

Wärmespeicher als medien- durchströmter Festkörper

Zur verstärkten Nutzung der während der Heizzeit durch transparente Raumumfassungen eingestrahlten Sonnenenergie dient eine Bauweise mit hoher Wärmespeicherkapazität. Diese ist gleichfalls im Sommer vorteilhaft, um den am Tage vorhandenen Wärmeeintrag zu speichern und durch eine intensive Nachtlüftung abzuführen. Bei Leichtbauten versucht man in neuerer Zeit die Raumumfassungen mit Latentspeichermaterialien (PCM) anzureichern [1].

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

Alternativ bzw. ergänzend zur Wärmespeicherung in den Raumumfassungen können auch zentrale Wärmespeicher eingesetzt werden, deren Be- und Entladung über flüssige und/oder gasförmige Stoffströme gesteuert erfolgt. Vorzugsweise wird Umweltenergie zur Beladung verwendet. Die Entladung dient der Kompensation der Raumlasten, wobei die vorhandenen Raumheiz- oder Raumkühleinrichtungen genutzt werden. Als Speichermaterial kann Erdreich, Beton, Latentspeichermaterial (PCM) usw. dienen.

Zur wärmetechnischen Simulation des Speichers wurde vom Autor im Auftrag der Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung ein universell nutzbares Rechen-

programm entwickelt, das sich auch zur Optimierung des Speichers und seiner Betriebsweise eignet. Der Forschungsbericht und das Simulationsprogramm sind kostenfrei unter [2] erhältlich.

Geometrische und wärmetechnische Speichermodellierung

Der Speicherkörper besitzt eine quaderförmige Gestalt mit maximal drei Schichten, die die Wärme im allgemeinen Fall sensibel und latent speichern. Das Schichtmaterial mit Latentspeichereigenschaften (PCM) bildet eine komplette Schicht oder es ist beispielsweise als Mikrogranulat dem nur sensibel speichernden Material homogen beigemischt. In jedem der Fälle wird ein homogener Stoff mit gemittelten, jedoch konstanten Stoffwerten für die Schicht angenommen.

Der Phasenwandel (Schmelzen bzw. Erstarren) kann sich stoffbezogen sehr unterschiedlich darstellen. In [3] wurde ein allgemeingültiges Modell abgeleitet, welches sowohl bei einer festen Phasenwandeltemperatur als auch für einen Phasenwandelbereich mit Hysterese verwendbar ist. Mit Hilfe der Modellierung ergibt sich die Änderung der Temperatur und des Phasenzustandes (Anteil der Phasenumwandlung) nach einem definierten Zeitschritt.

Die Schichten werden z.B. von wasserbeaufschlagten Rohrregistern oder von luftbeaufschlagten Kanälen durchzogen. An den Außenseiten befinden sich in der Regel Wärmedämmschichten, sie können aber auch ungedämmt an der Be- und Entladung des Speichermaterials beteiligt sein (Wände, Decken usw.). Beispiele zeigen die **Bilder 1 bis 3**.

Die instationäre Wärmeleitung im Speicherkörper mit den relativ kompli-

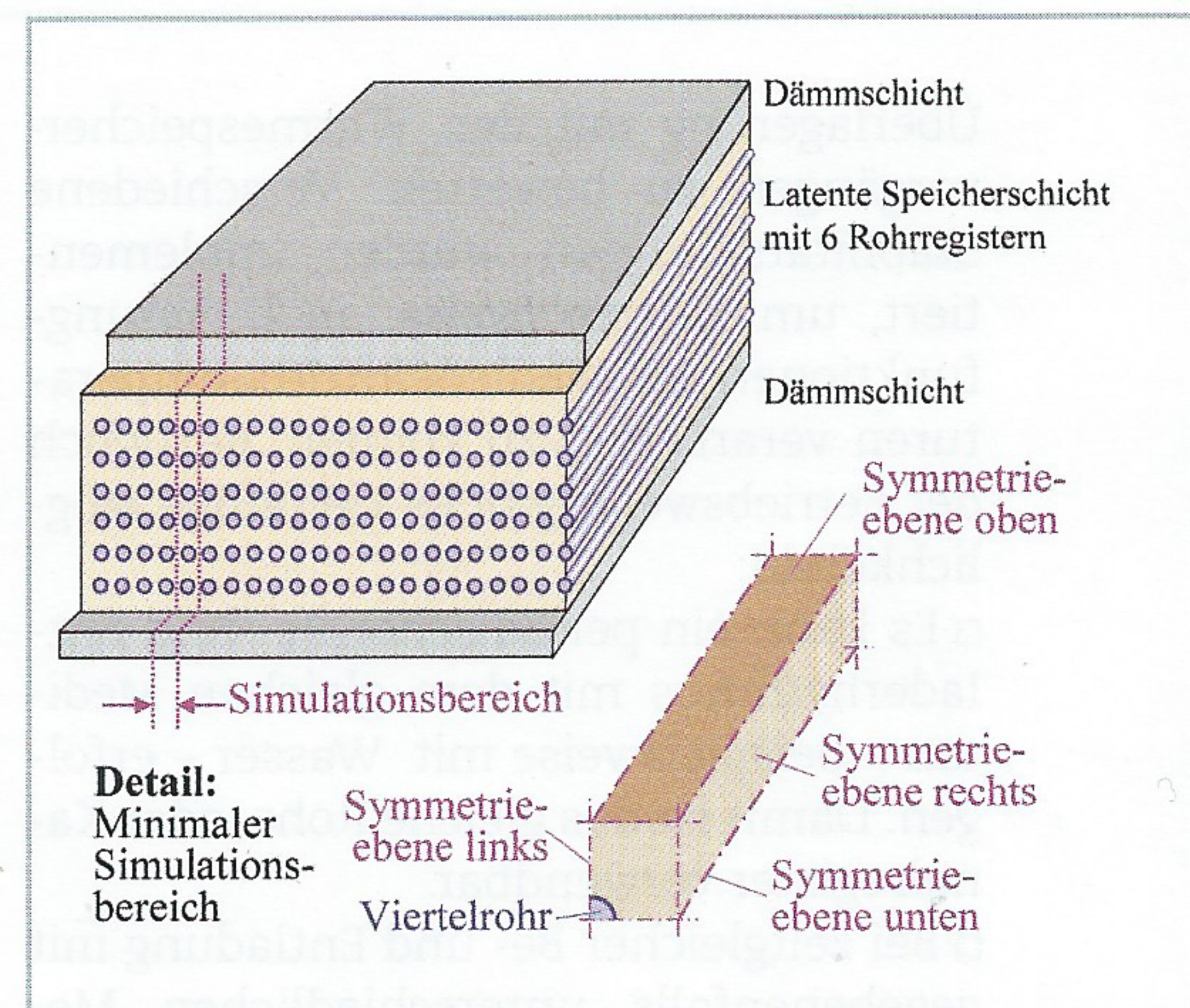


Bild 1

Einschichtiger Wärmespeicher mit Rohrregistern sowie oben und unten liegenden Wärmedämmschichten

Für die Simulation ist es ausreichend, nur einen Symmetriebereich von sechs übereinander liegenden Rohren zu modellieren. Bei starker Vereinfachung kann der Simulationsbereich auch durch vier Symmetrieebenen begrenzt werden und nur ein Viertelrohr am Rande zweier Symmetrieebenen einschließen (Detailbild). Der obere und untere Randeinfluss wird dann vernachlässigt, was bei guter Dämmung kaum Fehler bewirkt

zierten Randbedingungen (z.B. Kanaleinformungen) einschließlich der Phasenumwandlung des Materials wird numerisch mit der Finite-Volumen-Methode verfolgt.

