

---

**RUD. OTTO MEYER-UMWELT-STIFTUNG**

GERHARD-FALK-STR. 5 21035 HAMBURG TEL 040.79419548 FAX 040.72588313

---

Forschungskomplex

**EFFIZIENTER  
UMWELTENERGIEEINSATZ  
BEI WOHNBAUTEN**

**Bernd Glück**

Forschungsthema

**WÄRMESPEICHER  
ALS MEDIENDURCHSTRÖMTER  
FESTKÖRPER**

Die Bearbeitung erfolgte 2006 im Auftrag der RUD. OTTO MEYER-UMWELT-STIFTUNG

durch:

---

F+E TGA Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Goethestraße 18, D-08547 Jöbnitz (Plauen)  
Tel.+Fax 03741 / 52 12 14 E-Mail B.GLUECK@t-online.de

---

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Geometriemodellierung</b>	<b>3</b>
2.1	Grundlagen zur Auswahl des Simulationsbereiches	3
2.2	Rechentechnische Darstellung des Simulationsbereiches	5
<b>3</b>	<b>Wärmetechnische Modellierung</b>	<b>7</b>
3.1	Temperaturfeld im Speicherkörper und Startbedingung	7
3.2	Speichermaterial	7
3.2.1	Identische Schmelz- und Erstarrungstemperatur	8
3.2.2	Unterschiedliche Schmelz- und Erstarrungsverläufe – Hystereseformen	9
3.2.3	Einheitlicher Algorithmus zur Ermittlung der Temperatur- und Phasenänderung	13
3.3	Rohre und Kanäle im Speicherkörper	14
3.3.1	Geometrische Größen	15
3.3.2	Eintrittsparameter der Medienströme	16
3.3.3	Durchflussmedien und ihre Stoffwerte	17
3.3.4	Durchflussgrößen, Wärmeübergangskoeffizient und Teilwärmehdurchgangskoeffizient	21
3.3.5	Wärmetechnische Rohr- und Kanalkenngrößen bei Stillstand	23
3.4	Wärmeleitung im Speicherkörper	23
3.4.1	Randbedingungen am Speicherkörper	24
	Reale Speicherbegrenzungen	25
	Fiktive Speicherbegrenzungen	26
3.4.2	Wärmebilanz für ein Volumenelement	29
	Wärmeströme durch Wärmeleitung	29
	Datenbereitstellung zur rationellen numerischen Wärmestromberechnung	31
	Wärmebilanz	32
	Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung im Speicherkörper	33
3.5	Wärmetransport in Rohren und Kanälen	33
	Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung im Rohr- bzw. Kanalbereich	36
3.6	Umspeichern der Elementtemperaturen	36

3.7	Stündliche Wärmebilanzen für den Gesamtspeicher	36
<b>4</b>	<b>Rechenprogramm</b>	<b>39</b>
4.1	Ablaufplan mit Unterstruktur	39
4.2	Eingaben	40
4.2.1	Teil 1: Speicherdaten	40
4.2.2	Teil 2: Zeitverläufe der Randbedingungen	43
4.3	Datenverwaltung	45
4.4	Programmlisting, Programmgrundlagen, Installation und Abarbeitung	46
4.5	Ausgaben	47
<b>5</b>	<b>Testbeispiele für einen Speicher mit Paraffin-Salzhydrat-Gemisch und flüssigkeitsdurchströmten Kunststoff-Kapillarrohrmatten</b>	<b>48</b>
5.1	Basisbeispiel mit detaillierten Erläuterungen zum Ablauf der Simulation: Test 1	48
	Start und Dateneingabe für den Speicher	50
	Dateneingabe der thermischen Randbedingungen als Zeitfunktionen	50
	Berechnung	52
	Simulationsergebnisse anhand des Rechnerausdrucks	55
	Grundsätzliche Feststellungen	58
	Ergebnisbewertungen	58
	Simulationsergebnisse anhand der Grafikausgabe	60
	Simulationsergebnisse anhand spezieller Temperaturfelder	64
	Simulationsergebnisse anhand spezieller Phasenzustandsfelder	67
	Fazit	69
5.2	Beispiel: Test 1a (Gegenstrom)	69
5.3	Beispiel: Test 2 (Einfache Symmetrie)	71
	Ergebnisgegenüberstellung zum Test 1	74
	Auswertung der Temperaturfelder	74
	Fazit	75
5.4	Beispiel: Test 3 (Zweifache Symmetrie)	76
	Ergebnisgegenüberstellung zum Test 1 während der ersten vier Betriebsstunden	82
	Auswertung der Temperaturfelder	83

