



best in technical performance

Imtech

# Kühlen ohne Kältemaschine PCM-Techniken für die Raumkühlung

Latentwärmespeicher in Lüftungsgeräten  
Entwicklung und Betriebserfahrungen  
mit dem Imtech-Haus

**LowEx**

**Heizen und Kühlen mit Niedrig-Exergie**



**Dr.-Ing. Bruno Lüdemann**

**Imtech Deutschland GmbH & Co. KG**  
**Forschung und Entwicklung**



best in technical performance

Imtech

# Imtech Deutschland

## Forschung und Entwicklung:

## Strömungs- und wärmetechnisches Labor



best in technical performance



## forschung und entwicklung

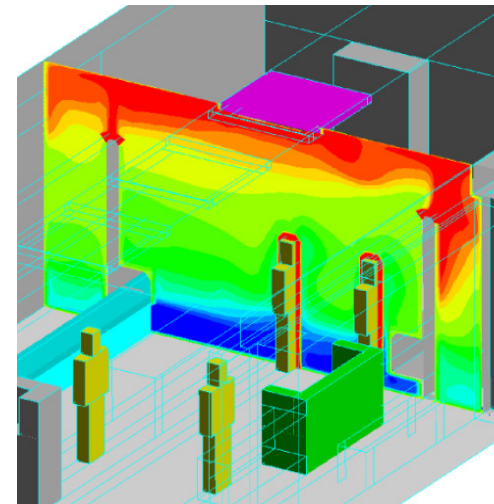
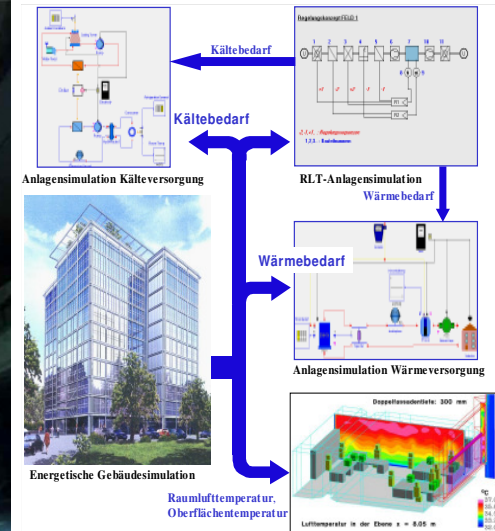
### ■ Simulation

- energetische Gebäudesimulation
- Anlagensimulation
- Energiestudien
- strömungstechnische Simulation

### ■ Labor

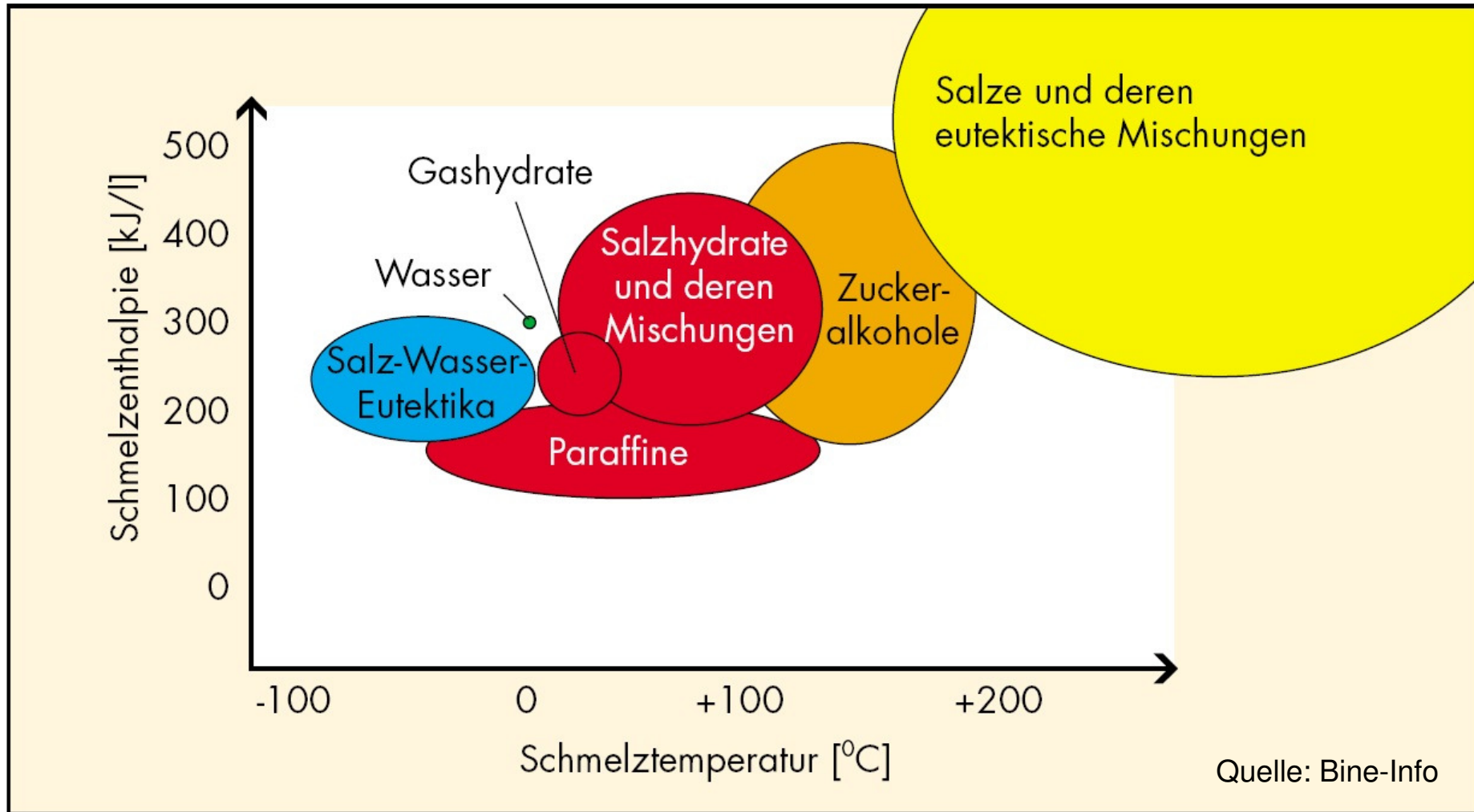
- Raumluftrömungsversuche
- Konzeptstudien und Beratung
- Komponentenentwicklung
- Leistungsmessung
- Entrauchungskonzepte
- Modellversuche
- Vor-Ort-Messungen

## offen für besseres



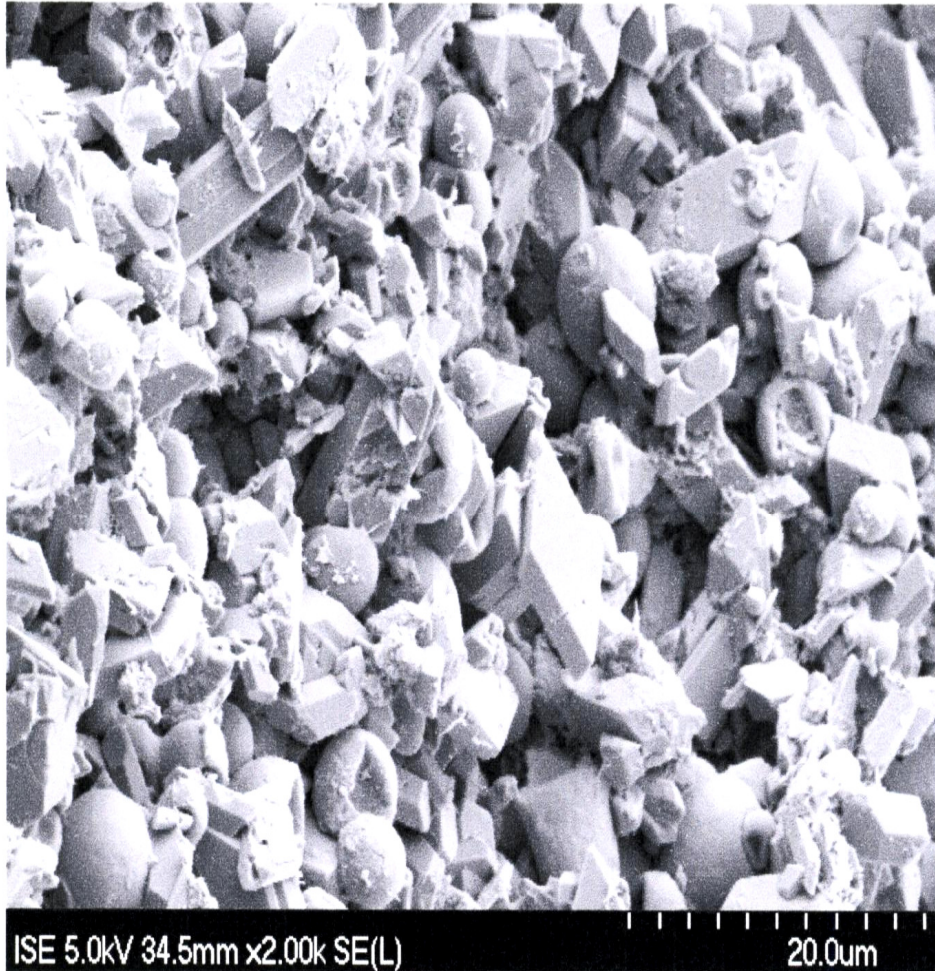


## PCM-Gerät: Materialauswahl





## Ansatz passive Speicherung



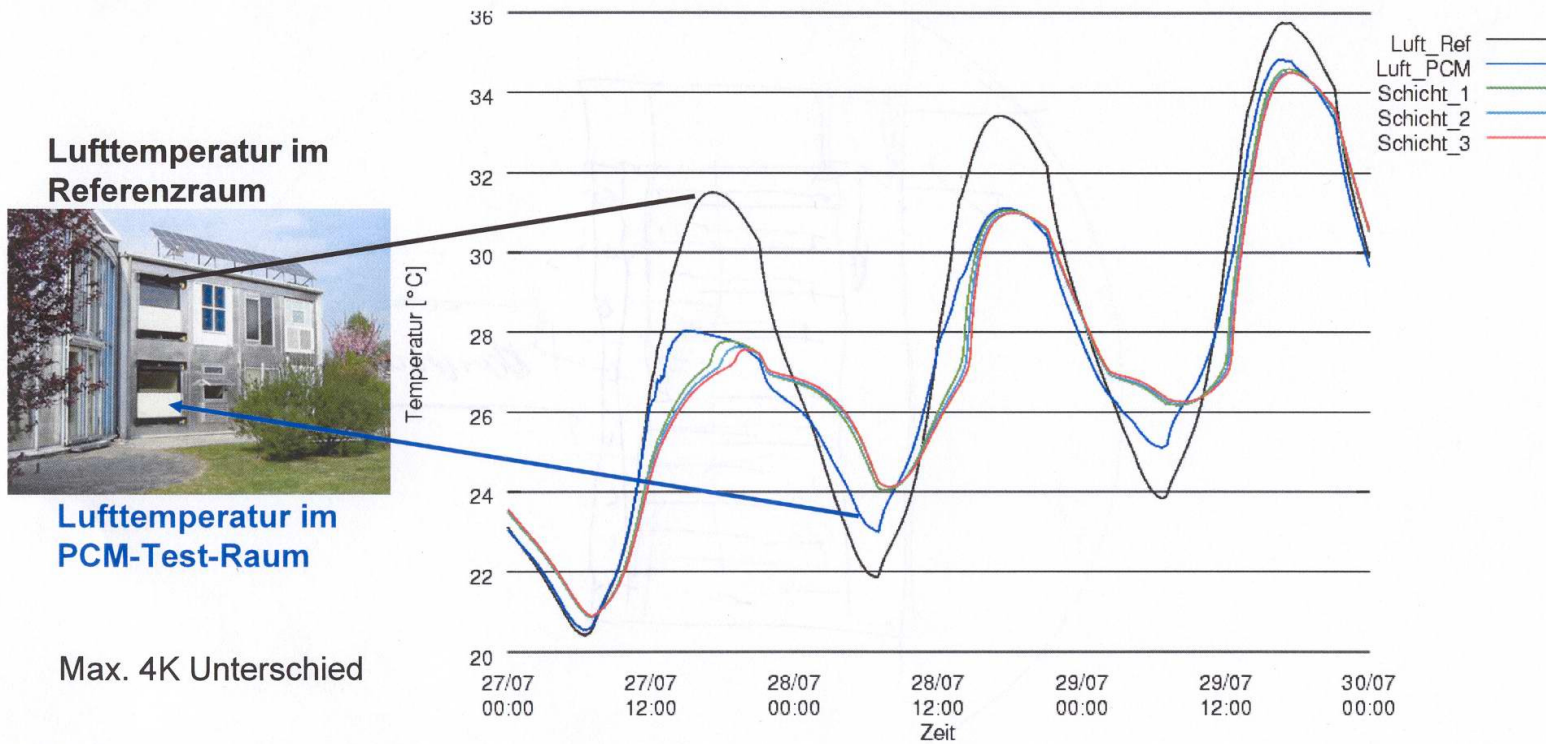
REM Gipsputz mit PCM-Mikrokapseln

- Mikroverkapselte Materialien für die Integration in Baustoffe für passive Systeme optimierter Schmelztemperatur im Bereich 24 – 25 °C verfügbar
- Entwicklung und Markteinführung von Putzen und pasteusen Produkten mit integrierten Latentmaterialien
- Hauptanwendung: Komforterrhöhung im Sommer → Speicherladung am Tag durch Raumlaster; Speicherentladung in der Nacht durch Lüftung
- Langzeitstabilität erreicht (10.000 Zyklen getestet)