Findet kein Mediendurchfluss in den Rohren oder Kanälen statt, betrachtet man die Rohrelemente ebenfalls als Festkörper. Die zugehörigen Stoffwerte werden dann als gewichtete Größen aus dem stagnierenden Medium und dem Wandmaterial der Rohre- bzw. Kanäle approximiert.

Ansonsten ermittelt das Rechenprogramm die zeitbezogenen Medientemperaturen in Abhängigkeit der Wärmekapazität der Fluidströme und der Durchflussrichtung abschnittsweise. Damit ist es möglich, auch die thermodynamischen Vor- bzw. Nachteile bei Gleich- und Gegenstromführung in

Autor



Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Jahrgang 1942, betreibt ein Forschungs- und Entwicklungsbüro für Technische Gebäudeausrüstung. Gleichzeitig ist er als Honorarprofessor an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) tätig.

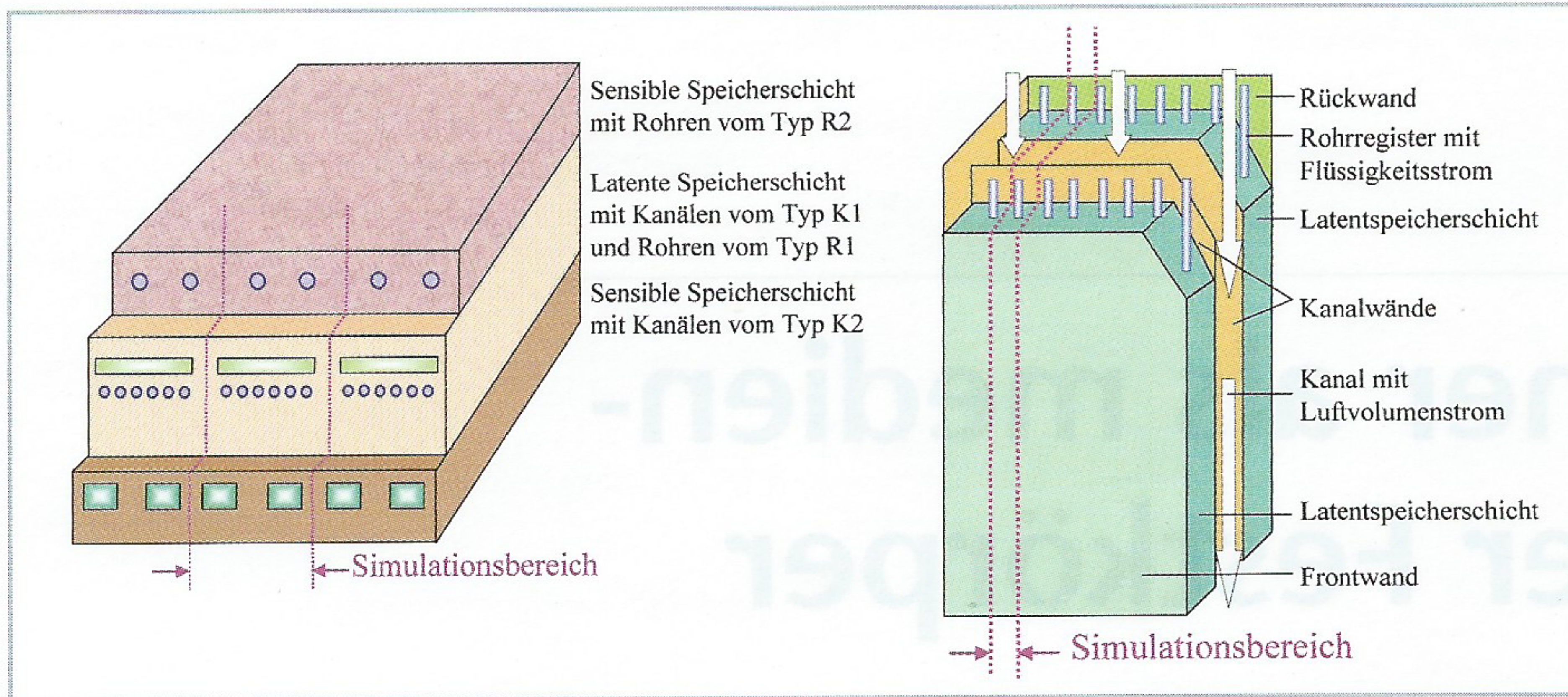


Bild 2

Links: Fiktiver Wärmespeicher mit je zwei unterschiedlichen Rohr- und Kanalregistern. Rechts: Realer Wärmespeicher als luftdurchströmter Schacht mit Latentspeichermaterial gefüllten Wänden und integrierten Rohrregistern. Das Wasser strömt im Gegenstrom zur Luft. Die für die Simulation gekennzeichneten Bereiche sind aufgrund der Symmetrieverhältnisse gebildet. Würden die Kanäle bzw. Rohre geschnitten, könnten die Bereiche nochmals halbiert werden.

Überlagerung mit den Wärmespeichervorgängen zu bewerten. Verschiedene Stabilitätskriterien wurden implementiert, um beispielsweise auch Sprungfunktionen der Medieneintrittstemperaturen verarbeiten zu können. Bezüglich der Betriebsweise gibt es vielfältige Möglichkeiten:

- Es kann ein periodischer Be- und Entladerhythmus mit dem gleichen Medium – beispielsweise mit Wasser – erfolgen. Damit ist das gleiche Rohr- oder Kanalregister verwendbar.
- Bei zeitgleicher Be- und Entladung mit gegebenenfalls unterschiedlichen Medien sind zwei Rohr- oder Kanalregister in den Speicherkörper einzuordnen. Die Medienströme können sich im Gleich- oder Gegenstrom bewegen.
- Die Beaufschlagung der Rohr- oder Kanalregister mit den Stoffströmen kann nach unterschiedlichsten Zeitprogrammen erfolgen.
- Aus thermodynamischer Sicht sind auch Steuerungsvarianten vorstellbar, die beispielsweise die Beladung vom Temperaturangebot des ersten Stoffstromes (verfügbare Medieneintrittstemperatur) und die Entladung von der erreichbaren Austrittstemperatur des zweiten Stoffstromes abhängig machen.

Aufgrund der vorgenannten Prämissen wurde ein Rechenprogramm entwickelt, mit dessen Hilfe die beschriebenen Wärmespeicher von unterschiedlichster Geometrie, mit variantenreichem stofflichen Aufbau und bei vielfältigsten thermischen sowie zeitlichen Randbedingungen untersucht werden können. Der Grobablauf ist im Bild 4 gezeigt.

Mit Hilfe von Variantenvergleichen sind optimale Konstruktionen und/oder Betriebsbedingungen auffindbar.

