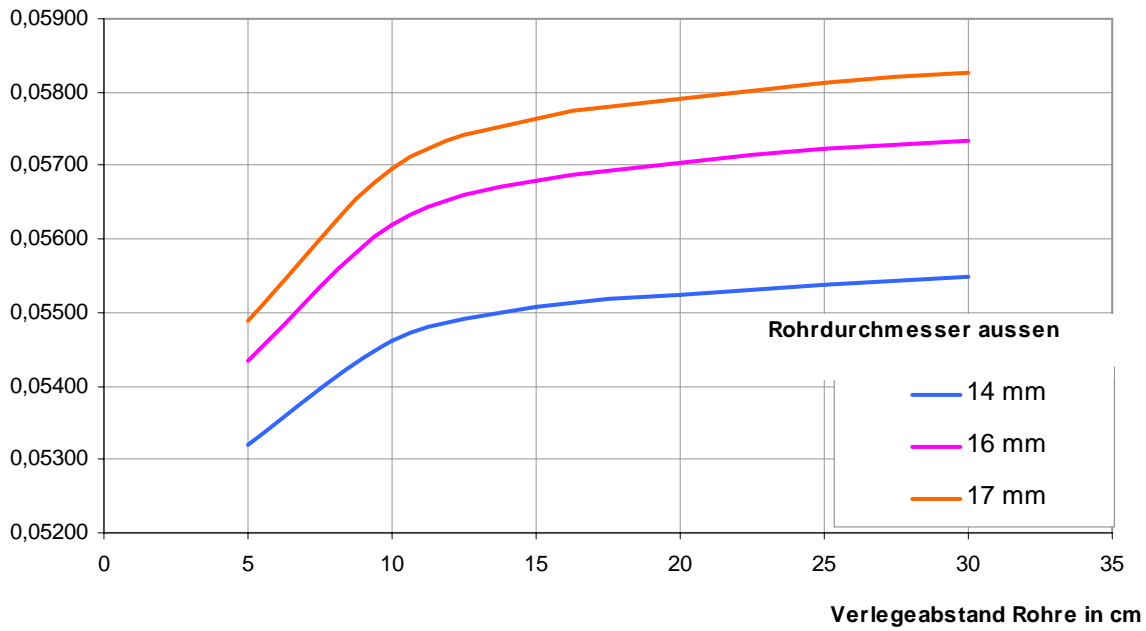
**für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



Zementestrich CT 4

**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 4**

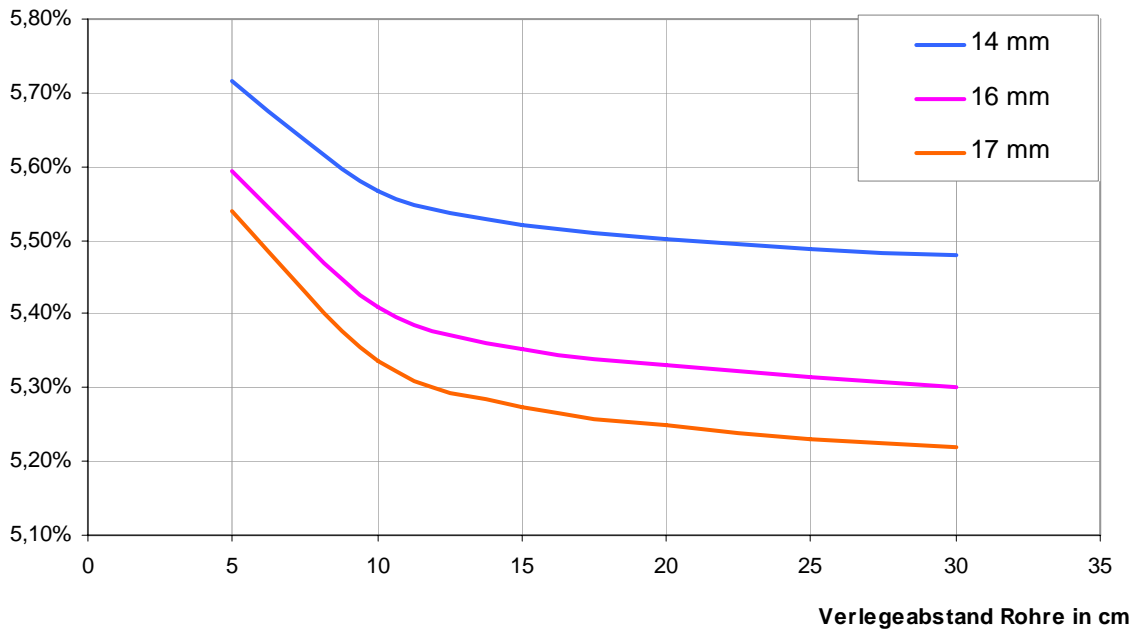
**für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 4**

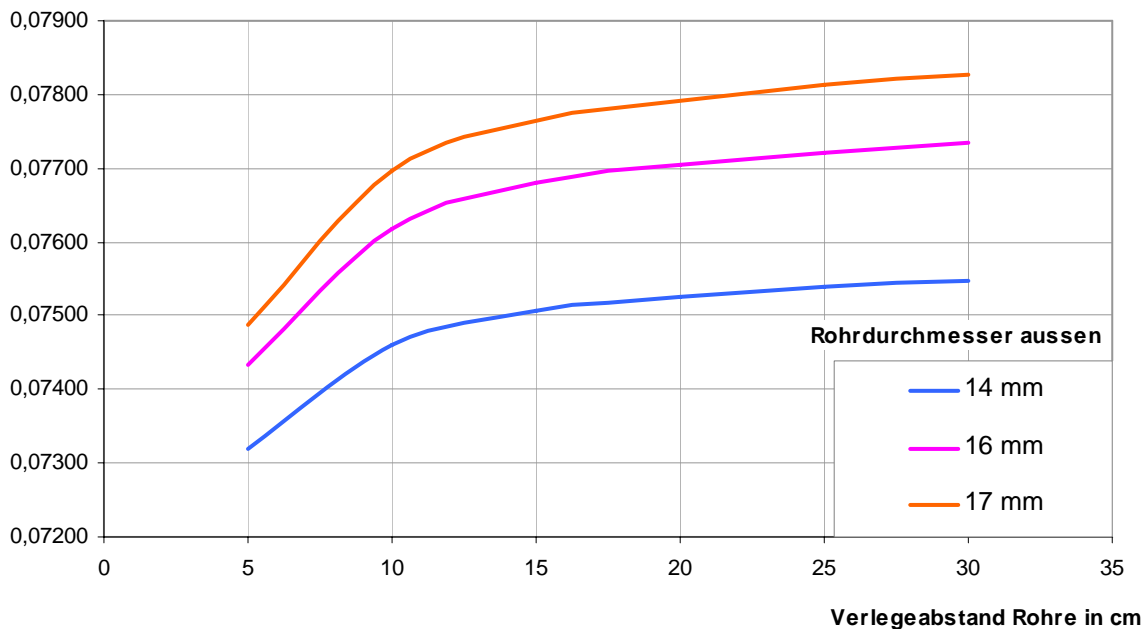
**für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**

**Rohrdurchmesser aussen**



**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 4**

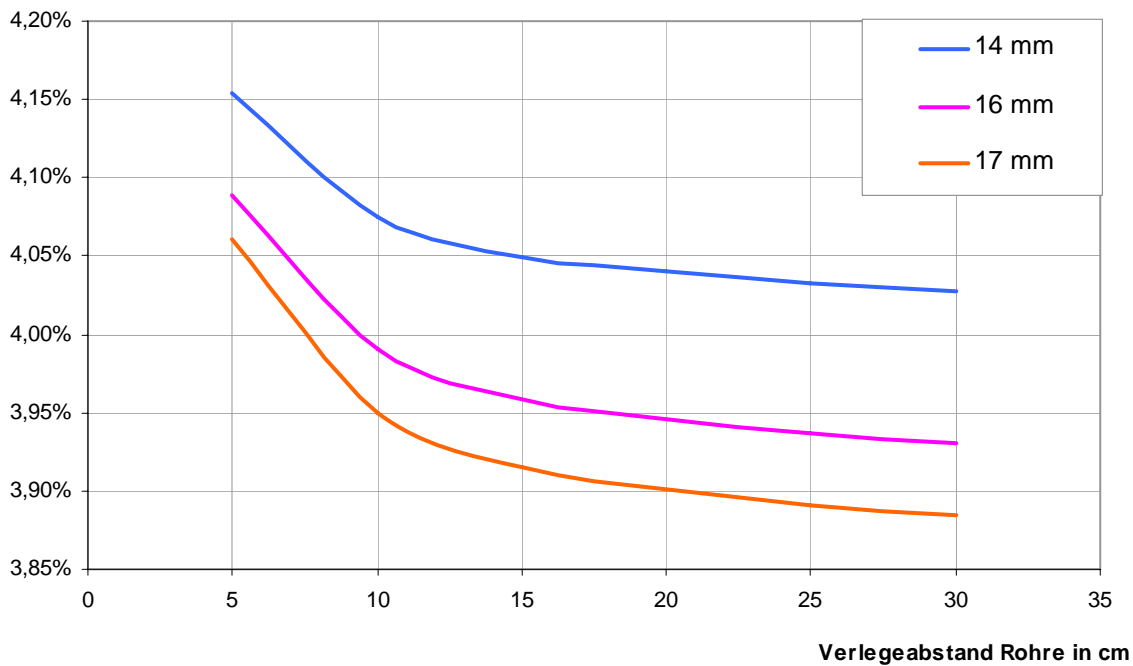
**für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 4**

**für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**

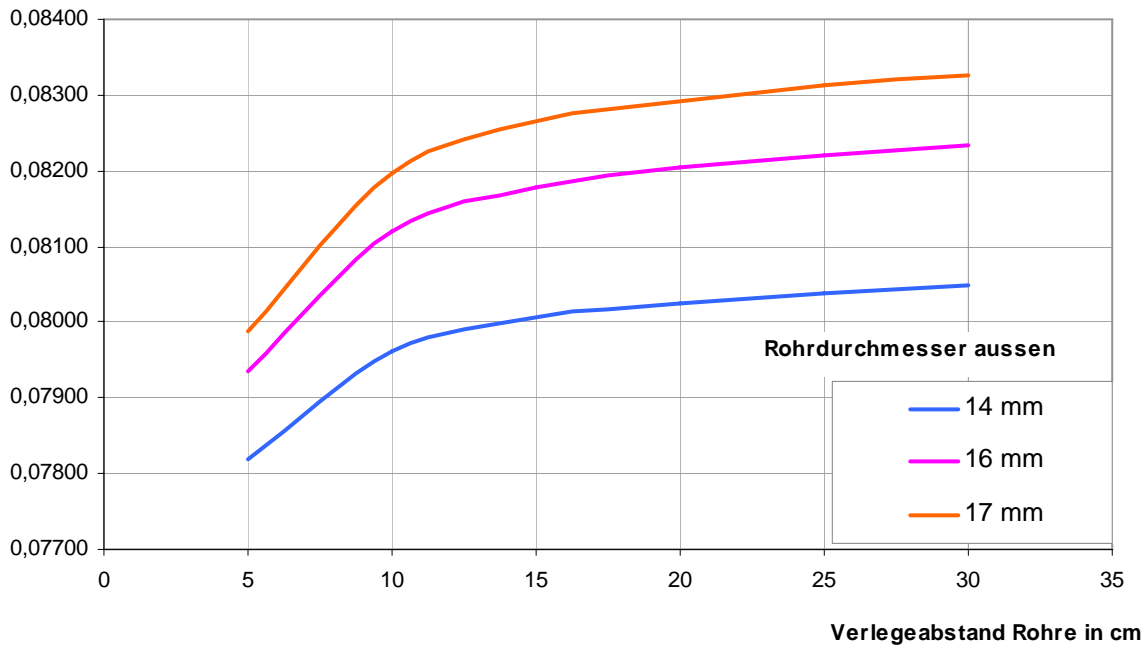
**Rohrdurchmesser  
ausssen**





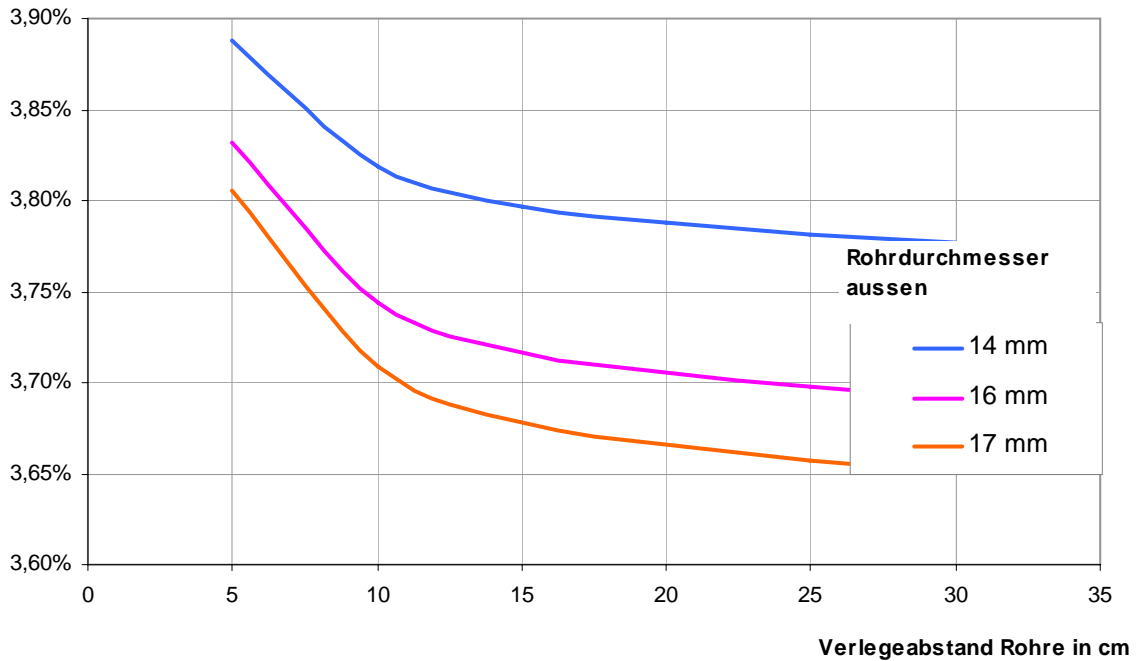
**m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 4**

**für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



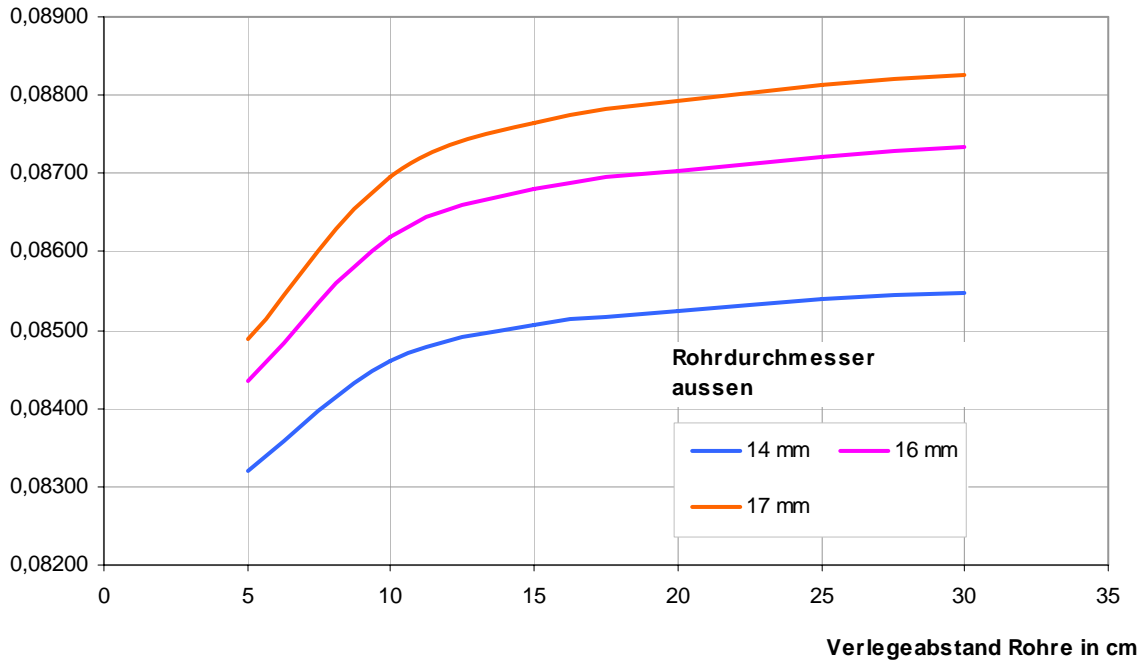
**Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 4**

**für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit**



m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CT 4

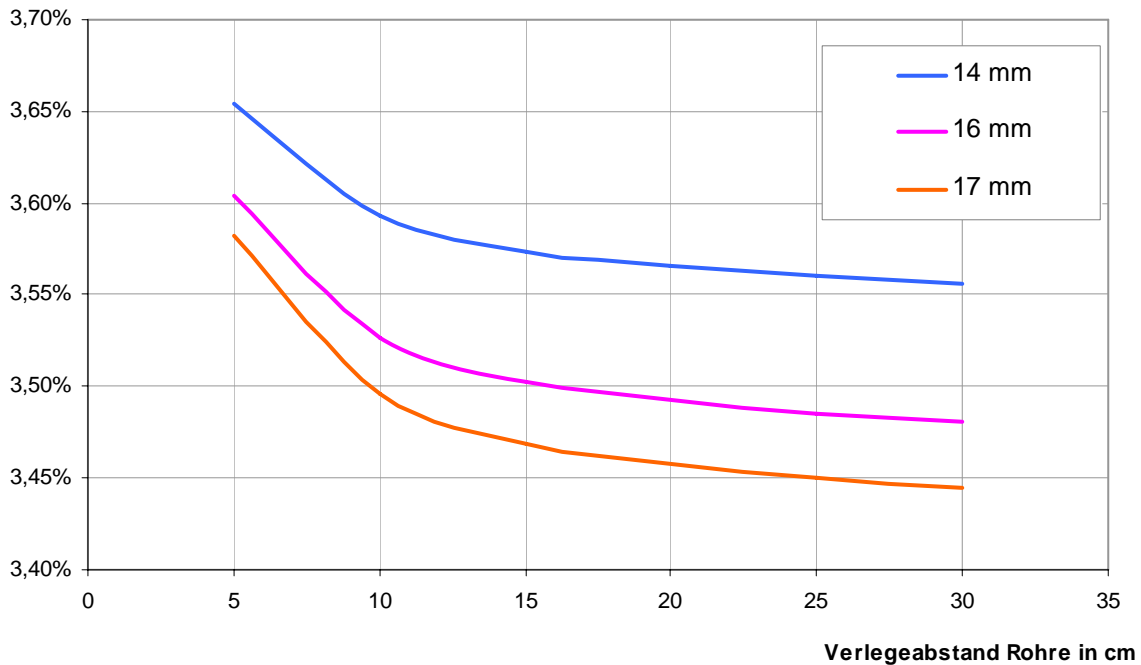
für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CT 4

für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit

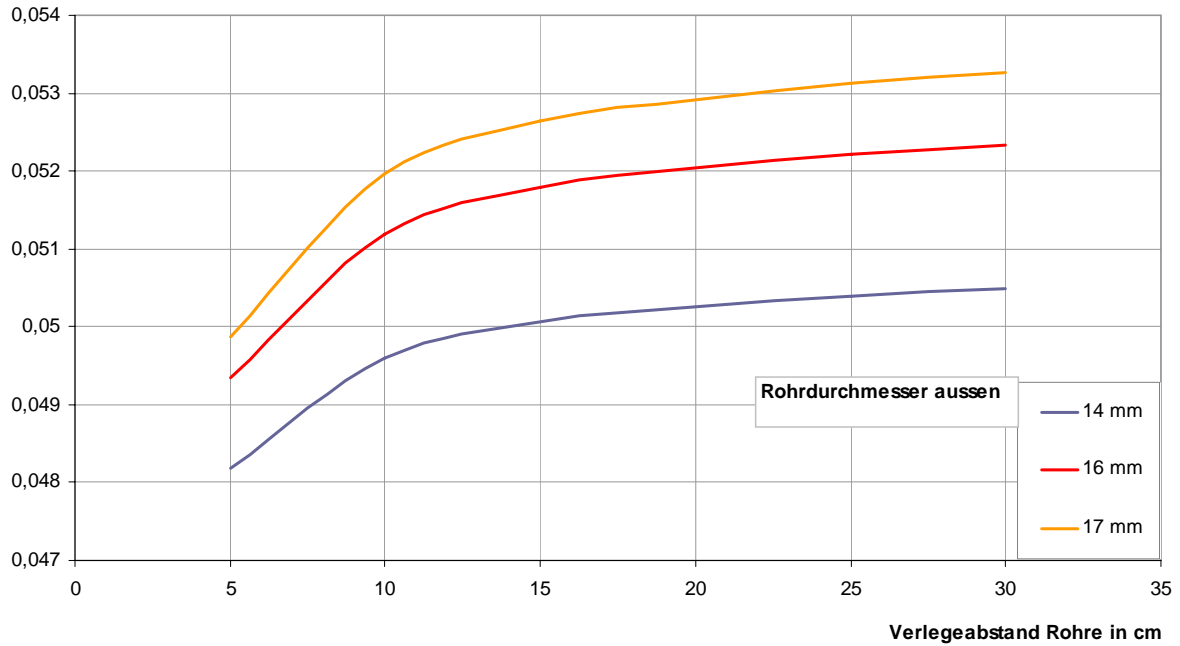
Rohrdurchmesser  
ausßen



Anhydritestrich CAF 4

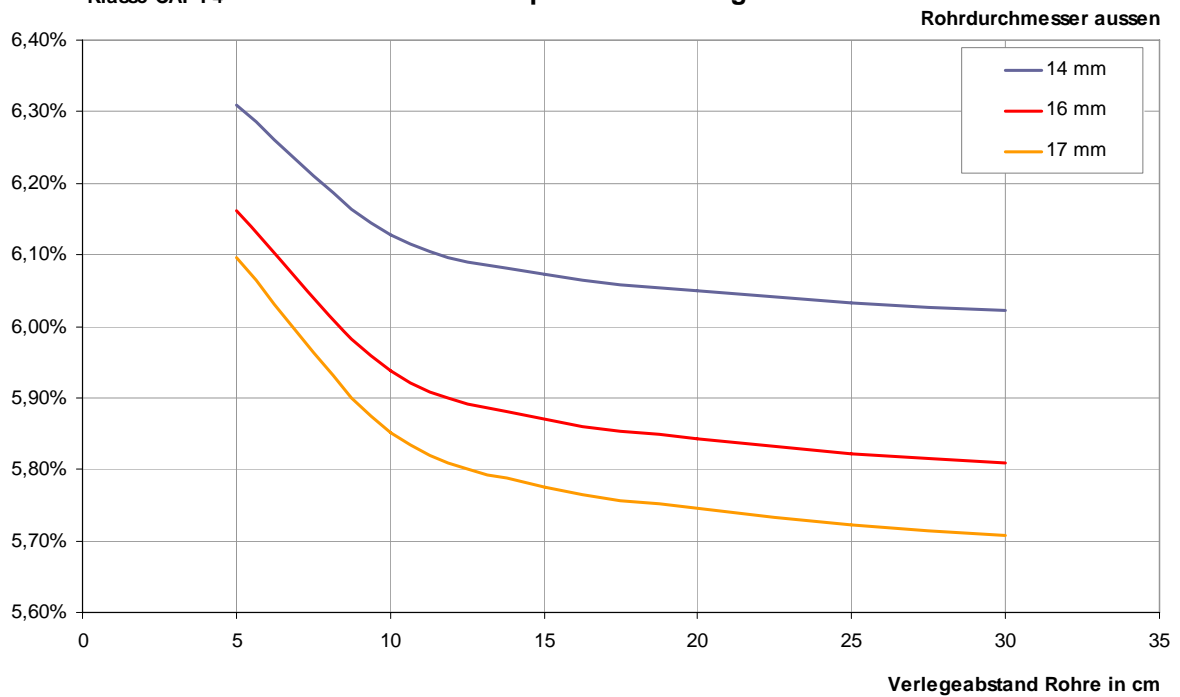
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F4

für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



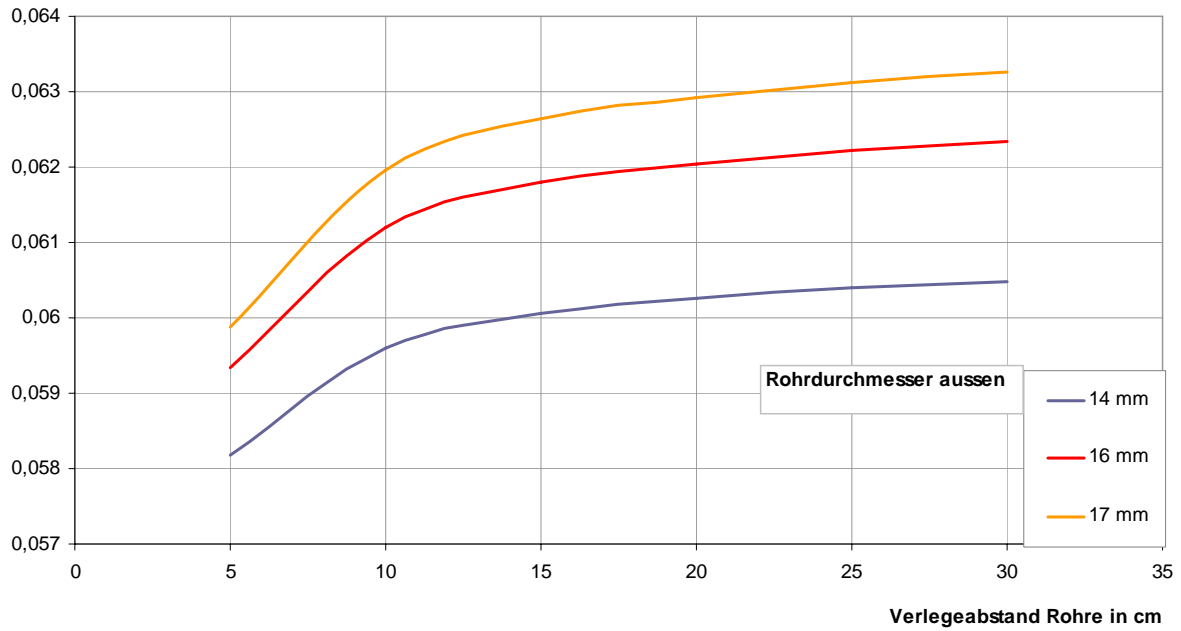
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F4

für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



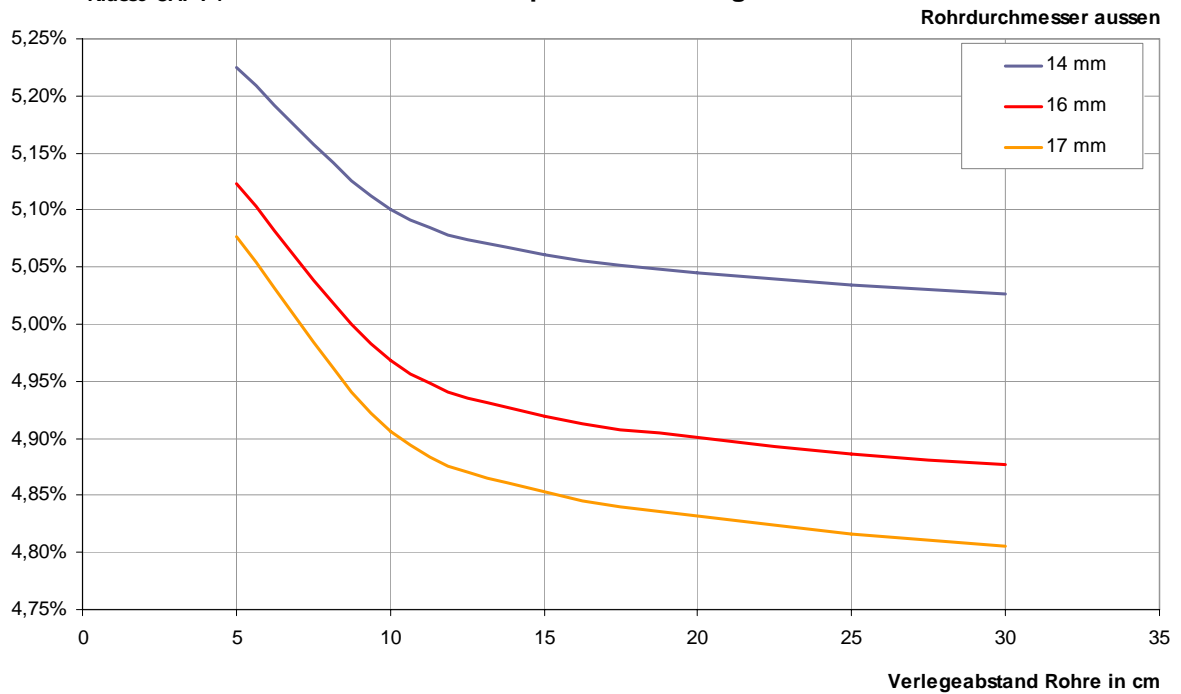
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F4

für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



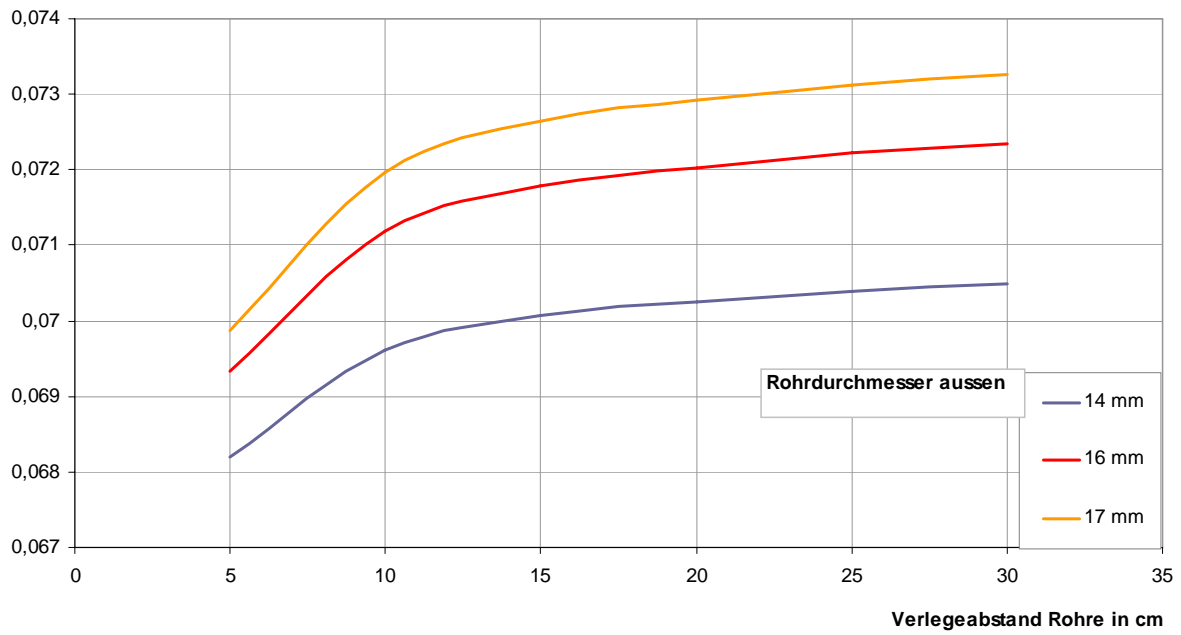
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F4