# Lufttemperaturmessungen im PCM-Testraum (ISE)

## Testraum-Messungen (Sommerperiode)





## Aktive PCM - Systeme Kapillarrohrmatten in PCM

- Gebäudeintegrierter, verteilter PCM-Speicher zum Heizen und/oder Kühlen
- Aktivierung durch Wasser-gestützte Systeme
- **Kühlung:** Speicherentladung unter Ausnutzung von Umwelt-Wärmesenken (Erdreich, Brunnenwasser, Kühlturm)
- **Heizung:** Speicherladung durch Solarkollektoren, Wärmepumpen, Abwärme (z.B. KWK) zeitunabhängig vom Bedarf mit niedrigen Temperaturdifferenzen

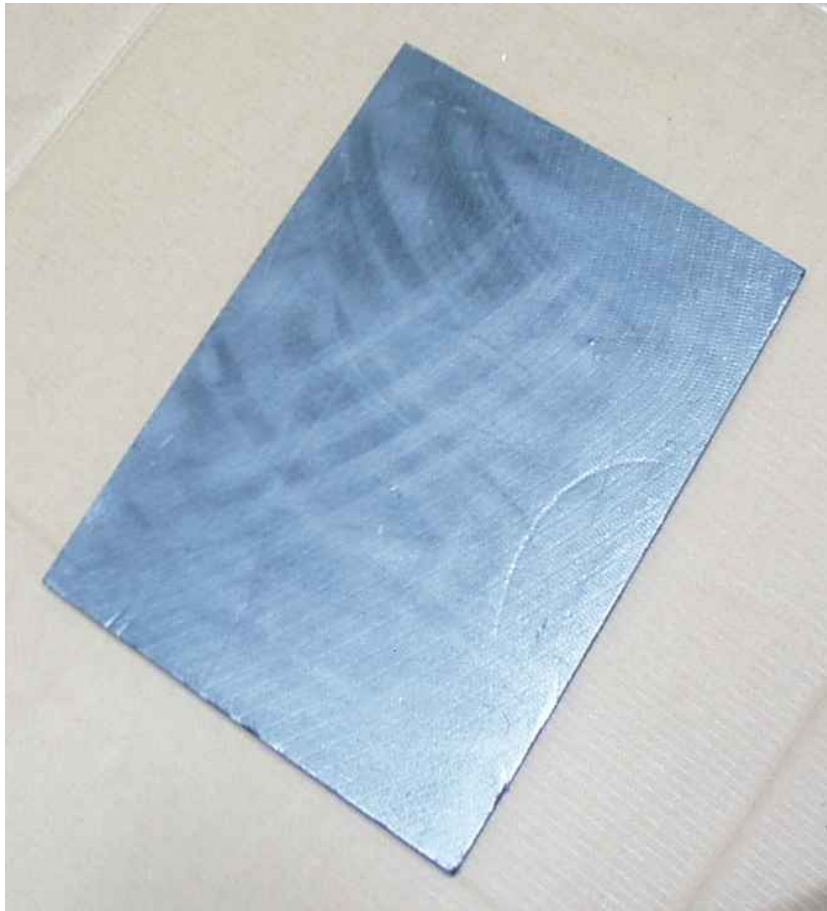




best in technical performance



## aktiv durchströmte Speicher mit PCM - Speicherplatten



**Graphit-Paraffin-Matrix**



**Aufbau Speichermodul:  
luftdurchströmter Stack  
aus Einzelplatten**

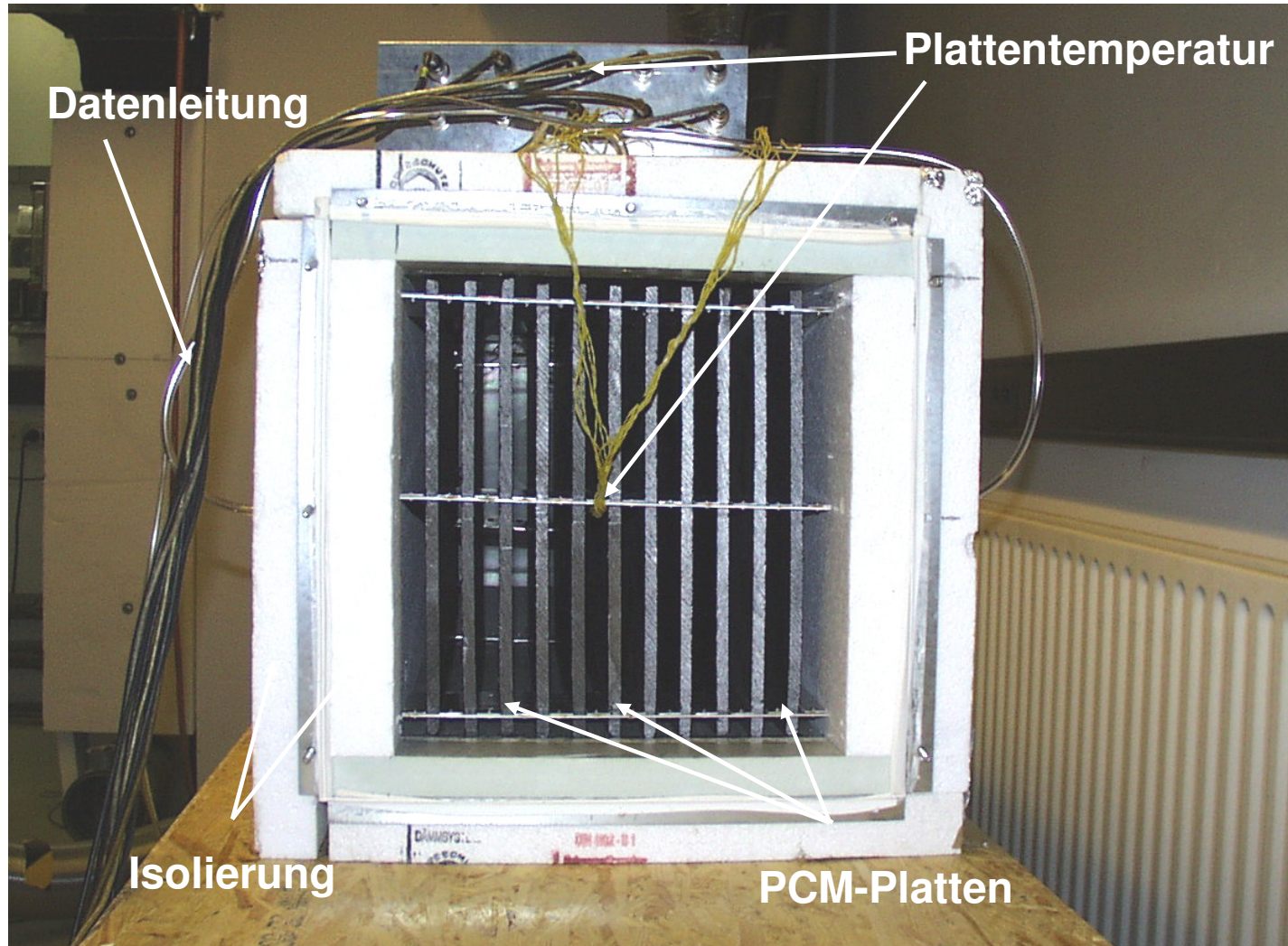




best in technical performance

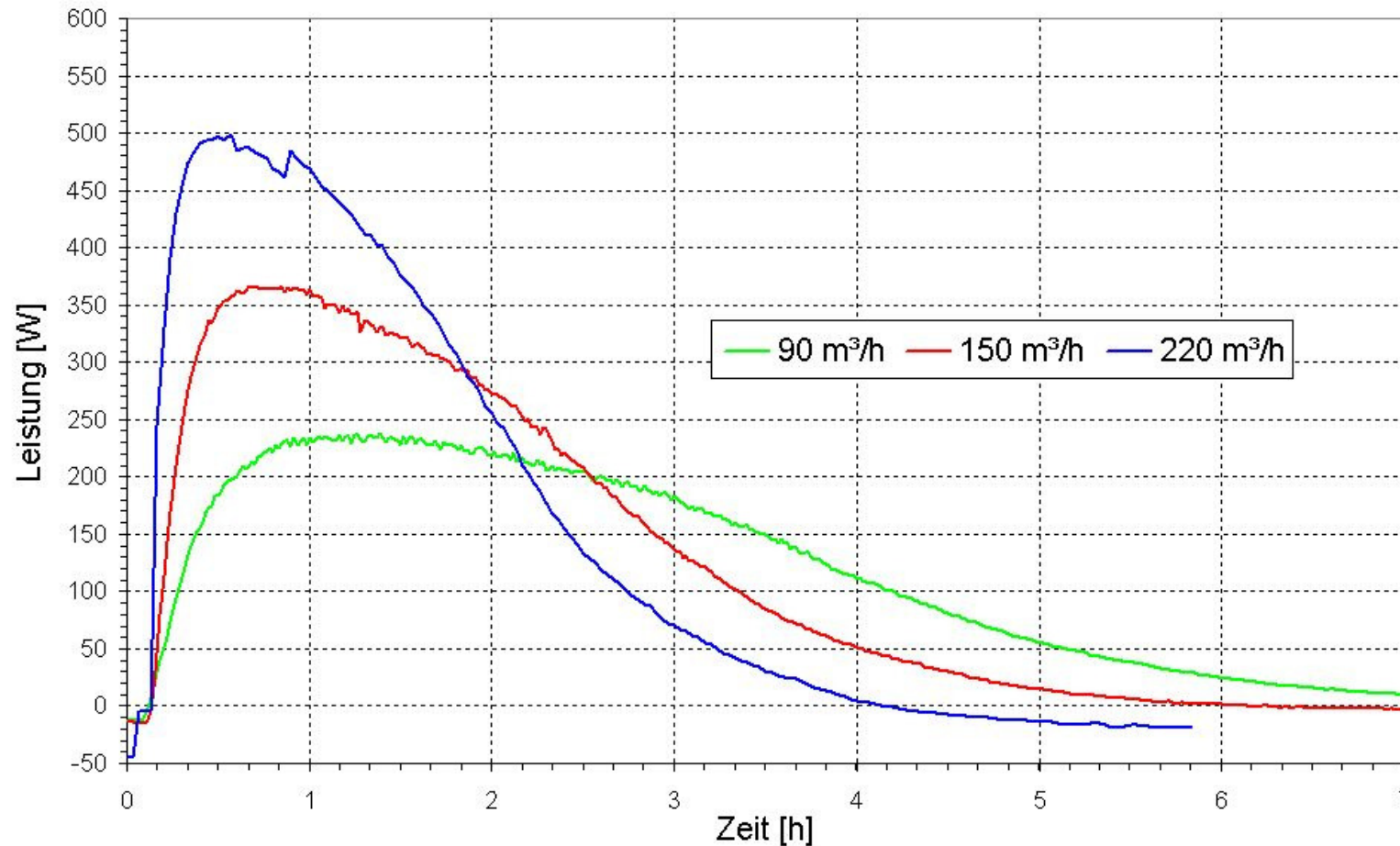
Imtech

## PCM Materialeigenschaften: Versuchsstand Speichermodul





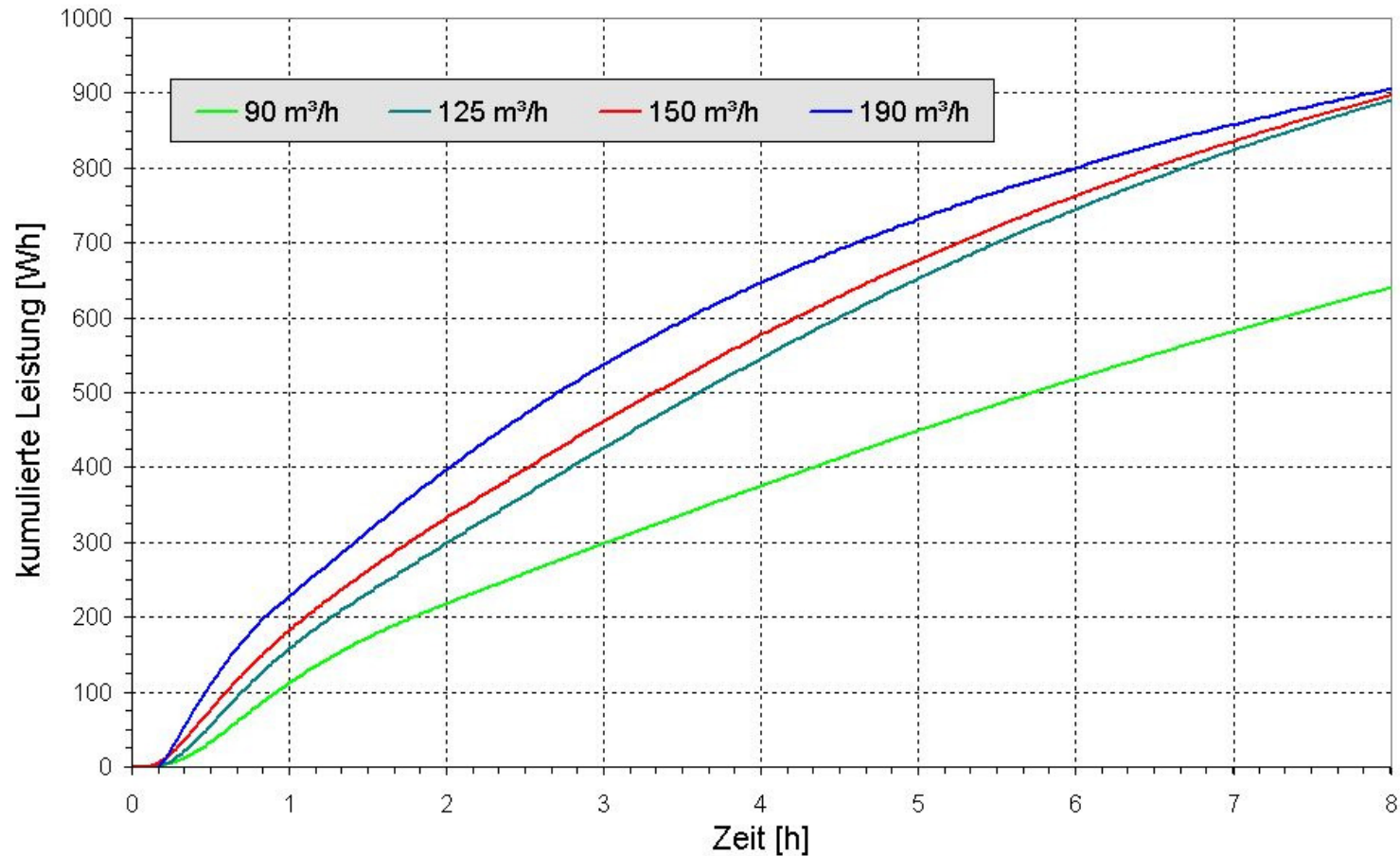
## Leistungsaufnahme PCM-Speichermodul für verschiedene Luftvolumenströmen (Tagbetrieb - Beladung)