Bereitstellung von meteorologischen Daten

Bei der Nutzung von Umweltenergiequellen- oder -senken sind die Betriebsbedingungen in vielen Fällen an die Wetter- oder Klimabedingungen des Einsatzortes gekoppelt. Dies betrifft z.B. Wärmepumpen, die zur Effizienzsteigerung

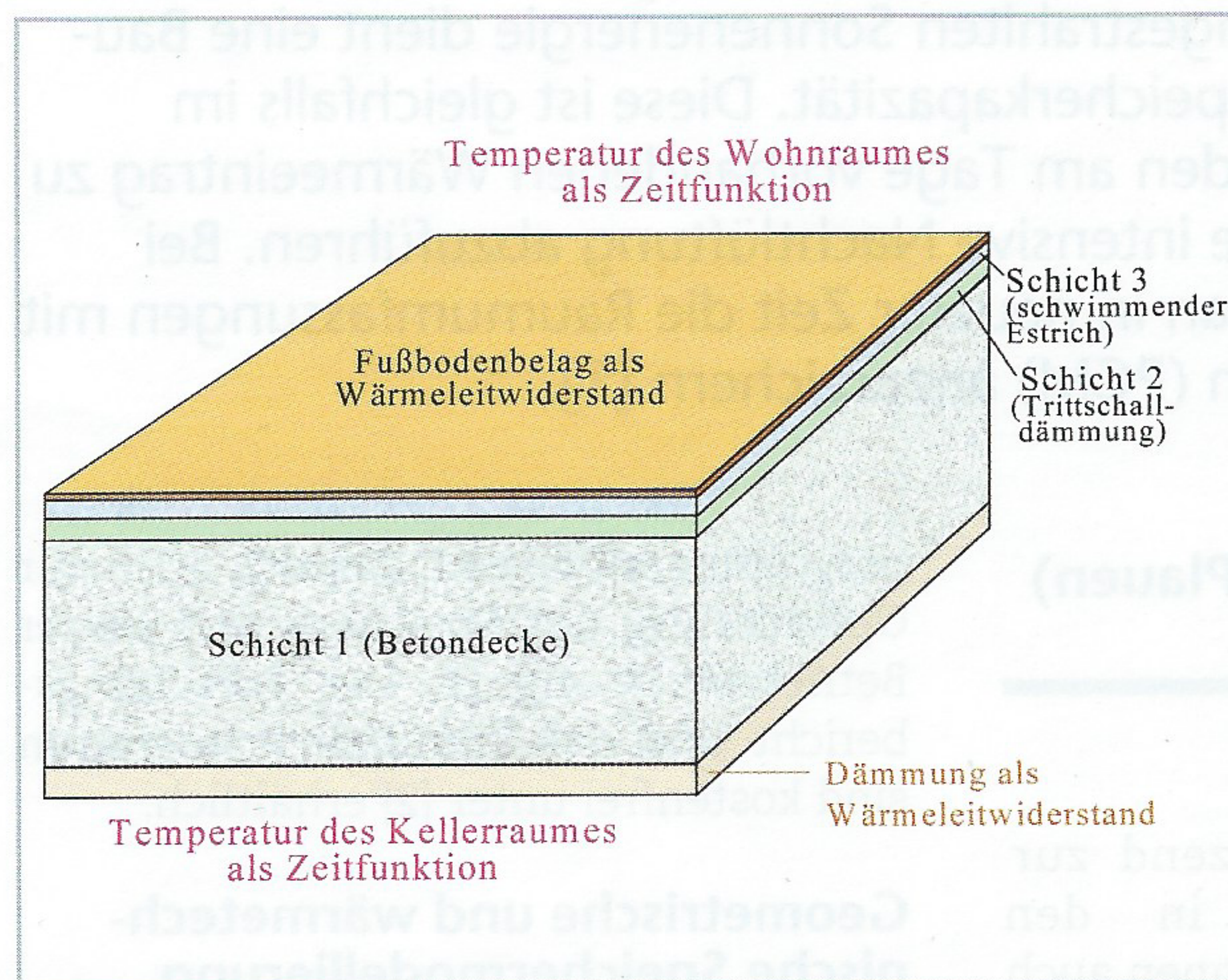
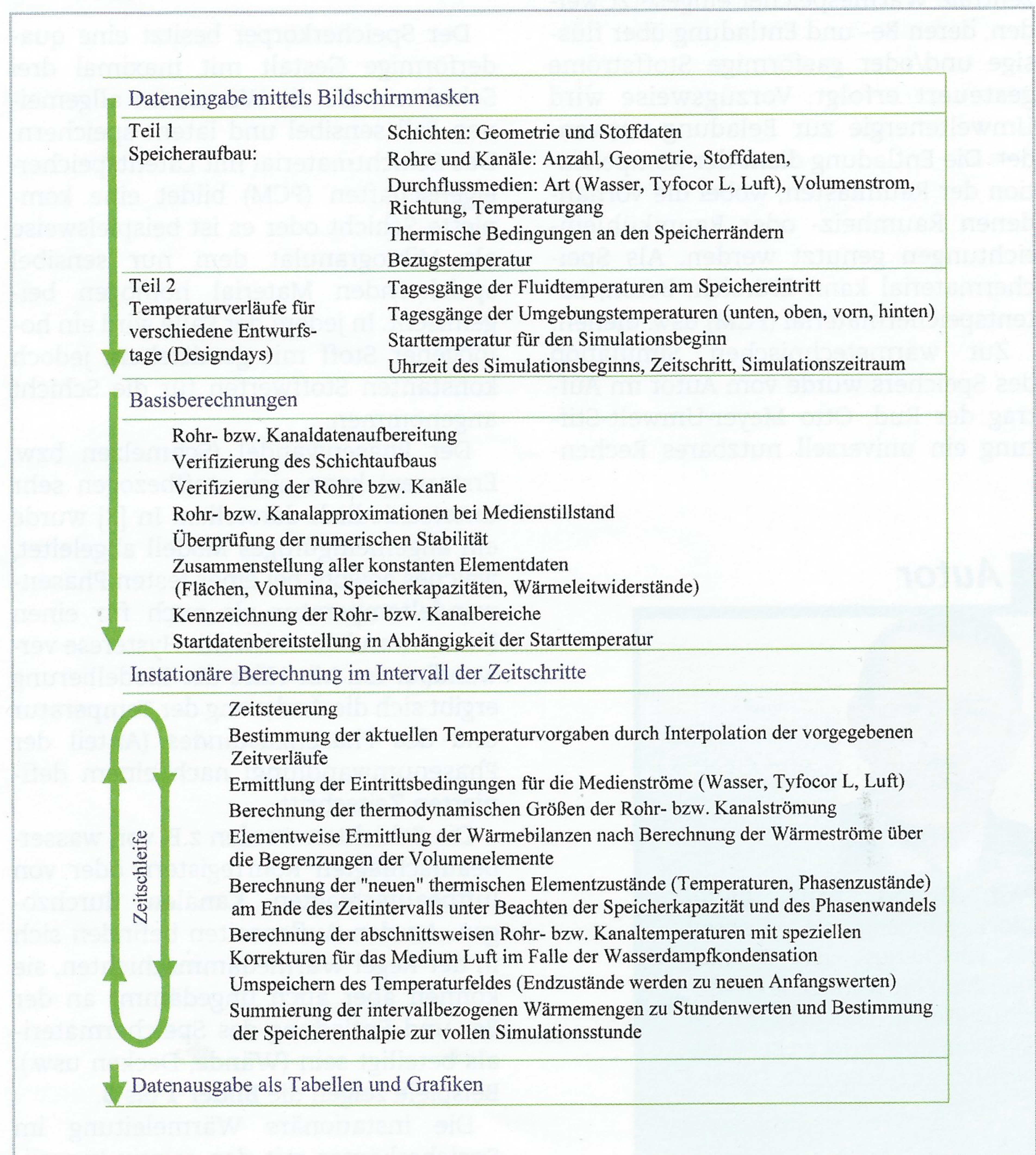


Bild 3

Ausschnitt zur verkürzten Simulation eines passiv wirkenden Deckenspeichers über einem Kellerraum (keine Rohrbestückung).