	Fazit	84
	Betrachtungen zum Einschwingverhalten	84
5.5	Beispiel: Test 4 (Mehrschichtiger Speicherkörper)	87
	Fazit	89
<b>6</b>	<b>Testbeispiele für einen Betonspeicher mit eingeformtem Luftkanal</b>	<b>90</b>
6.1	Basisbeispiel: Test 5	91
	Ergebnisbewertung	96
	Spezielle Betrachtung während der Einschwingphase zum Simulationsbeginn	98
	Fazit	100
6.2	Beispiel: Test 5a (Kleiner Zeitschritt)	100
	Fazit	102
<b>7</b>	<b>Meteorologische Daten</b>	<b>103</b>
7.1	$t_x$ -Korrelation und Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur	105
7.2	$t_{t_f}$ -Korrelation und Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur	123
7.3	Dateien zu den $t_x$ - und $t_{t_f}$ -Korrelationen	137
7.4	Außenlufttemperatur, Solarstrahlung und Sonnenlufttemperatur als Tagesgänge	137
7.5	Dateien zur Außenlufttemperatur, Solarstrahlung und Sonnenlufttemperatur	155
7.6	Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte als Tagesgang	156
7.7	Erdbodentemperaturen	158
7.8	Fazit und Beispielanwendungen für die meteorologischen Daten	160
<b>8</b>	<b>Speicheroptimierung – Grundüberlegungen und beispielhaftes Vorgehen</b>	<b>163</b>
8.1	Einflüsse auf die wärmetechnische Effizienz eines Festkörperspeichers	163
8.2	Bewertung der wärmetechnischen Effizienz eines Festkörperspeichers	164
8.3	Basisvariante des wasserdurchströmten Festkörperspeichers	165
	Feststellungen I	173
	Feststellungen II	178
8.4	Optimierungsvariante I: Kleinerer Abstand der Rohrregister	179
	Feststellungen I	182
	Feststellungen II	185
8.5	Optimierungsvariante II: Größere Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials	186

	Feststellungen I	189
	Feststellungen II	193
8.6	Optimierungsvariante III: Einfluss der Periodendauer	193
	Feststellungen I	197
	Feststellungen II	199
	Untervariante: Veränderte Starttemperatur	200
	Optimierungsvorschlag	201
	Feststellung III	205
8.7	Optimierungsvariante IV: Einfluss der Zyklenform	205
	Feststellungen I	209
	Feststellungen II	211
	Optimierungsvorschlag	211
	Feststellung III	216
8.8	Versuche zur analytischen Beschreibung des thermischen Speicherverhaltens	216
8.9	Empfehlung zur Vorgehensweise bei der Optimierung	217
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>223</b>

- **Wichtiger Hinweis**

Alle in diesem Forschungsbericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors oder der Stiftung. Beide übernehmen keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten.

Das beigelegte Rechenprogramm ist für Entwickler und nicht für den kommerziellen Gebrauch konzipiert.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Stiftung und des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen und Einspeicherung sowie Verarbeitung in elektronischen Systemen, die über die Eigennutzung hinausgehen, sowie für Übersetzungen und Mikroverfilmungen.