Sprungantwort: Außenlufttemperatur ca. 31,0 °C



## Leistungsaufnahme PCM-Speichermodul für verschiedene Luftvolumenströme (Nachtbetrieb - Regeneration)

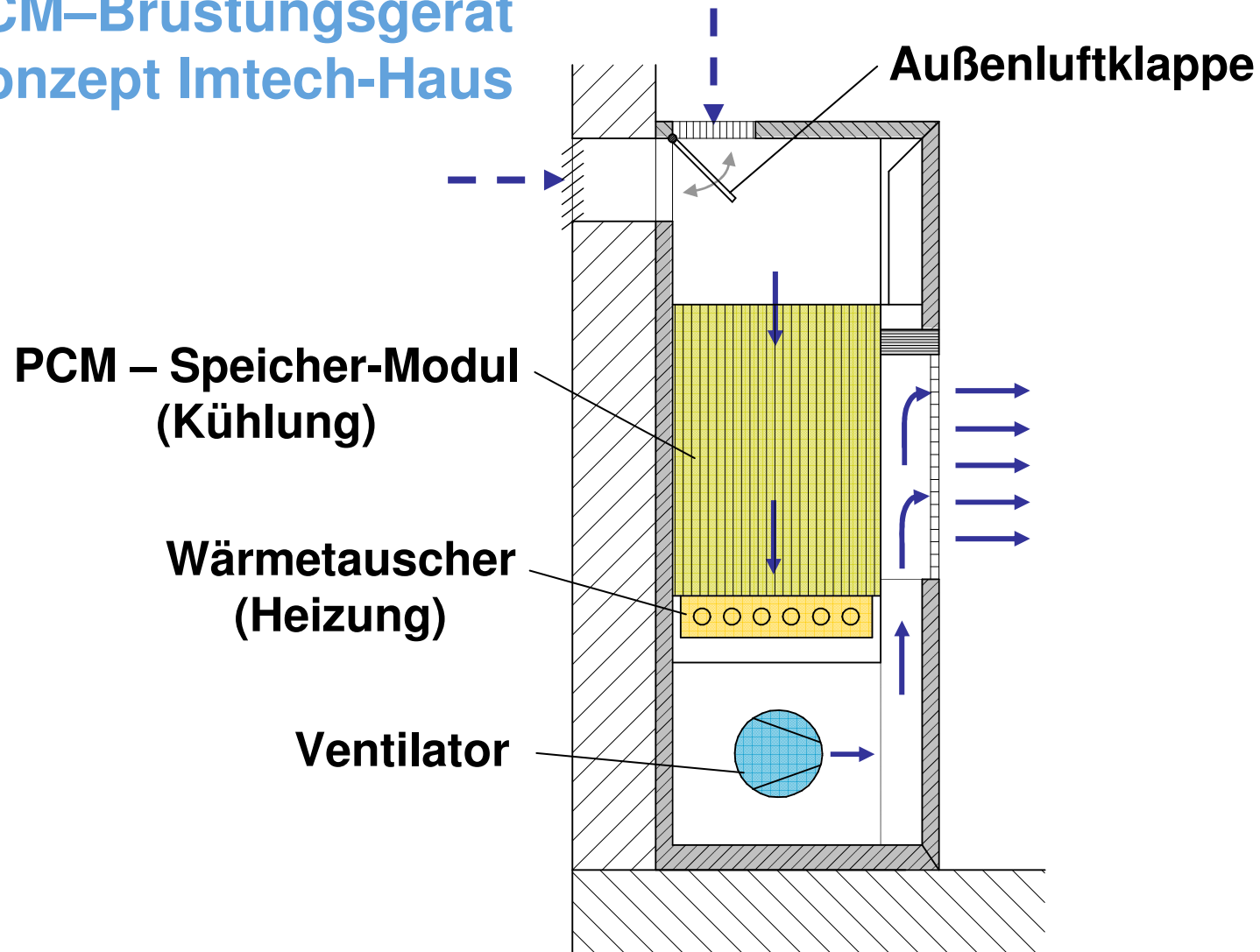


Kapazität:  
30 Wh/kg

Sprungantwort: Außenlufttemperatur ca. 17,0 °C



## PCM-Brüstungsgerät Konzept Imtech-Haus





best in technical performance



## PCM-Gerät (Prototyp Imtech-Haus)



**Innenansicht ohne PCM-Speichermodul  
und ohne Wärmetauscher**



**PCM-Modul mit 10 PCM-Platten**



## Aufbau eines Versuchsstandes im Maßstab 1:1

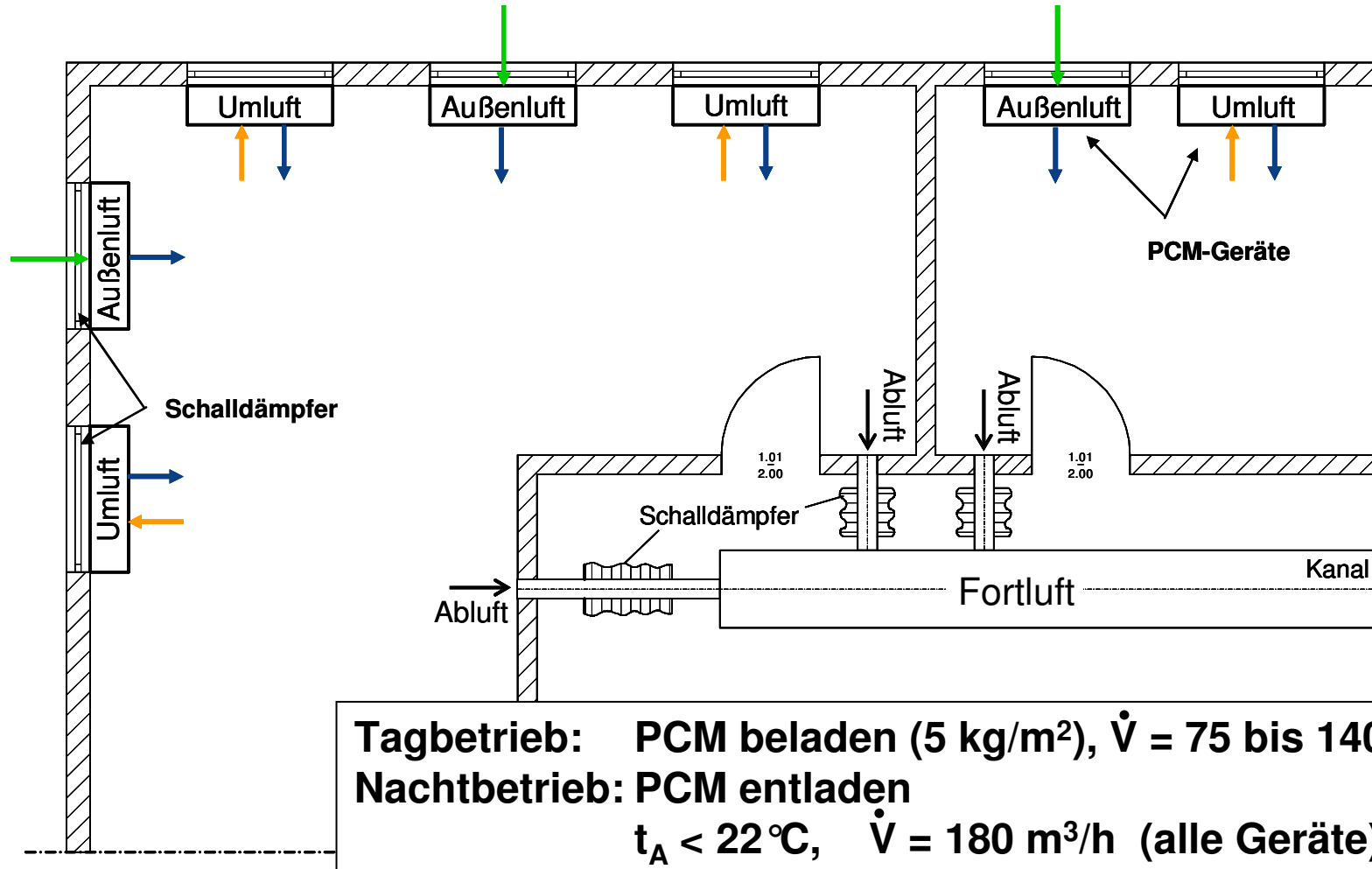


Messung des:

- Geräteverhaltens (Leistung, Beladungs, Entladungszyklus) bei dynamischen Randbedingungen
- Überprüfung der Dimensionierung
- Erprobung von Regelstrategien für die Referenzanlage