Bild 4

Ablaufplan des Rechenprogramms zur wärmetechnischen Simulation eines mehrschichtigen Wärmespeichers aus sensiblem und latentem Material mit integrierten Rohren bzw. Kanälen.



t,x-Korrelation mit Jahreshäufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für den 24 Stundentag, für 6 ... 18 Uhr und 18 ... 6 Uhr
t,t-Korrelation mit Jahreshäufigkeitsverteilung der Feuchtkugelttemperatur für den 24 Stundentag, für 6 ... 18 Uhr und 18 ... 6 Uhr

Außenlufttemperatur, Solarstrahlung und Sonnenlufttemperatur für jahreszeitlich typische Tagesgänge (Entwurfstage: heiterer Februartag, heiterer Julitag, Extremsommertag)

Außenlufttemperatur und -feuchte als Tagesgänge für die drei vorgenannten Entwurfstage

Tabellen- und Dateidarstellung (Die DIN-Angaben wurden unter Beachten der Klassenmitten so verändert, dass für die Luftzustände stets $\phi \leq 99\%$ gilt!)

Tabellen-, Grafik- und Dateidarstellung

Tabellen- und Grafikdarstellung (Beispiel: Bild 5)

Tabelle 1

Aufbereitete meteorologische Daten auf der Basis der DIN 4710 für den Standort Kassel zur Nutzung bei der Speicherprogrammanwendung als thermische Randbedingungen und/oder als Eintrittszustände der Fluidströme durch den Speicherkörper

quellenseitig mit einem Kurzzeitspeicher verbunden sind, Kühltürme, die nachts auf einen separaten Speicher arbeiten oder Speicherbauteile direkt kühlen (thermische Bauteilaktivierung), Fassaden mit Rohr- bzw. Kanalsystemen, die beispielsweise als Solarabsorber dienen, Erdkollektoren, die als Langzeitspeicher fungieren usw. Die älteste und einfachste Form stellt natürlich die rein passive Solarenergienutzung über die massive Außenwand dar, die zugleich ein Wärmespeicher ist. In [2] sind zur variantenreichen Nutzung wichtige meteorologische Daten auf Basis der DIN 4710 aufbereitet worden (Tabelle 1, Bild 5).

Wird der den Speicher beaufschlagende Medienstrom durch einen „Umweltenergieaufnehmer“ – bspw. durch einen Hybridkühler – bereitgestellt, dann kann durch entsprechende Voruntersuchungen auch der Zusammenhang z. B. zwischen Wassereintrittstemperatur in den Speicher und der Feuchtkugelttemperatur der Außenluft formuliert werden. Dies ist in [4], Bild 11 gezeigt.

Grundüberlegungen zur Speicheroptimierung

Die wärmetechnische Optimierung eines Speichers bezieht sich in erster Linie auf die speicherbare Wärme im Speichervolumen während eines Belade-Entlade-Zyklus. Die wärmetechnische Effizienz eines Festkörperspeichers – Nutzungsgrad – kann aus dem Verhältnis der praktisch nutzbaren Speicherwärme zur theoretisch möglichen innerhalb eines Zyklus gefolgert werden:

$$\varepsilon = \frac{Q_{S,max} - Q_{S,min}}{Q_{S,max} - Q_{S,min}}$$

In Verbindung mit Bild 6 gelten:

$Q_{S,max}$ theoretische Enthalpie des Speicherkörpers bei maximaler Ladetemperatur

$Q_{S,min}$ theoretische Enthalpie des Speicherkörpers bei minimaler Entladetemperatur

$Q_{SZ,max}$ reale Enthalpie des Speicherkörpers beim maximalen Ladezustand während des Zyklus

$Q_{SZ,min}$ reale Enthalpie des Speicherkörpers beim minimalen Ladezustand während des Zyklus.