für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



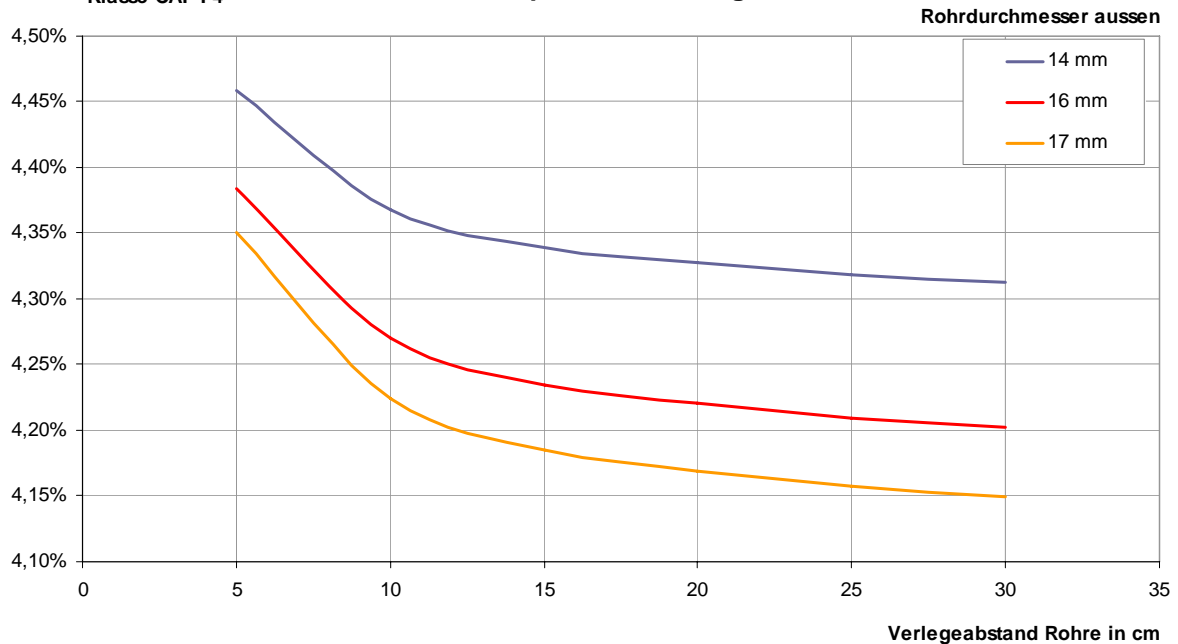
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F4

für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



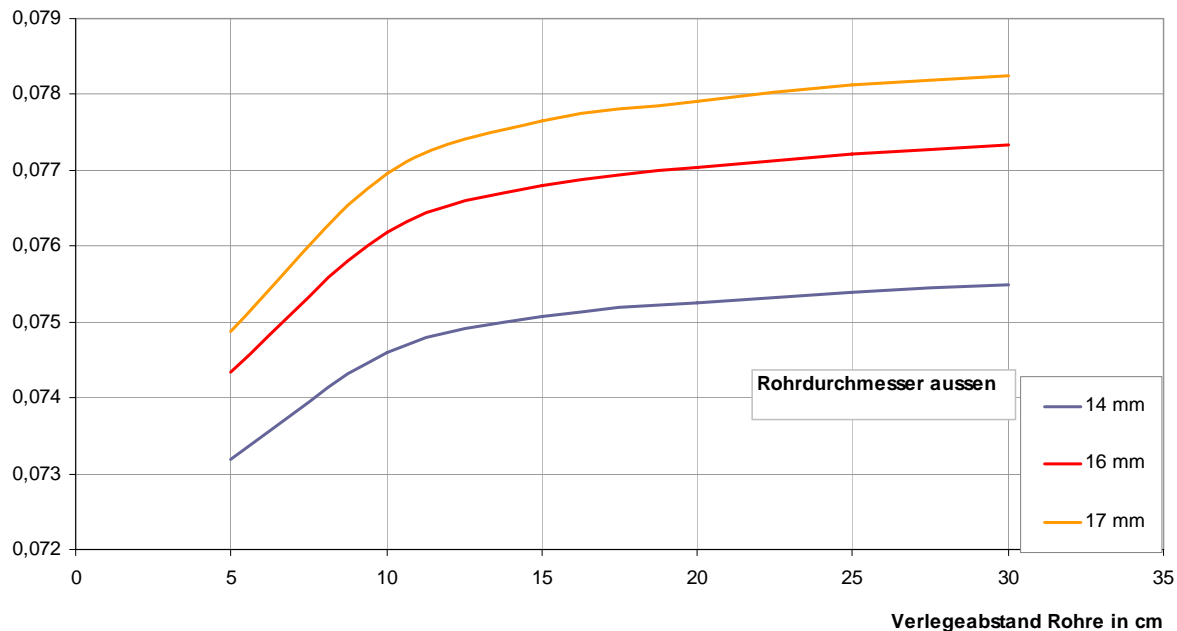
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F4

für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



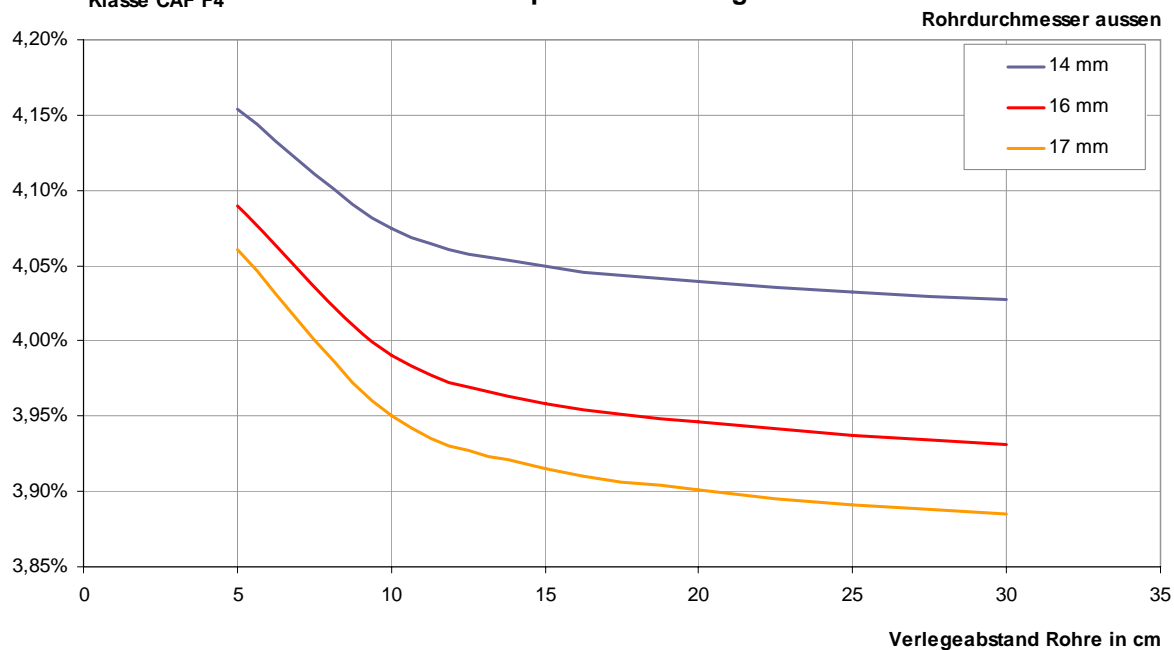
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F4

für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F4

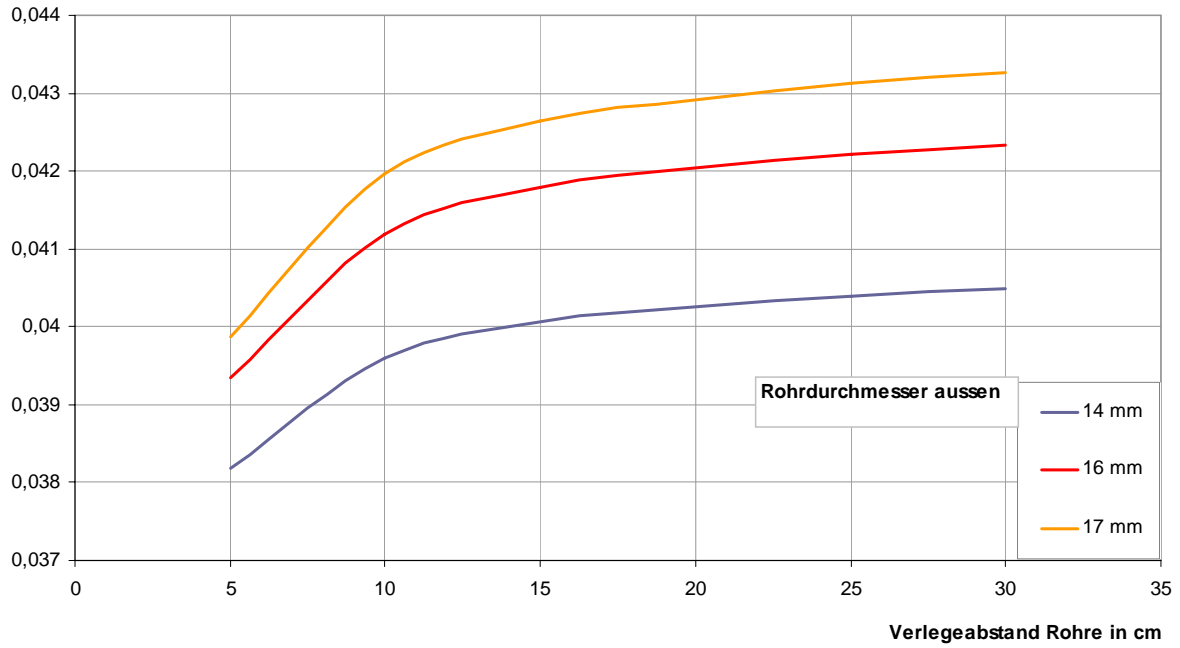
für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Anhydritestrich CAF 5

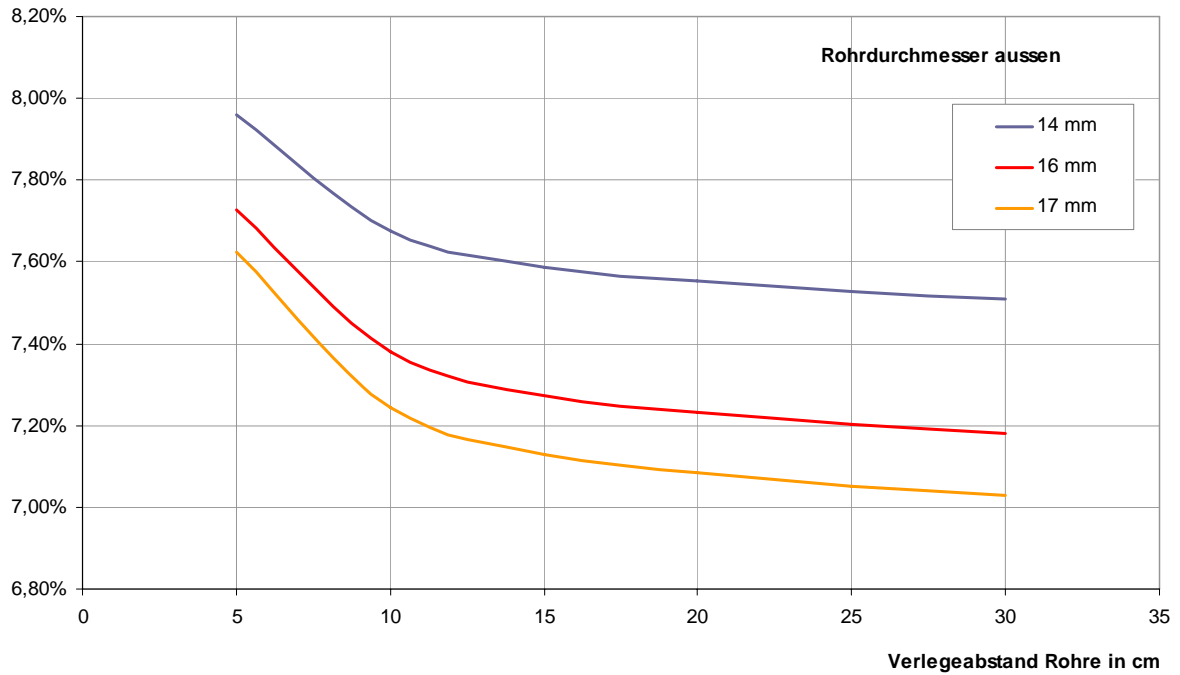
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F5

für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



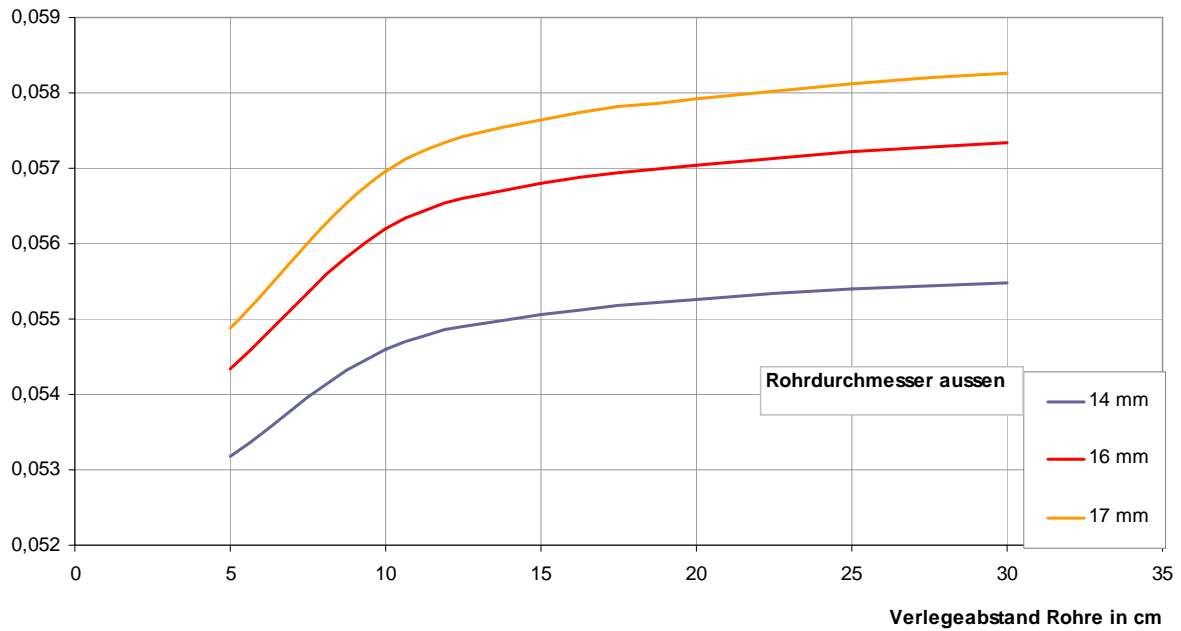
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F5

für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



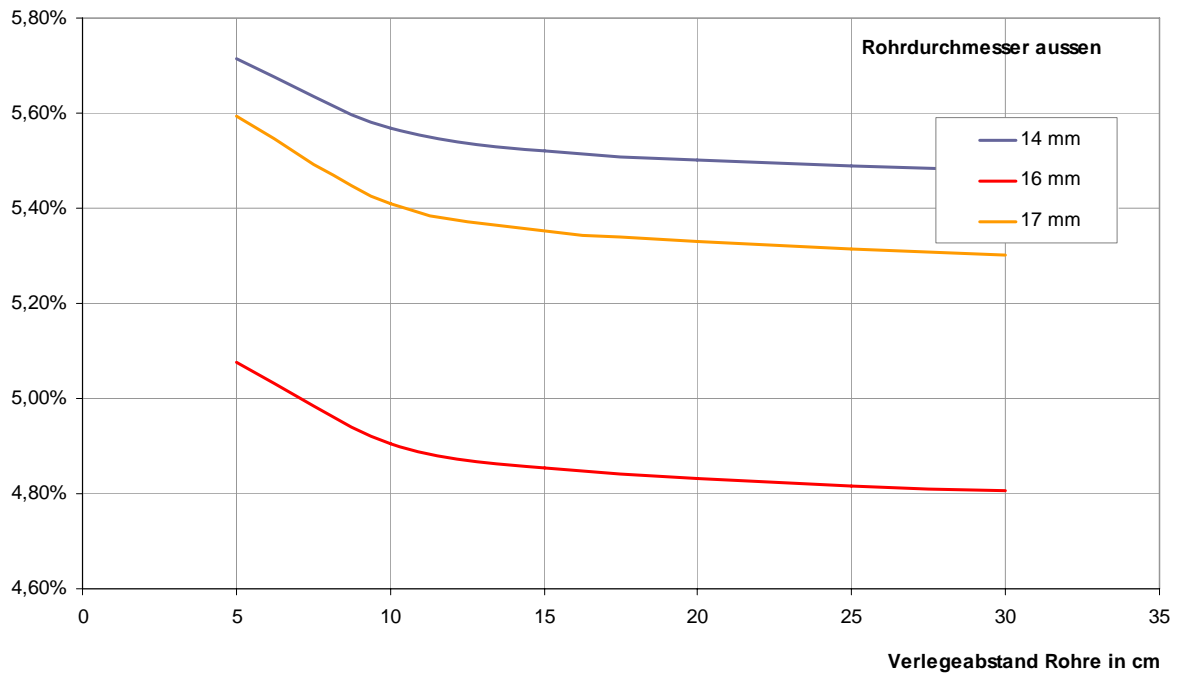
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F5

für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F5

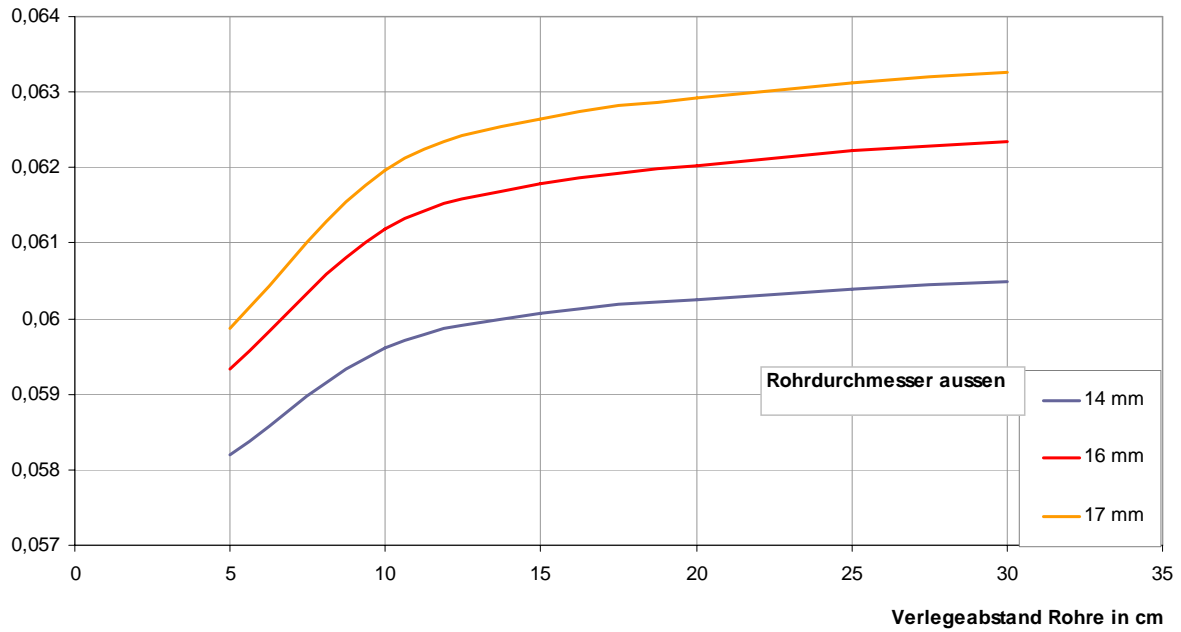
für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit





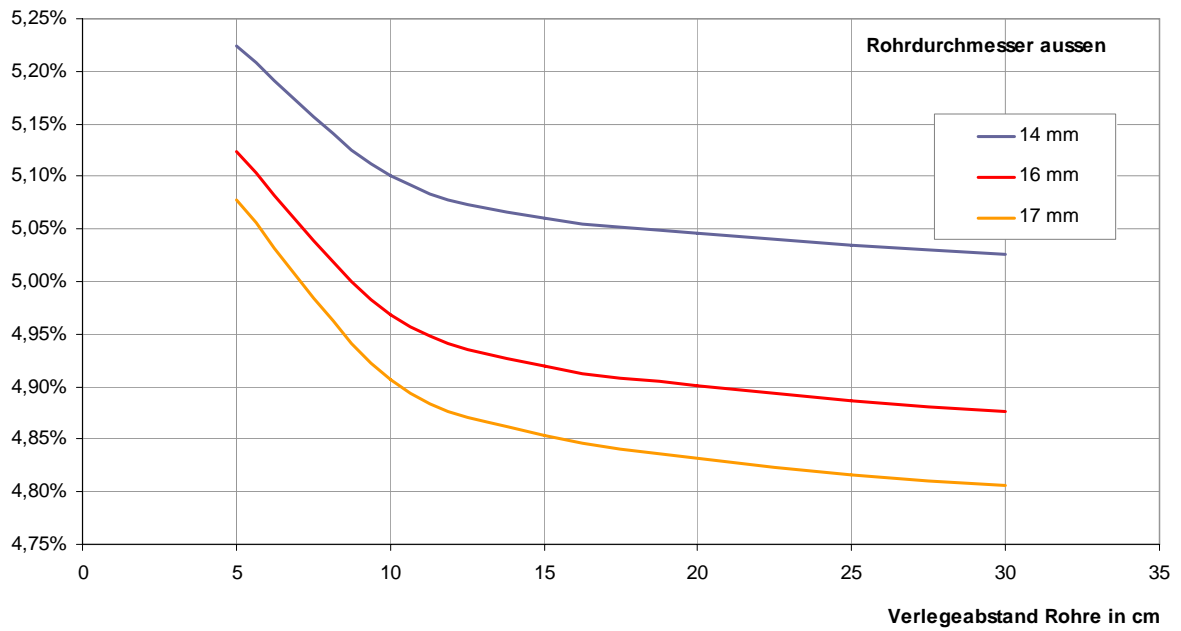
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F5

für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



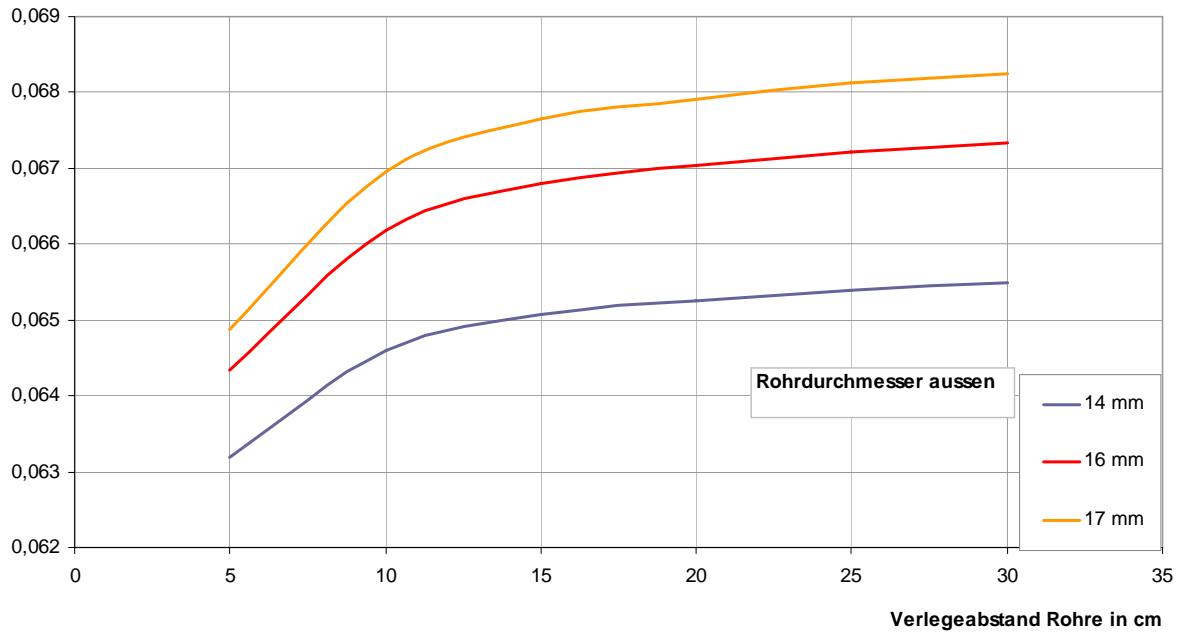
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F5

für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



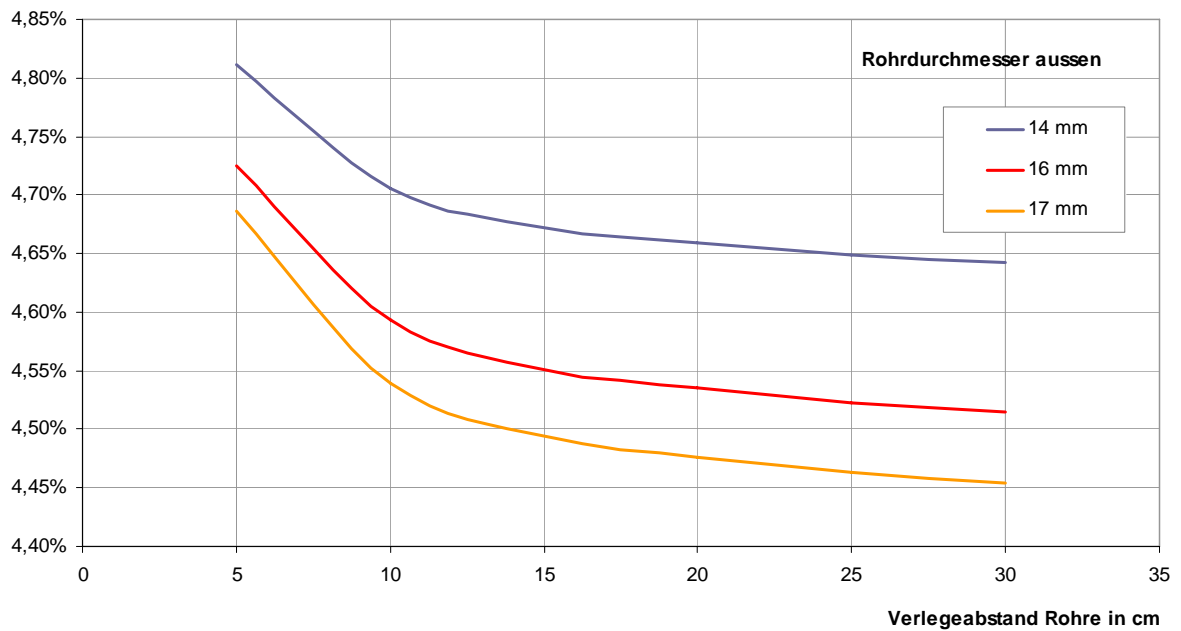
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F5

für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F5

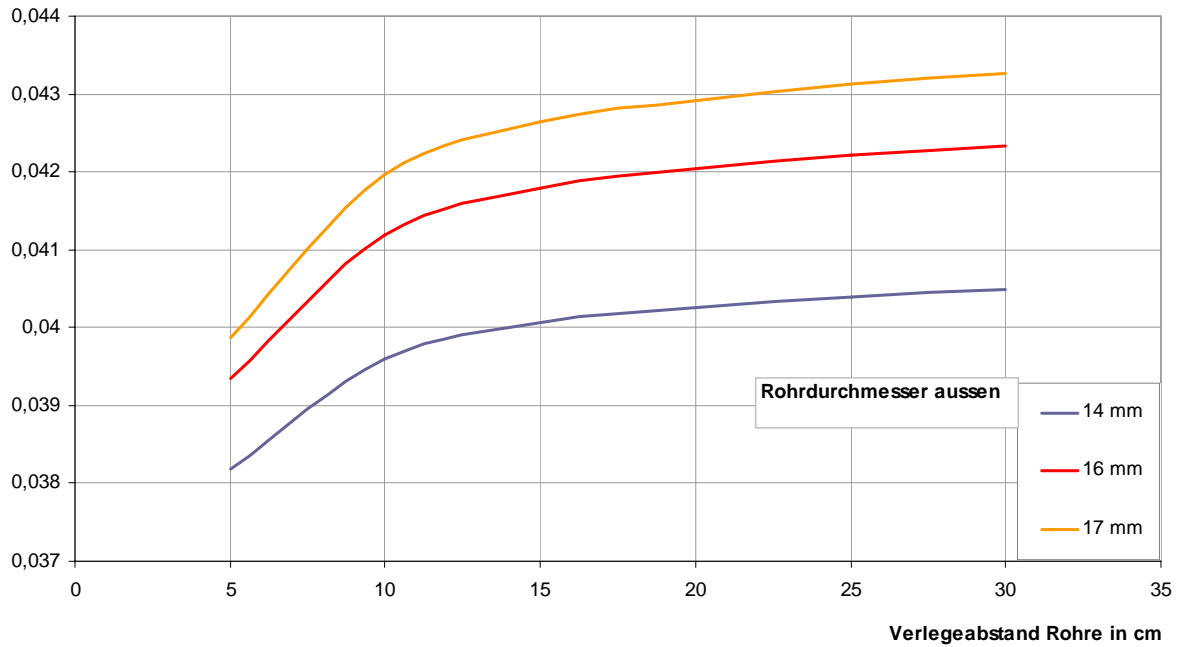
für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Anhydritestrich CAF 7