## 1 Einführung

In [1, [http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck\\_Raummodell\\_TeilC.pdf](http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Raummodell_TeilC.pdf)] wurden verschiedene Varianten für die mögliche Einordnung von Latentspeichermaterialien (PCM) in den Baukörper vorgestellt. Zur quantitativen wärmetechnischen und wärmephysiologischen Untersuchung von Räumen, deren Umfassungen teilweise mit Latentspeichermaterial angereichert sind, ist ein spezieller Algorithmus mit dem Rechenprogramm "Dynamisches Raummodell" entwickelt worden. Es ist in der oben genannten Literatur ausführlich beschrieben und für jedermann nutzbar.

In [2, [http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck\\_Bericht\\_Wohnbauten.pdf](http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Bericht_Wohnbauten.pdf)] sind für sechs unterschiedliche Bauweisen

- *Massivhäuser aus Betonfertigteilen*
- *Holzleichtbauten ohne und mit PCM-Gipsbauplatten*
- *Massivholzbauten ohne und mit PCM-Lehmbauplatten*
- *moderne Ziegelbauten*

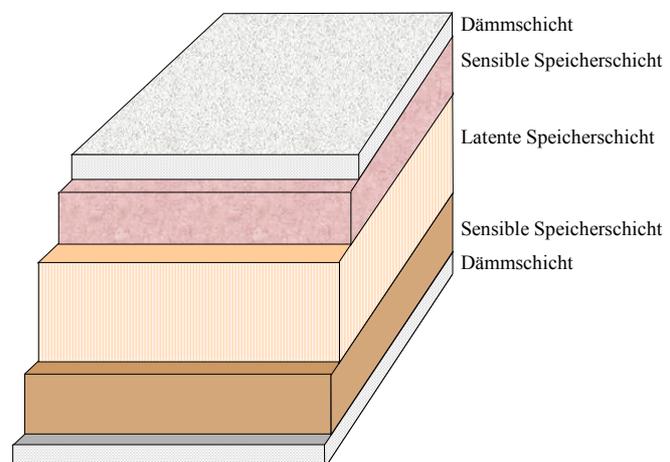
hinsichtlich ihrer energetischen und wärmephysiologischen Eigenschaften im Jahresgang anhand von vier Designdays Simulationen durchgeführt worden.

Die bisher untersuchten Speicher mit **Latentmaterial im Baukörper** sind in der Regel **passiv be- und entladen** worden. In Sonderfällen können sie auch **aktiv beladen und passiv entladen** werden. Damit ist die Nutzung des Wärmespeichers überhaupt nicht oder nur teilweise steuerbar.

Im Gegensatz dazu steht die **Installation eines separaten Wärmespeichers** – beispielsweise eines **Zentralspeichers** – mit vollkommen **steuerbaren Be- und Entladevorgängen**. Dieser Speicher ist in das wärmetechnische Versorgungskonzept komplett einzubinden. Hierzu gibt es die übliche Anlagenvielfalt von gut regelbaren Wassersystemen mit örtlichen Raumheizkörpern oder thermisch aktiven Raumumfassungen bis hin zu Luftheiz- und Kühlsystemen.

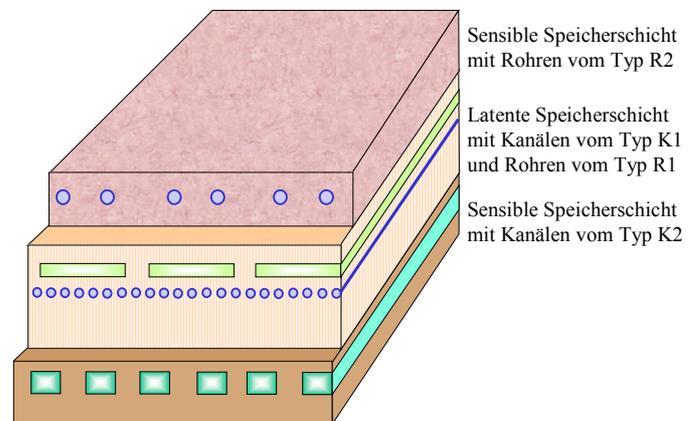
**Gegenstand der weiteren Untersuchung ist die Ausbildung eines solchen Speichers mit sensiblen und/oder latenten Speichermaterialien und seine wärmetechnische Optimierung.**