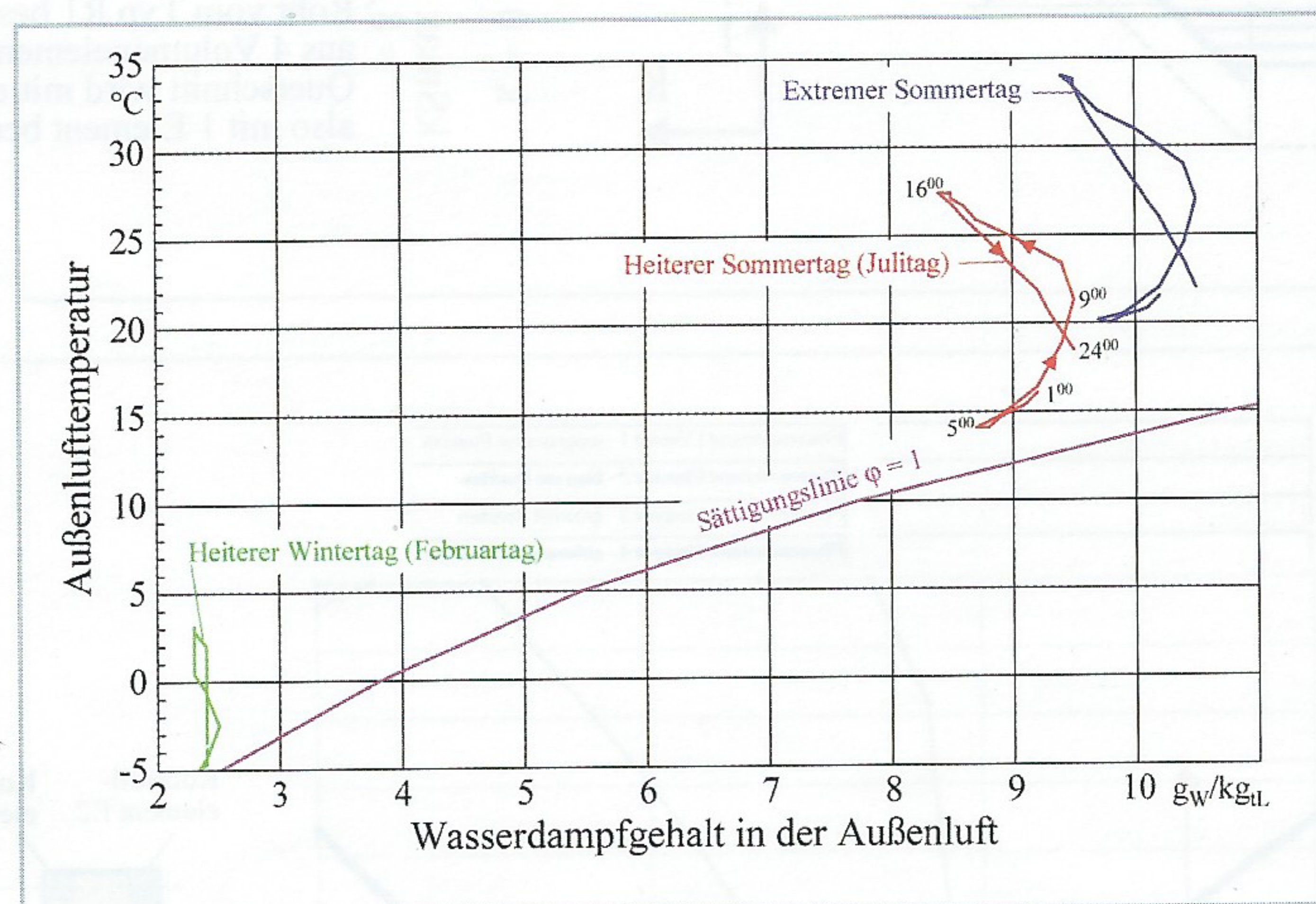


Bild 5

Außenluftzustandsverläufe (Lufttemperatur und Luftfeuchte) für drei ausgewählte Entwurfstage im h,x-Diagramm als ein Beispiel für die bereitgestellten meteorologischen Daten

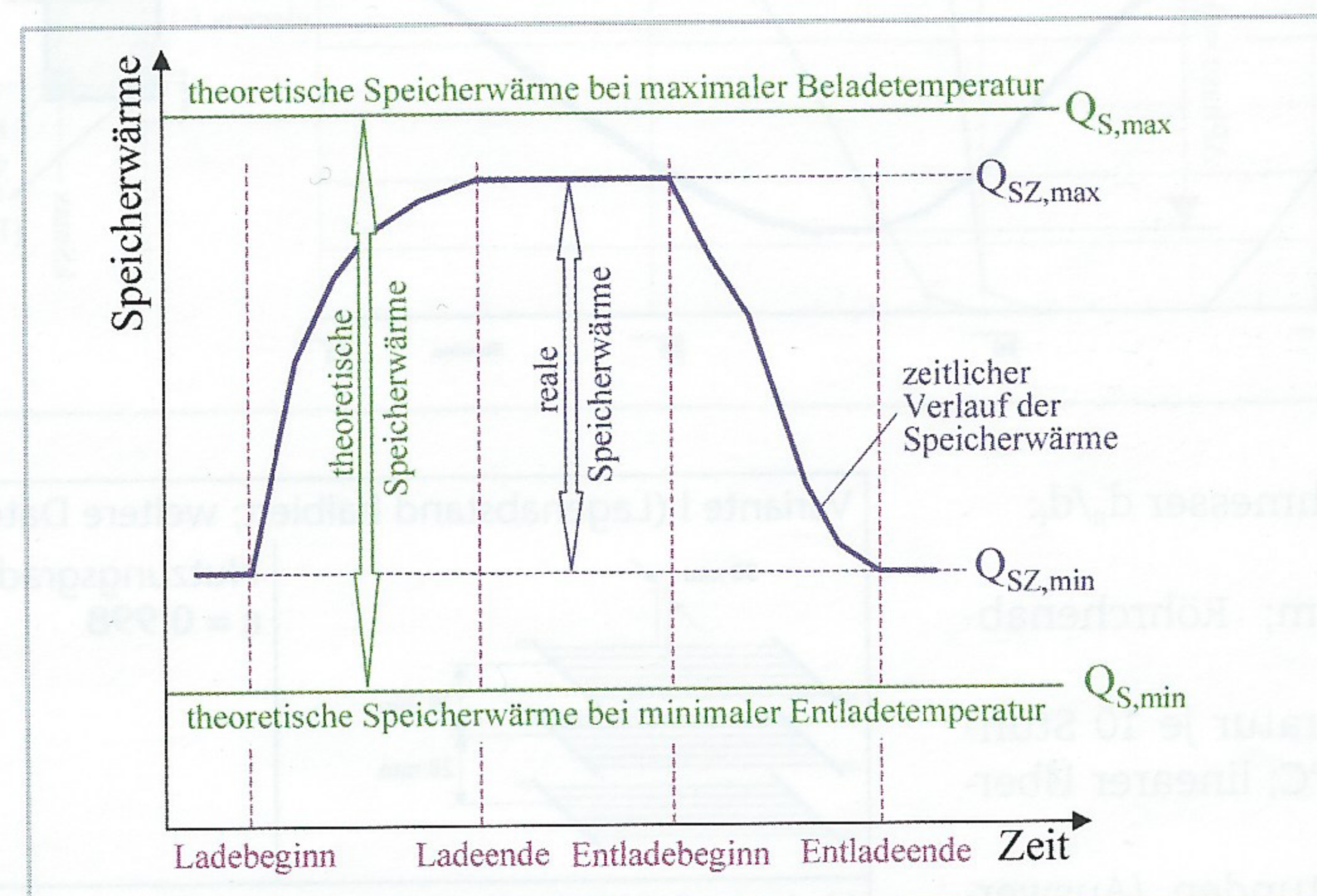


Bild 6

Schematische Darstellung der Grenzwerte zur Definition des Speichernutzungsgrades

Die Speicherenthalpie ist für eine vorgegebene Bezugstemperatur definiert. Die maximale Ladetemperatur und die minimale Entladetemperatur beziehen sich auf den Fluidstrom, der das Rohr- bzw. Kanalsystem im Speicherkörper beaufschlagt, oder bei rohr- bzw. kanallosen Speichern auf die Umgebungstemperatur an der ungedämmten Speicheroberfläche (z.B. einer Wand oder Deckenfläche), die der Speicherbe- und -entladung dient.

Zahlreiche Faktoren nehmen Einfluss auf den Speichernutzungsgrad:

- Speichergeometrie (Abstände zwischen den Rohren und den Registerebenen, Rohrdurchmesser), Bild 7
- Speichermaterial (Phasenwandelenthalpie, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit)
- Art des Phasenwandels (feste Temperatur, Phasenwandelsbereich, Hysterese)
- Temperaturregime (Fluideintrittstem-

peraturen, Wärmekapazitätsströme, Zyklenform)

□ Intensität der Wärmeübertragung an das Speichermaterial (Wärmeübergangskoeffizient).

Außer durch den Nutzungsgrad kann die qualitative Beurteilung des Speicherzustandes während des Zyklus durch die Anzeige der Temperaturen und Phasenzustände in den Volumenelementen erfolgen.