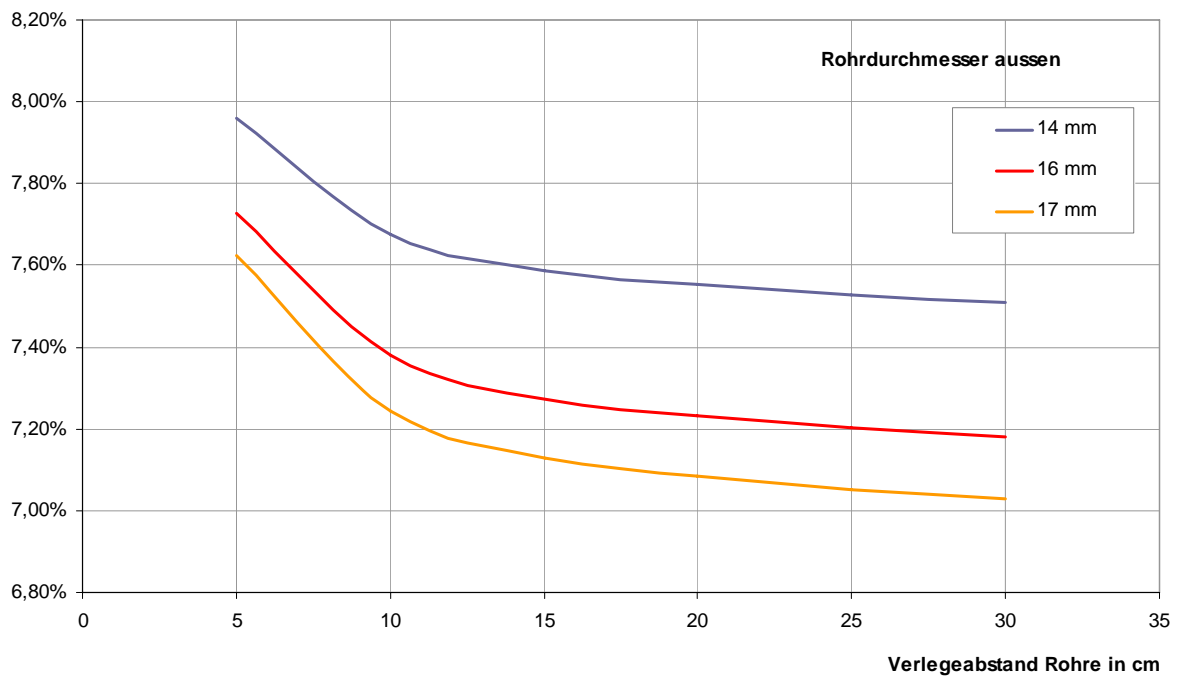
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F7

für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



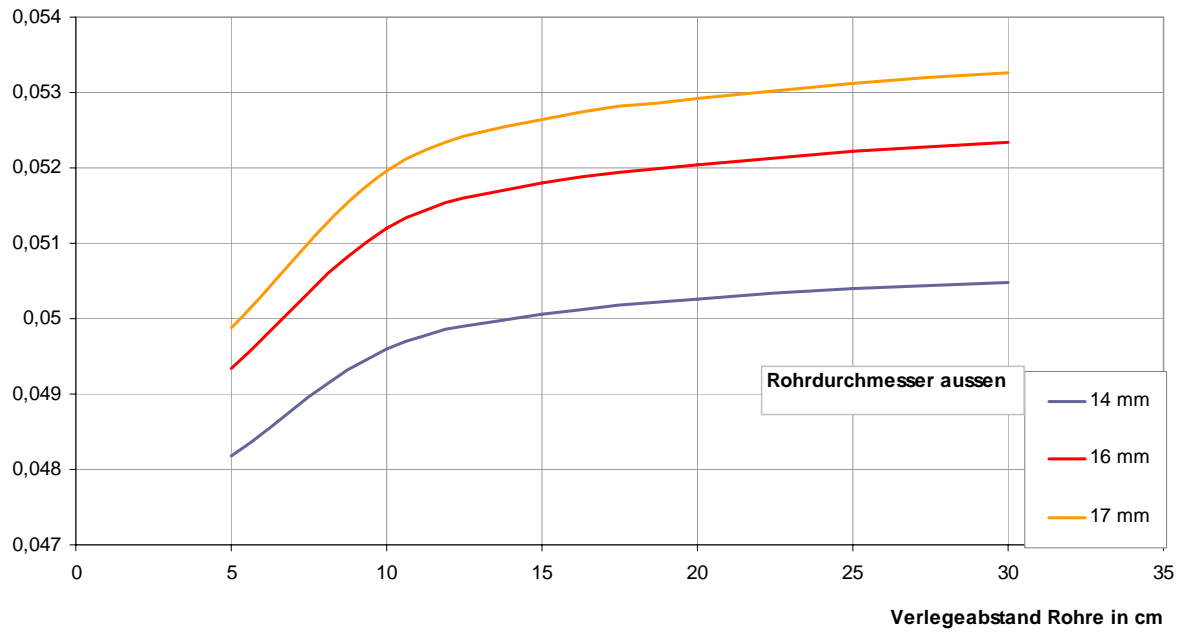
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F7

für 2 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



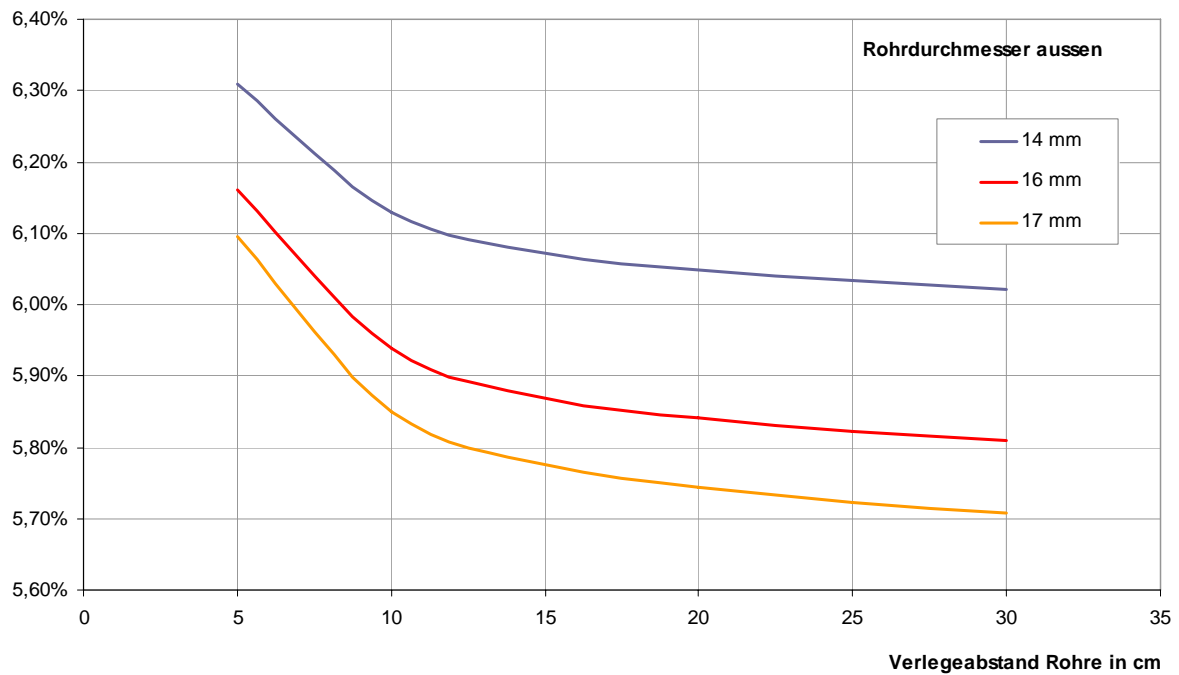
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F5

für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



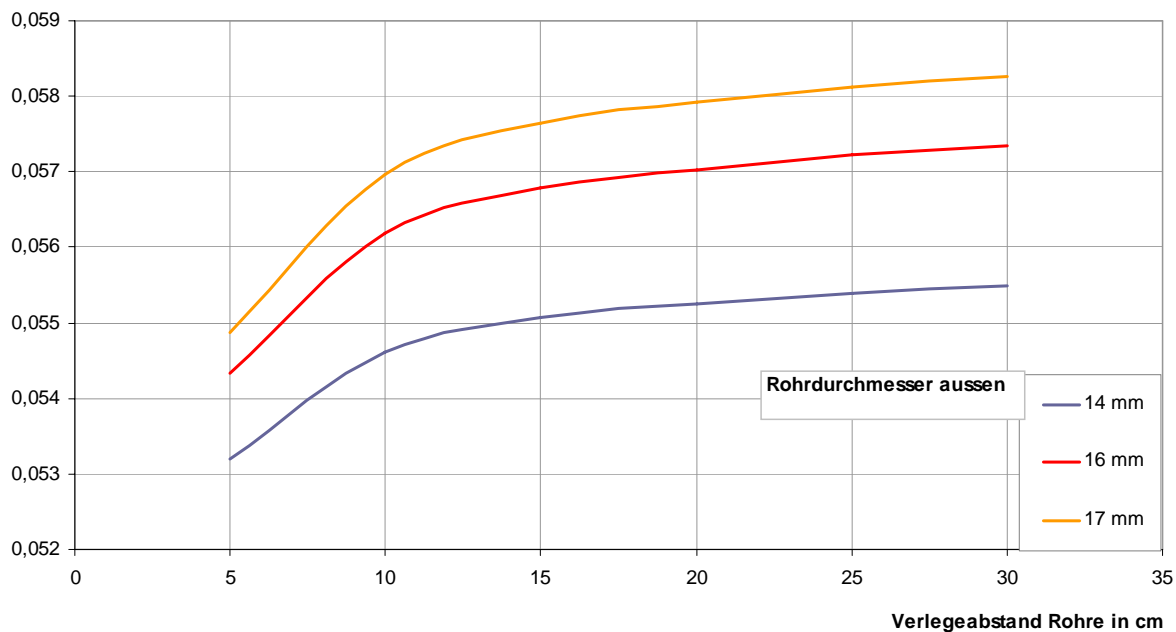
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F7

für 3 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



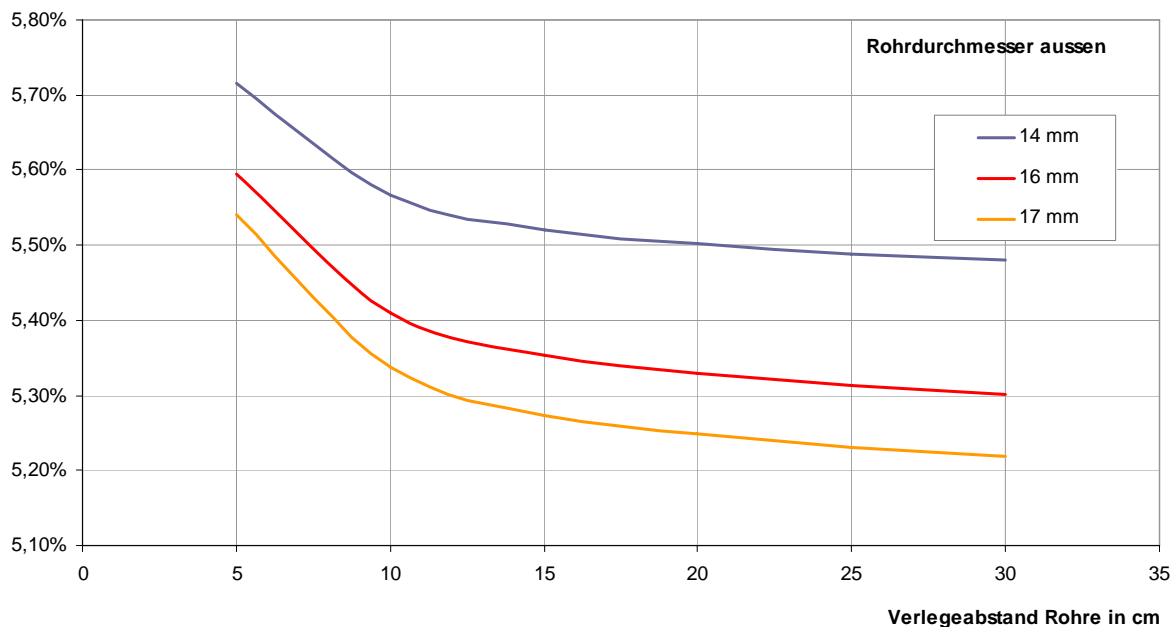
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F7

für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



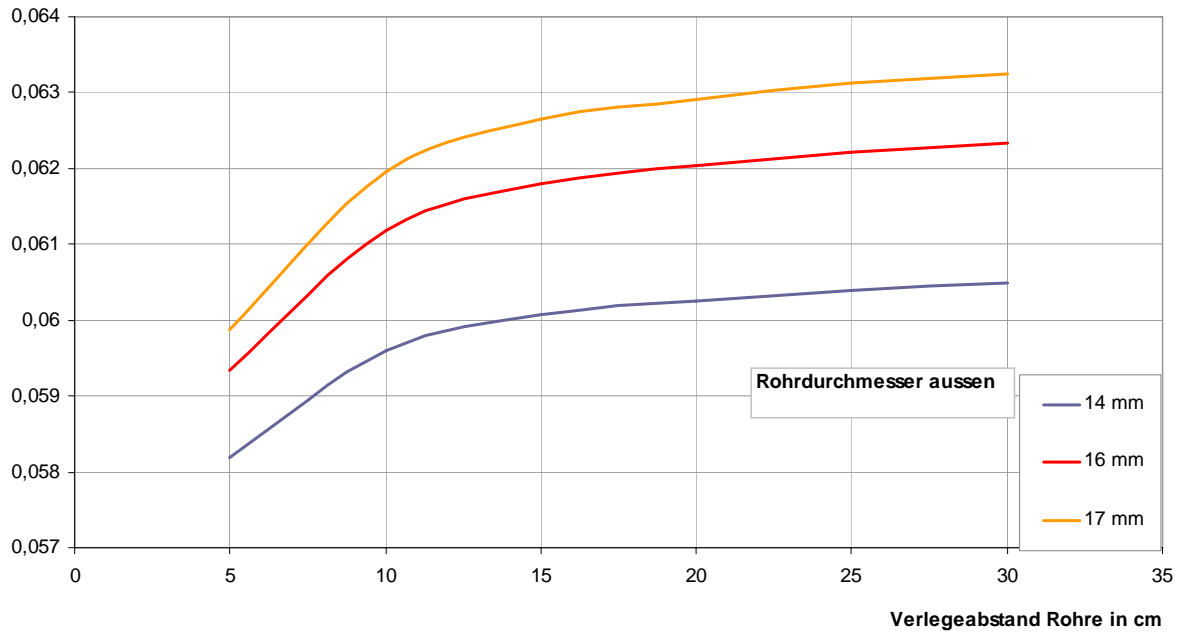
Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F7

für 4 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



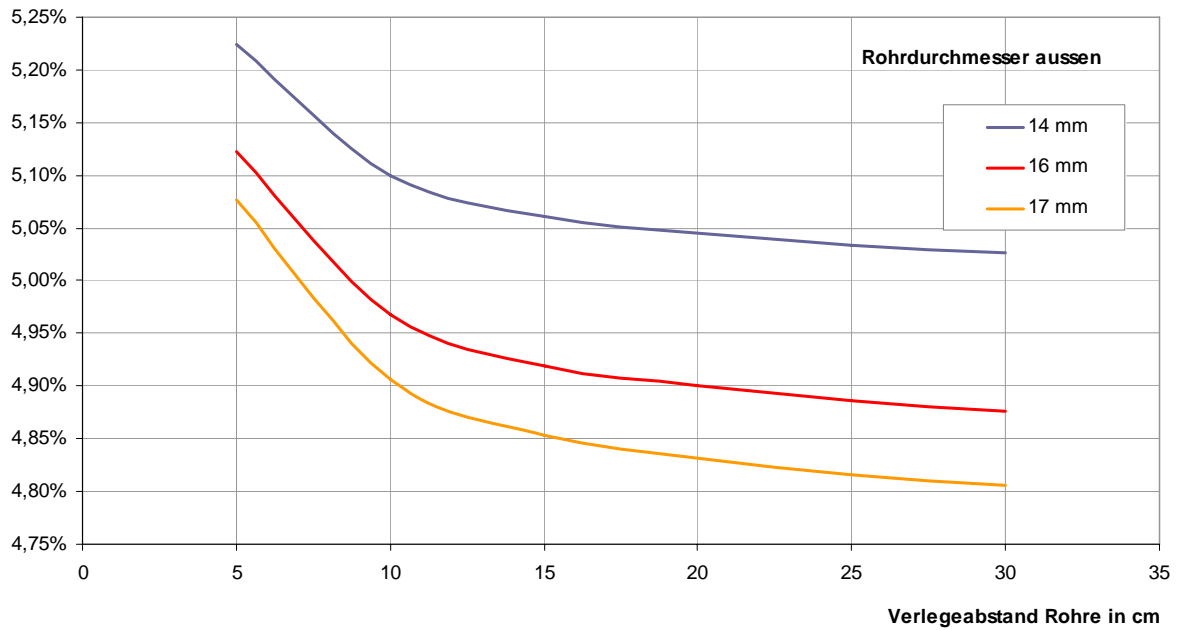
m<sup>3</sup> Estrich pro m<sup>2</sup>;  
Klasse CAF F7

für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit



Vol.-anteil PCM in %  
Klasse CAF F7

für 5 KN p.m<sup>2</sup> Druckfestigkeit





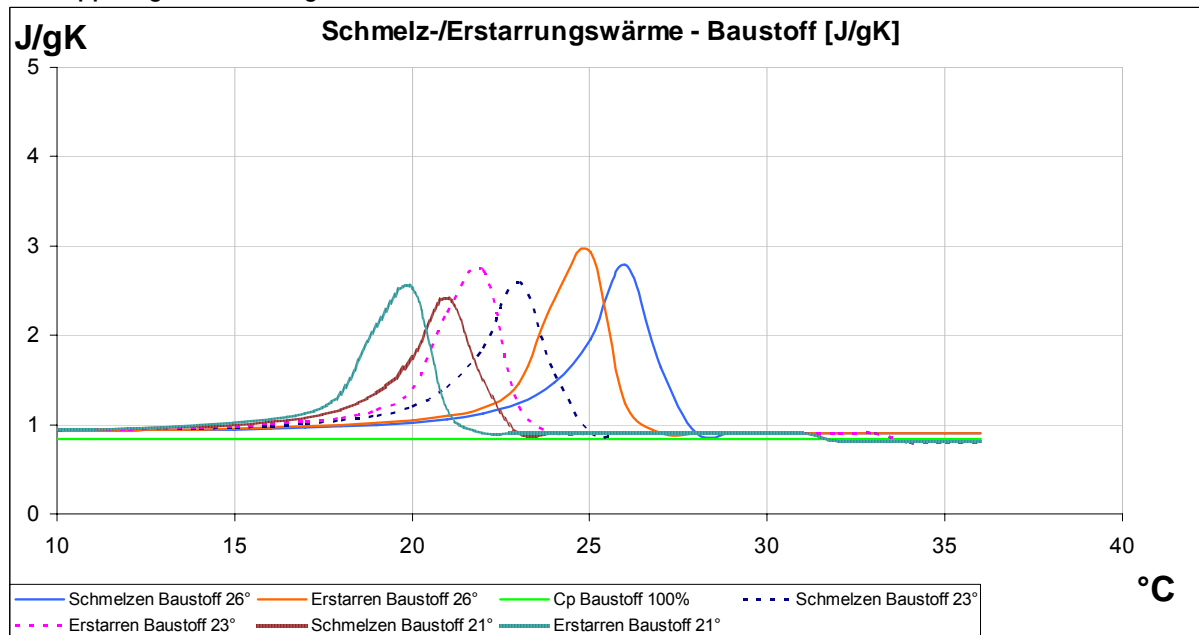
## **7.6. Anlage A 6 Schmelz- und Erstarrungsenthalpie für Stoffgemische**



## **7. 6.1. Anlage A 6.1 Stoffgemische mit Fließestrich und PCM**

**Anhydritestrich + PCM**

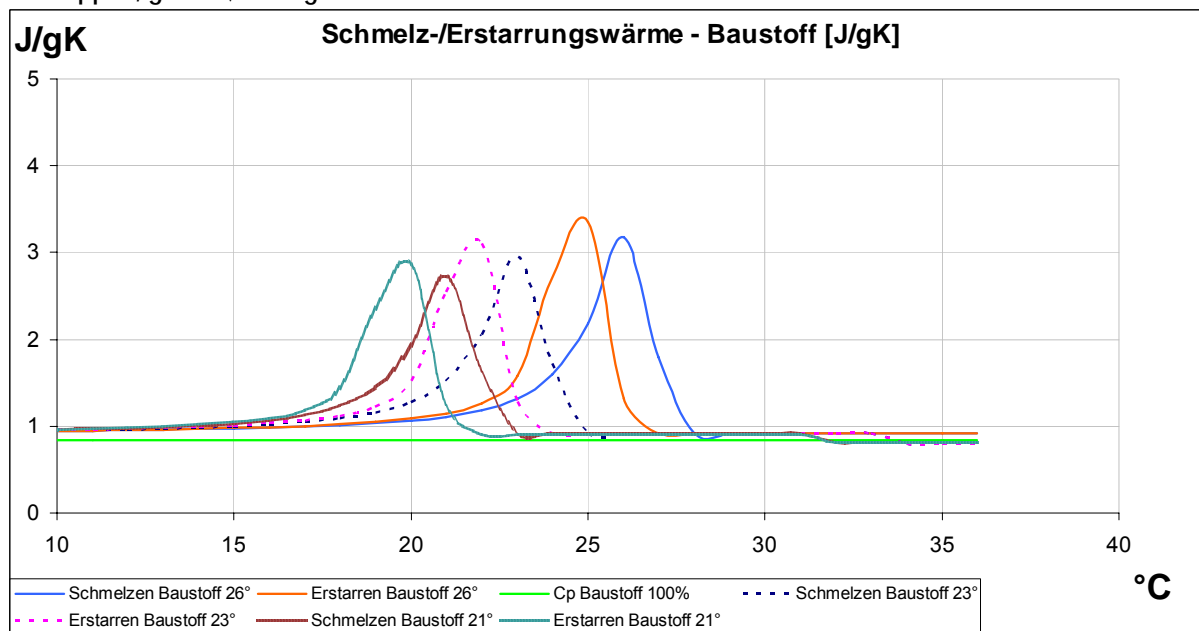
5% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2.044
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,15

**Anhydritestrich + PCM**

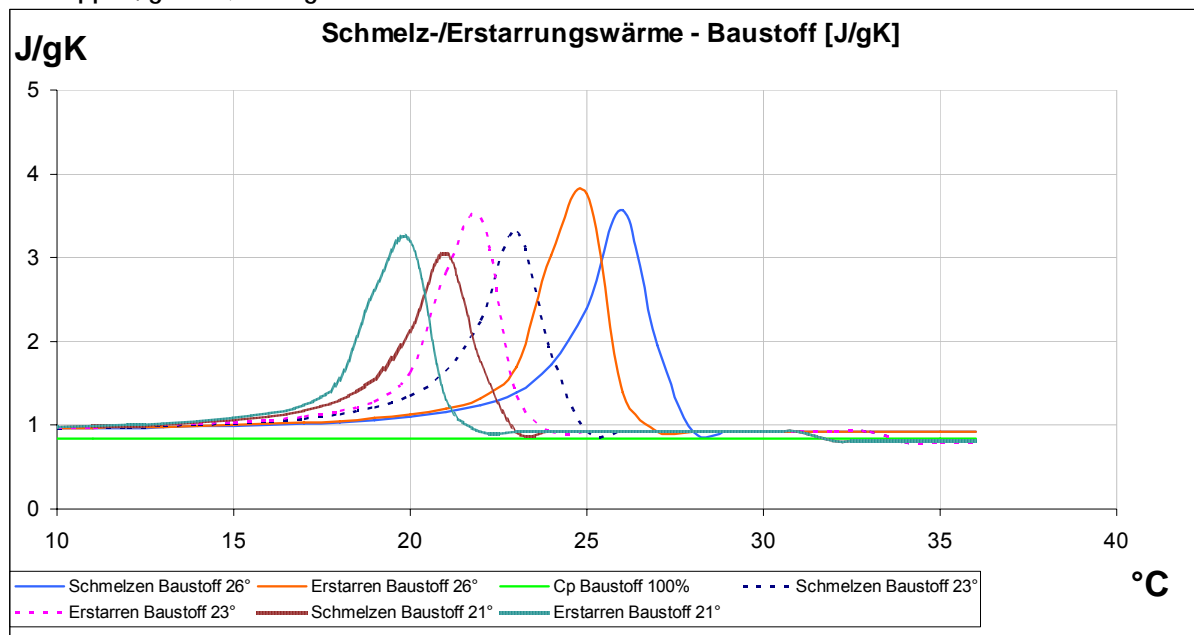
6% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2.033
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,14

**Anhydritestrich + PCM**

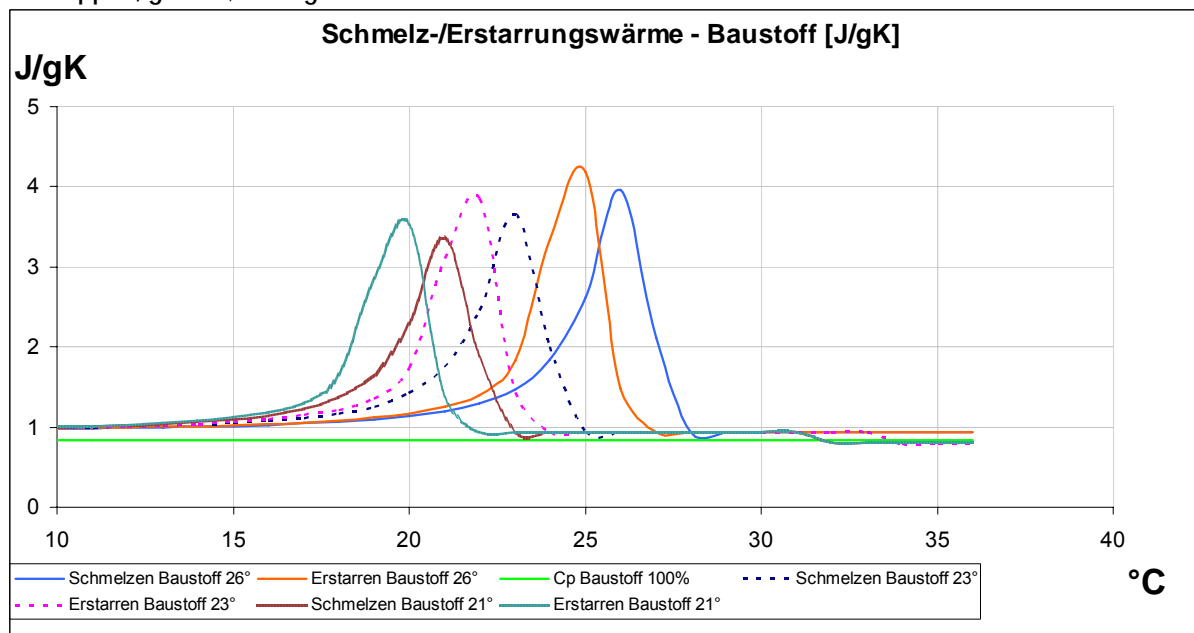
7% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2.022
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,13

**Anhydritestrich + PCM**

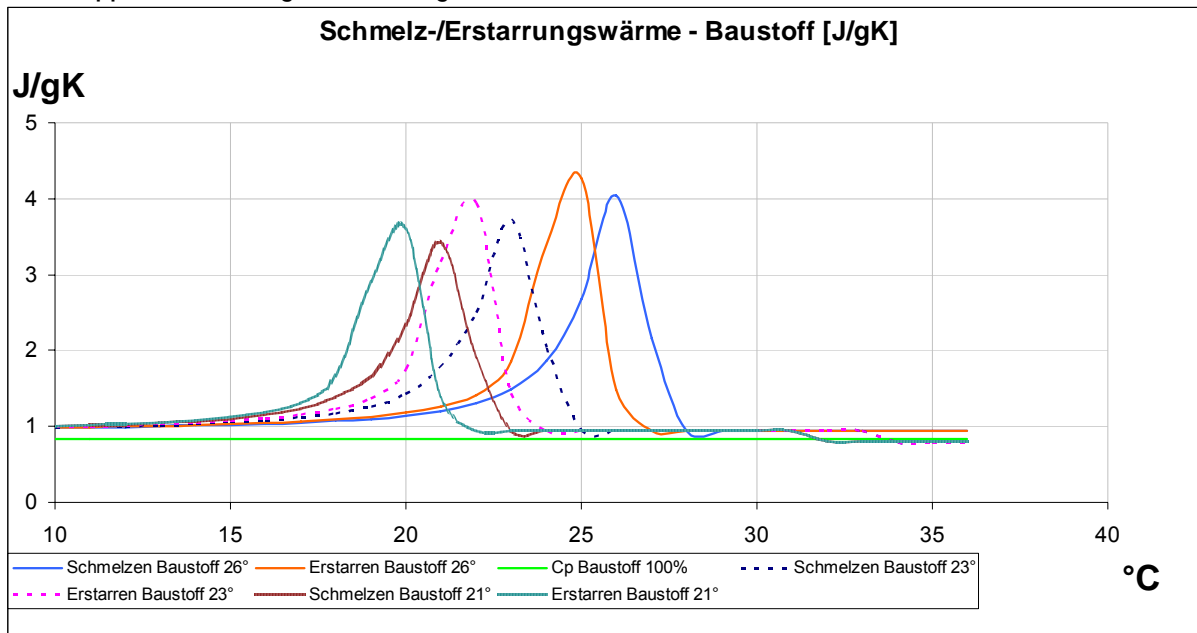
8% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2.010
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,12

**Anhydritestrich + PCM**

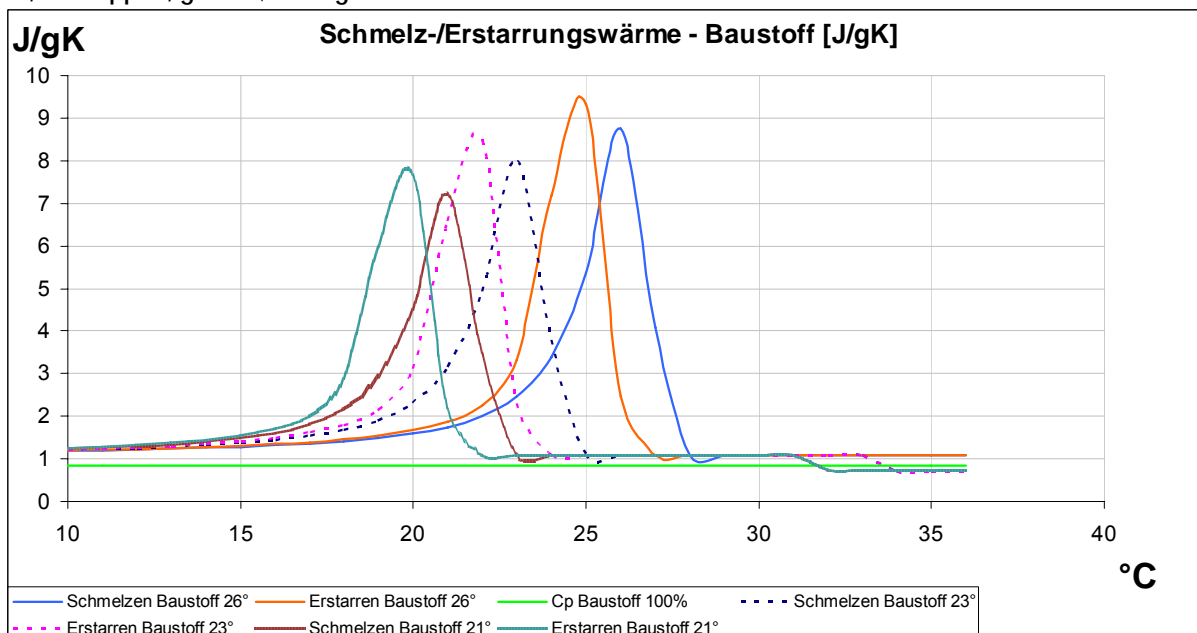
8,2% Noppen & Ronden gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2.008
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,11