- Es werde davon ausgegangen, dass die **Speicherschicht eine quaderförmige Gestalt** besitzt oder dass mehrere quaderförmige Schichten gleicher Grundfläche in **Sandwichbauweise** zusammengefügt sind. Dabei können sich **sensible und latente Wärmespeicherschichten** abwechseln (Bild 1.1).



**Bild 1.1** Beispielhafter Aufbau eines Wärmespeichers in Sandwichform

- Die konstruktiven Randbedingungen für die weitere **Speichergestaltung** sind durch die Systemgegebenheiten bereits determiniert. So werden beispielsweise bei Wassersystemen **wasserbeaufschlagte Rohre** und bei Luftsyste­men **luftbeaufschlagte Luftkanäle** den Speicherkörper durchziehen (Bild 1.2). Die spezielle Formgebung des Speicherkörpers, die Anordnung und die Querschnitte der Rohre und/oder der Kanäle stellen ein typisches Optimierungsproblem dar.



**Bild 1.2** Wärmespeicher mit je zwei unterschiedlichen Rohr- und Kanalregistern, die mit einem flüssigen oder gasförmigen Medium zur Be- und/oder Entladung durchflossen werden

- Bezüglich der **Beaufschlagung der Rohre und/oder der Kanäle** gibt es wiederum 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.
  - Soll die Be- und Entladung gegebenenfalls zeitgleich verlaufen und/oder werden unterschiedliche Medien eingesetzt, dann sind **zwei Rohr- oder Kanalregister** in den Speicherkörper einzuordnen.
  - Bei beiden vorgenannten Konstruktionen können wahlweise **Gleich- oder Gegenstrom** realisiert werden.
  - Die **konstruktive Vielfalt** der **Rohr- oder Kanalregister** ist grundsätzlich **grenzenlos**. Unter praktischen Gesichtspunkten wird allerdings von **parallel geführten Rohren bzw. Kanälen** ausgegangen, die **kreisrunden, ovalen oder rechteckigen Querschnitt** besitzen.
  - Die **Beaufschlagung** der Rohr- oder Kanalregister mit den Stoffströmen kann nach **unterschiedlichsten Zeitprogrammen** erfolgen.
  - Aus thermodynamischer Sicht sind auch **weitere Steuerungsvarianten** vorstellbar. So könnte z. B. die **Beladung vom Temperaturangebot** des ersten Stoffstromes (verfügbare Medien­eintrittstemperatur) erfolgen. Die **Entladung** würde beispielsweise von der **erreichbaren Austrittstemperatur** des zweiten Stoffstromes gesteuert.

Im Weiteren wird ein **Rechenprogramm** entwickelt, mit dessen Hilfe die beschriebenen **Wärmespeicher** von **unterschiedlichster Geometrie, stofflichem Aufbau** und bei **vielfältigsten thermischen sowie zeitlichen Randbedingungen** untersucht werden können. Mit Hilfe von **Variantenvergleichen** sind **optimale Konstruktionen und/oder Betriebsbedingungen** auffindbar.

Die Algorithmen und die zugehörige Programmumsetzung werden **abschnittsweise** erarbeitet.