Beispiel einer Speicheroptimierung

Als Speichermaterial wurde ein Paraffin-Salz-Hydrat, angepasst an die Herstellerangaben für SP 22 A4 der Fa. Rubitherm, verwendet. Für die Basisvariante gelten die Hauptdaten:

- Phasenwechseltemperatur von 22 bis 24 °C
- Kapillarrohrmatte Typ „Optimat“ der

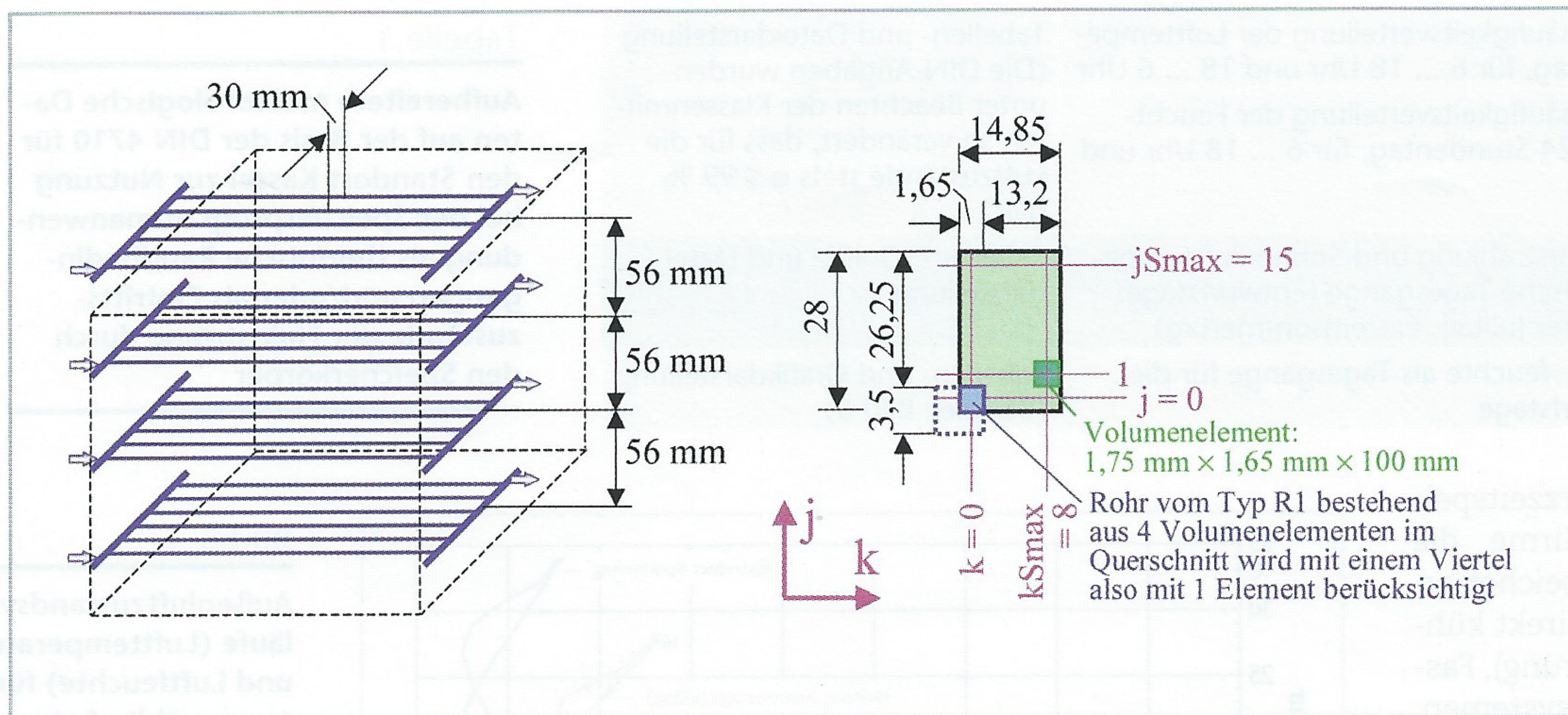


Bild 7

Links: Hauptabmessungen des Rohrregisters im Speicherkörper der Basisvariante
Rechts: Minimales Simulationsgebiet, das unter Nutzung der zweifachen Symmetrie gebildet wurde, mit Angaben in mm (nicht maßstäblich) und mit Kennzeichnung der Gittergrenzen. In i-Richtung – in die Tafel Ebene hinein – gelten die Unterteilungen $i = 0$ bis $i_{Smax} = 19$, so dass die Länge des Speicherkörpers 2000 mm beträgt

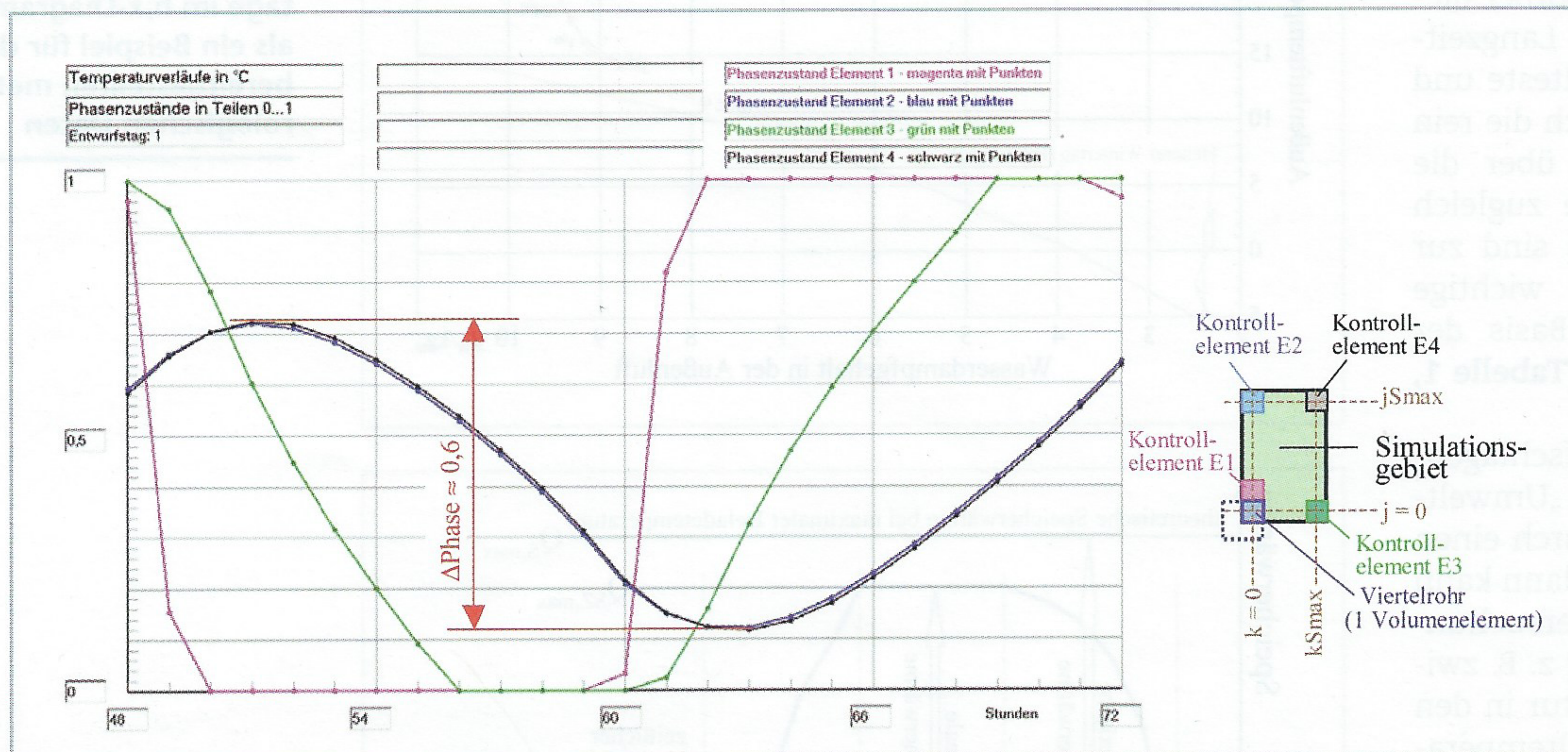


Bild 8

Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 in der Ebene $i=10$ am 3. Simulationstag