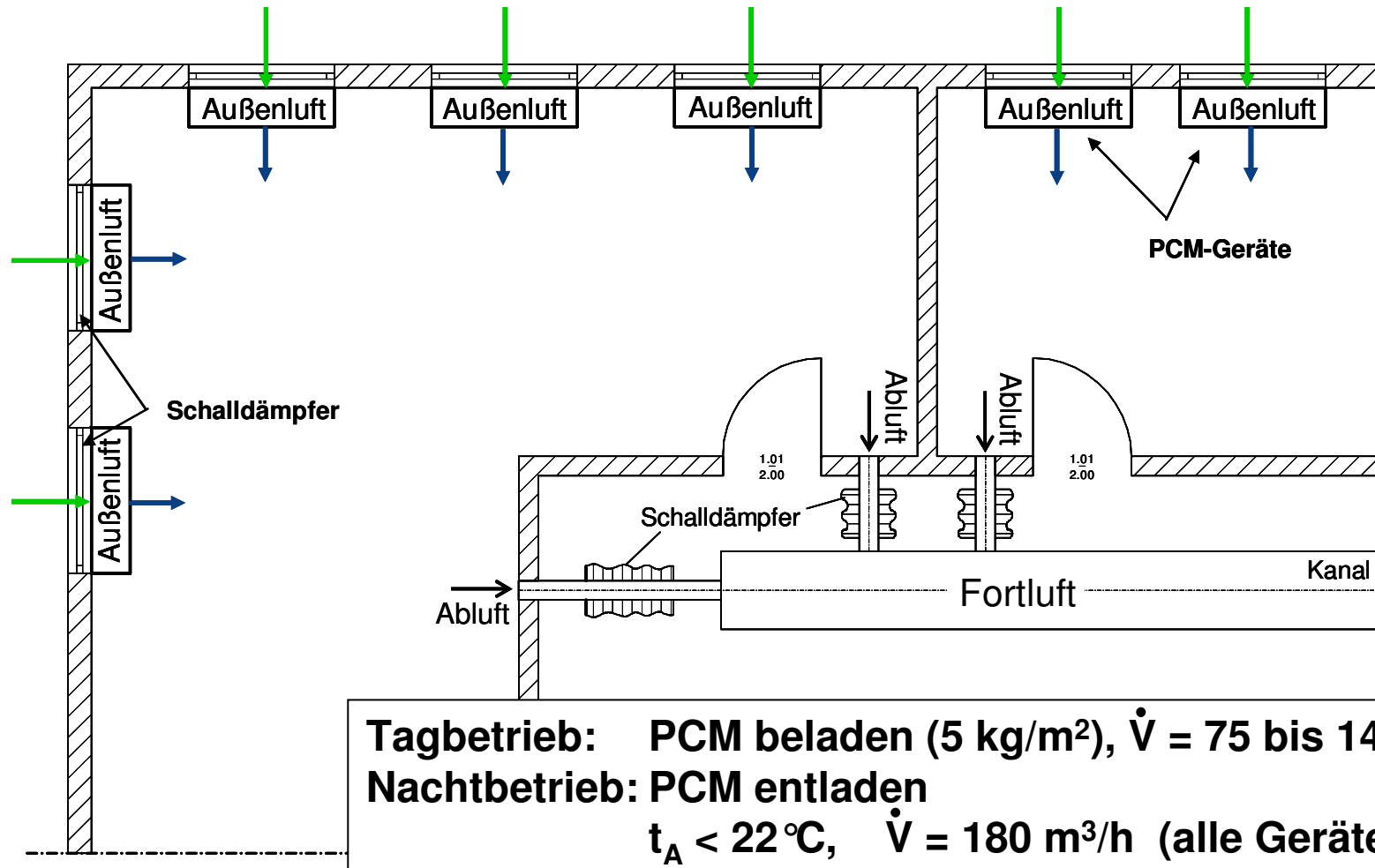


## Anlagenkonzept PCM Imtech-Haus, Tagbetrieb





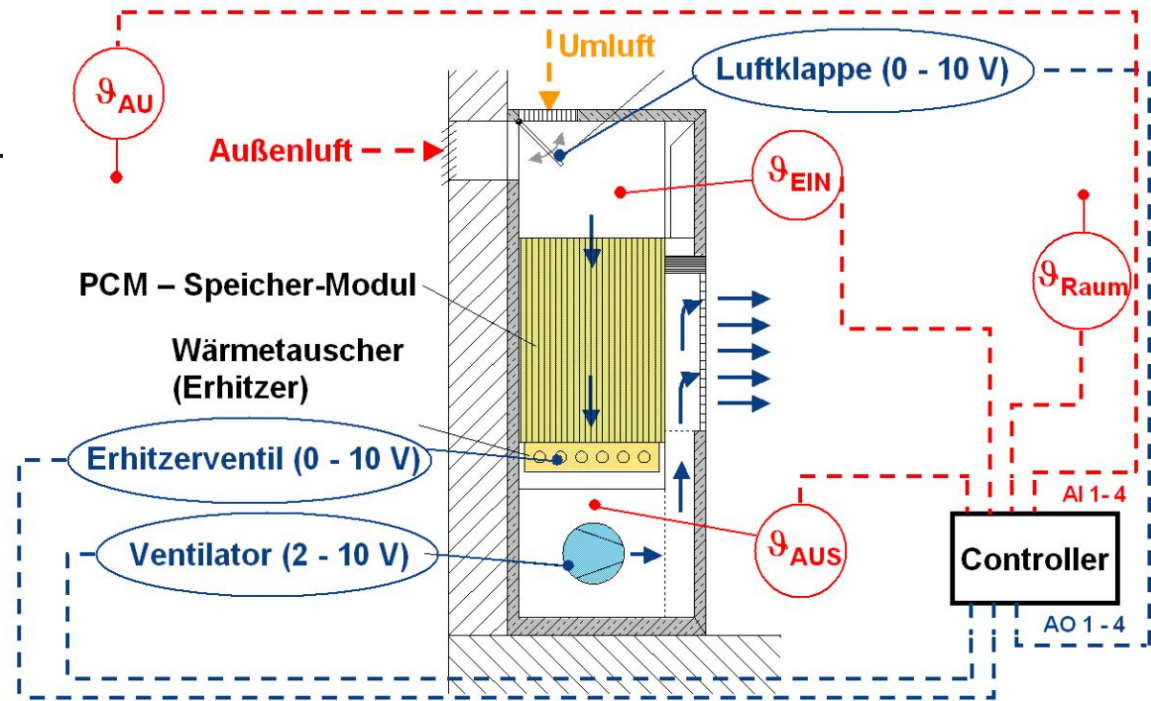
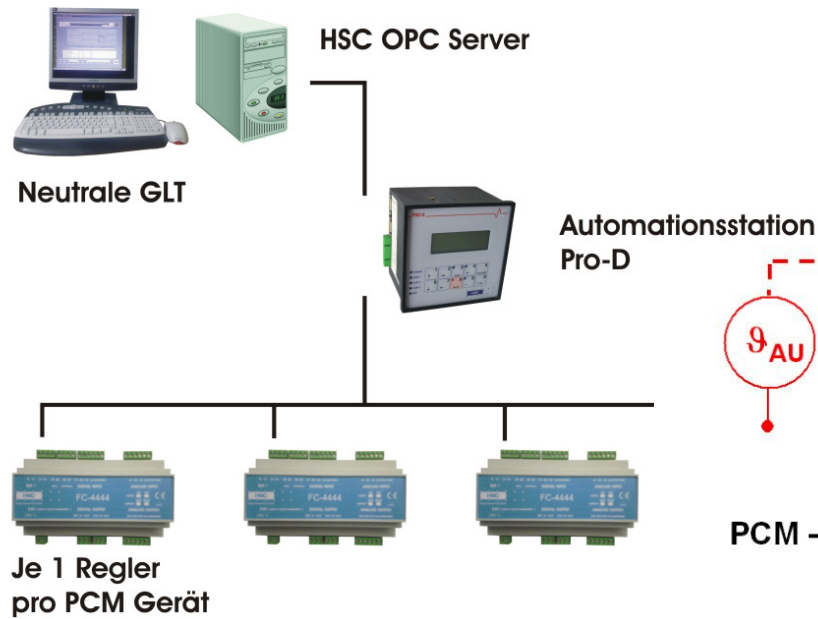
## Anlagenkonzept PCM Imtech-Haus, Nachtbetrieb







# PCM-Anlage Imtechhaus Referenzanlage Imtechhaus – Regelung





best in technical performance

Imtech

## PCM – Referenzanlage mit 50 Geräten im Imtech-Haus, Betrieb seit März 06



Einbauzustand in einem Süd-West-Büro  
Messdaten werden für alle Geräte und jeden Raum  
detailliert aufgenommen

Datenbasis: Optimierung der Regelung für die  
Übergangszeit und den Sommerbetrieb



# Messdatenerfassung auf moderner GLT – Grundlage für Systemsimulation

The screenshot displays two windows from the GraphWorX32 software. The main window, titled 'Übersicht 5.OG PCM Module', shows a floor plan of the 5th floor with various rooms and air handling units. A red circle highlights the 'Abluftanlage DSL 130' unit. The detailed window, titled 'Raum 49', shows the following data:

**Raum 49 Overview:**  
 19,83 °C, 60,24 %, 1009,04 mbar, 1,89 m/sec, 36092,80 lux  
 23,3 °C (indicated in a green box)  
 13.50 Freitag, 27. Juli 2007

**Gerät B13 (Aussenluft):**  
 Temperatur t<sub>EIN</sub>: 21,9 °C  
 Temperatur t<sub>AUS</sub>: 19,6 °C  
 Erhitzer: 29,6 %  
 Ventilator: 15,0 %  
 Modus: Außenluft-Tag  
 PCM: KALT  
 Sollwert: 22,5 °C  
 Steller: -1,0 °C

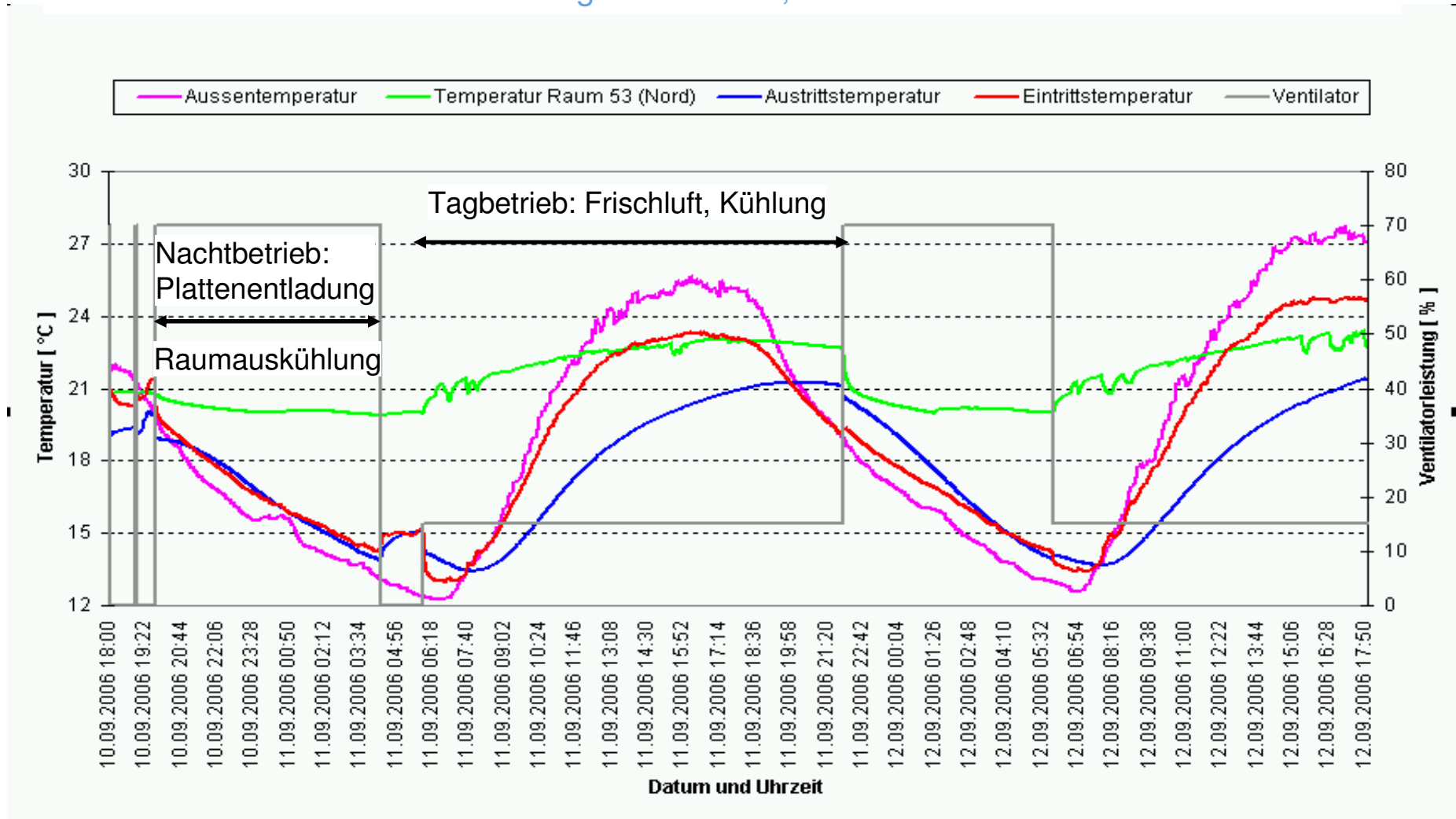
**Gerät B14 (Umluft):**  
 Temperatur t<sub>EIN</sub>: 22,3 °C  
 Temperatur t<sub>AUS</sub>: 20,7 °C  
 Erhitzer: 0,0 %  
 Ventilator: 36,2 %  
 Modus: Umluft-Tag  
 PCM: KALT  
 Sollwert: 22,5 °C  
 Steller: -1,0 °C

**Gerät B15 (Umluft):**  
 Temperatur t<sub>EIN</sub>: 22,7 °C  
 Temperatur t<sub>AUS</sub>: 21,0 °C  
 Erhitzer: 0,0 %  
 Ventilator: 36,2 %  
 Modus: Umluft-Tag  
 PCM: KALT  
 Sollwert: 22,5 °C  
 Steller: -1,0 °C

The bottom of the interface features a grid of room selection buttons, including 'Raum 45 B 23-26', 'Raum 47 B 21-22', 'Raum 48 B 16-20', 'Raum 49 B 13-15', 'Raum 50 B 11-12', 'Raum 51 B 08-10', 'Raum 53 B 01-02', 'Raum 54 B 05-07', 'Raum 55 B 03-04', 'Raum 56 A 27-28', 'Raum 57 B 03-04', 'Raum 58 A 25-26', 'Raum 59 A 23-24', 'Raum 60 A 21-22', 'Raum 61 A 18-20', 'Raum 62 A 15-17', 'Raum 63 A 11-14', 'Raum 64 A 08-10', 'Raum 65 A 05-07', 'Abluftanlage DSL 130', 'Abluftanlage DSL 140', and 'Abluftanlage DSL 150'.

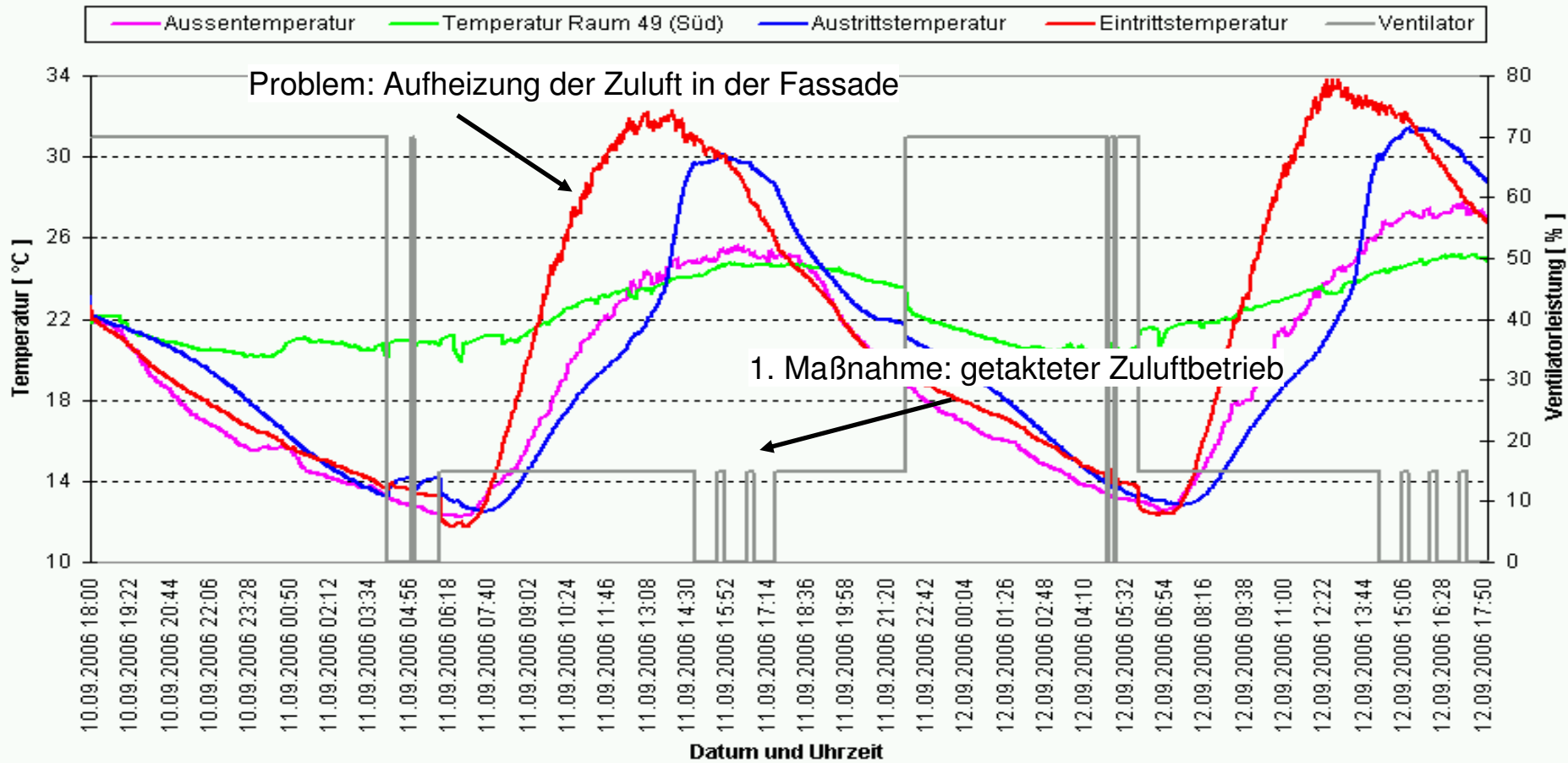


### Nordraum – Außenluftgerät: Temperaturen und Ventilatorsteuerung, September 2006 durchgehend klarer, wolkenloser Himmel