## 2 Geometriemodellierung

### 2.1 Grundlagen zur Auswahl des Simulationsbereiches

Gemäß den Bildern 1.1 und 1.2 kann der Speicherfestkörper aus **sensibel** und **latent speichernden Stoffschichten** bestehen, die in Sandwichbauweise zusammengefügt sind. Sie werden von **kreisrunden** oder **ovalen Rohren** sowie von **Rechteckkanälen** durchzogen, die von unterschiedlichen Medien durchströmt werden.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, ein Verfahren vorzustellen, das quasi von jedermann flexibel an die spezielle Problematik anpassbar ist. Als besonders vorteilhaft wird hierbei die **Finite-Volumen-Methode** angesehen und deshalb im Weiteren verwendet. Die Volumenelemente werden dabei generell als **Quaderelemente** dargestellt und jeweils symmetrisch von den Gitterlinien geschnitten. Im allgemeinen Fall ist ein **dreidimensionales, äquidistantes Gitter** aufgespannt. Der Algorithmus gestaltet sich dann relativ einfach, da alle Bauteile wiederum als Quader approximiert werden.

Die vorgestellte Approximation erfordert nachfolgend genannte Restriktionen:

- Jede Schicht des Speichermaterials hat an allen Stellen die **gleiche Dicke**, sodass die Begrenzungs- und Trennebenen äquidistant zueinander liegen.
- Alle Speicherschichten haben die **gleiche Grundfläche**.
- Jede Speicherschicht hat in sich **homogene wärmetechnische Eigenschaften**.

Speicherschichten mit heterogenem Aufbau – beispielsweise mit speziellen, räumlich begrenzten PCM-Füllräumen – sind wärmetechnisch nicht optimal und finden vorerst keine Beachtung.

- Die **Achsen der Rohre und Kanäle** im Speicherkörper sind untereinander **äquidistant**. Sie verlaufen parallel zu vier Außenkanten des Speicherkörpers.
- Die **Querschnitte der Rohre bzw. Kanäle** werden geometrisch grundsätzlich als **Rechtecke** approximiert.

Die wärmetechnische Betrachtung bezogen auf das Rohr- bzw. Kanalinnere, so beispielsweise die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten und des Wärmeleitwiderstandes durch die Wandungen basiert auf der geometrischen Realität.

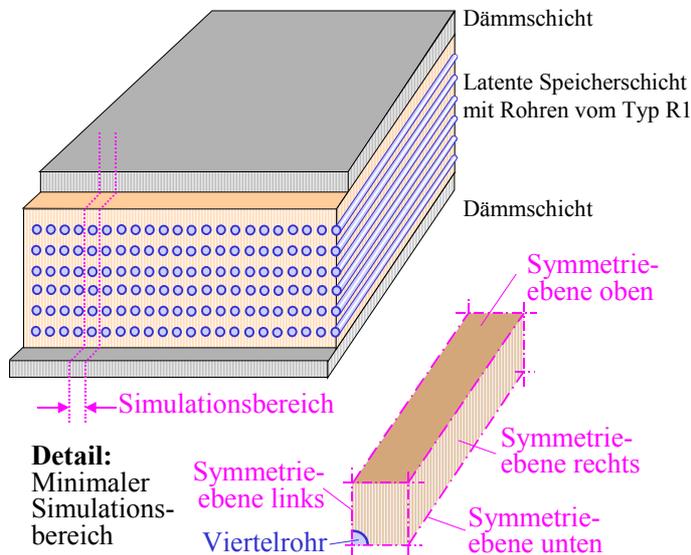
- Die Außenflächen des Speicherkörpers – nach Bild 1.1 sind dies z. B. die **Ober- und die Unterseite** des Speichers – können mit nichtwärmespeichernden **Dämmschichten** abgedeckt sein. Gleiches gilt für die **Materialflächen** an der **Vorder- und Rückseite** außerhalb der Durchtrittsflächen für die Rohre und Kanäle.
- Die **Fixierung des Simulationsbereiches** ist nach **Symmetriegesichtspunkten** zu wählen. Um kurze Rechenzeiten für die Simulation zu erreichen, sollte der kleinste mögliche Bereich bestimmt werden.