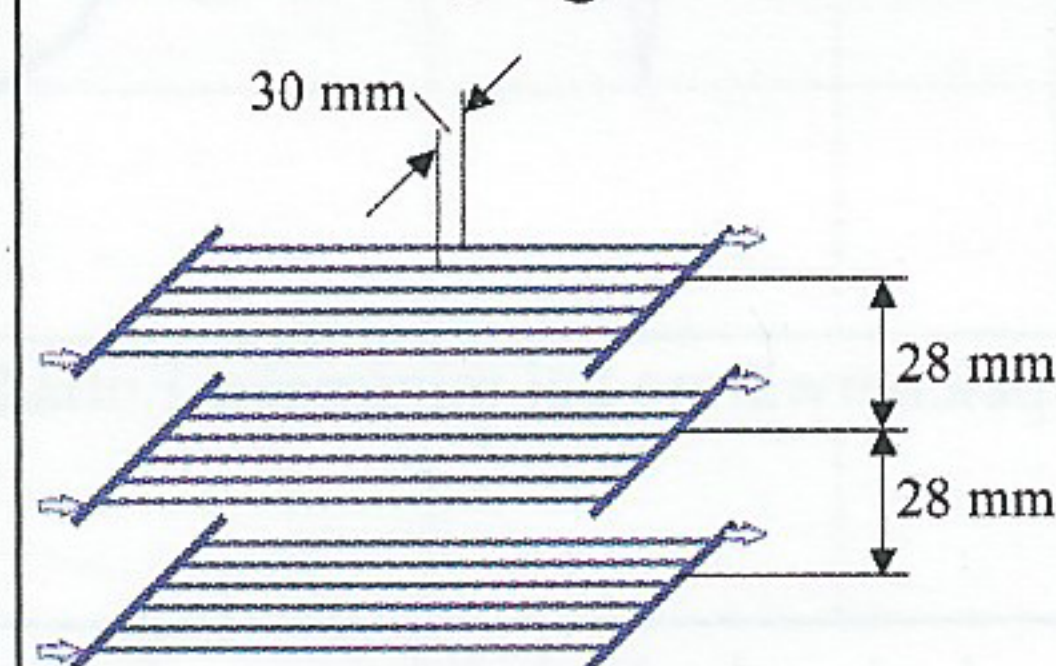
Fa. Clina, Form G, Durchmesser d_a/d_i : 4,3 mm/2,7 mm
□ Lagenabstand 56 mm; Röhrchenabstand ca. 30 mm
□ Wassereintrittstemperatur je 10 Stunden lang 16 °C bzw. 30 °C; linearer Übergang 2 Stunden
□ Simulationszeit 72 Stunden (Auswertung für den 3. Simulationstag).

Die Auswertung ergab einen Speichernutzungsgrad von nur $\epsilon = 0,637$. Die Ursache für das ungenügende Ergebnis liegt bei den gegebenen Stoffwerten in den zu großen Röhrchenabständen begründet. In [2] sind Schnitte durch den Speicherkörper gelegt, in denen die Phasenzustände der Volumenelemente angegeben werden. Daraus ist detailliert ersichtlich, inwieweit sie am Phasewandel beteiligt sind. Eine kurzgefasste Darstellung zeigt Bild 8, wo die Phasenzustände für nur vier Volumenelemente in Extremelage (Kontrollelemente) am 3. Simulationstag zu sehen sind. Es wird deutlich, dass die entfernt liegenden Elemente E2 und E4 lediglich eine Phasenumwandlung von ca. 60 % erfahren.

Zur Verbesserung des Speichernutzungsgrades werden zwei Veränderungen beispielhaft betrachtet:

□ Variante I: Verringerung des Lagenab-

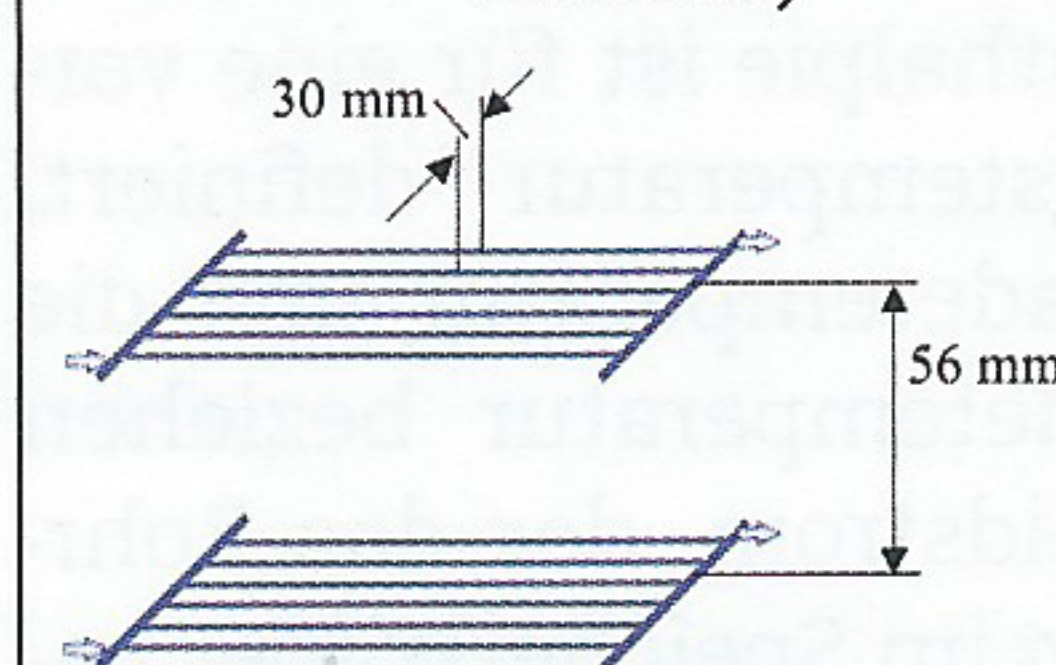
Variante I (Lagenabstand halbiert; weitere Daten wie bei Basisvariante)



Nutzungsgrad
 $\epsilon = 0,998$

Ideale Lösung!
Alle Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen einen 100 %igen Phasewandel.

Variante II (Wärmeleitfähigkeit von 0,6 auf 1,2 W/(m K) erhöht; weitere Daten wie bei Basisvariante)



Nutzungsgrad
 $\epsilon = 0,767$

Keine Ideallösung, aber besser als Originalvariante!
Entfernt liegende Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen nur einen 90 %igen Phasewandel.

standes auf die Hälfte

□ Variante II: Verdopplung der Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials.