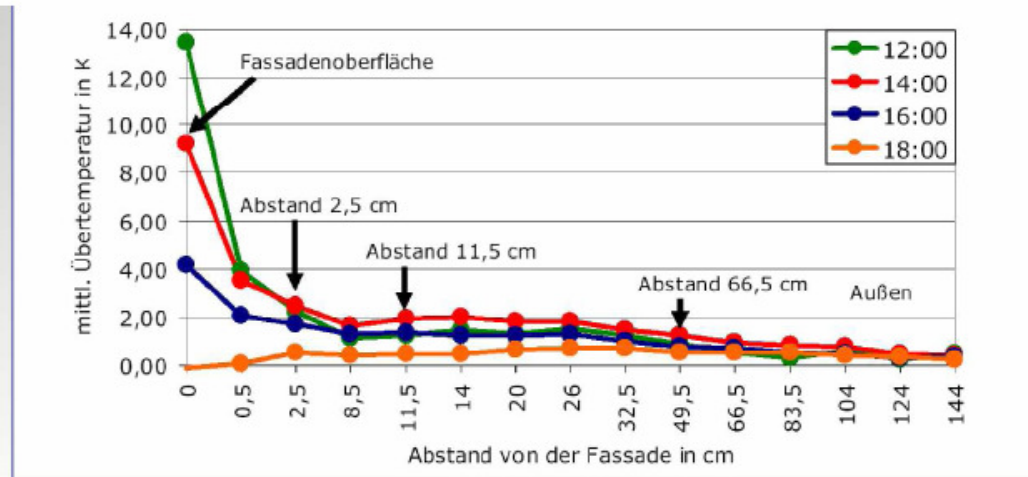


### Südraum – Außenluftgerät: Temperaturen und Ventilatorsteuerung, September 2006 durchgehend klarer, wolkenloser Himmel





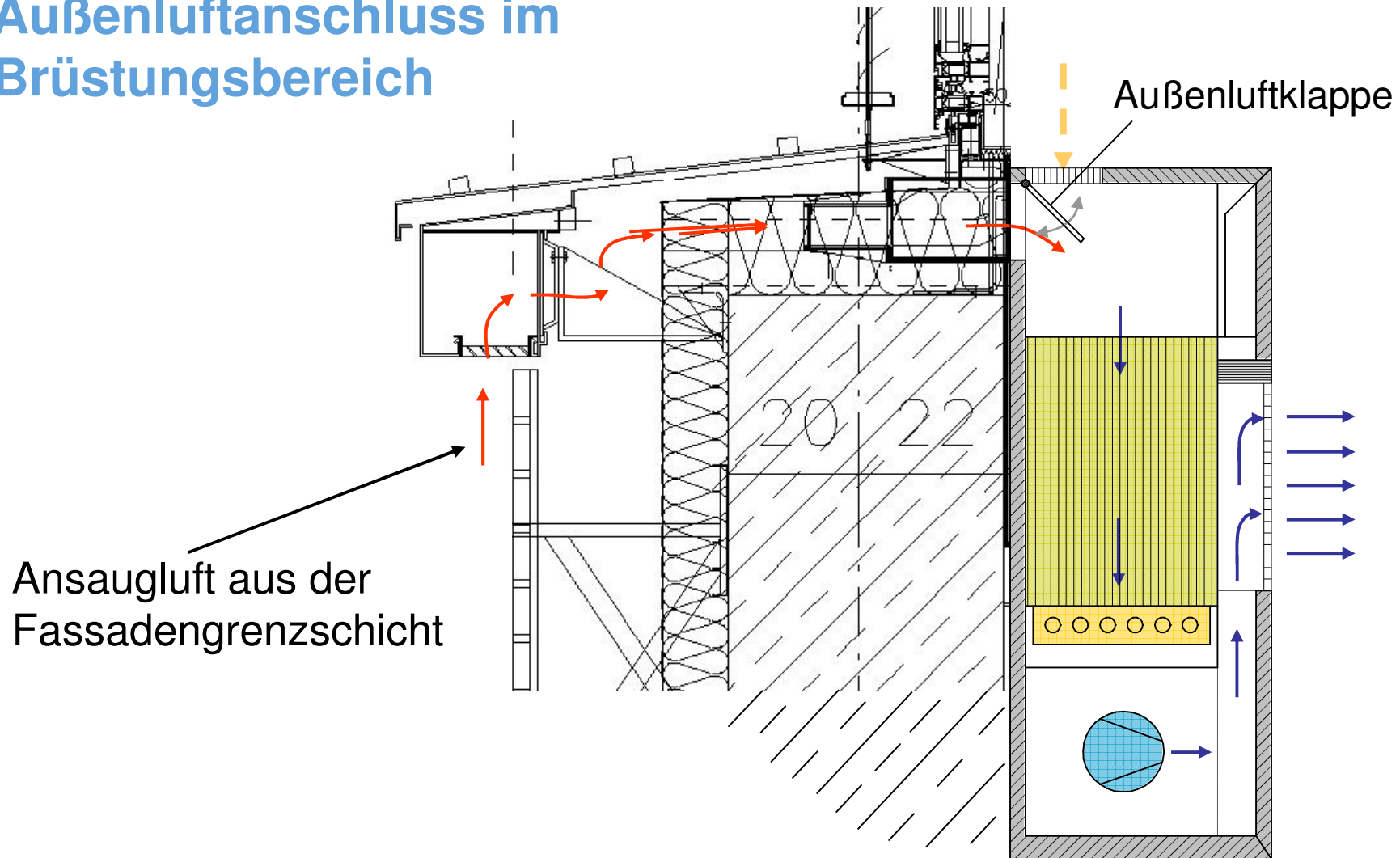
# Untersuchung der Lufttemperaturen im Nahbereich von Fassaden



Quelle: Forschungsvorhaben L 199/V, Fassadengrenzschichten, FLT 2003  
 Autoren: Prof. Dirk Müller, Dipl.-Ing. Matina Reske

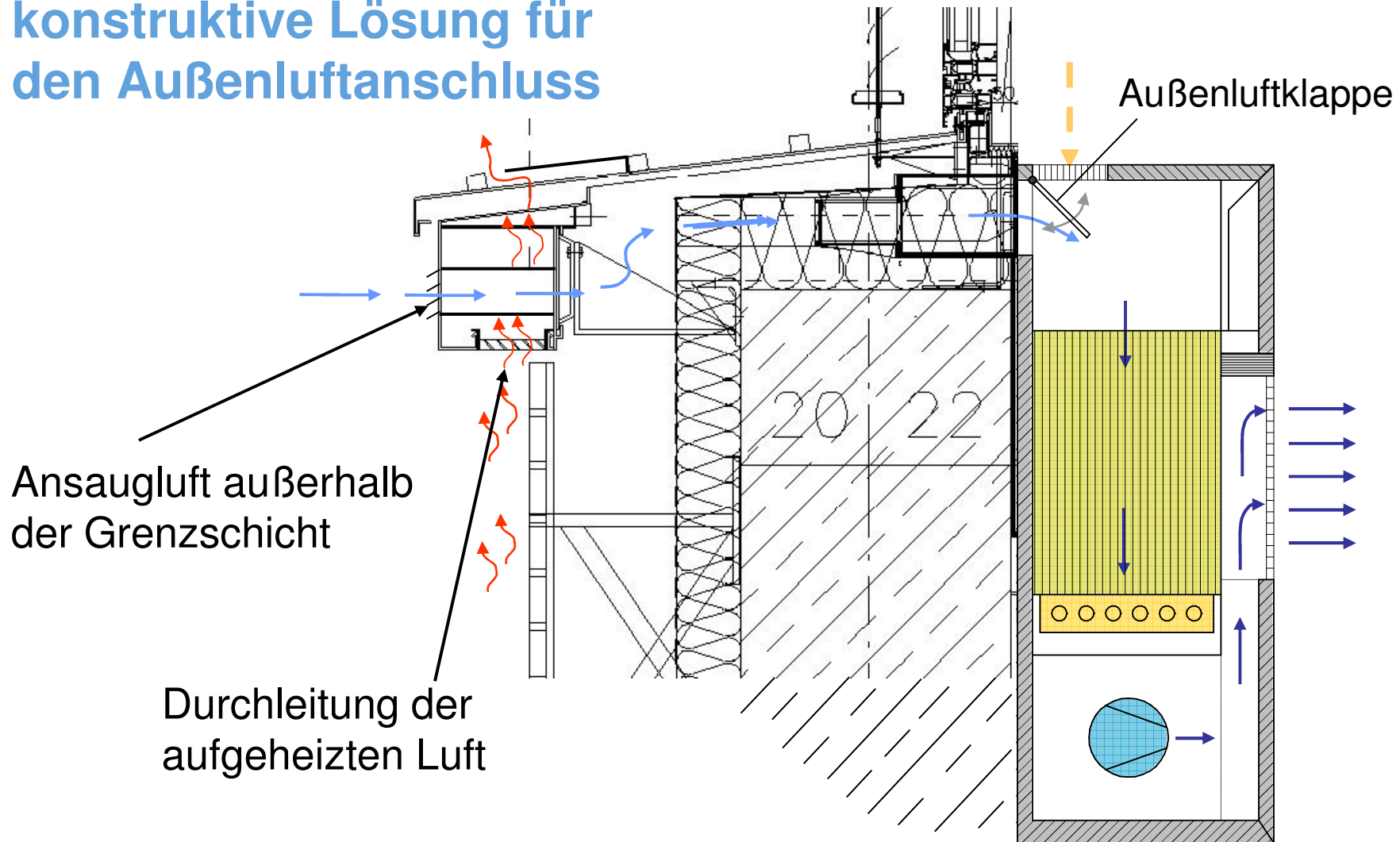


## PCM Geräte Imtechhaus: Außenluftanschluss im Brüstungsbereich





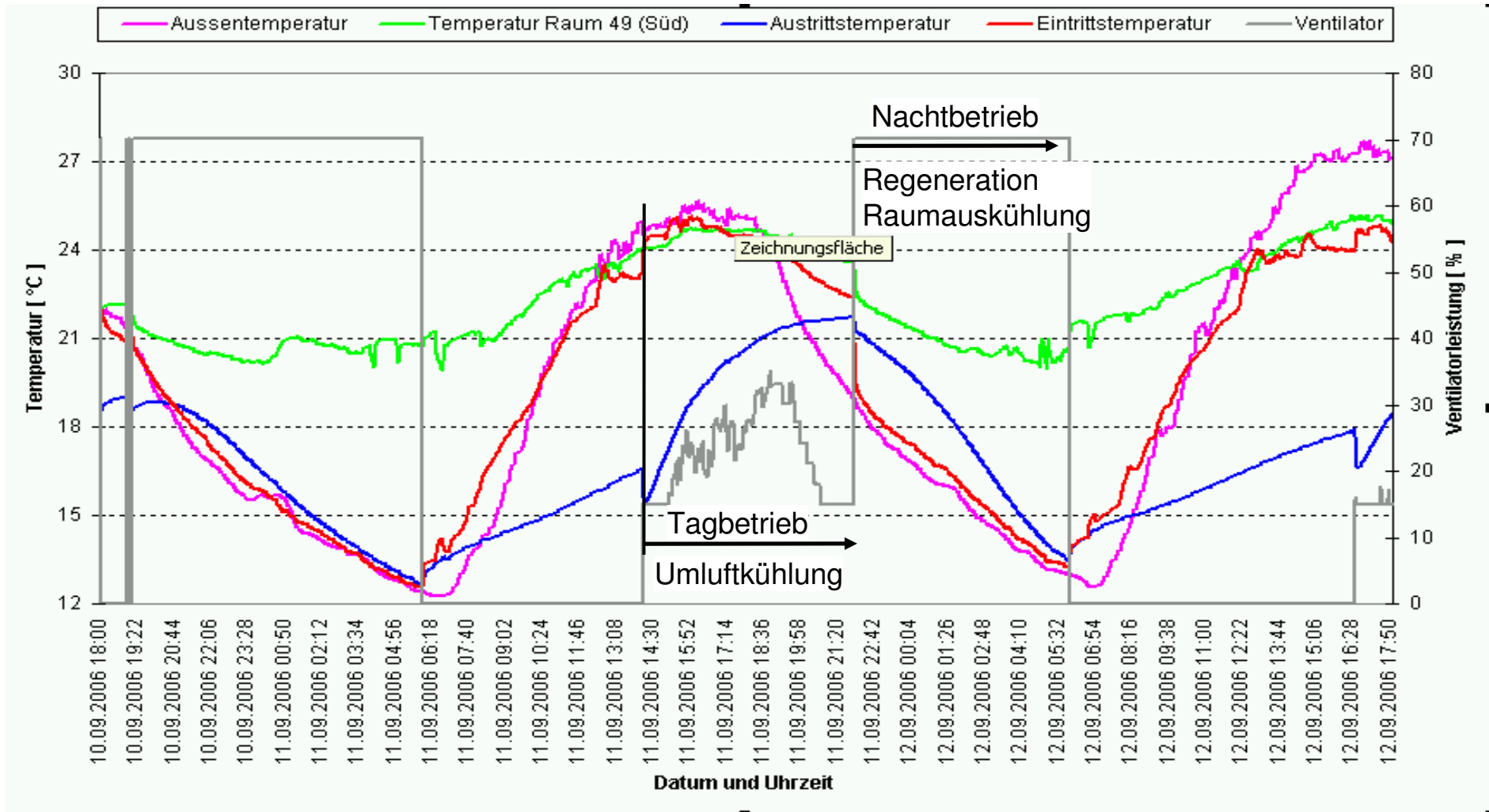
## PCM Geräte Imtechhaus: konstruktive Lösung für den Außenluftanschluss