**Anhydritestrich + PCM**

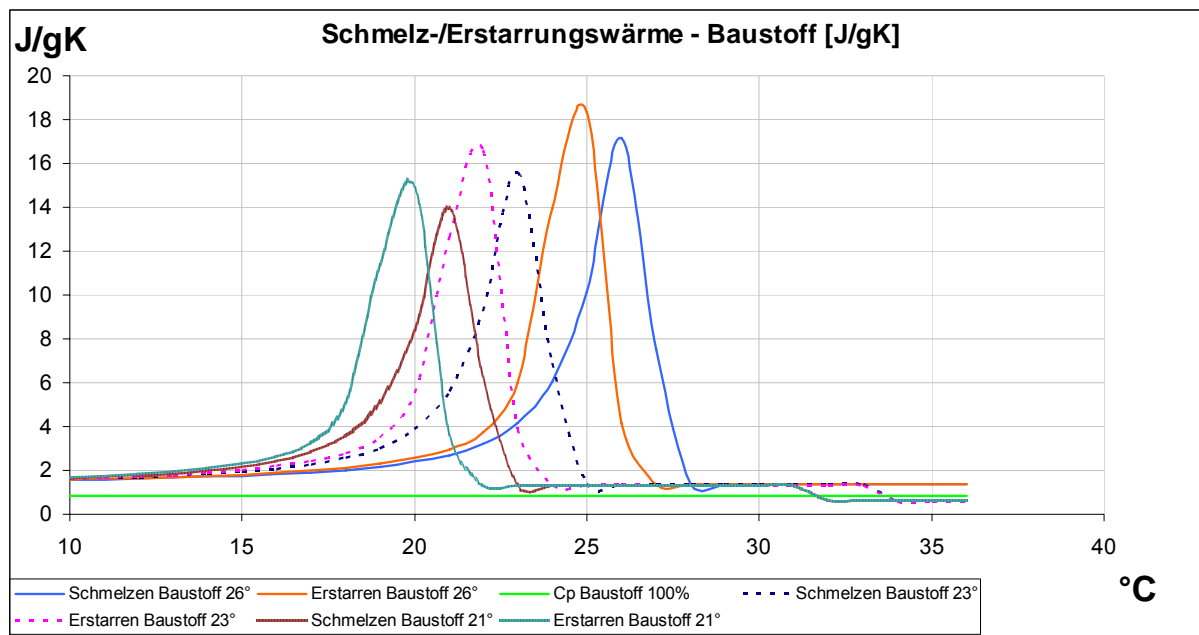
20,3% Noppen, gefüllt ; bezogen auf 2 cm Estrich



Dichte [kg/m³]	1.873
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,98

**Anhydritestrich + PCM**

41,8% Noppen & Ronden, gefüllt ; bezogen auf 2 cm Estrich

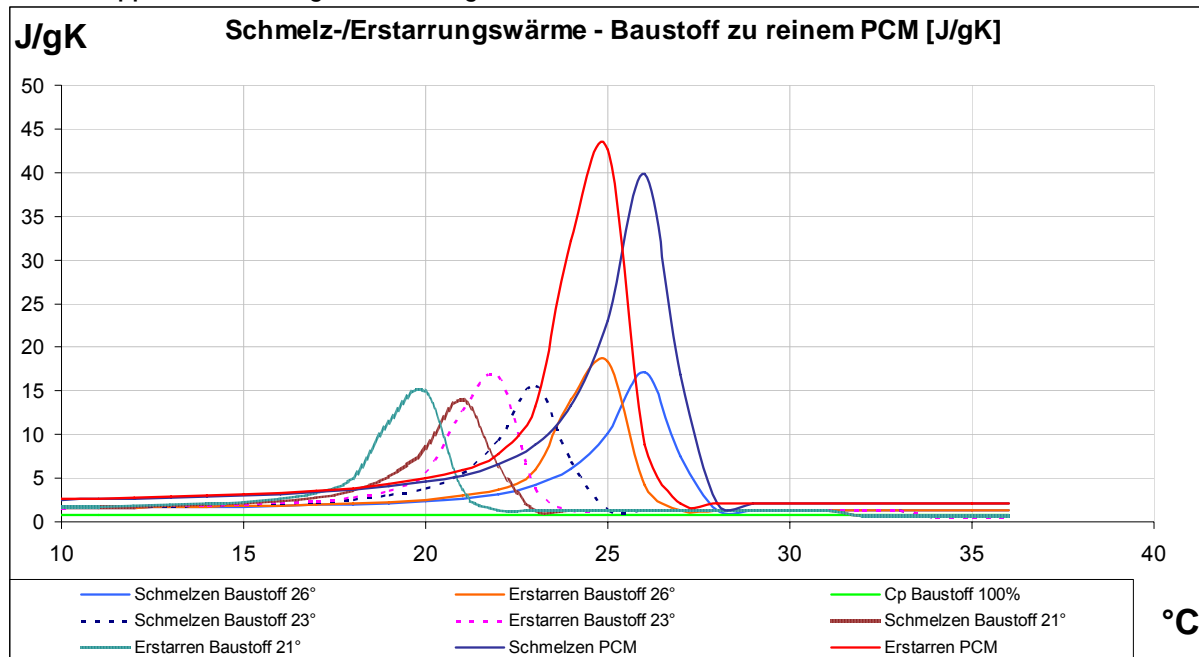


Dichte [kg/m³]	1.632
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,76

Vergleich zu reinem PCM

Anhydritestrich + PCM

41,8 % Noppen & Ronden, gefüllt ; bezogen auf 2 cm Estrich



Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1,632
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,76

Ausgangswerte für obigen Vergleich

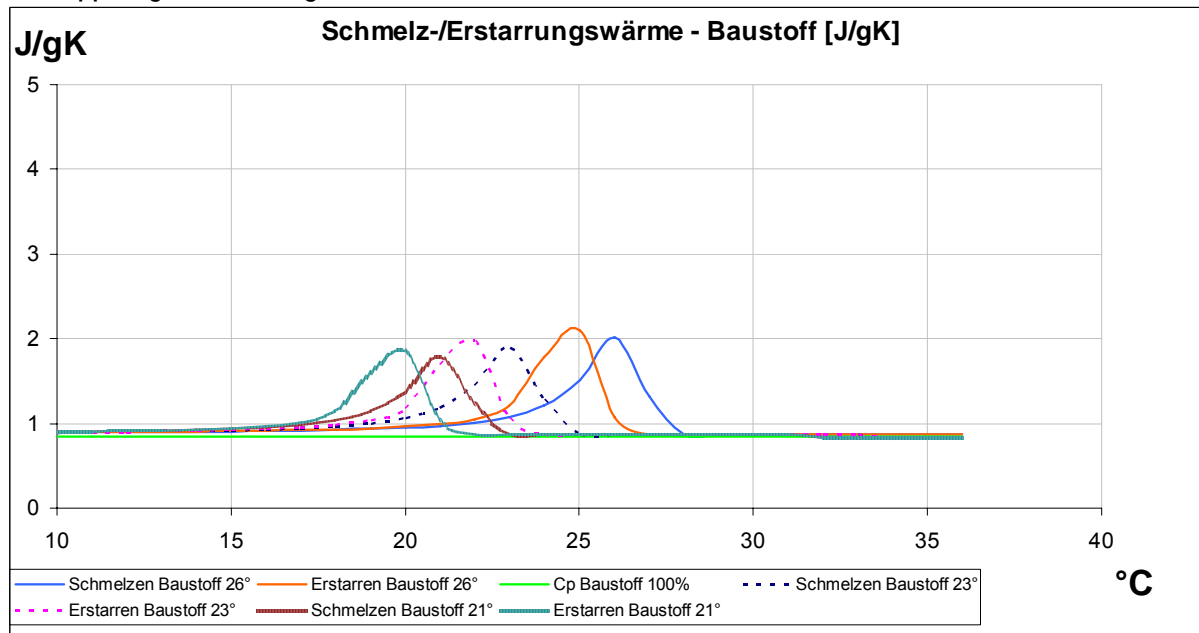
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Anhydritestrich	2.100
spez. Wärmekapazität C <sub>p</sub> [J/gK]	Anhydritestrich	0,84
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Anhydritestrich	1,20

Daten Micronal PCM (fest, ein Partikel)	
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,98
spez. Wärmekapazität C <sub>p</sub> [kJ/kgK]	2,4
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,14

## **7.6.2. Anlage A 6.2 Stoffgemische mit Zementestrich und PCM**

Zementestrich + PCM

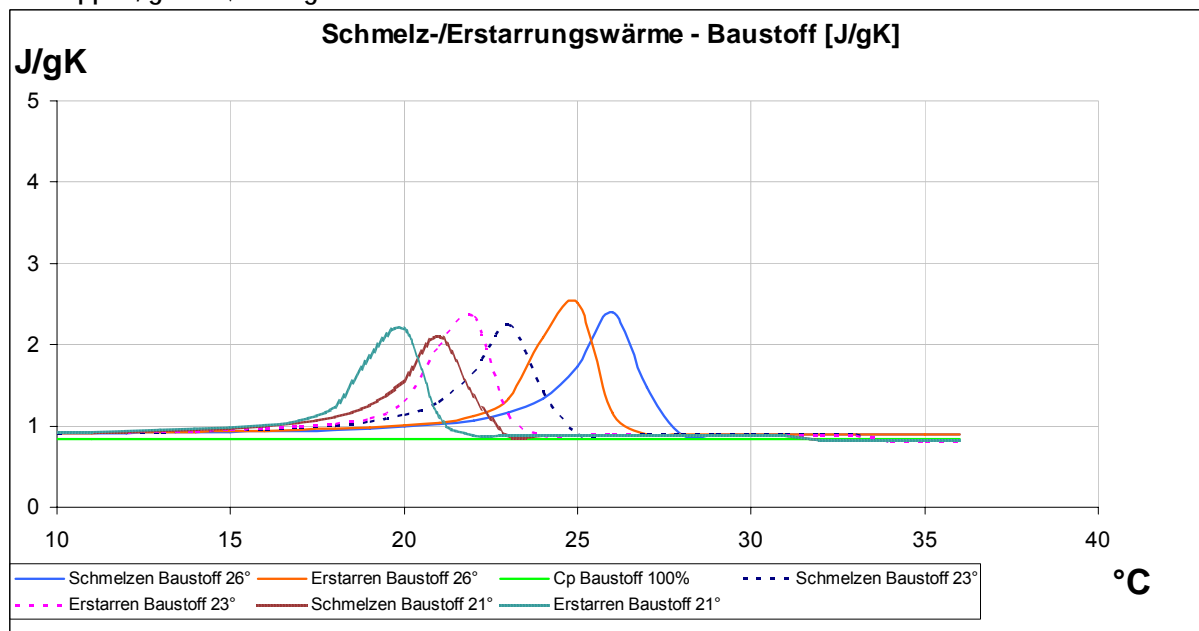
3% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2.163
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,36

Zementestrich + PCM

4% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich

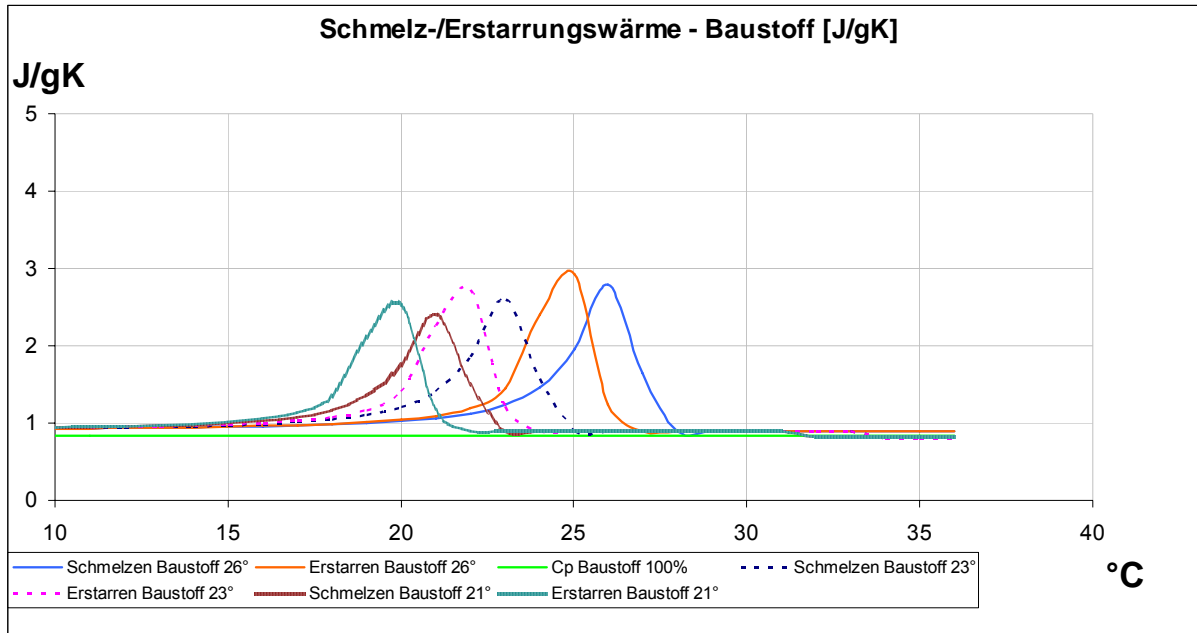


Dichte [kg/m³]	2.151
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,35



Zementestrich + PCM

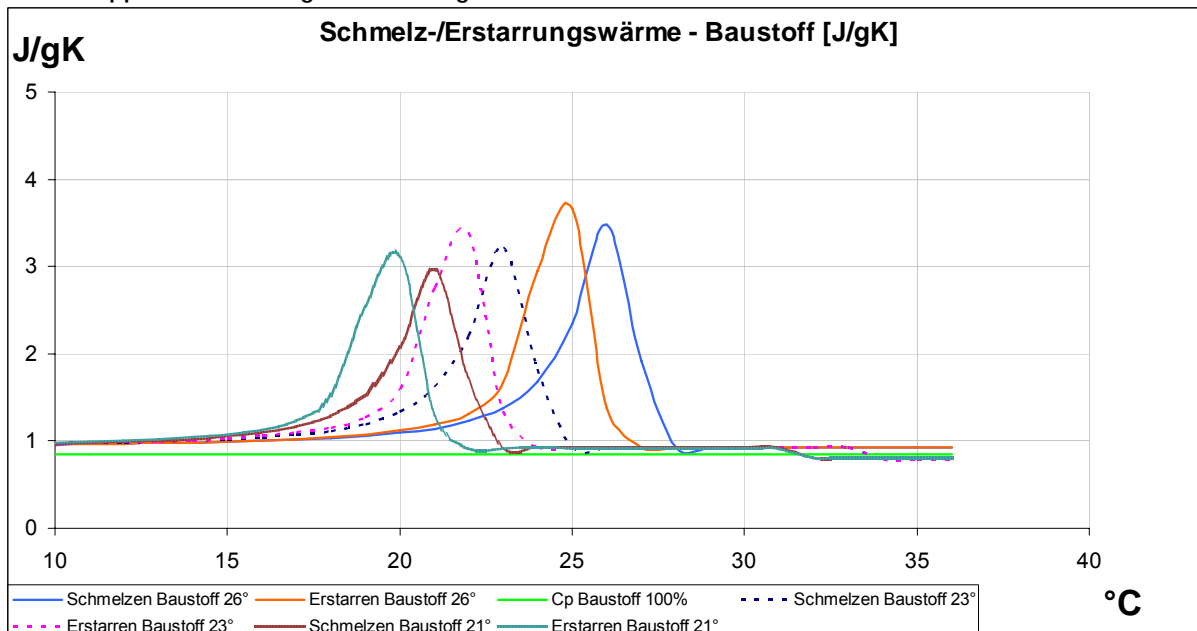
5% Noppen, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2,139
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,34

Zementestrich + PCM

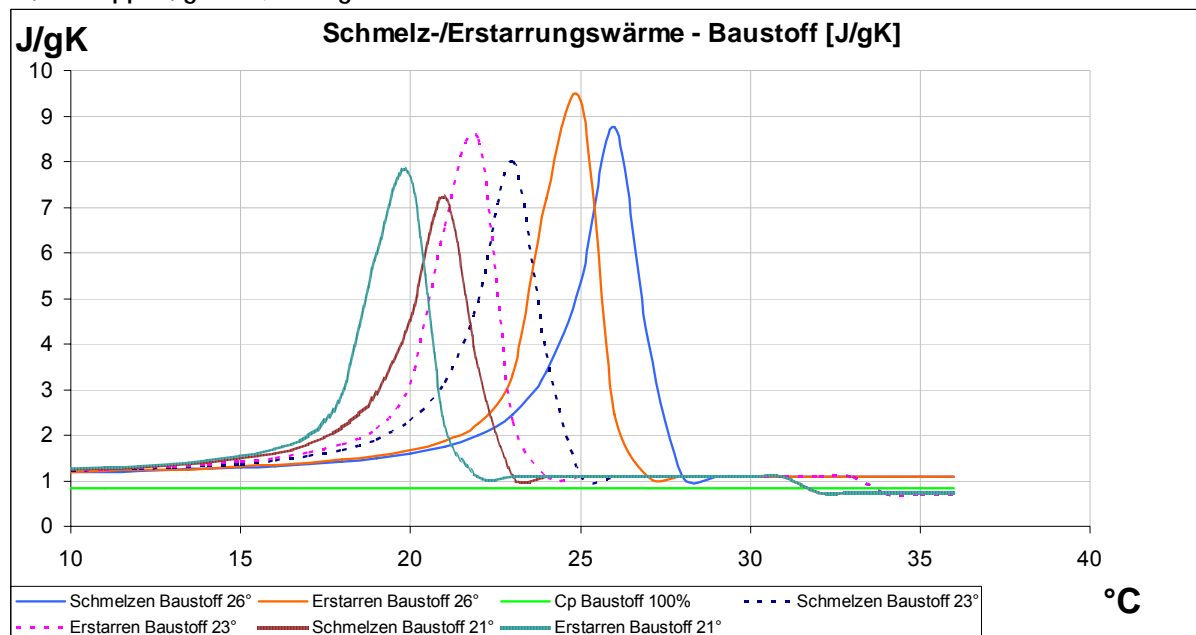
6,75% Noppen & Ronden, gefüllt ; bezogen auf Gesamtestrich



Dichte [kg/m³]	2,118
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,31

**Zementestrich + PCM**

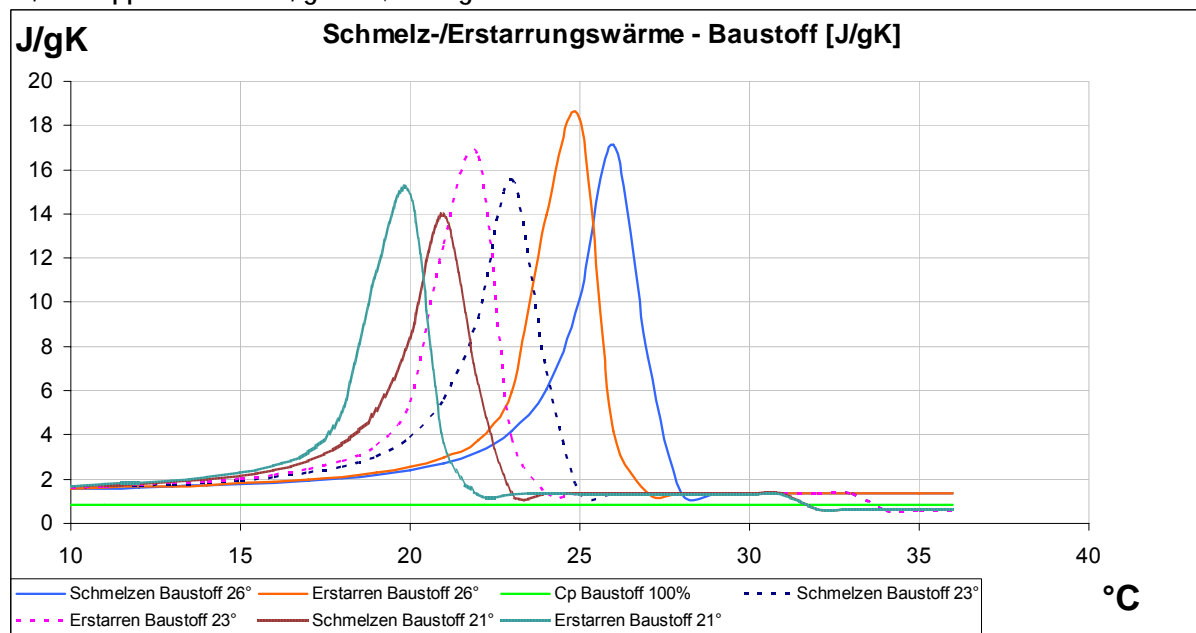
20,3% Noppen, gefüllt ; bezogen auf 2 cm Estrich



Dichte [kg/m³]	1,952
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	1,14

**Zementestrich + PCM**

41,8% Noppen & Ronden, gefüllt ; bezogen auf 2 cm Estrich

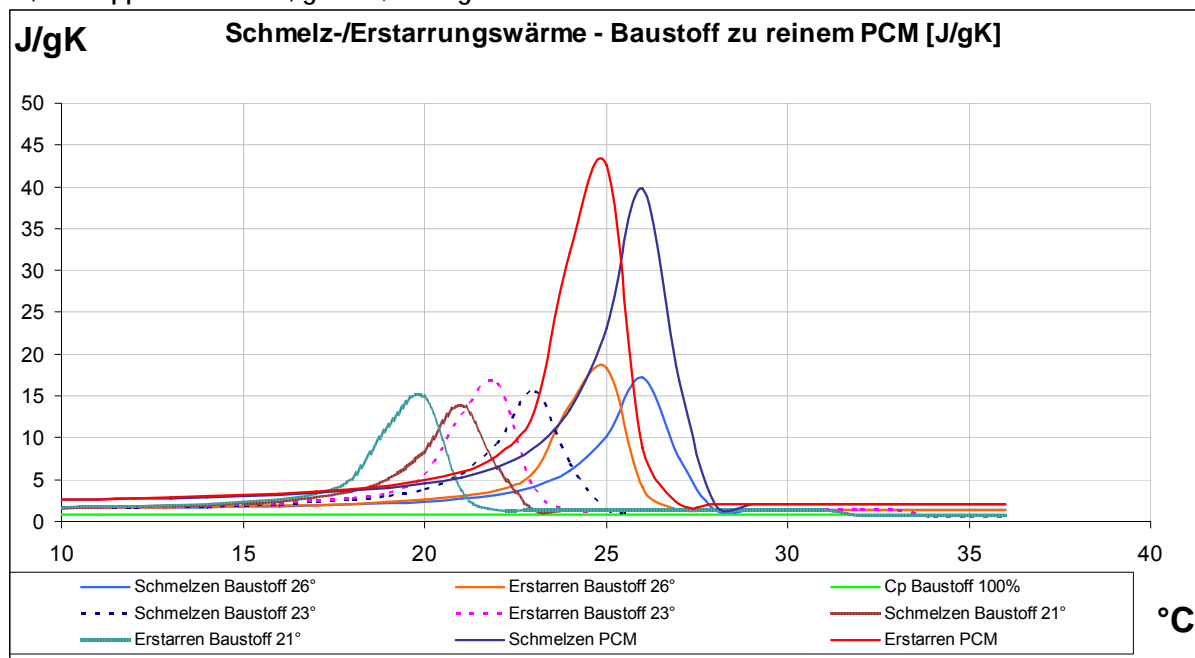


Dichte [kg/m³]	1,690
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,87

Vergleich zu reinem PCM

Zementestrich + PCM

41,8% Noppen & Ronden, gefüllt ; bezogen auf 2 cm Estrich



Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1.690
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,87

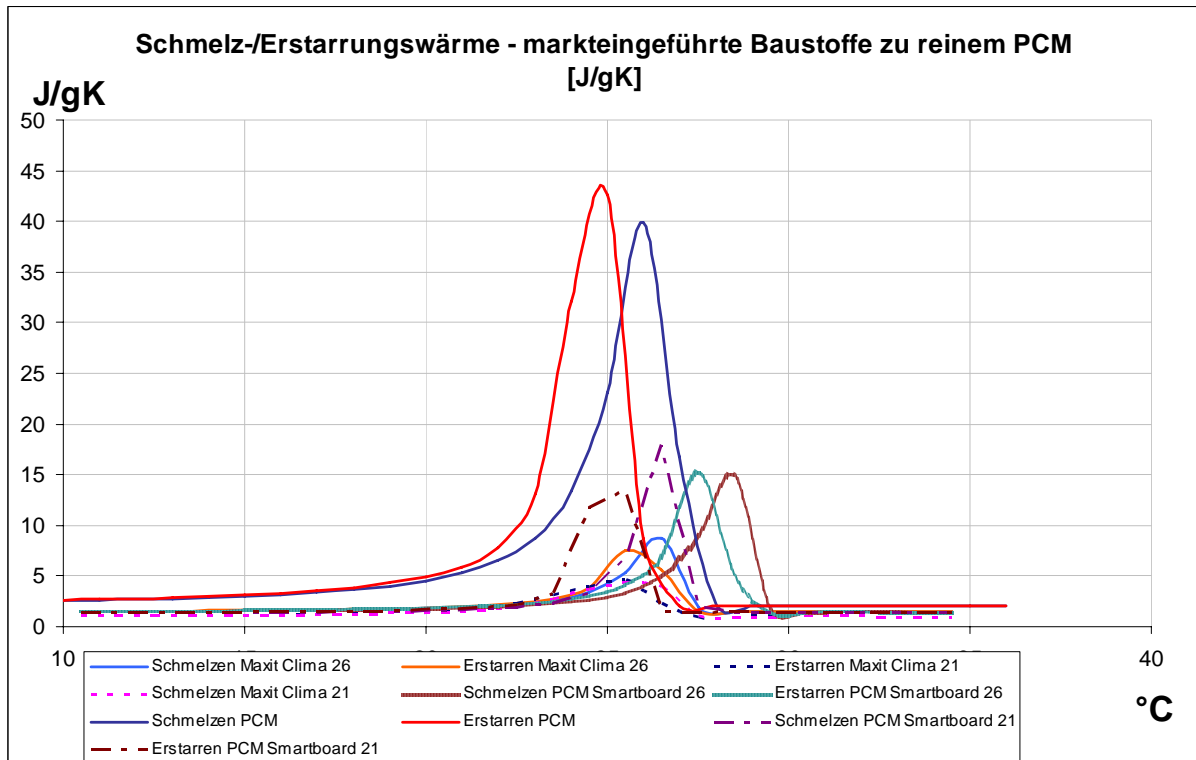
Ausgangswerte für obigen Vergleich

Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Zementestrich	2.200
spez. Wärmekapazität C <sub>p</sub> [J/gK]	Zementestrich	0,84
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Zementestrich	1,40

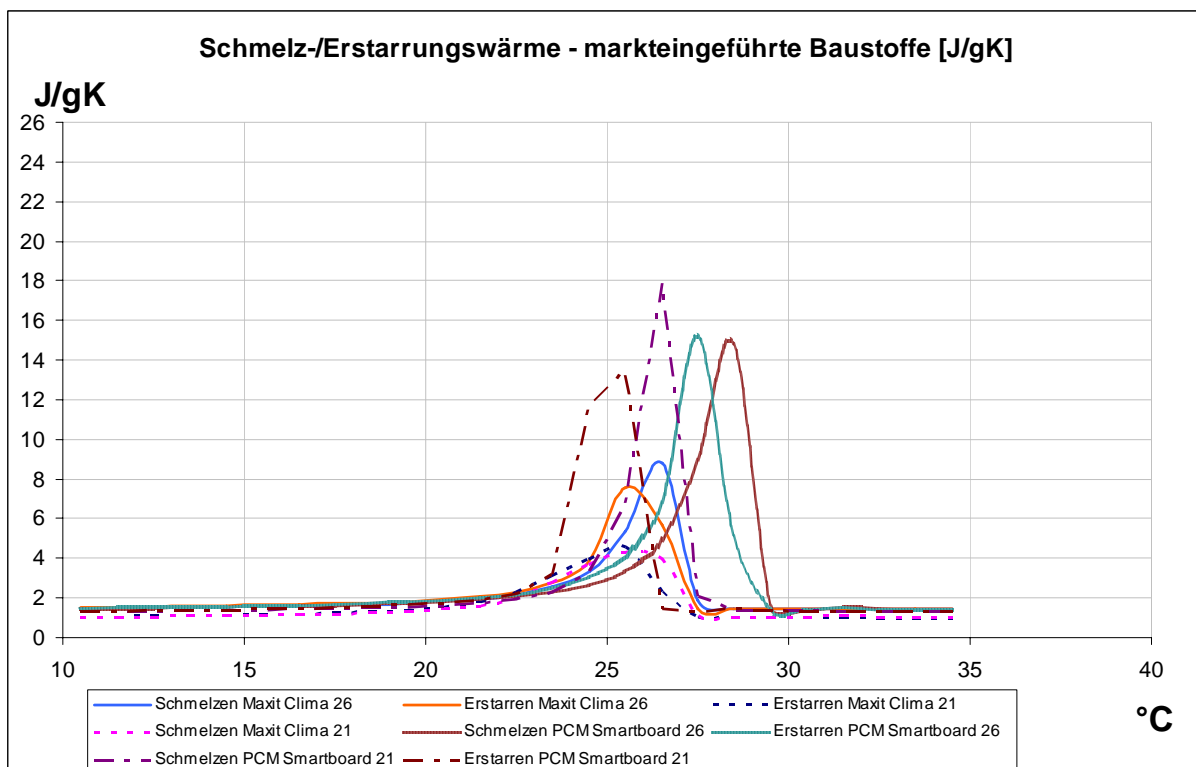
Daten Micronal PCM (fest, ein Partikel)	
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,98
spez. Wärmekapazität C <sub>p</sub> [kJ/kgK]	2,4
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,14