Falls es möglich ist, sind auch konstruktive Änderungen mit der Zielstellung, den Simulationsbereich in seiner Breite zu verkleinern, anzustreben.

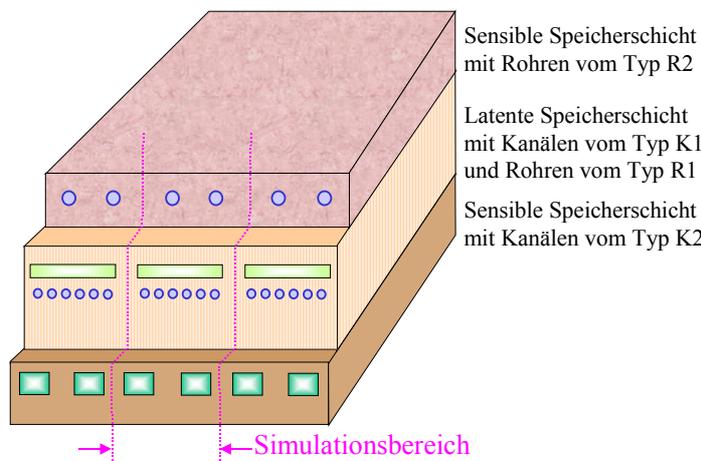
- Durch die **Seitenflächen** (linke und rechte Fläche) des Simulationsbereiches fließen aus Symmetriegründen **keine Wärmeströme**. Sie gelten als **adiabate Trennflächen**.

Es wird in praxi von einer Vielzahl nebeneinander liegender Simulationsbereiche ausgegangen, sodass reale **Wärmedämmungen an den Speicheraußenflächen ohne Beachtung** bleiben.

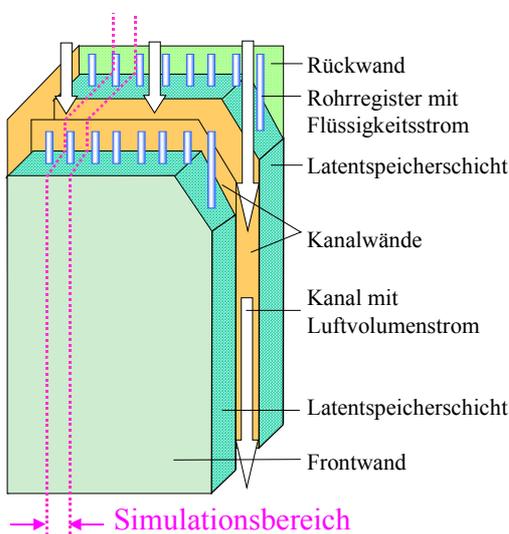
Die Bilder 2.1 bis 2.3 demonstrieren die Bildung der Simulationsbereiche beispielhaft.



**Bild 2.1** Normal üblicher Wärmespeicher mit einer Latentspeicherschicht, in die sechs Rohrregister integriert sind, und mit oben und unten liegenden Wärmedämmschichten. Für die Simulation ist es ausreichend, nur einen Symmetriebereich von sechs übereinander liegenden Rohren zu modellieren und zu untersuchen. Bei starker Vereinfachung könnte der Simulationsbereich durch vier Symmetrieebenen begrenzt werden und nur ein Viertelrohr am Rande zweier Symmetrieebenen einschließen (Detailbild).