### Südraum – Umluftgerät: Temperaturen und Ventilatorsteuerung, September 2006 durchgehend klarer, wolkenloser Himmel

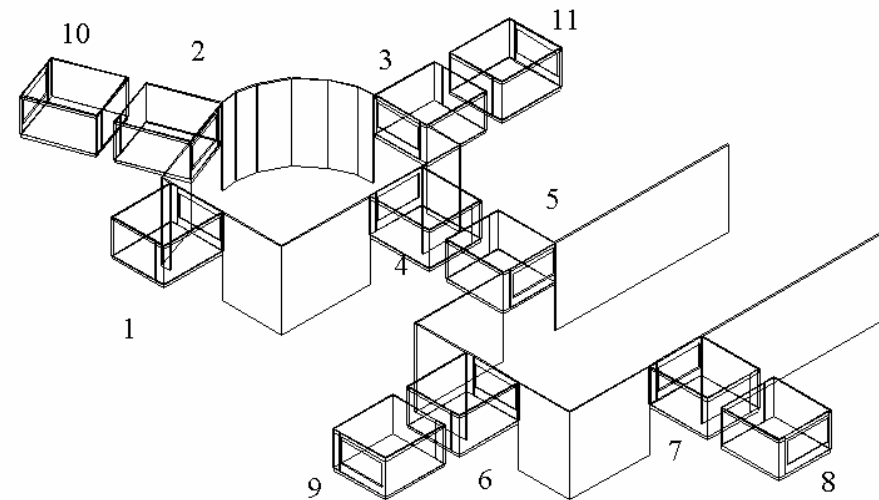




best in technical performance



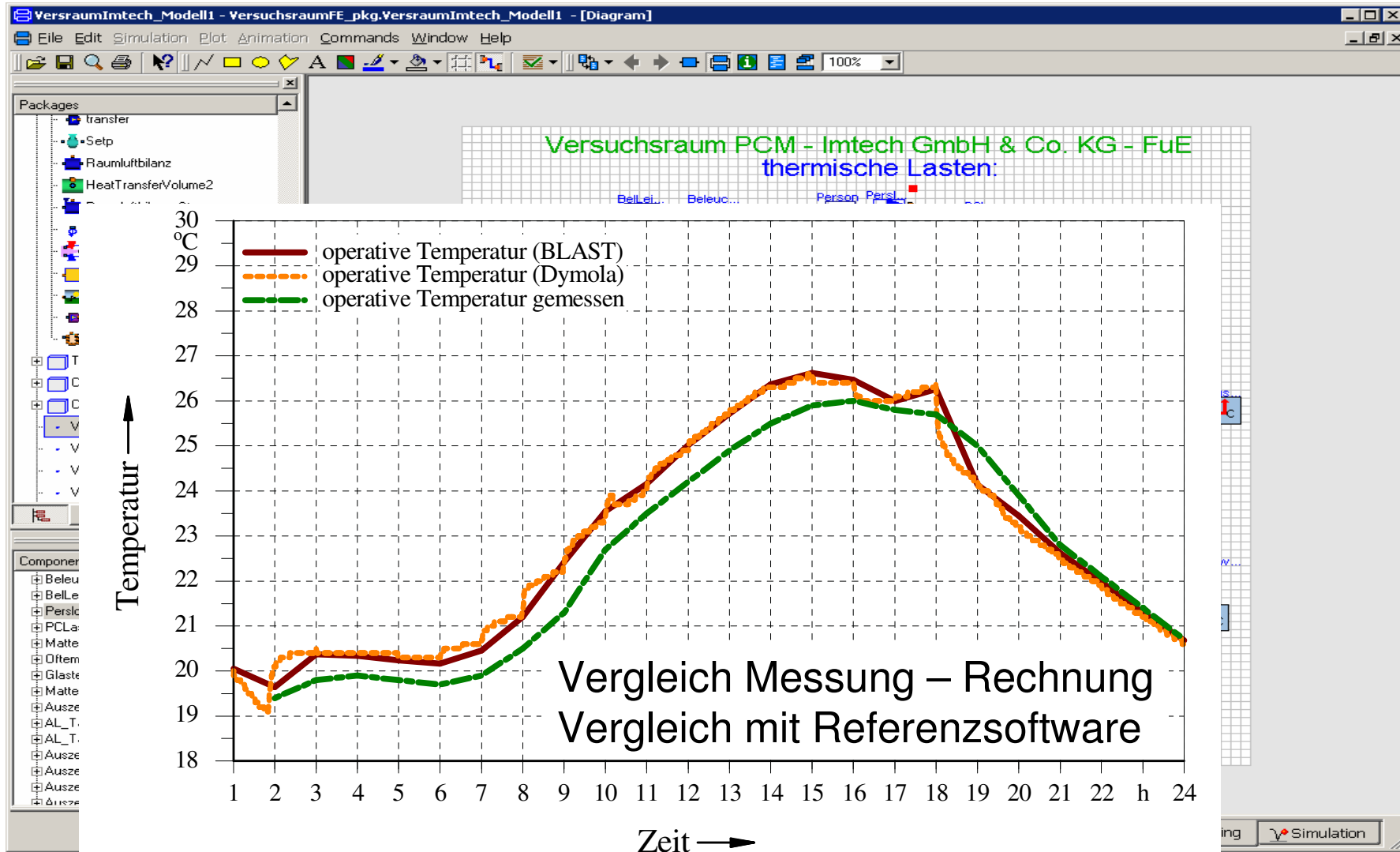
## Dynamische Gebäudesimulation: Ermittlung des Kühl-Potentials für die PCM-Referenzanlage im Imtech-Haus



**BLAST Zonen-Modell mit Verschattungsflächen**



# Gebäudemodellierung mit Dymola – Ermittlung Energiebilanz

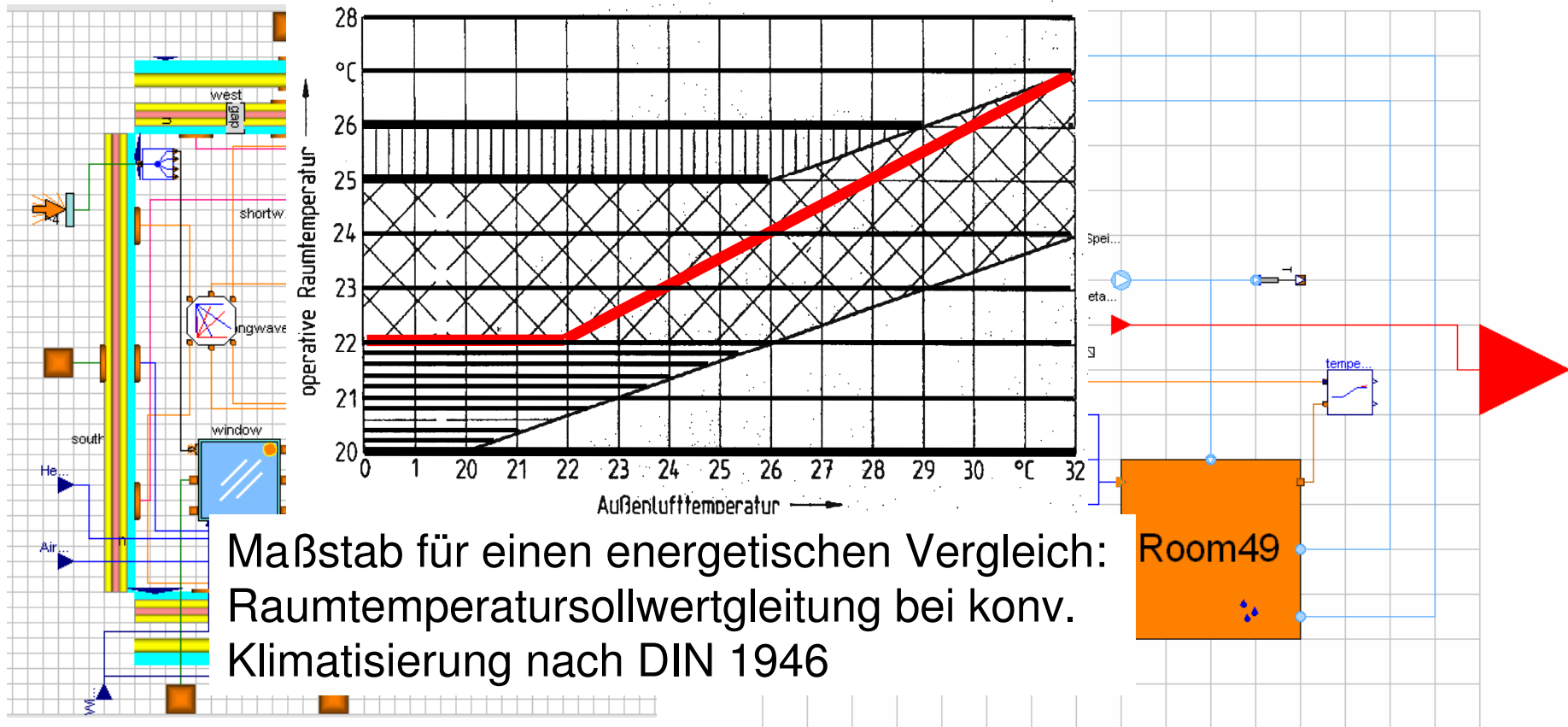




# Simulation Gebäude – Anlage mit PCM-Gerät

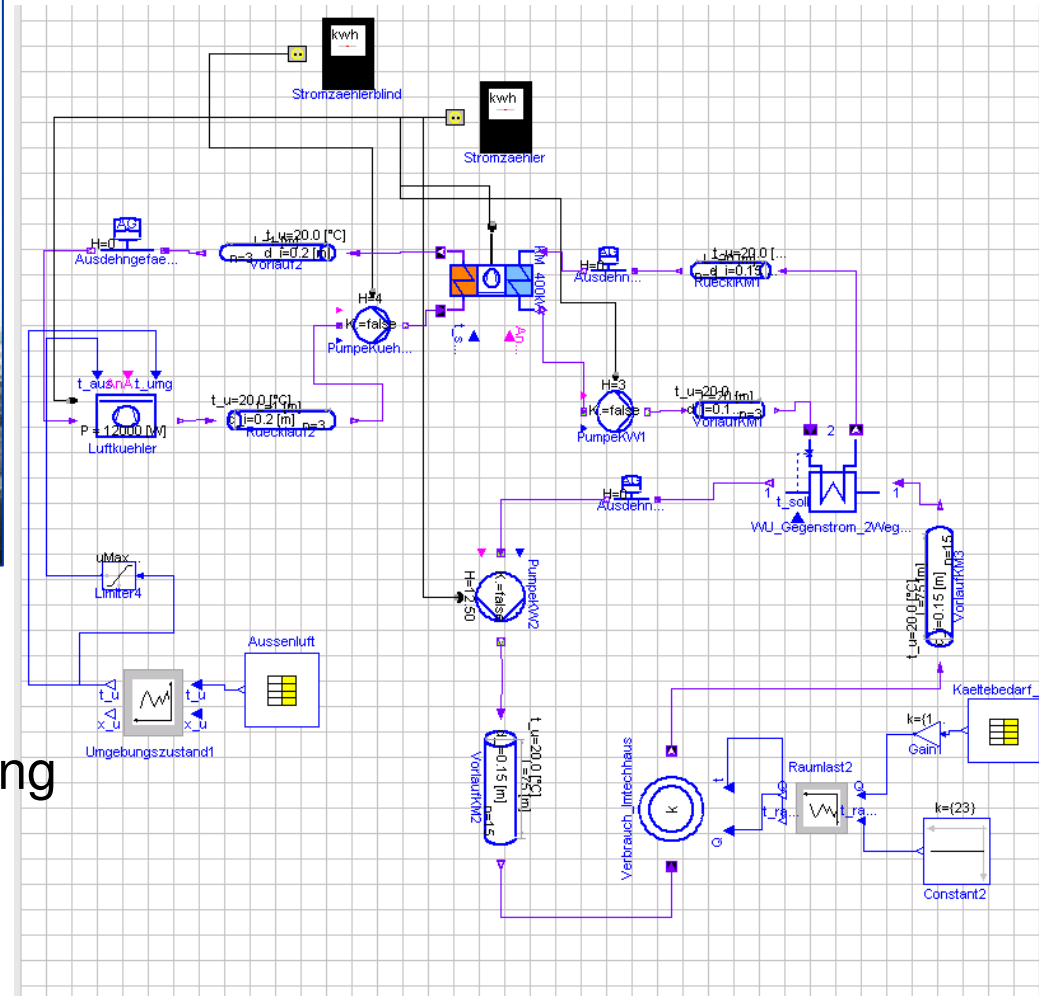
thermisches Raummodell

gekoppeltes Geräte - Raummodell





# Ermittlung des Energiebedarfes von Kälteerzeugung und -verteilung durch dynamische Simulation





## Jahresbedarf der Raumkühlung (DIN 1946) Deckung durch die PCM-Technik resultierender elektrischer Bedarf der PCM-Technik