Die Ergebnisse der beiden Zusatzvarianten finden sich in Tabelle 2.

Hilfreich bei der wärmetechnischen Bewertung des Speichers können auch weitere Ausgabedaten sein. So beispielsweise die Speicherenthalpie am Ende einer Simulationsstunde, die während der jeweils vorangegangenen Stunde vom Rohr an das Speichermaterial übergebene Wärme oder die im Bild 9 dargestellten Ein- und Austrittstemperaturen der Fluidströme. Im letzten Fall lassen

Tabelle 2

Variantenuntersuchungen zur Verbesserung des Speichernutzungsgrades gegenüber der Basisvariante durch Änderung des Lagenabstandes bzw. der Wärmeleitfähigkeit

sich beispielsweise auch die Wärmeübergangsbedingungen abschätzen, der Wärmekapazitätsstrom des Durchflussmediums beurteilen, die sinnvolle Länge des Speichers quantifizieren usw.

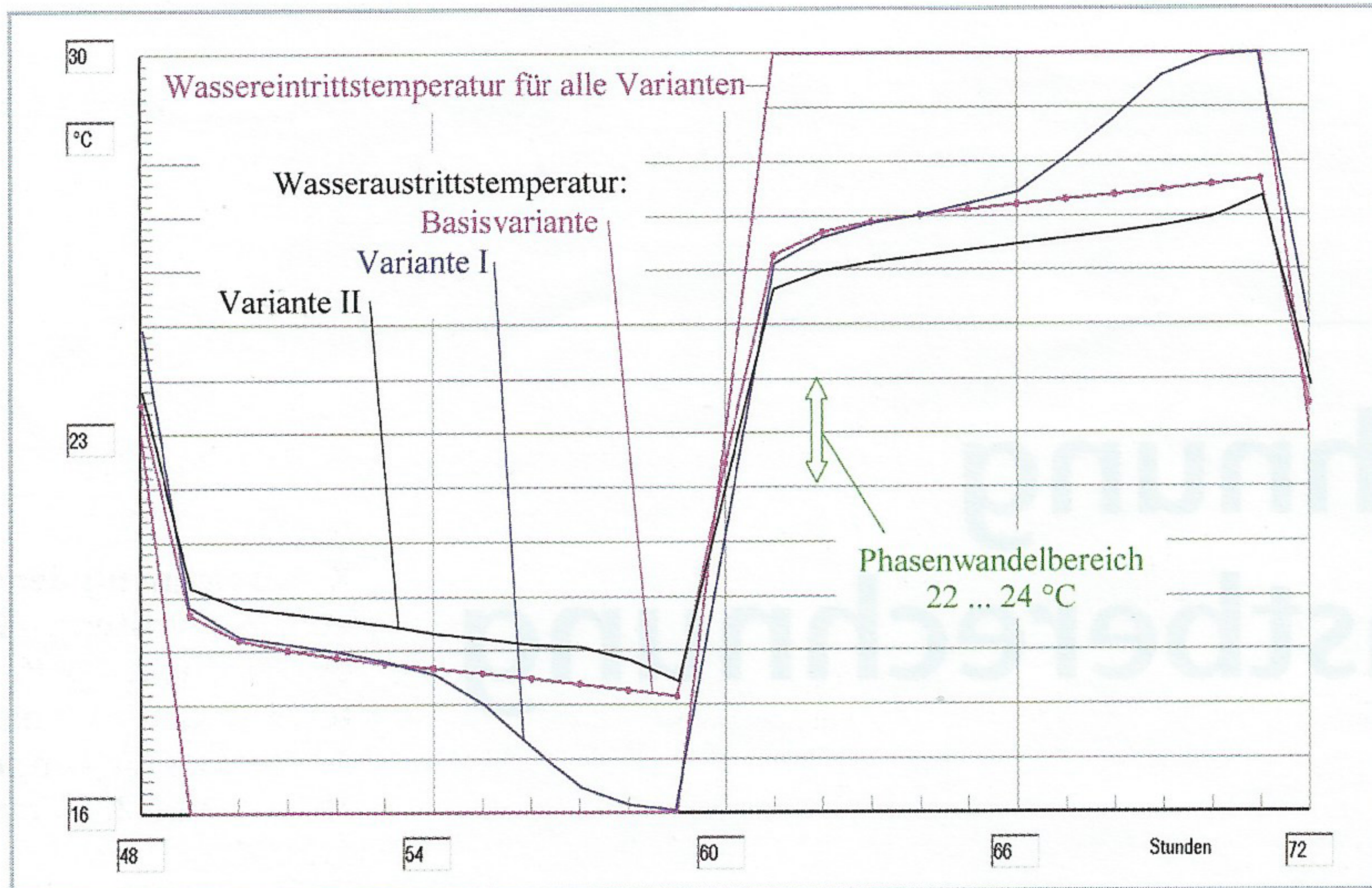


Bild 9

Einheitliche Wassereintrittstemperatur und unterschiedliche Wasseraustrittstemperaturen für die Basisvariante sowie für die Varianten I und II im Verlaufe des 3. Simulationstages

Fazit

Mit dem vorgestellten Simulationsprogramm können Festkörperspeicher, zu denen die Erdspeicher, die Bauteilspeicher (mit und ohne Rohrregister) und vor allem auch die mit Latentspeichermaterial gefüllten Zentralspeicher gehören, wärmetechnisch untersucht, beurteilt und hinsichtlich ihrer Geometrie, ihrer Stoffwerte und der Betriebssteuerung optimiert werden. Eine generell wichtige Zielstellung an den Speicherkörper ist dessen möglichst ho-

mogenes Temperaturfeld, was kleine Rohr- bzw. Kanalabstände bedingt.

Zentrale Wärmespeicher, die man beispielsweise in bestehende oder neue Anlagenkonzepte einordnet, können sich zukünftig als wirtschaftlich erweisen, da deren Entladung nach strikter Bedarfsorientierung steuerbar erfolgt. Die Unterbringung ist in Kellerräumen oder in Erdtanks denkbar, so dass die mögliche Brennbarkeit eingesetzter PCMs kein entscheidendes Verwendungskriterium mehr darstellt.

Literatur

- [1] Glück, B.: Thermisch-energetischer Gebrauchswert von Wohnbauten. HLH Bd.56 (2005) Nr. 12, S. 38-41 (Teil 1); Bd. 57 (2006) Nr. 1, S. 63-70 (Teil 2), Nr. 2, S. 84-90 (Teil 3).
- [2] <http://www.rom-umwelt-stiftung.de/> Rubrik „Arbeit bisher“ und weiter unter „Projekt 14“, Teil 3 mit dem Titel: „Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper“.
- [3] Glück, B.: Einheitliches Näherungsverfahren zur Simulation von Latentwärmespeichern. HLH Bd. 57 (2006) Nr. 7, S. 25-30.
- [4] Glück, B.: Hybridkühler mit gewickelter Kapillarrohrmatte und radial geführtem Luftstrom. HLH Bd. 58 (2007) Nr. 2, S. 116-122.