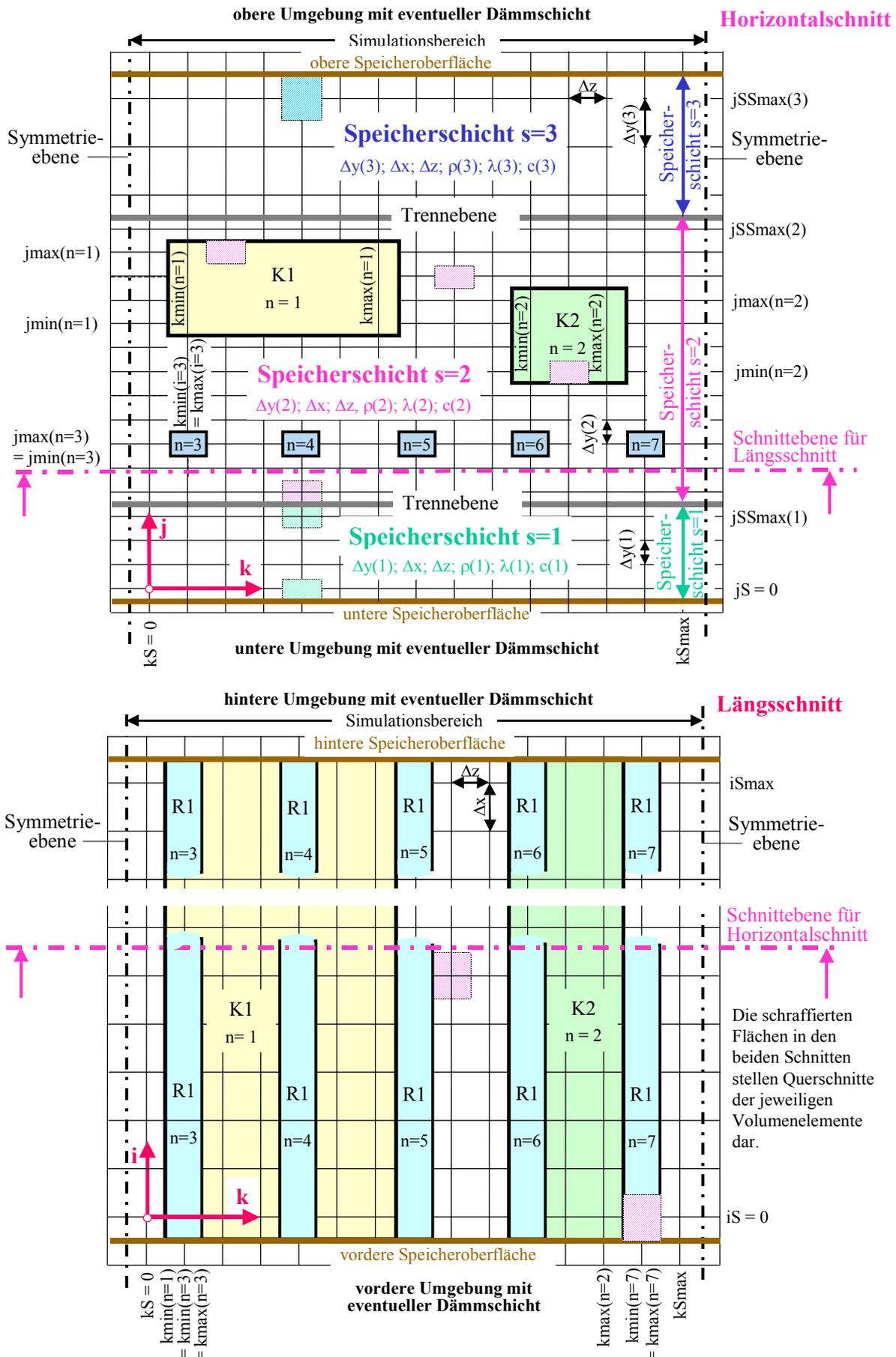


**Bild 2.2** Fiktiver Wärmespeicher mit je zwei unterschiedlichen Rohr- und Kanalregistern. Der für die Simulation gekennzeichnete Bereich ist aufgrund der Symmetrieverhältnisse gebildet.



**Bild 2.3** Luftdurchströmter Schacht mit Latentspeichermaterial gefüllten Wänden (Frontwand und Rückwand). Zur thermischen Aktivierung sind in den Wänden Rohrregister, die Wasser z. B. im Gegenstrom zum Luftstrom führen, integriert. Zur Bildung des Simulationsbereiches genügt es beispielsweise, aus dem Speichermodul nur die Breite eines Rohres mit beiderseits je einem halben Rohrabstand herauszugreifen. Würden die Rohre geschnitten, könnte der Simulationsbereich nochmals halbiert werden.