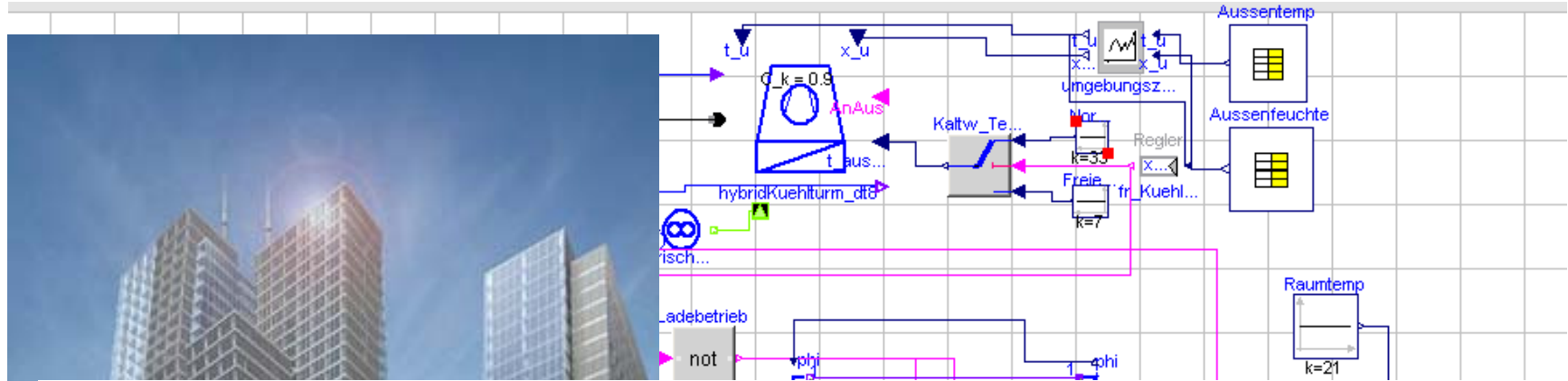
	Kälte- / Strombedarf TRY03			Kälte- / Strombedarf Extremklima		
	DIN 1946	PCM-Geräte	Abluftanlage	DIN 1946	PCM-Geräte	Abluftanlage
	kWh <sub>th</sub> /a	kWh <sub>el</sub> /a	kWh <sub>el</sub> /a	kWh <sub>th</sub> /a	kWh <sub>el</sub> /a	kWh <sub>el</sub> /a
Nordraum	767	50,6	38,5	1030	55,0	41,8
Südraum	803	51,3	37,4	1019	56,9	43,0
Ostraum	802	52,0	39,3	1072	57,7	43,9
Westraum	802	53,0	39,7	1046	56,9	44,3
	MWh <sub>th</sub> /a	MWh <sub>el</sub> /a	MWh <sub>el</sub> /a	MWh <sub>th</sub> /a	MWh <sub>el</sub> /a	MWh <sub>el</sub> /a
Gebäude 10000 m <sup>2</sup> , DIN 1946	378	24,6	18,4	496	27	20,6
Kälteerzeugung PCM-Technik	307,4	el. Bedarf Σ 43,0		347,4	el. Bedarf Σ 47,6	

Testreferenzjahr 03

Extremklima



## Projekt 2006: Bürohochhaus - zwei WP / KM (a 1,5 MW) u. Eisspeicher

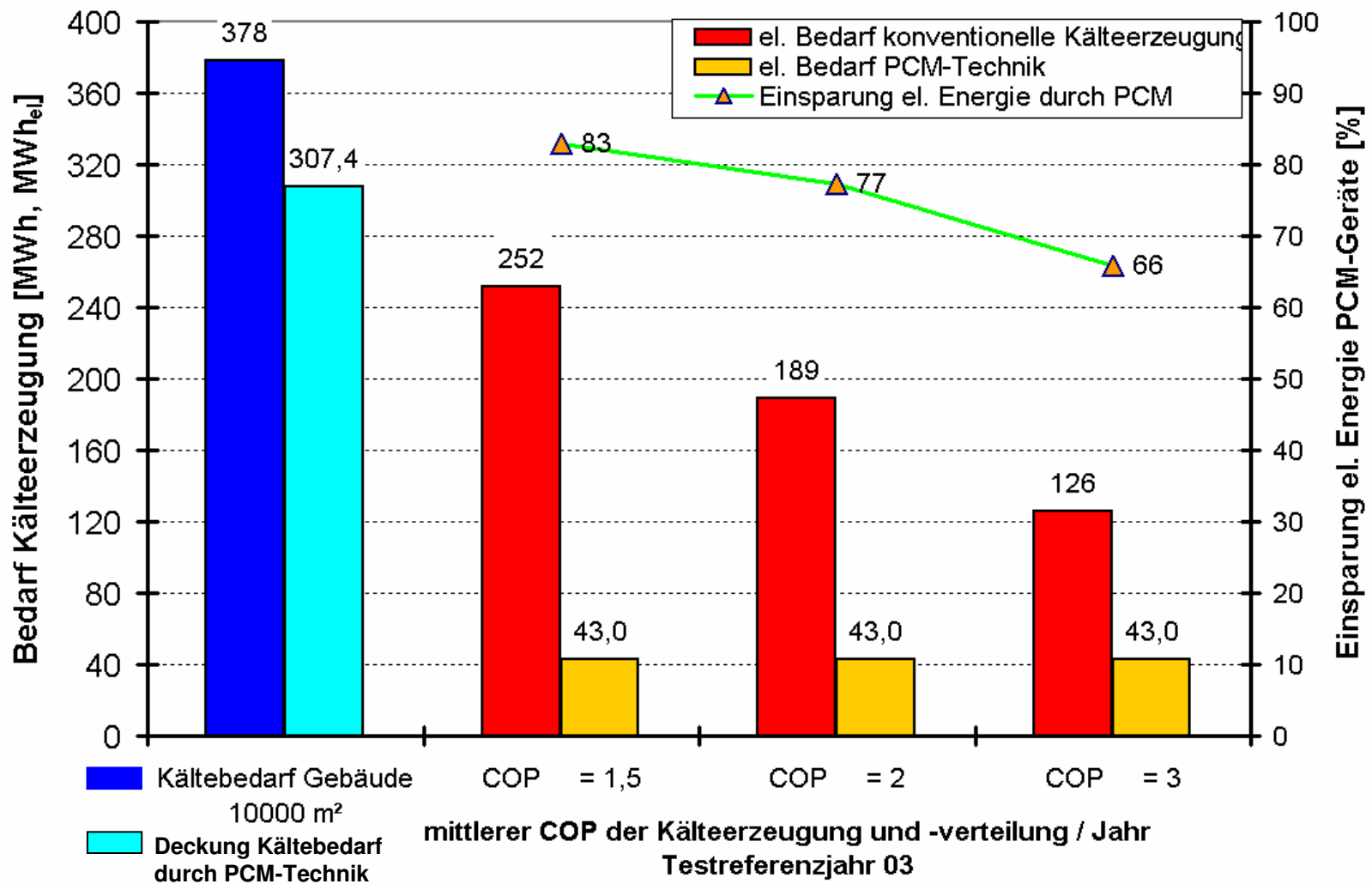


**Aufwand Kälteverteilung und –erzeugung:**

**Übergabe → Verteilung → Erzeugung Kältemaschine → Rückkühlung**

**Praxiserfahrungen und Jahressimulationen von kompletten Kälteversorgungsanlagen zeigen: mittlere  $\overline{COP}_{ANL}$  (Gesamtanlage) je nach Anlagengröße und -qualität:**

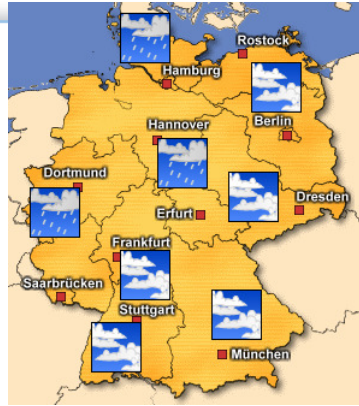
$$\overline{COP}_{ANL} : 1,5 \sim 3$$



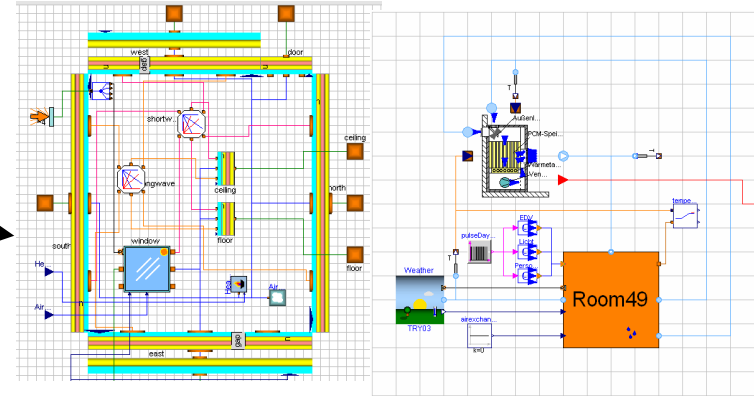




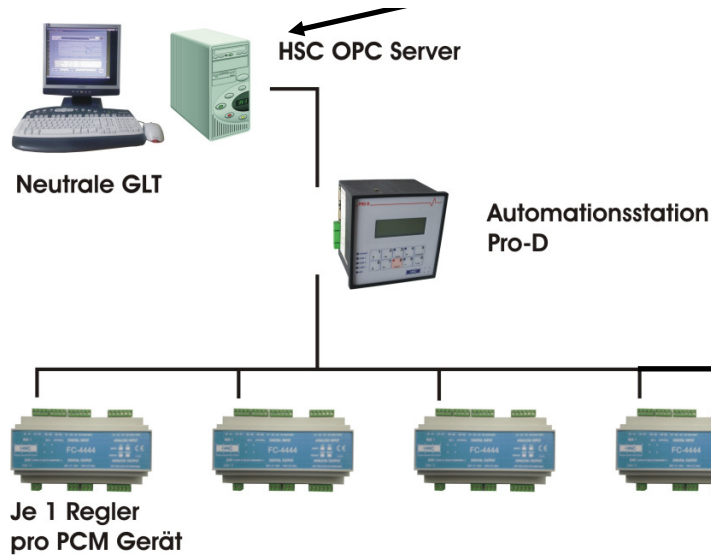
best in technical performance



vorausschauende Regelung  
Simulation, Wetterdaten, Internet



## Optimierung Betriebsverhalten (online – Austausch Regelungscode)





## Fazit:

- PCM-Lüftungsgerät im Imtech-Haus erfolgreich eingesetzt:  
5 kg PCM pro m<sup>2</sup> Grundfläche ausreichend für Büroräume  
mit Kühllasten bis 60 W/m<sup>2</sup>
- Gerätekonzept einschließlich Regelung ist zur Serienreife entwickelt
- Sommerperioden mit Nachttemperaturen unter 18 °C werden beherrscht  
→ Raumtemperaturen bleiben unter 26 °C
- Geräteeinsatz muss mit der Fassadengestaltung abgestimmt werden  
→ Problem der Zuluftüberhitzung
- Einsparung gegenüber konventionellen Kälteversorgungssystemen:  
**zwischen 60 % und 85 %**
- Optimierungspotentiale: Regelung (vorausschauende Regelung),  
Speicherdimensionierung (für größere Lasten),  
alternative Materialien (Salzhydrate).



best in technical **performance**



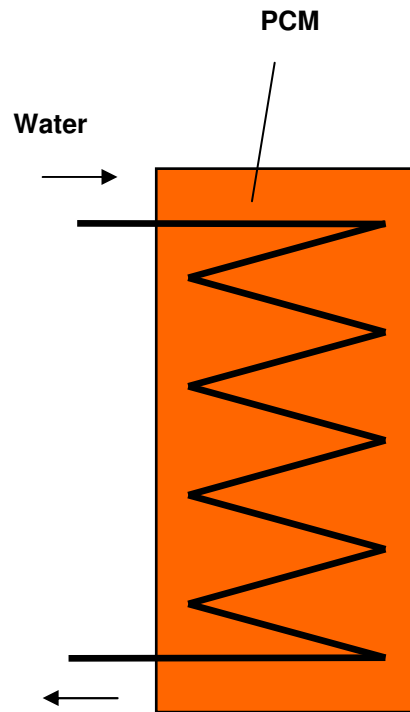
## weitere Entwicklungen:

### Verbundforschungsprojekt „PCM- PCS-Speicher“ mit dem FhG-ISE

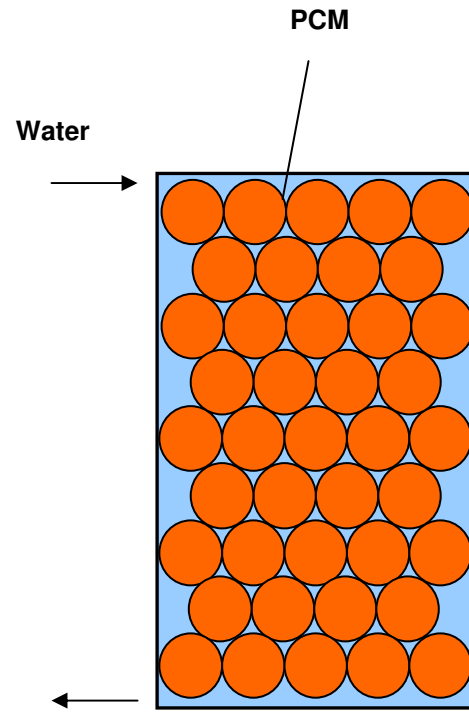
- Entwicklung kompakt bauender Kältespeicher auf der Basis von PCS und PCM
- Bau eines Prototypen mit makroverkapseltem PCM bei Imtech-FuE
- Aufbau und Dauervermessung einer Demoanlage mit wasserbasierten PCS- und PCM-Speichern im Imtech-Labor. Prüfung des Lastverhaltens und der Materialeigenschaften unter Einsatzbedingungen.
- Parallele Prüfung, Charakterisierung und Weiterentwicklung der Materialien am ISE