## **7. 6.3. Anlage A 6.3 Markteingeführte Stoffgemische und Verbundbaustoffe mit PCM**

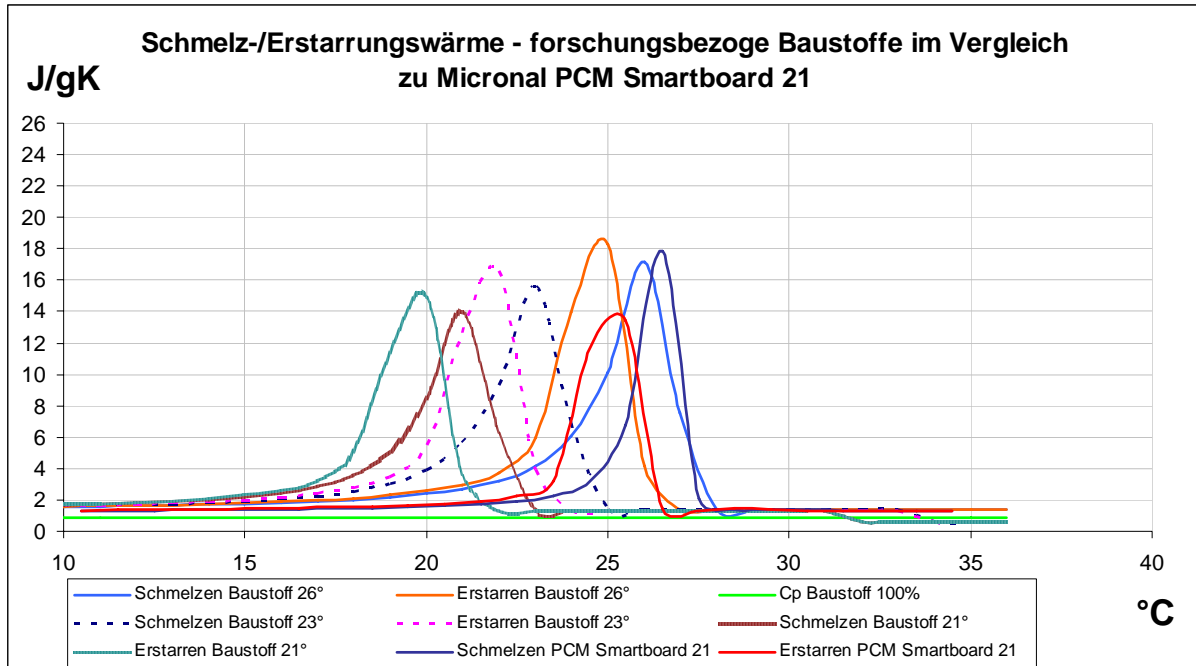
Markteingeführte PCM-Baustoffe im Vergleich zu reinem Micronal



Markteingeführte PCM Baustoffe



forschungsbezogenen Baustoffgemische im Vergleich zu Micronal PCM Smartboard 21

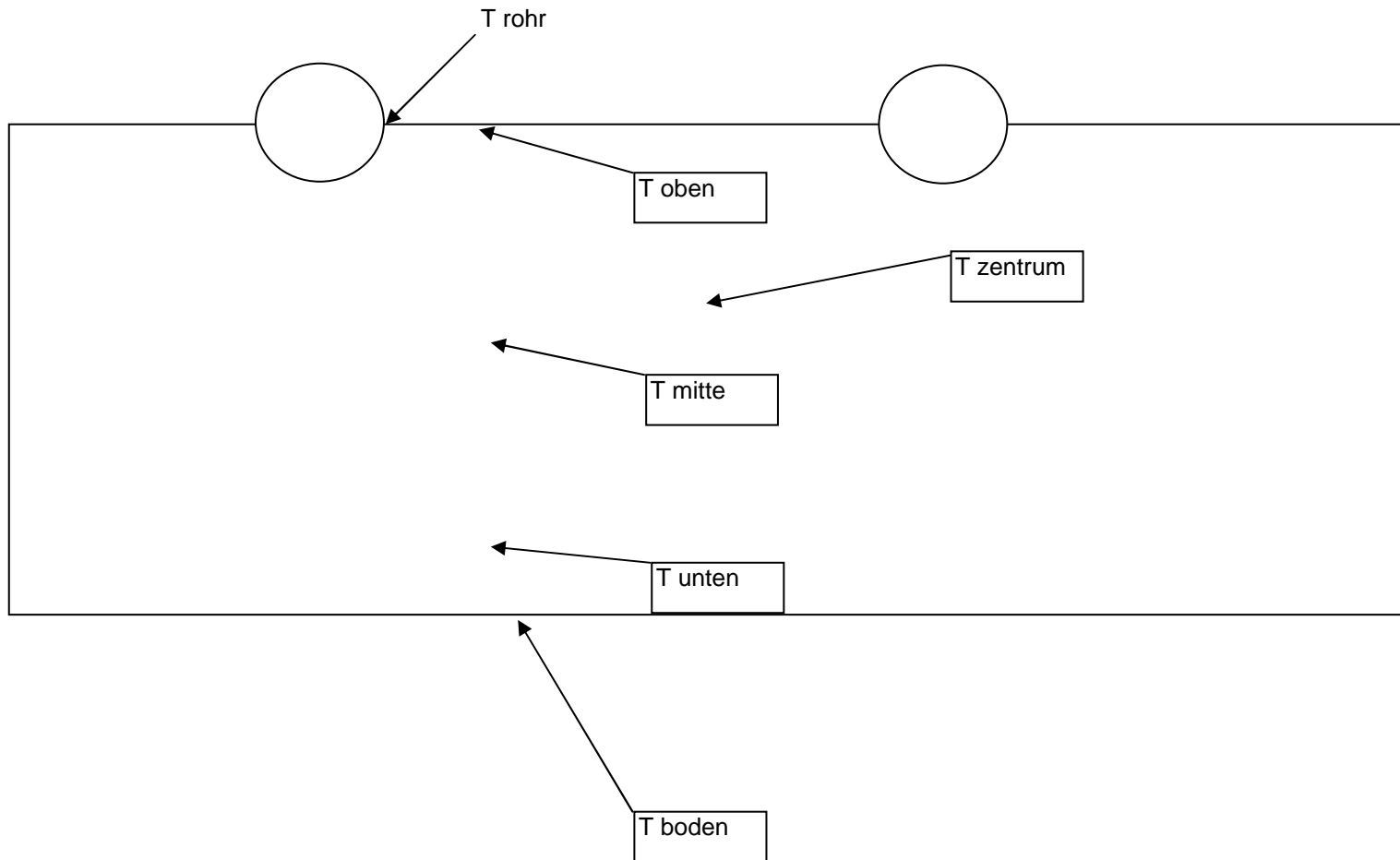


## **7. 7. Anlage A7 Messergebnisse 1. Versuchsreihe**

### **7. 7.1. Anlage A 7.1 Skizze Versuchsaufbau**

Die Anlage A7.2 – A 7.7 sind Messdaten. Je Anlage wird nur die erste Seite im Abschlussbericht dargestellt. Auf ihr ist der Dateiname und die Anzahl der Seiten mit aufgeführt. Die komplette Anlage ist als pdf - Datei auf der beiliegenden CD abgespeichert.

Dateiname: A 7.1 - Skizze





## **7. 7.2. Anlage A 7.2 – Messergebnisse Lupo 43 A**

Dateiname: A 7.2 - Lupo 43 A

SNR 04.03.2010 A LUPOG 0,86 kg Platte 15 mm  
 Info Test FB-H Lupo1/2 mit Graphit PCM 2,07 kg  
 Start 04.03.2010  
 10:32

Duration [sec]	T1 [°C] H2O ein	T2 [°C] H2O aus	T3 [°C] Rohr	T4 [°C] oben	T5 [°C] mitte	T6 [°C] unten	T7 [°C] boden	T8 [°C] zentrum
10,00	22	21	21	22	20	21	21	22
20,00	22	21	21	22	20	21	21	22
30,00	22	21	21	22	20	21	21	22
40,00	22	21	21	22	20	21	21	22
50,00	22	21	21	22	20	21	21	22
60,00	22	21	21	22	20	21	21	22
70,00	22	21	21	22	20	21	21	22
80,00	22	21	21	22	20	21	21	22
90,00	22	21	21	22	20	21	21	22
100,00	22	21	21	22	20	21	21	22
110,00	22	21	21	22	20	21	21	22
120,00	22	21	21	22	20	21	21	22
130,00	22	21	21	22	20	21	21	22
140,00	22	21	21	22	20	21	21	22
150,00	22	21	21	22	20	21	21	22
160,00	22	21	21	22	20	21	21	22
170,00	22	21	21	22	20	21	21	22
180,00	22	21	21	22	20	21	21	22
190,00	22	21	21	22	20	21	21	22
200,00	22	21	21	22	20	21	21	22
210,00	22	21	21	22	20	21	21	22
220,00	22	21	21	22	20	21	21	22
230,00	27	21	21	22	20	21	21	22
240,00	27	25	21	22	20	21	21	22
250,00	27	27	22	22	20	21	21	22
260,00	27	27	22	22	20	21	21	22
270,00	27	27	22	22	20	21	21	22
280,00	27	27	22	22	20	21	21	22
290,00	27	27	22	22	20	21	21	22
300,00	27	27	22	22	20	21	21	22
310,00	27	27	22	22	21	21	21	22
320,00	27	28	22	22	21	21	21	22
330,00	27	28	22	22	21	21	21	22
340,00	27	28	22	22	21	21	21	22
350,00	27	28	23	22	21	21	21	22
360,00	27	28	23	22	21	21	21	22
370,00	27	28	23	22	21	21	21	22
380,00	27	28	23	23	21	21	21	22
390,00	27	28	23	23	21	21	21	22
400,00	28	28	23	23	21	21	21	22
410,00	28	28	23	23	21	21	21	22
420,00	28	28	23	23	21	21	21	22
430,00	28	28	23	23	21	21	21	22
440,00	28	28	23	23	21	21	21	22
450,00	28	28	23	23	21	21	21	22
460,00	28	28	23	23	21	21	21	22
470,00	28	28	23	23	21	21	21	22
480,00	28	28	23	23	21	21	21	22
490,00	28	28	23	23	21	21	21	22
500,00	28	28	23	23	21	21	21	22
510,00	28	28	23	23	21	21	21	22

## **7. 7.3. Anlage A 7.3 – Messergebnisse Lupo 43 B**

Dateiname: A 7.3 - Lupo 43 B

SNR 04.03.2010 B LUPOG 0,82 kg Platte 30 mm  
 Info Test FB-H Lupo weis kompl. PCM 2,68 kg  
 Start 04.03.2010  
 10:34

Duration [sec]	T1 [°C] H2O ein	T2 [°C] H2O aus	T3 [°C] Rohr	T4 [°C] oben	T5 [°C] mitte	T6 [°C] unten	T7 [°C] boden	T8 [°C] zentrum
10,00	19	28	22	22	20	21	21	22
20,00	19	28	22	22	20	21	21	22
30,00	19	28	22	22	20	21	21	22
40,00	19	28	22	22	20	21	21	22
50,00	19	28	22	22	20	21	21	22
60,00	19	28	22	22	20	21	21	22
70,00	19	28	22	22	20	21	21	22
80,00	19	28	22	22	20	21	21	22
90,00	19	28	22	22	20	21	21	22
100,00	19	28	22	22	20	21	21	22
110,00	19	28	22	22	20	21	21	22
120,00	19	28	22	22	20	21	21	22
130,00	19	28	22	22	20	21	21	22
140,00	19	27	22	22	20	21	21	22
150,00	19	27	23	22	20	21	21	22
160,00	19	27	23	22	20	21	21	22
170,00	19	27	23	22	20	21	21	22
180,00	19	27	23	23	20	21	21	22
190,00	19	27	23	23	20	21	21	22
200,00	19	27	24	23	20	21	21	22
210,00	19	27	24	23	20	21	21	22
220,00	19	27	24	23	20	21	21	22
230,00	19	27	24	23	20	21	21	22
240,00	19	27	24	23	21	21	21	22
250,00	19	27	24	23	20	21	21	22
260,00	20	27	24	23	21	21	21	22
270,00	19	27	24	23	21	21	21	22
280,00	20	28	24	23	21	21	21	22
290,00	19	28	24	23	21	21	21	22
300,00	19	28	24	23	21	21	21	22
310,00	19	28	24	24	21	21	21	22
320,00	19	28	24	24	21	21	21	22
330,00	19	28	24	24	21	21	21	22
340,00	20	28	24	24	21	21	21	22
350,00	20	28	24	24	21	21	21	22
360,00	19	28	24	24	21	21	21	22
370,00	19	28	24	24	21	21	21	22
380,00	19	28	25	24	21	21	21	22
390,00	19	28	25	24	21	21	21	22
400,00	19	28	25	24	21	21	21	22
410,00	19	28	25	24	21	21	21	22
420,00	19	28	25	24	21	21	21	22
430,00	19	28	25	24	21	21	21	22
440,00	19	28	25	24	21	21	21	22
450,00	19	28	25	24	21	21	21	22
460,00	19	28	25	24	21	21	21	22
470,00	19	28	25	24	21	21	21	22
480,00	19	28	25	24	21	21	21	22
490,00	19	28	25	24	21	21	21	22
500,00	19	28	25	24	21	21	21	22
510,00	19	28	25	24	21	21	21	22

## **7. 7.4. Anlage A 7.4 – Messergebnisse AL 13 B**

Dateiname: A 7.4 - AI 13 B

SNR 01.03.2010 B AI 1,44 kg Platte 30 mm  
 Info test FB -H AI 99,5 PCM 2,14 kg  
 Start 01.03.2010  
 12:16

Duration [sec]	T1 [°C] H2O ein	T2 [°C] H2O aus	T3 [°C] Rohr	T4 [°C] oben	T5 [°C] mitte	T6 [°C] unten	T7 [°C] boden	T8 [°C] zentrum
10,00	18	23	22	22	21	21	21	22
20,00	18	23	22	22	21	21	21	22
30,00	18	23	22	22	21	21	21	22
40,00	18	23	22	22	21	21	21	22
50,00	18	24	22	22	21	21	21	22
60,00	18	24	22	22	21	21	21	22
70,00	18	24	22	23	21	21	21	22
80,00	18	24	22	22	21	21	21	22
90,00	18	24	22	23	21	21	21	22
100,00	18	24	22	23	21	21	21	22
110,00	18	24	23	23	21	21	21	22
120,00	18	24	23	23	21	21	21	22
130,00	18	24	23	23	21	21	21	22
140,00	18	25	23	23	21	21	21	22
150,00	18	25	23	23	21	21	21	22
160,00	18	25	23	23	21	21	21	22
170,00	18	25	23	23	21	21	21	22
180,00	18	25	23	23	21	21	21	22
190,00	18	25	23	23	21	21	21	22
200,00	18	25	23	23	21	21	21	22
210,00	18	25	23	23	21	21	21	22
220,00	18	25	23	23	21	21	21	22
230,00	18	25	23	23	21	21	21	22
240,00	18	26	23	23	21	21	21	22
250,00	18	26	23	23	21	21	21	22
260,00	17	26	23	23	21	21	21	22
270,00	17	26	23	23	21	21	21	22
280,00	17	26	23	23	21	21	21	22
290,00	18	26	23	23	21	21	21	22
300,00	18	26	23	23	21	21	21	22
310,00	18	26	23	23	21	21	21	22
320,00	18	26	23	23	21	21	21	22
330,00	18	26	23	23	21	21	21	22
340,00	18	26	23	23	21	21	21	22
350,00	18	26	23	23	21	21	21	22
360,00	18	26	23	23	21	21	21	22
370,00	18	26	23	23	21	21	21	22
380,00	18	26	23	23	21	21	21	22
390,00	17	26	23	23	21	21	21	22
400,00	17	26	23	23	21	21	21	22
410,00	17	26	23	24	21	21	21	22
420,00	17	26	23	23	21	21	21	22
430,00	17	26	23	23	21	21	21	22
440,00	17	26	23	24	21	21	21	22
450,00	17	26	23	24	21	21	21	22
460,00	17	26	23	24	21	21	21	22
470,00	17	27	24	24	21	21	21	22
480,00	17	27	24	24	21	21	21	22
490,00	17	27	24	24	21	21	21	22
500,00	17	27	23	24	21	21	21	22
510,00	17	27	24	24	21	21	21	22
520,00	17	27	23	24	21	21	21	22
530,00	17	27	23	24	21	21	21	22

## **7. 7.5. Anlage A 7.5 – Messergebnisse AL 262 B**

Dateiname: A 7.5 - AI 262 B

SNR 26.02.2010 B AI 1,44 kg Platte 30 mm  
 Info test FB -H AI 99,5 PCM 2,14 kg  
 Start 26.02.2010  
 16:32

Duration [sec]	T1 [°C] H2O ein	T2 [°C] H2O aus	T3 [°C] Rohr	T4 [°C] oben	T5 [°C] mitte	T6 [°C] unten	T7 [°C] boden	T8 [°C] zenitrum
10,00	20	0	21	21	18	18	18	19
20,00	20	0	21	21	18	18	18	19
30,00	20	0	21	21	18	18	18	19
40,00	20	0	21	21	18	18	18	19
50,00	20	0	21	22	18	18	18	19
60,00	20	0	21	21	18	18	18	19
70,00	20	0	21	21	18	18	18	19
80,00	20	0	21	21	18	18	18	19
90,00	20	0	21	21	18	18	18	19
100,00	20	0	21	22	18	18	18	19
110,00	20	0	21	21	18	18	18	19
120,00	20	0	21	22	18	18	18	19
130,00	20	0	21	22	18	18	18	19
140,00	20	0	21	22	18	18	18	19
150,00	20	0	21	22	18	18	18	20
160,00	20	0	21	22	18	18	19	20
170,00	20	0	21	22	18	18	18	20
180,00	20	0	21	22	18	18	18	20
190,00	20	0	21	22	18	18	19	20
200,00	20	0	21	22	18	18	19	20
210,00	20	0	22	22	18	18	19	20
220,00	20	0	22	22	18	18	19	20
230,00	20	0	22	22	18	18	19	20
240,00	20	0	22	22	18	18	19	20
250,00	20	0	22	22	18	18	19	20
260,00	20	0	22	22	18	18	19	20
270,00	20	0	22	22	18	18	19	20
280,00	20	0	22	22	18	18	19	20
290,00	20	0	22	22	18	18	19	20
300,00	20	0	22	22	18	18	19	20
310,00	20	0	22	22	18	18	19	20
320,00	20	0	22	22	18	18	19	20
330,00	20	0	22	22	18	18	19	20
340,00	20	0	22	22	18	18	19	20
350,00	20	0	22	22	18	18	19	20
360,00	20	0	22	22	18	19	19	20
370,00	20	0	22	22	18	19	19	20
380,00	20	0	22	22	18	19	19	20
390,00	20	0	22	22	18	19	19	20
400,00	20	0	22	22	18	19	19	20
410,00	20	0	22	22	18	19	19	20
420,00	20	0	22	22	18	19	19	20
430,00	20	0	22	22	18	19	19	20
440,00	20	0	22	22	18	19	19	20
450,00	20	0	22	22	18	19	19	20
460,00	20	0	22	22	18	19	19	20
470,00	20	0	22	22	18	19	19	20
480,00	20	0	22	22	18	19	19	20
490,00	20	0	22	22	18	19	19	20
500,00	20	0	22	22	18	19	19	20
510,00	20	0	22	22	19	19	19	20
520,00	20	0	22	22	18	19	19	20
530,00	20	0	22	22	19	19	19	20



## **7. 7.6. Anlage A 7.6 – Messergebnisse AL 262 A**

Dateiname: A 7.6 - AI 262 A

SNR 26.02.2010 A LUPOG 1,70 kg Platte 30 mm  
 Info test FB-H. PCM 1,74 kg  
 Start 26.02.2010  
 16:30

Duration [sec]	T1 [°C] H2O ein	T2 [°C] H2O aus	T3 [°C] Rohr	T4 [°C] oben	T5 [°C] mitte	T6 [°C] unten	T7 [°C] boden	T8 [°C] zenitrum
10,00	26	25	22	21	18	18	18	20
20,00	26	25	22	21	18	18	18	20
30,00	26	25	22	21	18	18	18	20
40,00	26	25	22	21	18	18	18	20
50,00	27	25	22	21	18	18	18	20
60,00	27	25	22	21	18	18	18	20
70,00	27	25	22	21	18	18	18	20
80,00	27	26	22	21	18	18	18	20
90,00	27	26	22	21	18	18	18	20
100,00	27	26	22	21	18	18	18	20
110,00	27	26	22	21	18	18	18	20
120,00	27	26	22	21	18	18	18	20
130,00	27	26	22	21	18	18	18	20
140,00	27	26	22	21	18	18	18	20
150,00	27	26	22	21	18	18	18	20
160,00	27	26	22	22	18	18	18	20
170,00	27	26	22	22	19	18	18	20
180,00	27	26	22	22	19	18	18	20
190,00	27	26	22	22	19	18	18	20
200,00	27	26	22	22	19	18	18	20
210,00	27	26	22	22	19	18	18	20
220,00	27	26	22	22	19	18	18	20
230,00	27	26	22	22	19	18	18	20
240,00	27	26	22	22	19	18	18	20
250,00	27	26	22	22	19	18	18	20
260,00	27	26	22	22	19	18	18	20
270,00	27	26	22	22	19	18	18	20
280,00	27	26	22	22	19	18	18	20
290,00	27	26	22	22	19	18	18	20
300,00	27	26	22	22	19	18	18	20
310,00	27	26	22	22	19	18	18	20
320,00	27	26	22	22	19	18	18	20
330,00	27	26	22	22	19	18	18	20
340,00	27	26	22	22	19	18	18	20
350,00	27	26	22	22	19	18	18	20
360,00	27	26	22	22	19	18	18	20
370,00	27	26	22	22	19	18	18	20
380,00	27	26	22	22	19	18	18	20
390,00	27	26	22	22	19	18	18	20
400,00	27	26	22	22	19	18	18	20
410,00	27	26	22	22	19	18	18	20
420,00	27	26	22	22	19	18	18	20
430,00	27	26	22	22	19	18	18	20
440,00	27	26	22	22	19	18	18	21
450,00	27	26	22	22	19	18	18	21
460,00	27	26	23	22	19	18	18	21
470,00	27	26	23	22	19	18	18	21
480,00	27	26	23	22	19	18	18	21
490,00	27	26	23	22	19	18	18	21
500,00	27	26	23	22	19	18	18	21
510,00	27	26	23	22	19	18	18	21

## **7. 7.7. Anlage A 7.7 – Messergebnisse Lupo 13 A**

Dateiname: A 7.7 - Lupo 13 A

SNR 01.03.2010 A LUPOG 1,70 kg Platte 30 mm  
 Info test FB-H. Lupo -Graphit PCM 1,74 kg  
 Start 01.03.2010  
 12:15

Duration [sec]	T1 [°C] H2O ein	T2 [°C] H2O aus	T3 [°C] Rohr	T4 [°C] oben	T5 [°C] mitte	T6 [°C] unten	T7 [°C] boden	T8 [°C] zentrum
10,00	22	22	21	21	21	21	21	22
20,00	22	23	21	21	21	21	21	22
30,00	23	23	21	21	21	21	21	22
40,00	23	23	21	21	21	21	21	22
50,00	23	23	21	21	21	21	21	22
60,00	23	23	21	21	21	21	21	22
70,00	23	23	21	21	21	21	21	22
80,00	23	24	21	21	21	21	21	22
90,00	24	24	21	21	21	21	21	22
100,00	24	24	21	21	21	21	21	22
110,00	24	24	21	21	21	21	21	22
120,00	24	24	21	21	21	21	21	22
130,00	24	24	21	21	21	21	21	22
140,00	24	24	21	21	21	21	21	22
150,00	24	24	21	22	21	21	21	22
160,00	24	25	21	22	21	21	21	22
170,00	25	25	21	22	21	21	21	22
180,00	25	25	21	22	21	21	21	22
190,00	25	25	21	22	21	21	21	22
200,00	25	25	21	22	21	21	21	22
210,00	25	25	22	22	21	21	21	22
220,00	25	25	22	22	21	21	21	22
230,00	25	25	22	22	21	21	21	22
240,00	25	26	22	22	21	21	21	22
250,00	25	26	22	22	21	21	21	22
260,00	26	26	22	22	21	21	21	22
270,00	26	26	22	22	21	21	21	22
280,00	26	26	22	22	21	21	21	22
290,00	26	26	22	22	21	21	21	22
300,00	26	26	22	22	21	21	21	22
310,00	26	26	22	22	21	21	21	22
320,00	26	26	22	22	21	21	21	22
330,00	26	26	22	22	21	21	21	22
340,00	26	26	22	22	21	21	21	22
350,00	26	27	22	22	21	21	21	22
360,00	26	27	22	22	21	21	21	22
370,00	26	27	22	22	21	21	21	22
380,00	26	27	22	22	21	21	21	22
390,00	26	27	22	22	21	21	21	22
400,00	27	27	22	22	21	21	21	22
410,00	27	27	22	22	21	21	21	22
420,00	27	27	22	22	21	21	21	22
430,00	27	27	22	22	21	21	21	22
440,00	27	27	22	23	21	21	21	22
450,00	27	27	23	23	21	21	21	22
460,00	27	27	23	23	21	21	20	22
470,00	27	27	23	23	21	21	21	22
480,00	27	27	23	23	21	21	21	22
490,00	27	27	23	23	21	21	21	22
500,00	27	27	23	23	21	21	21	22
510,00	27	27	23	23	21	21	21	22
520,00	27	27	23	23	21	21	21	22

## **7.8. Anlage A8 Auswertung der Kurvenanalyse**

## Verwendete Formeltypen für die Kurvenanalyse

Formeltyp	Formel	Formelnummer für Aufstellung
NIST-Modell Kirby 2	$y = (p_0 + p_1 * x + p_2 * x^2) / (1 + p_3 * x + p_4 * x^2)$	1
NIST – Modell MHG 09	$y = p_0 * (x^2 + p_1 * x) / (x^2 + p_2 * x + p_3)$	2
Verknüpfte Exponentialfunktion	$y = p_0 + p_1 * (1 - e^{-x/p_2}) + p_3 * (1 - e^{-x/p_4})$	3

Probe AL 13 B  
Vorgang Abkühlvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	1	1	1	1
p0	25,42923	26,308054	28,55574	27,687228
p1	-4,8401172	-5,1143139	-3,0420761	-2,7773431
p2	0,57527362	0,56623552	0,73761425	0,67962659
p3	0,21871167	0,22207392	0,08659763	0,07237951
p4	0,03492011	0,0321344	0,04328883	0,04191003

Probe AL 13 B  
Vorgang Aufheizvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	2	2	2	2
p0	13,244483	14,315397	14,265017	13,678604
p1	8,4673625	9,5006308	9,7110168	5,5676764
p2	0,67241224	13,099818	0,42273376	8,5106943
p3	11,282878	8,2965072	6,6237098	9,7942536
p4	18,691404	0,67433256	10,134036	0,3803297

Probe Lupo 13 A  
Vorgang Abkühlvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	1	1	1	1
p0	24,263805	28,678342	28,100131	26,7256
p1	-1,9881879	649,65358	456,43335	983,9123
p2	0,27139278	157,67917	138,65828	419,1291
p3	0,05631683	26,308483	21,199862	49,88994
p4	0,0158557	10,68629	9,1705939	29,65391

Probe Lupo 13 A  
Vorgang Aufheizvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	2	3	2	3
p0	15,661815	14,315397	16,642987	29,083868
p1	66,854415	9,5006308	6,5064434	2,0606816
p2	5,70216	13,099818	4,7384083	2,7604655
p3	-54,67446	8,2965072	6,079393	0,01124482
p4	5,70216		0,23720889	

Probe Lupo 43 A  
Vorgang Abkühlvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	1	1	1	1
p0	24,589891	26,433832	25,24335	22,800017
p1	-3,8521964	-1,7837546	1,8194943	3,2198945
p2	0,41373139	0,31504946	0,04933446	0,08264994
p3	-	-	0,20923081	0,31392371
p4	0,02423305	0,01706221	-0,0060225	0,00858302

Probe Lupo 43 A  
Vorgang Aufheizvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	2	2	2	2
p0	14,340435	15,6788	16,77031	16,943358
p1	7,4129695	7,86645	5,4267207	6,4256642
p2	1,016637	0,59975	13,425367	0,34609923
p3	6,1921535	7,04977	7,4339145	4,7521035
p4	21,648908	17,149579	0,39677644	10,846339

Probe Lupo 43 B  
Vorgang Abkühlvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	1	1	1	1
p0	24,589891	26,433832	25,24335	22,800017
p1	-3,8521964	-1,7837546	1,8194943	3,2198945
p2	0,41373139	0,31504946	0,04933446	0,08264994
p3	-	-	0,20923081	0,31392371
p4	0,02423305	0,01706221	-0,0060225	0,00858302

Probe Lupo 43 B  
Vorgang Aufheizvorgang

Faktoren	Boden	Zentrum	Oben	Rohr
Funktion	2	2	2	3
p0	25,383255	27,893382	27,25954	26,069605
p1	-3,3008989	-2,3763358	21,389464	17,95626
p2	0,16532527	0,11085159	17,742759	20,386825
p3	-	-	0,21829863	0,03257641
p4	0,00839483	0,00455996	1,2557346	



## **7.9. Anlage A9 Messergebnisse 2. Versuchsreihe**

### **7.9.1. Anlage A9.1. Messungen ohne Estrich**

#### **7.9.1.1. Anlage A 9.1.1**

Die Anlage A9 sind Messdaten. Je Anlage wird nur die erste Seite im Abschlussbericht dargestellt. Auf ihr ist der Dateiname und die Anzahl der Seiten mit aufgeführt. Die komplette Anlage ist als pdf - Datei auf der beiliegenden CD abgespeichert.