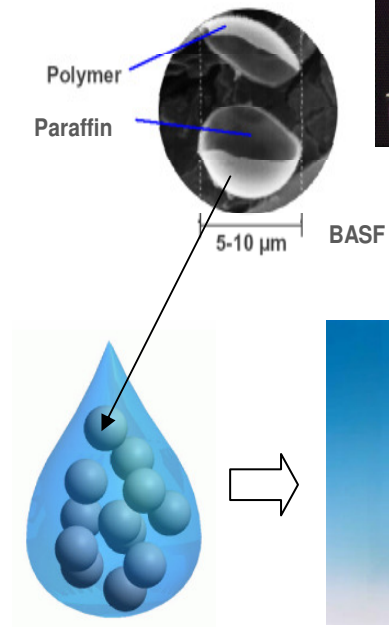
# Speicherkonzepte mit PCM / PCS



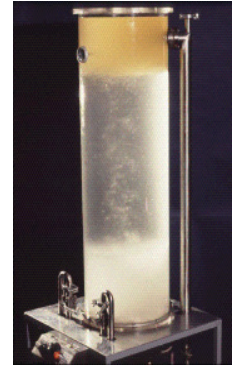
PCM-Speicherblock



makroverkapselte PCM



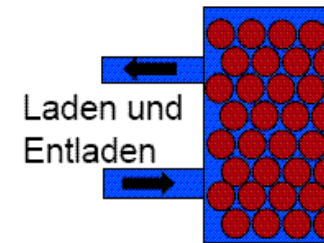
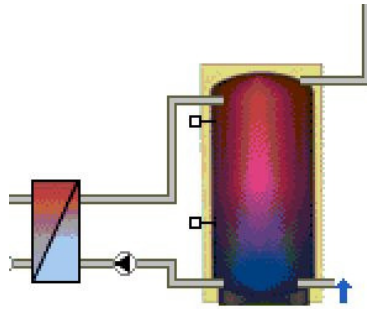
PCS (Phase Change Slurries)



Quelle: TU-Graz/BASF/ISE



## Speicherkonzepte mit PCM / PCS



- PCM und Trägerflüssigkeit sind als Slurry (PCS) vermischt
  - Wärmeaustausch in außen liegendem Wärmetauscher oder direkt am Verbraucher (z.B. Raum)
  - Erhöhung der Wärmekapazität des Speichers und der gepumpten Flüssigkeit bei gleichem Volumen durch PCM
- PCS aus Wasser / Paraffin (BASF)
- Erhöhung der gespeicherten Wärmemenge durch makrogekapselte PCM-Module (Platten) im Vergleich zum Kaltwasserspeicher
  - Graphit-Paraffin-Platten (SGL-Carbon)



## Phase Change Slurries (PCS) als neue Wärmeträgerflüssigkeiten

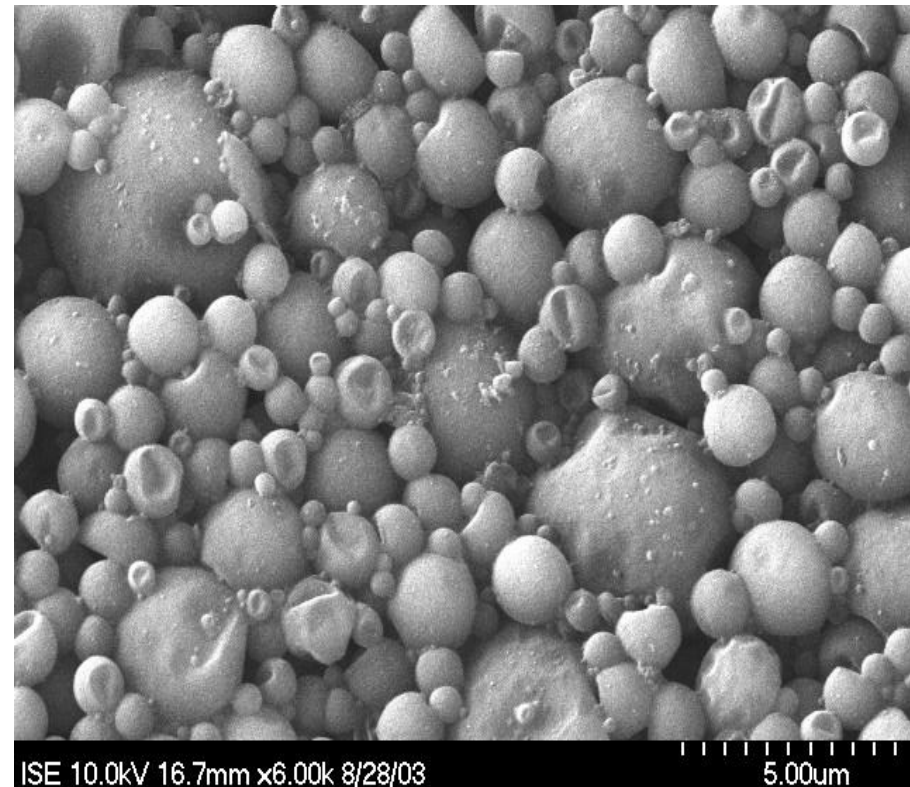
- Trägerflüssigkeit + Phasenwechselmaterial (PCM)
- Trägerflüssigkeiten:
  - Wasser
  - Wasser- Glykollmischungen
- PCMs:
  - mikroverkapselte Paraffine
  - emulgiertes Paraffin





## PCS mit mikroverkapselten Paraffinen

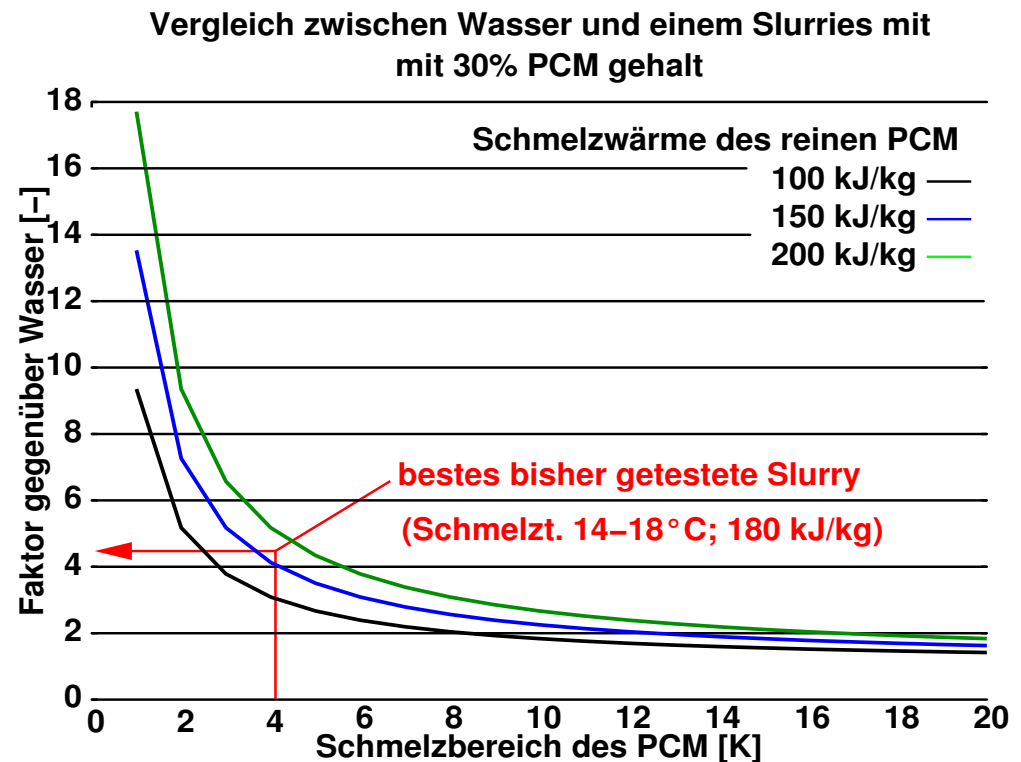
- PMMA als Kapselmaterial
- Verkapselte Paraffine:
  - Tetradekane Schmelztemp. 4-8 °C;  
 $\Delta H$  160 kJ/kg
  - Hexadekan  
Schmelztemp. 14-18 °C  
 $\Delta H$  180 kJ/kg
  - Hexadekan/Oktadekan  
Schmelztemp. 24-28 °C  
 $\Delta H$  100 kJ/kg





## PCS: Wärmehalt im Vergleich zu Wasser

- Energetischer Gewinn ist abhängig vom Schmelzbereich und der Schmelzwärme des reinen PCM
  - Kleiner Schmelzbereich
  - Hohe Energiedichte bei geringer Temperaturerhöhung
  - Vorteil gegenüber Wasser wird groß
- zur Zeit beste Schmelzwärmen
  - etwa 75 kJ/kg (14-18°C; 30% PCM in Wasser)

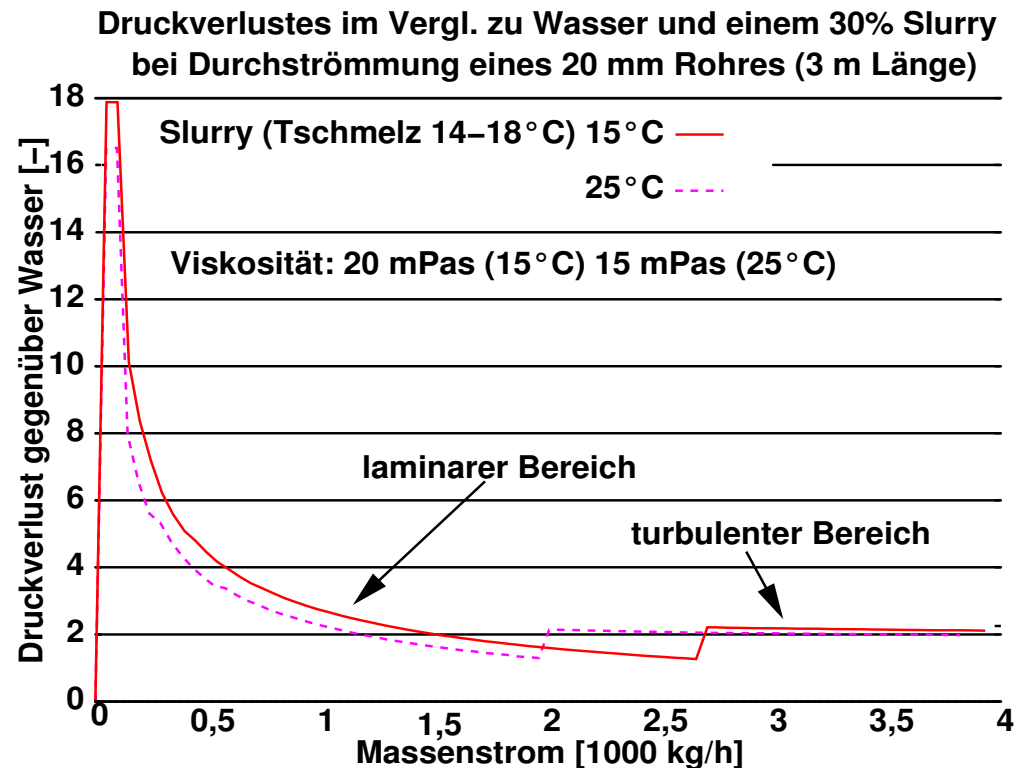






## Druckverlust im Vergleich zu Wasser (theoretisch)

- **Viskosität PCS 14-18°C bei 30% Mikrokapseln in Wasser: 10-20 mPas**
  - bleibt länger laminar (Viskosität)
  - Strömung des reinen Wassers ist wesentlich früher turbulent und steigt dadurch stärker an
  - Minimaler Druckverlust des PCS ist etwa doppelt so hoch als bei Wasser





## PCS: bisher mehrjährige Entwicklung im Rahmen eines EU Projektes

- Getestet unter realitätsnahen Bedingungen
  - Standardwärmetauscher
  - Standardventile
  - Druckausgleichsgefäße
  - Zentrifugalpumpen
- Entwicklungsstand
  - 1 Jahr ohne Probleme gepumpt (24h/Tag)
  - Keine Zerstörung von Komponenten



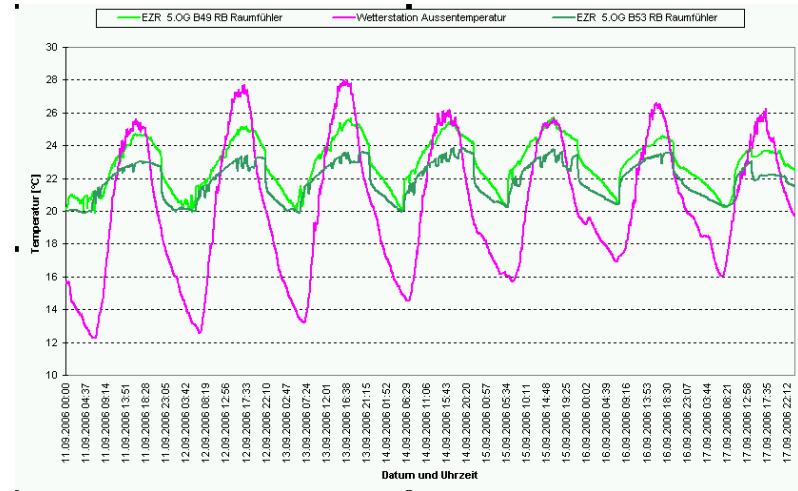


## Stand der Forschung Material:

- Hohe Stabilität der Kapseln gegen Zerstörung in Pumpen und anderen Anlagenkomponenten ist gegeben
- Es stehen mehrere potential interessante PCS für den Kältebereich zur Verfügung (4-8 °C, 14-18 °C, 18 °C-24 °C)
- Problematik:
  - Unterkühlung des PCM: Kristallisation findet unterhalb des Schmelzbereiches statt. Dies führt zur Vergrößerung des notwendigen Temperaturbereiches
  - Separation, d.h. Aufrahmen der Kapseln bei langen Standzeiten
- Große Fortschritte im Bereich Emulsionen (höhere PCM-Anteil, keine Verkapselung nötig, geringere Viskosität)



best in technical performance



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