Dateiname: A 9.1.1

SNR 12.05.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Kühlen mit 15°C - 6 l/min Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte Heizen mit 30°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 12.05.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 10:14

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:00:10	10,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:00:20	20,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:00:30	30,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:00:40	40,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:00:50	50,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:01:00	60,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:01:10	70,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:01:20	80,00	34	33	33	34	32	33	33	29
00:01:30	90,00	33	33	33	34	32	33	33	29
00:01:40	100,00	18	33	33	34	32	33	33	29
00:01:50	110,00	16	33	33	34	32	33	33	29
00:02:00	120,00	16	33	33	34	32	33	33	29
00:02:10	130,00	15	33	33	34	32	33	33	29
00:02:20	140,00	15	33	33	34	32	33	33	29
00:02:30	150,00	15	33	33	34	32	33	33	29
00:02:40	160,00	15	33	33	34	32	32	33	29
00:02:50	170,00	15	33	33	34	32	32	33	29
00:03:00	180,00	15	33	33	34	32	32	33	29
00:03:10	190,00	15	33	33	34	32	32	32	29
00:03:20	200,00	15	33	33	34	32	32	32	29
00:03:30	210,00	15	33	33	34	32	32	32	29
00:03:40	220,00	15	33	33	34	32	32	32	29
00:03:50	230,00	15	33	33	34	32	32	32	29
00:04:00	240,00	15	33	33	34	32	32	32	29
00:04:10	250,00	15	33	33	33	32	32	32	29
00:04:20	260,00	15	33	32	33	32	32	32	29
00:04:30	270,00	15	33	32	33	32	32	32	29
00:04:40	280,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:04:50	290,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:05:00	300,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:05:10	310,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:05:20	320,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:05:30	330,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:05:40	340,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:05:50	350,00	15	32	32	33	32	32	32	29
00:06:00	360,00	15	32	32	33	32	31	32	29
00:06:10	370,00	15	32	32	33	32	31	32	29
00:06:20	380,00	15	32	32	33	32	31	32	29
00:06:30	390,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:06:40	400,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:06:50	410,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:07:00	420,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:07:10	430,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:07:20	440,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:07:30	450,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:07:40	460,00	15	32	32	33	31	31	31	29
00:07:50	470,00	15	32	32	33	31	31	31	29

## 7.9.1.2. Anlage A 9.1.2

Dateiname: A 9.1.2

SNR 12.05.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Kühlen mit 15°C - 6 l/min Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. Heizen mit 30°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 12.05.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 10:14

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:00	0,00	33	33	34	35	32	33	34	28
00:00:10	10,00	33	33	34	35	32	33	34	28
00:00:20	20,00	33	33	34	35	32	33	34	28
00:00:30	30,00	33	33	34	35	32	33	34	28
00:00:40	40,00	33	33	34	35	32	33	34	28
00:00:50	50,00	33	33	34	34	32	33	34	28
00:01:00	60,00	33	33	34	34	32	33	34	28
00:01:10	70,00	33	33	34	34	32	33	34	28
00:01:20	80,00	33	33	34	34	32	33	34	28
00:01:30	90,00	33	33	34	35	32	33	34	28
00:01:40	100,00	33	33	34	34	32	33	34	28
00:01:50	110,00	27	33	34	34	32	33	34	28
00:02:00	120,00	19	33	34	34	32	33	34	28
00:02:10	130,00	17	33	34	34	32	33	34	28
00:02:20	140,00	16	33	34	34	32	33	34	28
00:02:30	150,00	15	33	33	34	32	33	34	28
00:02:40	160,00	15	33	33	33	32	32	34	28
00:02:50	170,00	15	33	33	33	32	32	34	27
00:03:00	180,00	15	33	33	33	32	32	34	27
00:03:10	190,00	15	33	33	33	32	32	34	27
00:03:20	200,00	15	33	33	33	32	32	34	27
00:03:30	210,00	15	32	33	33	32	32	34	27
00:03:40	220,00	15	32	32	33	32	32	33	27
00:03:50	230,00	15	32	32	33	32	32	33	27
00:04:00	240,00	15	32	32	33	32	32	33	28
00:04:10	250,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:04:20	260,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:04:30	270,00	15	32	32	32	32	32	33	27
00:04:40	280,00	15	32	32	32	32	32	33	27
00:04:50	290,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:05:00	300,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:05:10	310,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:05:20	320,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:05:30	330,00	15	32	32	32	32	32	33	28
00:05:40	340,00	15	32	32	32	31	32	33	28
00:05:50	350,00	15	32	32	32	31	31	33	28
00:06:00	360,00	15	32	32	32	31	31	33	28
00:06:10	370,00	15	32	32	32	31	31	33	28
00:06:20	380,00	15	32	32	32	31	31	33	28
00:06:30	390,00	15	32	32	32	31	31	33	28
00:06:40	400,00	15	32	32	32	31	31	32	28
00:06:50	410,00	15	32	32	32	31	31	32	28
00:07:00	420,00	15	32	31	32	31	31	32	27
00:07:10	430,00	15	32	31	32	31	31	32	27
00:07:20	440,00	15	31	31	32	31	31	32	27
00:07:30	450,00	15	31	31	32	31	31	32	27
00:07:40	460,00	15	31	31	31	31	31	32	27
00:07:50	470,00	15	31	31	31	31	31	32	27

## **7.9.2. Anlage A9.2. Messung mit Estrich**

### **7.9.2.1. Anlage A 9.2.1**

Dateiname: A 9.2.1

SNR 02.06.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Heizen mit 30°C Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte aus PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 02.06.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 11:51

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:00:10	10,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:00:20	20,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:00:30	30,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:00:40	40,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:00:50	50,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:01:00	60,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:01:10	70,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:01:20	80,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:01:30	90,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:01:40	100,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:01:50	110,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:02:00	120,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:02:10	130,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:02:20	140,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:02:30	150,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:02:40	160,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:02:50	170,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:03:00	180,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:03:10	190,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:03:20	200,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:03:30	210,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:03:40	220,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:03:50	230,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:04:00	240,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:04:10	250,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:04:20	260,00	21	16	16	17	16	17	16	18
00:04:30	270,00	22	16	16	17	16	17	16	18
00:04:40	280,00	25	16	16	17	16	17	16	18
00:04:50	290,00	29	16	16	17	16	17	16	18
00:05:00	300,00	29	16	16	17	16	17	16	18
00:05:10	310,00	29	16	16	17	16	17	16	18
00:05:20	320,00	28	16	16	17	16	17	16	18
00:05:30	330,00	28	16	16	17	16	17	16	18
00:05:40	340,00	28	16	16	17	16	17	16	18
00:05:50	350,00	29	17	16	17	16	17	16	18
00:06:00	360,00	29	17	16	18	16	17	16	18
00:06:10	370,00	29	17	16	18	16	17	16	18
00:06:20	380,00	29	17	16	18	16	17	16	17
00:06:30	390,00	29	16	16	17	16	17	16	17
00:06:40	400,00	29	17	16	18	16	17	16	18
00:06:50	410,00	29	17	16	18	16	17	16	18
00:07:00	420,00	29	17	16	18	16	17	17	18
00:07:10	430,00	29	17	16	18	16	17	17	18
00:07:20	440,00	29	17	16	18	16	17	17	18
00:07:30	450,00	30	17	16	18	16	17	17	18
00:07:40	460,00	30	17	16	18	16	17	17	18
00:07:50	470,00	30	17	16	18	16	17	17	18

## 7.9.2.2. Anlage A 9.2.2

Dateiname: A 9.2.2

SNR 03.06.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Kühlen mit 15°C Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte aus PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 03.06.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 06:44

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:00:10	10,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:00:20	20,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:00:30	30,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:00:40	40,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:00:50	50,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:01:00	60,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:01:10	70,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:01:20	80,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:01:30	90,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:01:40	100,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:01:50	110,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:02:00	120,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:02:10	130,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:02:20	140,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:02:30	150,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:02:40	160,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:02:50	170,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:03:00	180,00	30	30	30	31	29	30	30	31
00:03:10	190,00	29	30	30	31	29	30	30	31
00:03:20	200,00	29	30	30	31	29	30	30	31
00:03:30	210,00	29	30	30	31	29	30	30	31
00:03:40	220,00	29	30	30	31	29	30	30	31
00:03:50	230,00	29	30	30	31	29	30	30	31
00:04:00	240,00	21	30	30	31	29	30	30	31
00:04:10	250,00	16	30	30	31	29	30	30	31
00:04:20	260,00	15	30	30	31	29	30	30	31
00:04:30	270,00	15	30	30	31	29	30	30	31
00:04:40	280,00	15	30	30	31	29	30	30	31
00:04:50	290,00	14	30	30	31	29	30	30	31
00:05:00	300,00	14	30	30	31	29	30	30	31
00:05:10	310,00	14	30	30	31	29	30	30	31
00:05:20	320,00	14	30	30	31	29	30	30	31
00:05:30	330,00	14	30	30	30	29	29	30	31
00:05:40	340,00	14	30	30	30	29	29	30	31
00:05:50	350,00	14	29	30	30	29	29	30	31
00:06:00	360,00	14	29	30	30	29	29	29	31
00:06:10	370,00	14	29	29	30	29	29	29	31
00:06:20	380,00	14	29	29	30	29	29	29	31
00:06:30	390,00	15	29	29	30	29	29	29	31
00:06:40	400,00	14	29	29	30	29	29	29	31
00:06:50	410,00	14	29	29	30	29	29	29	31
00:07:00	420,00	14	29	29	30	29	29	29	31
00:07:10	430,00	14	29	29	30	29	29	29	31
00:07:20	440,00	15	29	29	30	29	29	29	31
00:07:30	450,00	15	29	29	30	29	29	29	31
00:07:40	460,00	15	29	29	30	29	29	29	31
00:07:50	470,00	15	29	29	30	29	29	29	31



### **7.9.2.3. Anlage A 9.2.3**

Dateiname: A 9.2.3

SNR	04.06.2010	A	Schaum	Platte oben	AI 99,5	0,94 kg
Rohr	Kühlen mit 15°C			Platte unten	AI 99,6	0,93 Kg
Kap.-Rohr-Matte	Heizen mit 30°C		PCM	Platte oben	Micronal 23	1,50 kg
Start	04.06.2010			Platte unten	RT 18/20	3,50 kg

10:46

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:00	0,00	15	16	16	17	16	16	16	17
00:00:10	10,00	15	16	16	17	16	16	16	17
00:00:20	20,00	15	16	16	17	16	16	16	17
00:00:30	30,00	15	16	16	17	16	16	16	17
00:00:40	40,00	15	16	16	17	16	16	16	17
00:00:50	50,00	15	16	16	17	16	16	16	17
00:01:00	60,00	15	16	16	17	16	16	16	18
00:01:10	70,00	15	16	16	17	16	16	16	18
00:01:20	80,00	15	16	16	17	16	16	16	19
00:01:30	90,00	15	16	16	17	16	16	16	19
00:01:40	100,00	15	16	16	17	16	16	16	19
00:01:50	110,00	15	16	16	17	16	16	16	19
00:02:00	120,00	15	16	16	17	16	16	16	19
00:02:10	130,00	15	16	16	17	16	16	16	19
00:02:20	140,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:02:30	150,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:02:40	160,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:02:50	170,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:03:00	180,00	15	16	16	17	15	16	16	20
00:03:10	190,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:03:20	200,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:03:30	210,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:03:40	220,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:03:50	230,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:04:00	240,00	15	16	16	17	16	16	16	20
00:04:10	250,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:04:20	260,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:04:30	270,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:04:40	280,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:04:50	290,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:05:00	300,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:05:10	310,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:05:20	320,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:05:30	330,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:05:40	340,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:05:50	350,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:06:00	360,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:06:10	370,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:06:20	380,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:06:30	390,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:06:40	400,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:06:50	410,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:07:00	420,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:07:10	430,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:07:20	440,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:07:30	450,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:07:40	460,00	15	16	16	17	16	16	16	21
00:07:50	470,00	15	16	16	17	16	16	16	21

## 7.9.2.4. Anlage A 9.2.4

Dateiname: A 9.2.4

SNR 05.06.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Heizen mit 30°C - 6 l/min Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte Kühlen mit 15°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 05.06.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 10:21

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:01	0,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:00:10	10,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:00:20	20,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:00:30	30,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:00:40	40,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:00:50	50,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:01:00	60,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:01:10	70,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:01:20	80,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:01:30	90,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:01:40	100,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:01:50	110,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:02:00	120,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:02:10	130,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:02:20	140,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:02:30	150,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:02:40	160,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:02:50	170,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:03:00	180,00	15	20	20	21	23	23	23	30
00:03:10	190,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:03:20	200,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:03:30	210,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:03:40	220,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:03:50	230,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:04:00	240,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:04:10	250,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:04:20	260,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:04:30	270,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:04:40	280,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:04:50	290,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:05:00	300,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:05:10	310,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:05:20	320,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:05:30	330,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:05:40	340,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:05:50	350,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:06:00	360,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:06:10	370,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:06:20	380,00	15	20	20	21	23	23	22	29
00:06:30	390,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:06:40	400,00	15	20	20	21	23	23	23	29
00:06:50	410,00	15	20	20	21	23	23	23	28
00:07:00	420,00	15	20	20	21	23	23	23	28
00:07:10	430,00	15	20	20	21	23	23	23	28
00:07:20	440,00	15	20	20	21	23	23	23	28
00:07:30	450,00	15	20	20	21	23	23	23	28
00:07:40	460,00	15	20	20	21	23	23	23	28
00:07:50	470,00	15	20	20	21	23	23	23	28

## 7.9.2.5. Anlage A 9.2.5

Dateiname: A 9.2.5

SNR 06.06.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Kühlen mit 15°C - 6 l/min Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte Kühlen mit 15°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 06.06.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 08:23

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	31	27	27	28	23	25	23	20
00:00:10	10,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:00:20	20,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:00:30	30,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:00:40	40,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:00:50	50,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:01:00	60,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:01:10	70,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:01:20	80,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:01:30	90,00	31	27	27	28	23	24	24	20
00:01:40	100,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:01:50	110,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:02:00	120,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:02:10	130,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:02:20	140,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:02:30	150,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:02:40	160,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:02:50	170,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:03:00	180,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:03:10	190,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:03:20	200,00	31	27	27	28	23	25	24	20
00:03:30	210,00	30	27	27	28	23	25	24	20
00:03:40	220,00	30	27	27	28	23	25	24	20
00:03:50	230,00	19	27	27	28	23	25	24	20
00:04:00	240,00	16	27	27	28	23	25	24	20
00:04:10	250,00	16	27	27	28	23	24	24	20
00:04:20	260,00	16	27	27	28	23	24	24	20
00:04:30	270,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:04:40	280,00	16	27	27	28	23	24	24	20
00:04:50	290,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:05:00	300,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:05:10	310,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:05:20	320,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:05:30	330,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:05:40	340,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:05:50	350,00	15	27	27	28	23	24	24	20
00:06:00	360,00	15	27	27	27	23	24	24	20
00:06:10	370,00	15	27	27	27	23	24	24	20
00:06:20	380,00	15	27	27	27	23	24	24	20
00:06:30	390,00	16	27	27	27	23	24	24	20
00:06:40	400,00	15	27	27	27	23	24	24	20
00:06:50	410,00	16	27	27	27	23	24	24	20
00:07:00	420,00	15	26	27	27	23	24	24	20
00:07:10	430,00	15	26	27	27	23	24	24	20
00:07:20	440,00	15	26	26	27	23	24	24	20
00:07:30	450,00	16	26	26	27	23	24	24	20
00:07:40	460,00	15	26	26	27	23	24	24	20
00:07:50	470,00	15	26	26	27	23	24	24	20

## 7.9.2.6. Anlage A 9.2.6

Dateiname A 9.2.6

SNR 07.06.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Kühlen mit 15°C - 6 l/min Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte Heizen mit 30°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 07.06.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 10:59

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:00:10	10,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:00:20	20,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:00:30	30,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:00:40	40,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:00:50	50,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:01:00	60,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:01:10	70,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:01:20	80,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:01:30	90,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:01:40	100,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:01:50	110,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:02:00	120,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:02:10	130,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:02:20	140,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:02:30	150,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:02:40	160,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:02:50	170,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:03:00	180,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:03:10	190,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:03:20	200,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:03:30	210,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:03:40	220,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:03:50	230,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:04:00	240,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:04:10	250,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:04:20	260,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:04:30	270,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:04:40	280,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:04:50	290,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:05:00	300,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:05:10	310,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:05:20	320,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:05:30	330,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:05:40	340,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:05:50	350,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:06:00	360,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:06:10	370,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:06:20	380,00	15	16	16	17	15	16	15	17
00:06:30	390,00	15	16	16	17	15	16	15	18
00:06:40	400,00	15	16	16	17	15	16	15	19
00:06:50	410,00	15	16	16	17	15	16	15	20
00:07:00	420,00	15	16	16	17	15	16	15	21
00:07:10	430,00	15	16	16	17	15	16	15	21
00:07:20	440,00	15	16	16	17	15	16	15	21
00:07:30	450,00	15	16	16	17	15	16	15	22
00:07:40	460,00	15	16	16	17	15	16	15	22
00:07:50	470,00	15	16	16	17	15	16	15	22



## 7.9.2.7. Anlage A 9.2.7

Dateiname: A 9.2.7

SNR 09.06.2010 A Schaum Platte oben AI 99,5 0,94 kg  
 Rohr Heizen mit 30°C Platte unten AI 99,6 0,93 Kg  
 Kap.-Rohr-Matte aus PCM Platte oben Micronal 23 1,50 kg  
 Start 09.06.2010 Platte unten RT 18/20 3,50 kg  
 08:04

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Rohr	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:00:10	10,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:00:20	20,00	15	20	19	20	23	22	22	29
00:00:30	30,00	15	20	19	20	23	22	22	29
00:00:40	40,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:00:50	50,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:01:00	60,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:01:10	70,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:01:20	80,00	15	20	19	20	23	22	22	29
00:01:30	90,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:01:40	100,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:01:50	110,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:02:00	120,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:02:10	130,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:02:20	140,00	15	20	19	20	23	22	22	29
00:02:30	150,00	15	20	19	20	23	22	22	29
00:02:40	160,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:02:50	170,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:03:00	180,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:03:10	190,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:03:20	200,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:03:30	210,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:03:40	220,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:03:50	230,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:04:00	240,00	15	19	19	20	22	22	22	29
00:04:10	250,00	15	20	19	20	22	22	22	29
00:04:20	260,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:04:30	270,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:04:40	280,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:04:50	290,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:05:00	300,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:05:10	310,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:05:20	320,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:05:30	330,00	15	20	19	20	22	22	22	29
00:05:40	340,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:05:50	350,00	15	20	19	20	23	22	22	29
00:06:00	360,00	15	19	19	20	23	22	22	29
00:06:10	370,00	22	19	19	20	23	22	22	29
00:06:20	380,00	28	19	19	20	23	22	22	29
00:06:30	390,00	29	19	19	20	23	22	22	29
00:06:40	400,00	28	19	19	20	23	22	22	28
00:06:50	410,00	28	20	19	20	23	22	22	28
00:07:00	420,00	28	20	19	20	23	22	22	28
00:07:10	430,00	28	20	19	21	23	22	22	28
00:07:20	440,00	28	20	19	21	22	22	22	28
00:07:30	450,00	28	20	19	21	22	22	22	28
00:07:40	460,00	29	20	19	21	23	22	22	28
00:07:50	470,00	29	20	19	21	22	22	22	28

## 7.9.2.8. Anlage A 9.2.8

Dateiname: A 9.2.8

SNR 02.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Heizen mit 30°C Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. aus PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 02.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 11:51

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:00	0,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:00:10	10,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:00:20	20,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:00:30	30,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:00:40	40,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:00:50	50,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:01:00	60,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:01:10	70,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:01:20	80,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:01:30	90,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:01:40	100,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:01:50	110,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:02:00	120,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:02:10	130,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:02:20	140,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:02:30	150,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:02:40	160,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:02:50	170,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:03:00	180,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:03:10	190,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:03:20	200,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:03:30	210,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:03:40	220,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:03:50	230,00	15	16	17	17	16	16	17	17
00:04:00	240,00	15	16	17	17	16	16	17	17
00:04:10	250,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:04:20	260,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:04:30	270,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:04:40	280,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:04:50	290,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:05:00	300,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:05:10	310,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:05:20	320,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:05:30	330,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:05:40	340,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:05:50	350,00	15	16	17	17	15	16	17	17
00:06:00	360,00	15	16	17	18	16	16	17	17
00:06:10	370,00	15	16	17	18	15	16	17	17
00:06:20	380,00	15	16	17	18	15	16	17	17
00:06:30	390,00	16	16	17	18	15	16	17	17
00:06:40	400,00	16	16	17	18	15	16	17	17
00:06:50	410,00	16	16	17	18	15	16	17	17
00:07:00	420,00	16	16	17	18	15	17	17	18
00:07:10	430,00	16	16	17	18	15	17	17	18
00:07:20	440,00	16	16	17	18	16	17	17	18
00:07:30	450,00	16	16	17	18	15	17	17	18
00:07:40	460,00	16	16	17	18	15	17	17	17
00:07:50	470,00	16	16	17	18	15	17	17	17

## **7.9.2.9. Anlage A 9.2.9**

Dateiname: A 9.2.9

SNR 03.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Kühlen mit 15°C Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. aus PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 03.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 06:44

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	21	30	30	31	29	30	30	31
00:00:10	10,00	21	30	30	31	29	30	30	31
00:00:20	20,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:00:30	30,00	21	30	30	31	29	30	30	31
00:00:40	40,00	21	30	30	31	29	30	30	31
00:00:50	50,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:01:00	60,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:01:10	70,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:01:20	80,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:01:30	90,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:01:40	100,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:01:50	110,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:02:00	120,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:02:10	130,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:02:20	140,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:02:30	150,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:02:40	160,00	21	29	31	31	29	30	30	31
00:02:50	170,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:03:00	180,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:03:10	190,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:03:20	200,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:03:30	210,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:03:40	220,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:03:50	230,00	21	30	30	31	29	30	30	31
00:04:00	240,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:04:10	250,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:04:20	260,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:04:30	270,00	21	29	30	31	29	30	30	31
00:04:40	280,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:04:50	290,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:05:00	300,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:05:10	310,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:05:20	320,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:05:30	330,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:05:40	340,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:05:50	350,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:06:00	360,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:06:10	370,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:06:20	380,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:06:30	390,00	21	29	30	31	29	29	30	31
00:06:40	400,00	21	29	30	30	29	29	30	31
00:06:50	410,00	21	29	30	30	29	29	30	31
00:07:00	420,00	21	29	30	30	29	29	30	31
00:07:10	430,00	21	29	30	30	29	29	30	31
00:07:20	440,00	21	29	29	30	29	29	30	31
00:07:30	450,00	21	29	29	30	29	29	30	31
00:07:40	460,00	21	29	29	30	29	29	30	31
00:07:50	470,00	21	29	29	30	29	29	30	31

## **7.9.2.10. Anlage A 9.2.10**

Dateiname: A 9.2.10

SNR 04.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Kühlen mit 15°C Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. Heizen mit 30°C PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 04.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg

10:46

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:01	0,00	21	16	17	17	15	16	16	17
00:00:10	10,00	21	16	16	17	15	16	16	17
00:00:20	20,00	21	16	17	17	15	16	16	17
00:00:30	30,00	21	16	16	17	15	16	16	17
00:00:40	40,00	21	16	17	17	15	16	16	17
00:00:50	50,00	21	16	16	17	15	16	16	17
00:01:00	60,00	21	16	16	17	15	16	16	17
00:01:10	70,00	21	16	17	17	15	16	16	17
00:01:20	80,00	21	16	16	17	15	16	16	18
00:01:30	90,00	21	16	17	17	15	16	16	18
00:01:40	100,00	21	16	17	17	15	16	16	18
00:01:50	110,00	21	16	17	17	15	16	16	19
00:02:00	120,00	21	16	17	17	15	16	16	19
00:02:10	130,00	21	16	16	17	15	16	16	19
00:02:20	140,00	21	16	16	17	15	16	16	19
00:02:30	150,00	21	16	16	17	15	16	16	19
00:02:40	160,00	21	16	17	17	15	16	16	19
00:02:50	170,00	21	15	16	17	15	16	16	19
00:03:00	180,00	21	16	16	17	15	16	16	19
00:03:10	190,00	21	16	17	18	15	16	16	19
00:03:20	200,00	21	16	17	17	15	15	16	19
00:03:30	210,00	21	16	17	17	15	16	16	20
00:03:40	220,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:03:50	230,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:04:00	240,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:04:10	250,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:04:20	260,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:04:30	270,00	21	16	17	17	15	15	16	20
00:04:40	280,00	21	16	17	17	15	15	16	20
00:04:50	290,00	21	16	17	17	15	15	16	20
00:05:00	300,00	21	16	17	17	15	15	16	20
00:05:10	310,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:05:20	320,00	21	16	16	17	15	15	16	20
00:05:30	330,00	21	16	17	17	15	15	16	21
00:05:40	340,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:05:50	350,00	21	16	17	17	15	15	16	21
00:06:00	360,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:06:10	370,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:06:20	380,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:06:30	390,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:06:40	400,00	21	16	17	17	15	15	16	21
00:06:50	410,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:07:00	420,00	21	16	17	17	15	15	16	21
00:07:10	430,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:07:20	440,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:07:30	450,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:07:40	460,00	21	16	16	17	15	15	16	21
00:07:50	470,00	21	16	16	17	15	15	16	21



## 7.9.2.11. Anlage A 9.2.11

Dateiname: A 9.2.11

SNR 05.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Heizen mit 30°C - 6 l/min Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. Kühlen mit 15°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 05.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 11:20

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:00	0,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:00:10	10,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:00:20	20,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:00:30	30,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:00:40	40,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:00:50	50,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:01:00	60,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:01:10	70,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:01:20	80,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:01:30	90,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:01:40	100,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:01:50	110,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:02:00	120,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:02:10	130,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:02:20	140,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:02:30	150,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:02:40	160,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:02:50	170,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:03:00	180,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:03:10	190,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:03:20	200,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:03:30	210,00	30	19	20	21	23	22	23	28
00:03:40	220,00	30	19	20	21	23	22	23	27
00:03:50	230,00	30	19	20	21	23	22	23	27
00:04:00	240,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:04:10	250,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:04:20	260,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:04:30	270,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:04:40	280,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:04:50	290,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:05:00	300,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:05:10	310,00	29	20	20	21	23	22	23	27
00:05:20	320,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:05:30	330,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:05:40	340,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:05:50	350,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:06:00	360,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:06:10	370,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:06:20	380,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:06:30	390,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:06:40	400,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:06:50	410,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:07:00	420,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:07:10	430,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:07:20	440,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:07:30	450,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:07:40	460,00	29	19	20	21	23	22	23	27
00:07:50	470,00	29	19	20	21	23	22	23	27

## 7.9.2.12. Anlage A 9.2.12

Dateiname: A 9.2.12

SNR 06.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Kühlen mit 15°C - 6 l/min Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. Kühlen mit 15°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 06.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 08:32

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonoberfläche
00:00:00	0,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:00:10	10,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:00:20	20,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:00:30	30,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:00:40	40,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:00:50	50,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:01:00	60,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:01:10	70,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:01:20	80,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:01:30	90,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:01:40	100,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:01:50	110,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:02:00	120,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:02:10	130,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:02:20	140,00	14	27	28	28	21	24	24	22
00:02:30	150,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:02:40	160,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:02:50	170,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:03:00	180,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:03:10	190,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:03:20	200,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:03:30	210,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:03:40	220,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:03:50	230,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:04:00	240,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:04:10	250,00	14	27	28	28	22	24	24	22
00:04:20	260,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:04:30	270,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:04:40	280,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:04:50	290,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:05:00	300,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:05:10	310,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:05:20	320,00	15	27	28	28	22	24	24	22
00:05:30	330,00	15	27	27	28	22	24	24	22
00:05:40	340,00	15	27	27	28	22	24	24	22
00:05:50	350,00	15	27	27	28	22	24	24	22
00:06:00	360,00	15	27	27	28	22	24	24	22
00:06:10	370,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:06:20	380,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:06:30	390,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:06:40	400,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:06:50	410,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:07:00	420,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:07:10	430,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:07:20	440,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:07:30	450,00	15	26	27	28	22	24	24	22
00:07:40	460,00	15	26	27	27	22	24	24	22
00:07:50	470,00	15	26	27	27	22	24	24	22

## **7.9.2.13. Anlage A 9.2.13**

Dateiname: A 9.2.13

SNR 07.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Kühlen mit 15°C - 6 l/min Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. Heizen mit 30°C - 3 l/min PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 07.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 10:59

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:00	0,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:00:10	10,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:00:20	20,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:00:30	30,00	14	15	16	17	15	15	16	17
00:00:40	40,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:00:50	50,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:01:00	60,00	14	15	16	17	15	15	16	17
00:01:10	70,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:01:20	80,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:01:30	90,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:01:40	100,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:01:50	110,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:02:00	120,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:02:10	130,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:02:20	140,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:02:30	150,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:02:40	160,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:02:50	170,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:03:00	180,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:03:10	190,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:03:20	200,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:03:30	210,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:03:40	220,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:03:50	230,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:04:00	240,00	14	15	16	17	15	15	16	17
00:04:10	250,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:04:20	260,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:04:30	270,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:04:40	280,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:04:50	290,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:05:00	300,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:05:10	310,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:05:20	320,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:05:30	330,00	-999	16	16	17	15	15	16	17
00:05:40	340,00	21	16	16	17	15	15	16	17
00:05:50	350,00	22	16	16	17	15	15	16	17
00:06:00	360,00	22	16	16	17	15	15	16	17
00:06:10	370,00	20	16	16	17	15	15	16	17
00:06:20	380,00	12	16	16	17	15	15	16	17
00:06:30	390,00	14	16	16	17	15	15	16	17
00:06:40	400,00	15	16	16	17	15	15	16	17
00:06:50	410,00	16	16	16	17	15	15	16	18
00:07:00	420,00	16	16	16	17	15	15	16	18
00:07:10	430,00	16	16	16	17	15	15	16	19
00:07:20	440,00	16	16	16	17	15	15	16	19
00:07:30	450,00	15	16	16	17	15	15	16	19
00:07:40	460,00	15	16	16	17	15	15	16	19
00:07:50	470,00	15	16	16	17	15	15	16	19

## 7.9.2.14. Anlage A 9.2.14

Dateiname: A 9.2.14

SNR 09.06.2010 B Schaum Platte oben AI 99,5 0,75 kg  
 Rohr: Heizen mit 30°C Platte unten AI 99,5 0,62 kg  
 Kap.-Rohr-Mat. aus PCM Platte oben Micronal 23 1,15 kg  
 Start 09.06.2010 Platte unten RT 18/20 2,54 kg  
 08:04

Duration [sec]	Zeit (sec)	Vorlauf Kapillarrohr matre	Platte unten mitte	Platte unten unten	Platte unten oben	Platte oben mitte	Platte oben unten	Platte oben oben	Betonober fläche
00:00:00	0,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:00:10	10,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:00:20	20,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:00:30	30,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:00:40	40,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:00:50	50,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:01:00	60,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:01:10	70,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:01:20	80,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:01:30	90,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:01:40	100,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:01:50	110,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:02:00	120,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:02:10	130,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:02:20	140,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:02:30	150,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:02:40	160,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:02:50	170,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:03:00	180,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:03:10	190,00	30	19	20	21	23	21	23	27
00:03:20	200,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:03:30	210,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:03:40	220,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:03:50	230,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:04:00	240,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:04:10	250,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:04:20	260,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:04:30	270,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:04:40	280,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:04:50	290,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:05:00	300,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:05:10	310,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:05:20	320,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:05:30	330,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:05:40	340,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:05:50	350,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:06:00	360,00	29	19	20	21	23	21	23	27
00:06:10	370,00	28	19	20	21	23	21	23	27
00:06:20	380,00	28	19	20	21	23	21	23	27
00:06:30	390,00	28	19	20	21	23	21	23	27
00:06:40	400,00	28	19	20	21	23	21	23	27
00:06:50	410,00	28	19	20	21	23	21	23	27
00:07:00	420,00	28	19	20	21	23	22	23	27
00:07:10	430,00	28	19	20	21	23	22	23	27
00:07:20	440,00	28	19	20	21	23	22	23	27
00:07:30	450,00	28	19	20	21	23	22	23	27
00:07:40	460,00	28	19	20	21	23	22	23	27
00:07:50	470,00	28	19	20	21	23	22	23	27



## **7.10. Anlage A10 Stoffdaten Latentspeichermaterial**

### **7.10.1. Anlage A10.1. Micronal 23**

A broader base for your success

Polymer Dispersions for:

Construction

Architectural Coatings

Adhesives

Fiber Bonding

 **BASF**

The Chemical Company

IBB Modul Air KG  
Heideweg 28  
53604 Bad Honnef

**Micronal<sup>®</sup> PCM**

Intelligentes Temperatur-  
management für Gebäude

Abschlussbericht  
Forschung 23836 - 24/2

Aktiv-Kühlung durch Latentspeicher

[www.micronal.de](http://www.micronal.de)

# Micronal® PCM

## Intelligentes Temperaturmanagement für Gebäude

### Die Herausforderung:

Das Raumklima wird maßgeblich durch das thermische Verhalten eines Gebäudes beeinflusst. Bei Gebäuden, denen aufgrund ihrer Bauweise die erforderliche thermische Speichermasse fehlt, führen innere Lasten und Sonneneinstrahlung zu großen Temperaturschwankungen, Komforteinbußen und verstärktem Bedarf an Klimatisierung im Gebäudeinneren.

Bürobau und Wohnbau werden heute vermehrt in moderner Leichtbauweise unter Einsatz von Holz- und Stahlkonstruktionen mit hochdämmenden Wandbaustoffen und großen Glasflächen ausgeführt. Der hohe Vorfertigungsgrad und die Vermeidung langer Trocknungszeiten bringen einen raschen Baufortschritt und damit eine besonders hohe Wirtschaftlichkeit mit sich. Das damit einhergehende Streben nach Optimierung der Masse und Dematerialisierung der Bauteile birgt jedoch neben diversen praktischen und ökonomischen Vorteilen vor allem auch ein Problem: einen Verlust an thermischer Masse und daraus resultierend negative Auswirkungen auf das Raumklima.



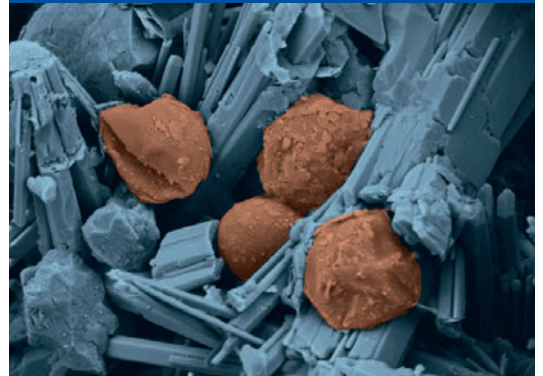
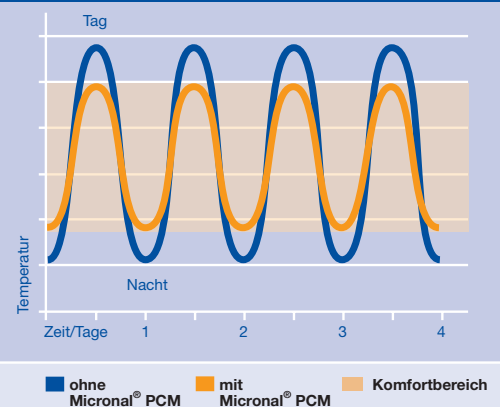
### Micronal® PCM – Zukunft eingebaut

Die Anpassung baurelevanter Richtlinien im Rahmen der Klimapolitik sowie die internationalen Bestrebungen der Gebäudezertifizierung in den Punkten Raumklima, Komfort, Gesundheit, Ressourcenverbrauch und Energieeffizienz machen die hohen Anforderungen an Architektur, Gebäudeplanung und Baurealisierung deutlich. Die Konsequenz – die Notwendigkeit, neue, innovative und zukunftsfähige Lösungsansätze für die Bauindustrie zu entwickeln, um diese Herausforderungen zu bewältigen und die hohen Ansprüche zu erfüllen. Mit Micronal® PCM hat die BASF ein innovatives Latentwärmespeichermaterial entwickelt, welches die Bauindustrie im Bereich Gebäudeklimatisierung zukunftsfähig macht. Micronal® PCM ist eine innovative, langfristige und nachhaltige Lösung für ein angenehmes, gesundes Raumklima und energieeffizientere Klimatisierung; für anspruchsvolle und moderne Architektur – heute und in Zukunft.

**Die Lösung:**

Micronal® PCM, der formaldehydfreie, mikroverkapselte Latentwärmespeicher der BASF, macht es möglich, die Vorteile moderner Architektur und die Wirtschaftlichkeit des Leichtbaus mit dem Nutzen und ausgleichenden Effekt thermischer Speicherfähigkeit für ein angenehmes Raumklima zu verbinden.

Micronal® PCM (Phase Change Material) stellt eine dauerhafte und effiziente Möglichkeit dar, die i. d. R. tagsüber anfallenden Lastspitzen in einem definierbaren Temperaturbereich isotherm zu speichern und zeitverzögert (z.B. in den Abendstunden oder nachts) wieder abzugeben. Integriert in verschiedene Arten von Baustoffen und Baustystemen, trägt Micronal® PCM so durch intelligentes Temperaturmanagement zu einem verbesserten Raumklima, mehr Wohnkomfort und einer besseren Energieeffizienz bei.

**PCM clever verpackt****Temperaturmanagement im definierten Komfortbereich****Vorteile von Micronal® PCM auf einen Blick**

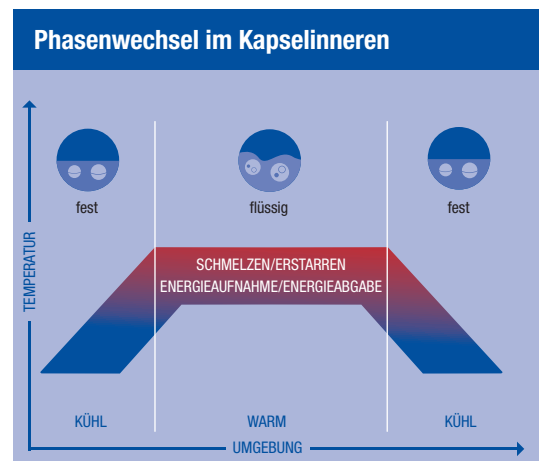
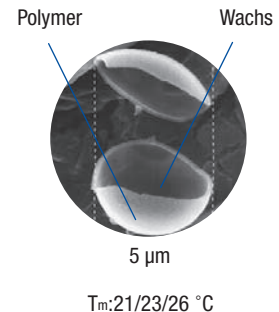
- Optimales Raumklima und gleichmäßige Temperaturen das ganze Jahr
- Arbeiten oder Wohnen im Komfort- und Wohlfühlbereich, d. h. zwischen 21 °C und 26 °C
- Ein Plus für die Gesundheit: Stille Klimatisierung ohne Zugerscheinungen und Lärmübertragungen
- Mehr Energieeffizienz durch besseres Energiemanagement. Vermeidung überhöhter Energieverbräuche und bessere Nutzung regenerativer Wärme- und Kältequellen
- Ihr Beitrag zu CO<sub>2</sub>-Reduktion, Klima- und Umweltschutz
- Hohe Gestaltungsfreiheit und einfachste Verarbeitung als konventionelle Baustoffe – mit einer neuen, unverwechselbaren Funktion!
- Kosteneffizienz. Keine Betriebs- und Wartungskosten, selbstständige Funktion
- Mehr thermische Masse auf gleichem Raum, d. h. mehr Nutzfläche bei gegebener Grundfläche

# Micronal® PCM – Hightech in Mikrokapseln

Micronal® PCM ist ein Phasenwechselmaterial, das innerhalb des Raumtemperatur- und Wohlfühlbereiches des Menschen, d.h. bei 21 °C, 23 °C oder 26 °C, einen Phasenwechsel von fest nach flüssig vollzieht und dadurch sehr große Mengen an Wärme speichern kann. Dieses Prinzip der latenten Wärmespeicherung ist vergleichbar mit einem Eiswürfel, der während seines Schmelzvorgangs ein Getränk konstant bei 0 °C hält. Micronal® PCM nutzt diesen einfachen physikalischen Effekt zur gezielten Stabilisierung der Raumtemperatur.

Micronal® enthält im Kern der Mikrokapsel (Größe ca. 5 µm) ein Latentwärmespeichermaterial aus einer speziellen Wachsmischung. Diese absorbiert bei Temperaturanstieg über eine definierte Temperaturschwelle (21 °C, 23 °C oder 26 °C) die überschüssige Wärmeenergie und speichert diese im Phasenwandel. Bei Absenkung der Temperatur unter die Temperaturschwelle gibt die Kapsel diese gespeicherte Wärmeenergie wieder ab.<sup>1</sup>

Während die Beladung des Speichers i.d.R. durch die tagsüber anfallenden Wärmeeinträge eigenaktiv ab einer definierten Temperatur stattfindet, kann eine Entladung des Speichermaterials sowohl durch natürliche Ventilation als auch durch mechanische Lüftung oder auch durch regenerative oder konventionelle Kühlkonzepte erfolgen.



## Die Vorteile der Mikroverkapselung

- Dichte Verpackung, das Produkt bleibt immer trocken.
- Der Phasenwechsel ist von außen nicht sichtbar, die Volumenänderung beim Schmelzvorgang erfolgt je Kapsel. PCM-Baustoffe bleiben darum dimensionsstabil.
- Geringes Volumen und geringer Platzbedarf bei hohem Wärmespeichervermögen
- „Just in time“. Schneller Wärmeaustausch durch hohes Oberflächen/Volumen-Verhältnis. 1 g Micronal® PCM = 30 m<sup>2</sup> Oberfläche
- Direkt integrierbar in Baustoffe, d.h. einsetzbar ohne zusätzliche Arbeitsschritte oder höhere Komplexität auf der Baustelle
- Mechanisch praktisch unzerstörbar, hohe Zyklenbeständigkeit und jahrzehntelange Funktion
- Formaldehydfrei

<sup>1</sup> Bei diesem Vorgang ändert sich der Aggregatzustand des Speichermaterials. Die Temperatur des Systems bleibt daher so lange annähernd konstant, bis die gesamte versteckte = latente Wärme aufgenommen bzw. abgegeben worden ist.

# Das Micronal® PCM-Produktportfolio

Micronal® PCM ist in unterschiedlicher Form in Baustoffe integrierbar. Für alle Anwendungen, in denen eine flüssige Form eingesetzt werden kann, bietet BASF Micronal® PCM-Dispersionen an, in denen die Mikrokapseln in Wasser dispergiert sind. Für Baustoffanwendungen, die eine pulverförmige Form erforderlich machen (wie beispielsweise trockene Fertigmischungen wie Gips- oder Zementmörtel), bietet BASF ein Portfolio an redispersierbaren Pulvern an.



Micronal® PCM – Als Dispersion und Pulver

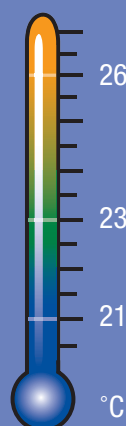
Produktbezeichnung	Produkttyp	Schmelztemperatur ca.	Anwendung	Integrationsbereich	Gesamtspeicherkapazität ca.	Latentwärmekapazität ca.	Feststoffgehalt	Dichte	Schüttdichte	Viskosität
DS 5000	Dispersion	26 °C	Sommerl. Überhitzungsschutz	10–30 °C	59 kJ/kg	45 kJ/kg	ca. 42 %	ca. 0,98		ca. 200–600 mPas
DS 5007	Dispersion	23 °C	Stabilisierung d. Raumtemperatur im Komfortbereich Passive und aktive Anwendung	10–30 °C	55 kJ/kg	41 kJ/kg	ca. 42 %	ca. 0,98		ca. 200–600 mPas
DS 5030	Dispersion	21 °C	Flächenkühlsysteme	10–30 °C	51 kJ/kg	37 kJ/kg	ca. 42 %	ca. 0,98		ca. 200–600 mPas
DS 5001	Pulver	26 °C	Sommerl. Überhitzungsschutz	10–30 °C	145 kJ/kg	110 kJ/kg	pulverförmig		ca. 250–350 kg/m <sup>3</sup>	
DS 5008	Pulver	23 °C	Stabilisierung d. Raumtemperatur im Komfortbereich Passive und aktive Anwendung	10–30 °C	135 kJ/kg	100 kJ/kg	pulverförmig		ca. 250–350 kg/m <sup>3</sup>	
DS 5029	Pulver	21 °C	Flächenkühlsysteme	10–30 °C	125 kJ/kg	90 kJ/kg	pulverförmig		ca. 250–350 kg/m <sup>3</sup>	

Als Bestandteil eines funktionalen Gebäudekonzeptes können mit Micronal® PCM-Latentwärmespeichern beste Ergebnisse hinsichtlich passivem Überhitzungsschutz, Stabilisierung der Raumtemperaturen und effizienter Nutzung von Flächenkühlsystemen erzielt werden.

## Die richtige Wahl der Schmelztemperatur

### Wussten Sie schon:

**30 kg Micronal® PCM bieten etwa 1 kWh Speicherleistung. Dies entspricht der Wärmemenge eines Haartrockners mit 1000 W, der 1 Stunde läuft.**

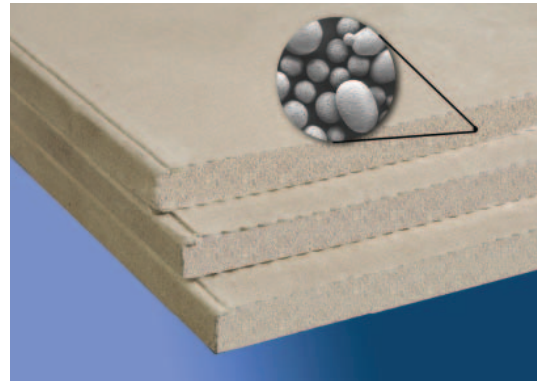


- 26 °C für den sommerlichen Überhitzungsschutz (z.B. in Dachgeschossen oder für die passive Anwendung in warmen Regionen)
- 23 °C für die Stabilisierung der Raumtemperatur im Komfortbereich, dadurch häufige Nutzung des PCM-Effektes. Wichtigstes Produkt für aktive und passive Anwendungsfälle.
- 21 °C für die Nutzung in Flächenkühlsystemen

# Bauanwendungen und Systeme mit Micronal® PCM

## Das PCM SmartBoard® der Firma Knauf Gips KG

In Form der Gipsbauplatte Knauf PCM SmartBoard® lässt sich Micronal® PCM schnell und unkompliziert im Trockenbau in innovative Gebäudekonzepte integrieren. In jedem Quadratmeter dieses Baustoffes sind drei Kilogramm des Latentwärmespeichers Micronal® PCM enthalten. Die Wärmespeicherkapazität einer zweifach mit 15 mm PCM SmartBoard® beplankten Wand, ist vergleichbar mit einer 14 cm dicken Beton- bzw. einer 36,5 cm dicken Hochlochziegelwand.



## Das System Ilkatherm® von Ilkazell Isoliertechnik GmbH

Abgeleitet aus der Sandwichtechnologie (Metalloberfläche, PUR-Hartschaum-Kern, Metalloberfläche) wurden hocheffiziente Kühldeckensegel mit Micronal® PCM entwickelt, die im einfachen Plug-and-play-Verfahren an bestehende Kühlwasserkreisläufe angeschlossen werden können. Die Wasserkühlung erfolgt über Kapillarrohrmatten, die sich auf der Rückseite der zum Raum hin orientierten PCM-Schicht befinden. Diese Systemlösung ermöglicht es, auf regenerative Kälte zurückzugreifen und Leistungsspitzen abzuf puffern.



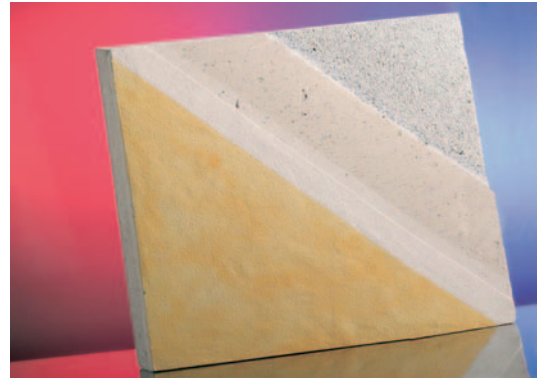
© Ilkazell Isoliertechnik GmbH

## Passive oder aktive Anwendung

Mit Micronal® PCM modifizierte Baustoffe können in „passiver Anwendung“, d.h. ohne den gleichzeitigen Einsatz von mechanischer Kühlung, aber auch als Bestandteil eines „aktivierten“ Systems in Gebäudekonzepten eingesetzt werden. Ein aktiviertes System beschreibt die Kombination unterschiedlicher Komponenten, die eine Rückkühlung bzw. aktive Be- oder Entladung des Speichermediums ermöglichen. Das Wärmeträgermedium kann dabei z.B. Luft oder Wasser sein.

### Der Gips-Maschinenputz maxit clima® von maxit Deutschland GmbH

Maxit clima ist ein PCM Gips-Maschinenputz zur Herstellung von einlagigem Innenputz mit temperaturregulierender Wirkung. Über die Variation der Schichtdicke kann die einzubringende Menge an Micronal® PCM Latentwärmespeicher nach Bedarf gesteuert werden. Maxit clima® ist fertig formuliert (zur Direktverarbeitung auf der Baustelle) als Trockenmörtel erhältlich.



### Der CelBloc Plus® von H+H Deutschland GmbH

Der grüne Porenbeton CelBloc Plus bietet neben guten Wärme-, Brand- und Schallschutzeigenschaften sowie positiven baubiologischen Eigenschaften zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit eine weitere Verbesserung: die Fähigkeit zur latenten Wärmespeicherung.

Die Wanderung der Wärmefront durch die Außenwand wird durch die aktive Komponente PCM gebremst. Ergebnis ist ein hochdämmender Stein, der bei gleichem U-Wert geringere Temperaturschwankungen an der inneren Wandoberfläche zeigt. Das führt zu gleichmäßigeren Innenraumtemperaturen.



© H+H Deutschland GmbH

**Weitere Produktentwicklungen auf Anfrage.**

## Hinweis für Planer



Micronal® PCM hat seine Leistungsfähigkeit nach den Kriterien der RAL Gütegemeinschaft PCM e.V. in umfassenden Testreihen unter Beweis gestellt. Micronal® PCM hat sowohl als Rohstoff als auch in der Trockenbauplatte PCM SmartBoard® alle Prüfungen bestanden und trägt das RAL Gütezeichen seit 22. August 2008. Damit entsprechen Ausschreibungen nach RAL-GZ 896 für Bauprodukte auf Basis Micronal® PCM der guten fachlichen Praxis und den anerkannten Regeln der Technik.

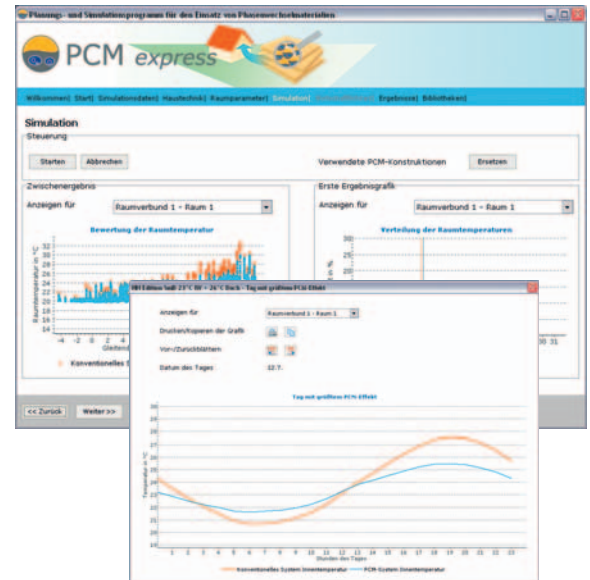
Einzelheiten sind zu finden unter [www.pcm-ral.de](http://www.pcm-ral.de)



# Micronal® PCM – High Performance in intelligenten Gebäudekonzepten

## Die Simulationssoftware PCMexpress

Das Programm PCMexpress wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, der Firma Valentin Energiesoftware und weiteren Industriepartnern entwickelt. PCMexpress ist ein Planungs- und Simulationsprogramm für Gebäude mit Phasenwechselmaterialien (PCM). Es soll Architekten und Planer bei der Einschätzung des PCM-Effektes im konkreten Gebäude unterstützen, indem es eine gesicherte Entscheidungsfindung für die Dimensionierung des Gesamtsystems ermöglicht. Als Ergebnispräsentation werden u.a. Projektberichte für den Kunden und für den Planer sowie aussagekräftige Grafiken zum Vergleich der Systeme angeboten.



© Dr. Valentin EnergieSoftware GmbH

## Referenzobjekte mit Micronal® PCM

In den vergangenen Jahren wurde Micronal® PCM mehrfach in realen Referenzobjekten erprobt und geprüft. Im Folgenden sind drei Beispiele aus den Bereichen Gewerbebau, Schulbau und Wohnungsbau ausgeführt.

### PCM-Bewertung leicht gemacht

Mehr über die kostenlose Simulationssoftware PCMexpress sowie den Link zum Download finden Sie unter [www.micronal.de](http://www.micronal.de)

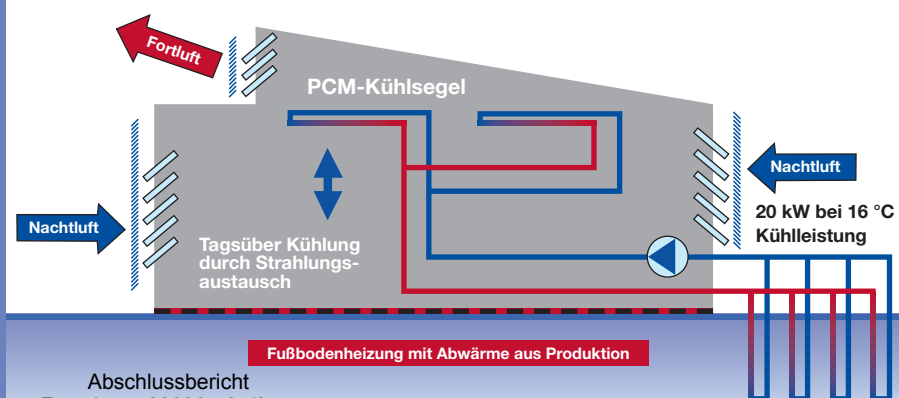
# Referenzobjekt 1: Gewerbebau

## Zielsetzung: Optimiertes Energiekonzept mit exzellenten raumklimatischen Bedingungen für die Mitarbeiter

- Bauobjekt: Bürobau der Firma Engelhardt & Bauer in Karlsruhe
- Anwendung: Aktive Kühldeckenelemente mit regenerativer Kältequelle (Erdsonden)
- Produkt: Ilkazell Kühlsegel Ilkatherm
- Konzept und Monitoring: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg
- Ergebnis: Erdsonden als regenerative Kältequelle stellen für die Ilkatherm Kühldecke kontinuierlich Kühlenergie bereit. Zusätzlich sorgt eine automatische Fensteröffnung für natürliche Nachtlüftung zur Entladung des Gebäudes in der Nacht. Micronal® PCM wirkt als Zwischenspeicher für die anfallenden Lastspitzen während der Nutzungszeit am Tag und vergleichmäßig so den „Just-in-time“-Kühlbedarf.

## Referenzobjekt: Engelhardt & Bauer

- Kühlquelle sind klein dimensionierte Erdsonden
- Energieeffiziente Lösung, basierend auf regenerativem Kühlkonzept
- Kein Wärmetauscher zwischen Kühlquelle und Kühldeckensegel
- Minimaler technischer Aufwand, geringe Betriebs- und Investitionskosten



## Referenzobjekt 2: Wohnbau

### Zielsetzung: Möglichst gleichbleibende Innentemperatur um 23 °C, autarke Versorgung durch Photovoltaik

- Bauobjekt: Deutscher Beitrag zum Wettbewerb „Solar Decathlon“ des DOE in Washington D.C. 2008
- Konzept: Prof. Hegger, TU Darmstadt
- Anwendung: Passives Temperaturmanagement bei 23 °C an Wänden und aktive Kühldecken
- Produkte: Knauf PCM SmartBoard® und Ilkatherm Kühldeckenelemente
- Bauweise: Holzrahmen Leichtbau, teilweise mit Vakuum-Dämmung, Innenausbau Trockenbau
- Realisierung: Studentische Arbeitsgruppe um Prof. Hegger, TU Darmstadt
- Internet: [www.solardecathlon.de](http://www.solardecathlon.de)

### Referenzobjekt: Solar-Decathlon-Haus



## Referenzobjekt 3: Schulbau

### Zielsetzung: Guter thermischer Komfort im Container-Leichtbau ohne aktive Kühlung

- Bauobjekt: Schulneubau des Staates Luxemburg, Stadt Diekirch
- Konzept: Administration des Bâtiments Publics, Division des Travaux neufs, Luxemburg
- Anwendung: Rein passives Temperaturmanagement bei 23 °C an Wänden und Decken
- Produkt: Knauf PCM SmartBoard®
- Bauweise: Tragwerk Stahl-Containerbau, Innenausbau Trockenbau und PCM-Rasterdecken
- Realisierung: Fa. ALHO Systembau GmbH, Morsbach
- Monitoring: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg

### Referenzobjekt: Schulgebäude Diekirch

Weitere Referenzobjekte finden Sie auch unter [www.micronal.de](http://www.micronal.de)  
Micronal® PCM wurde entwickelt mit freundlicher Unterstützung durch das BMWi unter FKZ: 0329840 und 0327370





## BASF SE

Business Management Micronal® PCM  
Marketing Polymer Dispersions for Construction  
67056 Ludwigshafen, Germany

[www.micronal.de](http://www.micronal.de)  
E-mail: [micronal@basf.com](mailto:micronal@basf.com)

For further information please contact us on our toll-free numbers and you will automatically be transferred to your regional contact person:

**Phone: 00 800 - 227 66 257 or 00 800 - ACRONALS**  
**Phone: 00 800 - 227 66 259 or 00 800 - ACRONALX**

IBB Modul Air KG  
Heideweg 28

53604 Bad Honnef

Abschlussbericht  
Forschung 23836 - 24/2

Aktiv-Kühler, Heizboden, Latentspeicher

Seite 211 von 228

The data contained herein are based on our current knowledge and do not constitute a contractual quality of the product and we do not accept any liability for the product. The agreed contractual quality of the product at the time of transfer of risk is based solely on the data in the specification data sheet. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights, etc. given in this publication may change without prior information. It is the responsibility of the recipient of our product to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed (11/2008).

 **BASF**  
The Chemical Company

## 7.10.2. Anlage A 10.2 Paraffin RT 18/20

Produkt-  
information



# RUBITHERM® RT

## Latentwärmespeichermaterial auf Basis von Paraffinen

RUBITHERM RT ist ein ungebundenes Wärmespeichermaterial und nutzt den Schmelzvorgang fest/flüssig, um bei nahezu konstanter Temperatur große Wärmemengen zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. So kann man Wärme und sogar Kälte sehr viel effektiver speichern, als mit herkömmlichen Speichermaterialien.

Alle unsere reinen Speichermaterialien weisen eine hohe Kristallinität auf. Hierdurch erreicht man gegenüber herkömmlichen Paraffinen eine bis zu 30% höhere Speicherkapazität.

Damit sind für verschiedene Anwendungen selbst bei wenig Raum und kleinen Temperaturdifferenzen große Wärmemengen effektiv nutzbar.

### Merkmale:

- hohe Wärmespeicherkapazität
- Ein- und Ausspeichern der Wärme erfolgen bei nahezu konstanter Temperatur
- hohe Kristallinität
- keine Unterkühlung
- langlebig, zyklenstabil
- Ökologisch und toxikologisch unbedenklich
- Praktisch chemisch inert
- Für sehr viele Temperaturen stehen die optimalen Speichermaterialien zur Verfügung (von -4°C bis 100°C)

➤ durch verschiedene den Produkten zugesetzte Stoffe kann eine höhere Viskosität und eine höhere Dichte erreicht werden, dies verhindert das Zerfließen beim Aufschmelzen.

### **Rubitherm Technologies GmbH**

Sperenberger Str. 5a  
D-12277 Berlin

Tel: (030) 720004-62

Fax: (030) 720004-99

E-Mail: [info@rubitherm.com](mailto:info@rubitherm.com)

Internet: [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com)  
IBB Modul Air KG  
Heideweg 28  
53604 Bad Honnef

## Technisches Datenblatt

# **RUBITHERM® RT 21**

(früher: RT 20)



### Typische Werte

Schmelzbereich	°C	18 - 23 typisch: 21°C
Erstarrungsbereich	°C	22 - 19 typisch: 22°C
Speicherkapazität Temperaturbereich von 15°C – 30 °C	kJ/kg	134
Volumenausdehnung Im Phasenübergangsbereich	%	14
Dichte fest bei 15°C	kg/l	0,88
Dichte flüssig bei 25°C	kg/l	0,77
Wärmeleitfähigkeit	W/(m*K)	0,2
Kinetische Viskosität bei 50°C	mm <sup>2</sup> /s	24
Flammpunkt	°C	154
Korrosivität		gegenüber den meisten Materialien chemisch inert
Wassergefährdung		Wassergefährdungsklasse ( WGK ) 1

Die Datenblätter sind unverbindliche Planungshilfen, Technische Änderungen vorbehalten

Version: 20.08.2009



## **7.11. Anlage A11 Ergebnisse Simulationsrechnung**

Objektbezeichnung: C:\Simulation 2. Versuchsreihe\Platte A unten\

### Thermisch aktives Bauteil: Wärmespeichernde Platte mit oder ohne Rohrregister

Fußbodenkühlung für den oberen Raum a mit Zusatzwärmeaufnahme vom unteren Raum i

Eingabedaten:

Konstante Raumtemperatur  $t_a$ : 20,0 °C

Fußboden-Wärmeübergangskoeffizient gemäß Basiskennlinie bestimmt.

Konstante Raumtemperatur (unterer Raum)  $t_i$ : 20,0 °C

Wärmeübergangskoeffizient (Deckenunterseite) gemäß Basiskennlinie bestimmt.

Äußere (bzw. obere) Deckschichten:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
5	1,000	0,0
4	1,000	0,0
3	1,000	0,0
2	0,035	60,0
1	1,400	20,0

Innere (bzw. untere) Deckschichten:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
1	1,400	20,0
2	0,035	60,0
3	1,000	0,0
4	1,000	0,0
5	1,000	0,0

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen:

Schicht	Delta_y mm	Rho kg/m <sup>3</sup>	Lambda		c		r kJ/kg	t_Wandel		jSSmax
			fest W/(m K)	flüssig W/(m K)	fest J/(kg K)	flüssig J/(kg K)		Beginn °C	Ende °C	
1	5,00	1690,0	1,560	0,500	4048,0	3000,0	112,0	16,0	23,0	8

Legende: s Nummer der Materialschicht des Speichers

Delta_y(s)	Gitterabstand in j-Richtung
Rho(s)	Dichte des Speichermaterials
Lambda_fest(s)	Wärmeleitfähigkeit des festen Speichermaterials
Lambda_flüssig(s)	Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Speichermaterials
c_fest(s)	spez. Wärmekapazität des festen Speichermaterials
c_flüssig(s)	spez. Wärmekapazität des flüssigen Speichermaterials
r(s)	Phasenwandelenthalpie des Speichermaterials
t_Wandel_Beginn(s)	Beginn des Phasenwandels (Unterverwert)
t_Wandel_Enden(s)	Ende des Phasenwandels (Oberwert)
jSSmax(s)	maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1: 0,0450 m

Höhe der Schicht 2: 0,0000 m

Höhe der Schicht 3: 0,0000 m

Breite des Speicherkörpers (Simulationausschnitt): 0,5100 m

Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 0,5100 m

Delta_x	Delta_z	iSmax	kSmax	Deckschichtwiderstände	
mm	mm			Ra	Ri
				m <sup>2</sup> K/W	
10,00	10,00	50	50	1,72857	1,72857

Legende: Delta\_x Gitterabstand in i-Richtung  
Delta\_z Gitterabstand in k-Richtung  
iSmax maximale Gitterzahl der Schicht in i-Richtung  
kSmax maximale Gitterzahl der Schicht in k-Richtung

### Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	3	5	6	8	R1
2	3	5	16	18	R1
3	3	5	26	28	R1
4	3	5	36	38	R1
5	3	5	46	48	R1

### Rohr- bzw. Kanalmitelpunkte bezogen auf die linke untere Ecke des Simulationsquerschnittes:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Abstand in		Kanalabmessungen		Rohr-/ Kanal- Typ
	j-Richtung mm	k-Richtung mm	Höhe mm	Breite mm	
1	22,50	75,00	15,00	30,00	R1
2	22,50	175,00	15,00	30,00	R1
3	22,50	275,00	15,00	30,00	R1
4	22,50	375,00	15,00	30,00	R1
5	22,50	475,00	15,00	30,00	R1

### Ausgewählte Testelemente für die der Zeitverlauf untersucht wird:

Element- nummer i	Gitterkoordinaten		
	jE(i)	kE(i)	iE(i)
E1	4	6	10
E2	4	11	10
E3	0	11	10
E4	8	11	10

### Rohr-, Kanal- und Mediendaten in Abhängigkeit des Rohr- bzw. Kanaltyps:

Typ	da	ba	ha	D_W	Rho_W	Lambda_W	c_W	Zahl	V_S	SR	T_Typ	Medium
	mm	mm	mm	mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)	J/(kg K)	-	l/h	-	-	-
R1	17,0			2,00	897,0	0,20	2000,0	5	360,0	1	1	Wasser

Legende: Typ Rohr- bzw. Kanaltyp  
da(Typ) Rohraussendurchmesser  
ba(Typ) Kanalaussehenbreite  
ha(Typ) Kanalaussehenhöhe  
D\_W(Typ) Wanddicke des Rohres oder Kanals  
Rho\_W(Typ) Dichte der Rohr- bzw. Kanalwand  
Lambda\_W(Typ) Wärmeleitfähigkeit der Rohr- bzw. Kanalwand  
c\_W(Typ) spez. Wärmekapazität der Rohr- bzw. Kanalwand

Zahl(Typ) Anzahl der Rohre bzw. Kanäle des Typs im Speicher  
 V\_S(Typ) Volumenstrom durch den Rohr- bzw. Kanaltyp im Speicher  
 SR(Typ) Strömungsrichtung des Mediums (in i-Richtung 1, sonst -1)  
 T\_Typ(Typ) Typ des Temperaturverlaufs (Tagesgang) am Speichereintritt  
 Medium(Typ) Medienart (TL-x% bedeutet: wässrige Lösung mit x% Tyfocor L)

**Allgemeine Simulationsdaten:**

Entwurfstag: 1  
 Startzeit: 0 Uhr Starttemperatur: 30,0 °C  
 Zeitschritt: 10 s Anzahl der Zeitschritte: 7200 Simulationszeit: 20 Stunden  
 Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 20,0 °C

**Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1:**

Tages- stunde	tF1 °C	tF2 °C	tL1 °C	xL1 g/kg	tL2 °C	xL2 g/kg	ta °C	ti °C
1	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
2	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
3	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
4	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
5	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
6	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
7	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
8	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
9	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
10	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
11	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
12	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
13	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
14	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
15	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
16	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
17	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
18	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
19	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
20	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
21	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
22	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
23	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00
24	15,0	-	-	-	-	-	20,00	20,00

**Legende:**

tF1 Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 1  
 tF2 Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 2  
 tL1 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 1  
 tL2 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 2  
 xL1 abs. Feuchteverlauf des Luftvolumenstromes 1  
 xL2 abs. Feuchteverlauf des Luftvolumenstromes 2  
 ta Temperaturverlauf äußere (obere) Plattenumgebung  
 ti Temperaturverlauf innere (untere) Plattenumgebung

**Ergebnisse:****Simulationsergebnisse für die Speicherplatte (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:**

Stunden BS	TZ	Qa Wh	Qi Wh	QR1 Wh	QR2 Wh	QK1 Wh	QK2 Wh	QPlatte Wh	QRK Wh
0	0	-	-	-	-	-	-	578,76	0,00
1	1	1,02	1,00	92,56	-	-	-	484,20	0,00
2	2	0,55	0,54	68,85	-	-	-	414,25	0,00
3	3	0,31	0,31	58,77	-	-	-	354,85	0,00
4	4	0,18	0,17	51,10	-	-	-	303,42	0,00
5	5	0,08	0,08	45,30	-	-	-	257,97	0,00

6	6	-0,01	-0,01	40,74	-	-	-	217,26	0,00
7	7	-0,08	-0,08	36,95	-	-	-	180,47	0,00
8	8	-0,14	-0,14	33,61	-	-	-	147,14	0,00
9	9	-0,19	-0,19	30,58	-	-	-	116,94	0,00
10	10	-0,24	-0,24	27,79	-	-	-	89,65	0,00
11	11	-0,28	-0,29	25,20	-	-	-	65,03	0,00
12	12	-0,32	-0,33	22,79	-	-	-	42,89	0,00
13	13	-0,36	-0,37	20,52	-	-	-	23,11	0,00
14	14	-0,39	-0,40	18,34	-	-	-	5,57	0,00
15	15	-0,42	-0,43	16,43	-	-	-	-10,01	0,00
16	16	-0,45	-0,46	14,73	-	-	-	-23,82	0,00
17	17	-0,47	-0,48	13,12	-	-	-	-35,99	0,00
18	18	-0,50	-0,50	11,62	-	-	-	-46,60	0,00
19	19	-0,52	-0,53	10,19	-	-	-	-55,74	0,00
20	20	-0,54	-0,55	8,81	-	-	-	-63,46	0,00

## Legende:

BS	Betriebsstunden (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
Qa	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die äußere Umgebung
Qi	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die innere Umgebung
QR1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R1
QR2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R2
QK1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K1
QK2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K2
QPlatte	Wärme (Enthalpie) in der Speicherplatte am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand am Ende der Stunde

## Flächenbezogene Simulationsergebnisse für die Speicherplatte (Stundenwerte):

Stunden	qam	qim	qm	qmR+K	qPl	ta	tmOa	ti	tmOi	
BS	TZ	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	Wh/m <sup>2</sup>	°C	°C	°C	°C
0	0	-	-	-	-	2225,1	20,0	20,8	20,0	20,6
1	1	3,9	3,8	7,7	355,8	1861,6	20,0	20,3	20,0	20,4
2	2	2,1	2,1	4,2	264,7	1592,7	20,0	20,2	20,0	20,2
3	3	1,2	1,2	2,4	225,9	1364,3	20,0	20,1	20,0	20,1
4	4	0,7	0,7	1,3	196,5	1166,5	20,0	20,1	20,0	20,1
5	5	0,3	0,3	0,6	174,2	991,8	20,0	20,0	20,0	20,0
6	6	-0,0	-0,0	-0,0	156,6	835,3	20,0	20,0	20,0	20,0
7	7	-0,3	-0,3	-0,6	142,0	693,8	20,0	19,9	20,0	19,9
8	8	-0,5	-0,5	-1,0	129,2	565,7	20,0	19,9	20,0	19,9
9	9	-0,7	-0,7	-1,5	117,6	449,6	20,0	19,9	20,0	19,9
10	10	-0,9	-0,9	-1,9	106,8	344,7	20,0	19,8	20,0	19,9
11	11	-1,1	-1,1	-2,2	96,9	250,0	20,0	19,8	20,0	19,8
12	12	-1,2	-1,3	-2,5	87,6	164,9	20,0	19,8	20,0	19,8
13	13	-1,4	-1,4	-2,8	78,9	88,8	20,0	19,8	20,0	19,8
14	14	-1,5	-1,5	-3,1	70,5	21,4	20,0	19,7	20,0	19,8
15	15	-1,6	-1,7	-3,3	63,2	-38,5	20,0	19,7	20,0	19,8
16	16	-1,7	-1,8	-3,5	56,6	-91,6	20,0	19,7	20,0	19,8
17	17	-1,8	-1,9	-3,7	50,5	-138,4	20,0	19,7	20,0	19,8
18	18	-1,9	-1,9	-3,8	44,7	-179,2	20,0	19,7	20,0	19,7
19	19	-2,0	-2,0	-4,0	39,2	-214,3	20,0	19,7	20,0	19,7
20	20	-2,1	-2,1	-4,2	33,9	-244,0	20,0	19,7	20,0	19,7

## Legende:

BS	Betriebsstunden (= Simulationsstunden)	
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)	[WSD = Wärmestromdichte]
qam	mittlere WSD von der Platte in vorheriger Stunde an die äußere Umgebung	
qim	mittlere WSD von der Platte in vorheriger Stunde an die innere Umgebung	
qm	mittlere WSD von der Platte in vorheriger Stunde an die Umgebung	
qmR+K	mittlere WSD von der Platte an die Rohre und Kanäle in vorheriger Stunde	
qPl	Speicherwärme in der Platte am Ende der Stunde	
ta	aktuelle Temperatur der äußeren Umgebung am Ende der Stunde	
tmOa	mittlere, äußere Oberflächentemperatur der Platte am Ende der Stunde	
ti	aktuelle Temperatur der inneren Umgebung am Ende der Stunde	
tmOa	mittlere, innere Oberflächentemperatur der Platte am Ende der Stunde	

## Simulationsergebnisse für die Fluide (Werte am Ende der Stunde):

Stunden	BS	TZ	Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
			Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h
1	1	1	15,0	15,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2	2	15,0	15,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3	3	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4	4	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5	5	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	6	6	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	7	7	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	8	8	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	9	9	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	10	10	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	11	11	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	12	12	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	13	13	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	14	14	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	15	15	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	16	16	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	17	17	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	18	18	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	19	19	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	20	20	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Legende:

BS	Betriebsstunden (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
Ein	Eintrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde
Aus	mittlere Austrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde
Kond	Kondensatstrom am Ende der Stunde bezogen auf den Volumenstrom V <sub>S</sub>
Füllung im Rohrtyp R1:	Wasser
Füllung im Rohrtyp R2:	-
Füllung im Kanaltyp K1:	-
Füllung im Kanaltyp K2:	-

## Simulationsergebnisse für die ausgewählten Volumenelemente (Werte am Ende der Stunde):

Stunden	BS	TZ	Element E1		Element E2		Element E3		Element E4	
			t °C	Phase -	t °C	Phase -	t °C	Phase -	t °C	Phase -
1	1	1	15,0	0,000	27,1	1,000	27,2	1,000	27,2	1,000
2	2	2	15,0	0,000	24,1	1,000	24,2	1,000	24,2	1,000
3	3	3	15,0	0,000	22,8	0,978	22,9	0,986	22,9	0,986

4	4	15,0	0,000	22,3	0,894	22,3	0,906	22,3	0,906
5	5	15,0	0,000	21,6	0,799	21,7	0,808	21,7	0,808
6	6	15,0	0,000	20,9	0,701	21,0	0,708	21,0	0,708
7	7	15,0	0,000	20,3	0,608	20,3	0,614	20,3	0,614
8	8	15,0	0,000	19,7	0,523	19,7	0,528	19,7	0,528
9	9	15,0	0,000	19,1	0,446	19,2	0,450	19,2	0,450
10	10	15,0	0,000	18,6	0,378	18,7	0,382	18,7	0,382
11	11	15,0	0,000	18,2	0,317	18,3	0,322	18,3	0,321
12	12	15,0	0,000	17,9	0,265	17,9	0,269	17,9	0,269
13	13	15,0	0,000	17,5	0,218	17,6	0,222	17,6	0,222
14	14	15,0	0,000	17,2	0,178	17,3	0,182	17,3	0,182
15	15	15,0	0,000	17,0	0,143	17,0	0,146	17,0	0,146
16	16	15,0	0,000	16,8	0,112	16,8	0,115	16,8	0,115
17	17	15,0	0,000	16,6	0,085	16,6	0,088	16,6	0,088
18	18	15,0	0,000	16,4	0,061	16,4	0,064	16,4	0,064
19	19	15,0	0,000	16,3	0,039	16,3	0,043	16,3	0,043
20	20	15,0	0,000	16,1	0,019	16,2	0,022	16,2	0,022

---

**Simulationsergebnisse für den Zeitraum der letzten 24 Stunden bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Speicherplatte:**

Wärme an die äußere Umgebung: 0,0 Wh/m<sup>2</sup>  
Wärme an die innere Umgebung: 0,0 Wh/m<sup>2</sup>  
Wärme an das Rohr-/Kanalsystem: 0,0 Wh/m<sup>2</sup>

Mittlere Leistung an die äußere Umgebung: 0,0 W/m<sup>2</sup>  
Mittlere Leistung an die innere Umgebung: 0,0 W/m<sup>2</sup>  
Mittlere Leistung an das Rohr-/Kanalsystem: 0,0 W/m<sup>2</sup>

## **17.12. Anlage A12 Ergebnisse Simulation Raum**



Objektbezeichnung: C:\Simulation\Raum mit Speicherplatte\\

### Thermisch aktives Bauteil: Wärmespeichernde Platte mit oder ohne Rohrregister

Fußbodenkühlung für den oberen Raum a mit Zusatzwärmeaufnahme vom unteren Raum i

Eingabedaten:

Raumtemperatur  $t_a$  folgt einem zeitlichen Verlauf.

Fußboden-Wärmeübergangskoeffizient gemäß Basiskennlinie bestimmt.

Konstante Raumtemperatur (unterer Raum)  $t_i$ : 20,0 °C

Wärmeübergangskoeffizient (Deckenunterseite) gemäß Basiskennlinie bestimmt.

Äußere (bzw. obere) Deckschichten:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
5	1,000	0,0
4	1,000	0,0
3	1,000	0,0
2	1,000	0,0
1	1,400	60,0

Innere (bzw. untere) Deckschichten:

Schicht	Lambda W/(m K)	Dicke mm
1	0,035	40,0
2	1,400	200,0
3	1,000	0,0
4	1,000	0,0
5	1,000	0,0

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen:

Schicht	Delta_y mm	Rho kg/m <sup>3</sup>	Lambda		c		r kJ/kg	t_Wandel		jSSmax
			fest W/(m K)	flüssig W/(m K)	fest J/(kg K)	flüssig J/(kg K)		Beginn °C	Ende °C	
1	5,00	1690,0	1,560	0,500	4048,0	3000,0	112,0	16,0	23,0	8

Legende: s Nummer der Materialschicht des Speichers

Delta_y(s)	Gitterabstand in j-Richtung
Rho(s)	Dichte des Speichermaterials
Lambda_fest(s)	Wärmeleitfähigkeit des festen Speichermaterials
Lambda_flüssig(s)	Wärmeleitfähigkeit des flüssigen Speichermaterials
c_fest(s)	spez. Wärmekapazität des festen Speichermaterials
c_flüssig(s)	spez. Wärmekapazität des flüssigen Speichermaterials
r(s)	Phasenwandelenthalpie des Speichermaterials
t_Wandel_Beginn(s)	Beginn des Phasenwandels (Unterwert)
t_Wandel_End(e)s)	Ende des Phasenwandels (Oberwert)
jSSmax(s)	maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1: 0,0450 m

Höhe der Schicht 2: 0,0000 m

Höhe der Schicht 3: 0,0000 m

Breite des Speicherkörpers (Simulationausschnitt): 0,5100 m

Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 0,5100 m

Delta_x mm	Delta_z mm	iSmax	kSmax	Deckschichtwiderstände	
				Ra	Ri m <sup>2</sup> K/W
10,00	10,00	50	50	0,04286	1,28571

Legende:	Delta_x	Gitterabstand in i-Richtung
	Delta_z	Gitterabstand in k-Richtung
	iSmax	maximale Gitterzahl der Schicht in i-Richtung
	kSmax	maximale Gitterzahl der Schicht in k-Richtung

### Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	3	5	6	8	R1
2	3	5	16	18	R1
3	3	5	26	28	R1
4	3	5	36	38	R1
5	3	5	46	48	R1

### Rohr- bzw. Kanalmittelpunkte bezogen auf die linke untere Ecke des Simulationsquerschnittes:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Abstand in		Kanalabmessungen		Rohr-/ Kanal- Typ
	j-Richtung mm	k-Richtung mm	Höhe mm	Breite mm	
1	22,50	75,00	15,00	30,00	R1
2	22,50	175,00	15,00	30,00	R1
3	22,50	275,00	15,00	30,00	R1
4	22,50	375,00	15,00	30,00	R1
5	22,50	475,00	15,00	30,00	R1

### Ausgewählte Testelemente für die der Zeitverlauf untersucht wird:

Element- nummer i	Gitterkoordinaten		
	jE(i)	kE(i)	iE(i)
E1	4	6	10
E2	4	11	10
E3	0	11	10
E4	8	11	10

### Rohr-, Kanal- und Mediendaten in Abhängigkeit des Rohr- bzw. Kanaltyps:

Typ	da	ba	ha	D_W	Rho_W	Lambda_W	c_W	Zahl	V_S	SR	T_Typ	Medium
	mm	mm	mm	mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)	J/(kg K)	-	l/h	-	-	-
R1	17,0			2,00	897,0	0,20	2000,0	5	360,0	1	1	Wasser

Legende:	Typ	Rohr- bzw. Kanaltyp
	da(Typ)	Rohraussendurchmesser
	ba(Typ)	Kanalaussenbreite
	ha(Typ)	Kanalaussenhöhe
	D_W(Typ)	Wanddicke des Rohres oder Kanals
	Rho_W(Typ)	Dichte der Rohr- bzw. Kanalwand
	Lambda_W(Typ)	Wärmeleitfähigkeit der Rohr- bzw. Kanalwand
	c_W(Typ)	spez. Wärmekapazität der Rohr- bzw. Kanalwand
	Zahl(Typ)	Anzahl der Rohre bzw. Kanäle des Typs im Speicher
	V_S(Typ)	Volumenstrom durch den Rohr- bzw. Kanaltyp im Speicher
	SR(Typ)	Strömungsrichtung des Mediums (in i-Richtung 1, sonst -1)
	T_Typ(Typ)	Typ des Temperaturverlaufs (Tagesgang) am Speichereintritt
	Medium(Typ)	Medienart (TL-x% bedeutet: wässrige Lösung mit x% Tyfocor L)

**Allgemeine Simulationsdaten:**

Entwurfstag: 1  
 Startzeit: 0 Uhr Starttemperatur: 15,0 °C  
 Zeitschritt: 10 s Anzahl der Zeitschritte: 8640 Simulationszeit: 24 Stunden  
 Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugsstemperatur: 20,0 °C

**Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1:**

Tages- stunde	tF1 °C	tF2 °C	tL1 °C	xL1 g/kg	tL2 °C	xL2 g/kg	ta °C	ti °C
1	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
2	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
3	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
4	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
5	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
6	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
7	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
8	19,0	-	-	-	-	-	24,00	20,00
9	19,0	-	-	-	-	-	24,00	20,00
10	19,0	-	-	-	-	-	25,00	20,00
11	19,0	-	-	-	-	-	26,00	20,00
12	19,0	-	-	-	-	-	27,00	20,00
13	19,0	-	-	-	-	-	28,00	20,00
14	19,0	-	-	-	-	-	29,00	20,00
15	19,0	-	-	-	-	-	28,00	20,00
16	19,0	-	-	-	-	-	27,00	20,00
17	19,0	-	-	-	-	-	26,00	20,00
18	19,0	-	-	-	-	-	25,00	20,00
19	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
20	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
21	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
22	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
23	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00
24	15,0	-	-	-	-	-	23,00	20,00

**Legende:**

tF1 Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 1  
 tF2 Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 2  
 tL1 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 1  
 tL2 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 2  
 xL1 abs. Feuchteverlauf des Luftvolumenstromes 1  
 xL2 abs. Feuchteverlauf des Luftvolumenstromes 2  
 ta Temperaturverlauf äußere (obere) Plattenumgebung  
 ti Temperaturverlauf innere (untere) Plattenumgebung

**Ergebnisse:****Simulationsergebnisse für die Speicherplatte (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:**

Stunden BS	TZ	Qa Wh	Qi Wh	QR1 Wh	QR2 Wh	QK1 Wh	QK2 Wh	QPlatte Wh	QRK Wh
0	0	-	-	-	-	-	-	-100,32	0,00
1	1	-9,92	-0,90	2,49	-	-	-	-91,97	0,00
2	2	-9,44	-0,86	5,68	-	-	-	-87,36	0,00
3	3	-9,23	-0,82	7,30	-	-	-	-84,60	0,00
4	4	-9,14	-0,81	8,08	-	-	-	-82,74	0,00
5	5	-9,07	-0,80	8,50	-	-	-	-81,37	0,00
6	6	-9,03	-0,79	8,75	-	-	-	-80,30	0,00
7	7	-9,00	-0,79	8,93	-	-	-	-79,44	0,00
8	8	-9,51	-0,75	-12,52	-	-	-	-56,53	0,00
9	9	-9,53	-0,67	-27,46	-	-	-	-18,89	0,00
10	10	-9,54	-0,59	-20,38	-	-	-	11,60	0,00

11	11	-10,32	-0,53	-15,75	-	-	-	38,18	0,00
12	12	-11,16	-0,47	-12,16	-	-	-	61,96	0,00
13	13	-12,04	-0,42	-9,16	-	-	-	83,58	0,00
14	14	-12,96	-0,38	-6,55	-	-	-	103,47	0,00
15	15	-12,59	-0,34	-4,27	-	-	-	120,66	0,00
16	16	-11,00	-0,31	-2,45	-	-	-	134,40	0,00
17	17	-9,51	-0,27	-1,08	-	-	-	145,26	0,00
18	18	-8,08	-0,25	-0,06	-	-	-	153,64	0,00
19	19	-6,12	-0,24	22,62	-	-	-	137,25	0,00
20	20	-5,34	-0,29	37,80	-	-	-	105,10	0,00
21	21	-5,92	-0,36	31,57	-	-	-	79,83	0,00
22	22	-6,35	-0,42	27,78	-	-	-	58,83	0,00
23	23	-6,69	-0,46	25,08	-	-	-	40,92	0,00
24	0	-6,98	-0,50	22,97	-	-	-	25,43	0,00

## Legende:

BS	Betriebsstunden (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
Qa	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die äußere Umgebung
Qi	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die innere Umgebung
QR1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R1
QR2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R2
QK1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K1
QK2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K2
QPlatte	Wärme (Enthalpie) in der Speicherplatte am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand am Ende der Stunde

## Flächenbezogene Simulationsergebnisse für die Speicherplatte (Stundenwerte):

Stunden	qam	qim	qm	qmR+K	qPl	ta	tmOa	ti	tmOi	
BS	TZ	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	Wh/m <sup>2</sup>	°C	°C	°C	°C
0	0	-	-	-	-	-385,7	23,0	16,8	20,0	19,6
1	1	-38,1	-3,5	-41,6	9,6	-353,6	23,0	17,4	20,0	19,6
2	2	-36,3	-3,3	-39,6	21,8	-335,9	23,0	17,5	20,0	19,6
3	3	-35,5	-3,2	-38,7	28,1	-325,3	23,0	17,6	20,0	19,6
4	4	-35,1	-3,1	-38,2	31,1	-318,1	23,0	17,7	20,0	19,6
5	5	-34,9	-3,1	-38,0	32,7	-312,8	23,0	17,7	20,0	19,6
6	6	-34,7	-3,1	-37,8	33,7	-308,7	23,0	17,7	20,0	19,6
7	7	-34,6	-3,0	-37,7	34,3	-305,4	23,0	17,7	20,0	19,6
8	8	-36,6	-2,9	-39,5	-48,1	-217,3	24,0	18,2	20,0	19,7
9	9	-36,7	-2,6	-39,2	-105,6	-72,6	24,0	18,6	20,0	19,7
10	10	-36,7	-2,3	-38,9	-78,3	44,6	25,0	19,2	20,0	19,7
11	11	-39,7	-2,0	-41,7	-60,6	146,8	26,0	19,7	20,0	19,8
12	12	-42,9	-1,8	-44,7	-46,8	238,2	27,0	20,2	20,0	19,8
13	13	-46,3	-1,6	-47,9	-35,2	321,4	28,0	20,7	20,0	19,8
14	14	-49,8	-1,5	-51,3	-25,2	397,8	29,0	21,2	20,0	19,8
15	15	-48,4	-1,3	-49,7	-16,4	463,9	28,0	21,1	20,0	19,8
16	16	-42,3	-1,2	-43,5	-9,4	516,7	27,0	21,0	20,0	19,8
17	17	-36,6	-1,1	-37,6	-4,1	558,5	26,0	20,8	20,0	19,9
18	18	-31,1	-1,0	-32,0	-0,2	590,7	25,0	20,6	20,0	19,9
19	19	-23,5	-0,9	-24,5	87,0	527,7	23,0	20,0	20,0	19,9
20	20	-20,5	-1,1	-21,6	145,3	404,1	23,0	19,6	20,0	19,8
21	21	-22,8	-1,4	-24,2	121,4	306,9	23,0	19,4	20,0	19,8
22	22	-24,4	-1,6	-26,0	106,8	226,2	23,0	19,1	20,0	19,8
23	23	-25,7	-1,8	-27,5	96,4	157,3	23,0	19,0	20,0	19,8
24	0	-26,8	-1,9	-28,8	88,3	97,8	23,0	18,8	20,0	19,7

-

## Legende:

BS	Betriebsstunden (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit) [WSD = Wärmestromdichte]
qam	mittlere WSD von der Platte in vorheriger Stunde an die äußere Umgebung
qim	mittlere WSD von der Platte in vorheriger Stunde an die innere Umgebung
qm	mittlere WSD von der Platte in vorheriger Stunde an die Umgebung
qmR+K	mittlere WSD von der Platte an die Rohre und Kanäle in vorheriger Stunde
qPl	Speicherwärme in der Platte am Ende der Stunde
ta	aktuelle Temperatur der äußeren Umgebung am Ende der Stunde
tmOa	mittlere, äußere Oberflächentemperatur der Platte am Ende der Stunde
ti	aktuelle Temperatur der inneren Umgebung am Ende der Stunde
tmOa	mittlere, innere Oberflächentemperatur der Platte am Ende der Stunde

## Simulationsergebnisse für die Fluide (Werte am Ende der Stunde):

Stunden	BS	TZ	Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
			Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h
1	1	1	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2	2	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3	3	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4	4	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5	5	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	6	6	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	7	7	15,0	15,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	8	8	19,0	18,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	9	9	19,0	18,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	10	10	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	11	11	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	12	12	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	13	13	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	14	14	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	15	15	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	16	16	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	17	17	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	18	18	19,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	19	19	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	20	20	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	21	21	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	22	22	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	23	23	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	0	0	15,0	15,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Legende:

BS	Betriebsstunden (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
Ein	Eintrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde
Aus	mittlere Austrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde
Kond	Kondensatstrom am Ende der Stunde bezogen auf den Volumenstrom V_S
Füllung im Rohrtyp R1:	Wasser
Füllung im Rohrtyp R2:	-
Füllung im Kanaltyp K1:	-
Füllung im Kanaltyp K2:	-

## Simulationsergebnisse für die ausgewählten Volumenelemente (Werte am Ende der Stunde):

Stunden		Element E1		Element E2		Element E3		Element E4	
BS	TZ	t	Phase	t	Phase	t	Phase	t	Phase
		°C	-	°C	-	°C	-	°C	-
1	1	15,0	0,000	15,4	0,000	15,3	0,000	15,7	0,000
2	2	15,0	0,000	15,7	0,000	15,6	0,000	16,0	0,000
3	3	15,0	0,000	15,8	0,000	15,7	0,000	16,1	0,015
4	4	15,0	0,000	15,9	0,000	15,8	0,000	16,2	0,025
5	5	15,0	0,000	15,9	0,000	15,8	0,000	16,2	0,031
6	6	15,0	0,000	15,9	0,000	15,8	0,000	16,2	0,035
7	7	15,0	0,000	16,0	0,000	15,9	0,000	16,3	0,039
8	8	19,0	0,000	16,1	0,014	16,0	0,004	16,4	0,055
9	9	19,0	0,000	16,4	0,056	16,3	0,040	16,7	0,100
10	10	19,0	0,000	16,8	0,108	16,6	0,091	17,1	0,158
11	11	19,0	0,000	17,1	0,160	17,0	0,140	17,5	0,217
12	12	19,0	0,000	17,5	0,208	17,3	0,186	17,9	0,273
13	13	19,0	0,000	17,8	0,253	17,6	0,229	18,3	0,326
14	14	19,0	0,000	18,1	0,294	17,9	0,267	18,6	0,376
15	15	19,0	0,000	18,3	0,331	18,1	0,302	18,9	0,414
16	16	19,0	0,000	18,5	0,363	18,3	0,334	19,1	0,441
17	17	19,0	0,000	18,7	0,389	18,5	0,361	19,2	0,460
18	18	19,0	0,000	18,9	0,409	18,7	0,384	19,3	0,472
19	19	15,0	0,000	18,9	0,419	18,8	0,400	19,3	0,472
20	20	15,0	0,000	18,8	0,398	18,7	0,385	19,1	0,447
21	21	15,0	0,000	18,5	0,361	18,4	0,349	18,8	0,406
22	22	15,0	0,000	18,2	0,319	18,1	0,307	18,5	0,363
23	23	15,0	0,000	18,0	0,278	17,9	0,267	18,3	0,322
24	0	15,0	0,000	17,7	0,242	17,6	0,230	18,0	0,286

Simulationsergebnisse für den Zeitraum der letzten 24 Stunden bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Speicherplatte:

Wärme an die äußere Umgebung: -840,1 Wh/m<sup>2</sup>  
Wärme an die innere Umgebung: -50,1 Wh/m<sup>2</sup>  
Wärme an das Rohr-/Kanalsystem: 406,7 Wh/m<sup>2</sup>

Mittlere Leistung an die äußere Umgebung: -35,0 W/m<sup>2</sup>  
Mittlere Leistung an die innere Umgebung: -2,1 W/m<sup>2</sup>  
Mittlere Leistung an das Rohr-/Kanalsystem: 16,9 W/m<sup>2</sup>