## 2.2 Rechentechnische Darstellung des Simulationsbereiches



**Bild 2.4** Gittereinteilung für einen dreischichtigen Wärmespeicher mit einem Rohrregister und zwei unterschiedlichen Kanaltypen in zwei Schnittebenen

Das Bild 2.4 zeigt das Berechnungsgitter für einen Wärmespeicher mit drei Schichten, in dem ein Rohrregister R1 und zwei unterschiedliche Kanaltypen K1 und K2 eingeordnet sind. Sie werden durch die laufenden Nummern  $n$  gekennzeichnet. Die Gittergrenzen der Rohre und Kanäle  $j_{\min}(n)$ ,  $j_{\max}(n)$ ,  $k_{\min}(n)$  sowie  $k_{\max}(n)$  sind im Bild 2.4 für ausgewählte  $n$  eingetragen. Dabei kann bei kleinen Durchflussquerschnitten  $j_{\min}(n) = j_{\max}(n)$  bzw.  $k_{\min}(n) = k_{\max}(n)$  gelten. Dies ist dann der Fall, wenn die Breite oder die Höhe nur von einem Volumenelement ausgefüllt wird. Für die Rohre  $n = 3$  bis  $n = 7$  trifft dies für beide Abmessungen zu. Die Länge aller Rohre und Kanäle geht stets von  $i = 0$  bis  $i = i_{\text{Smax}}$ . Die Symmetrieebenen sind im Bild 2.4 ebenfalls eingetragen.

Besonders zu beachten ist die Notwendigkeit, dass sowohl die Symmetrieebenen als auch die realen Oberflächen der Speicherschichten jeweils in der Mitte der Gitterteilung liegen. Die Mittelpunkte der Quaderelemente befinden sich stets auf den Gitterpunkten (Gitterkreuzungen). Demzufolge bilden die Oberflächen der Quaderelemente die realen Speicherflächen und die Symmetrieebenen.

Zum besseren Verständnis sind im Bild 2.4 einige Quaderelemente dargestellt. Gleichfarbige Flächen gehören zur gleichen Kategorie der Volumenelemente. Zu jedem Gitter gehört eine Kategorie (Größe) von Quaderelementen, wobei die Seiten  $\Delta x$  und  $\Delta z$  einheitlich gelten. Unterschiede können bezüglich der Abmessungen  $\Delta y(1)$ ,  $\Delta y(2)$  und  $\Delta y(3)$  bestehen.

**Hinweis:** Wenn die Gitterabstände  $\Delta y(1)$ ,  $\Delta y(2)$  und  $\Delta y(3)$  ungleich sind, dann darf ein definierter Rohr- bzw. Kanaltyp auch nur in **einer Schicht** vorkommen.

### 3 Wärmetechnische Modellierung

Die Reihenfolge der weiteren Unterabschnitte ist aus Verständnisgründen gewählt worden. Dagegen wird die spätere Umsetzung in den Rechencode vor allem nach dem Gesichtspunkt kurzer Rechenzeiten vorgenommen.

#### 3.1 Temperaturfeld im Speicherkörper und Startbedingung

Das Temperaturfeld im Speicherkörper wird durch die Temperaturen der Volumenelemente charakterisiert. Sie sind für deren Mittelpunkte – die identisch den Gitterpunkten sind – definiert:

$t_{i,j,k}$  Temperatur zu Beginn eines Zeitschrittes

$tn_{i,j,k}$  Temperatur am Ende eines Zeitschrittes (n bedeutet "neu").

Nach Abarbeitung eines Zeitschrittes erfolgt das Umspeichern der Temperaturen

$$t_{i,j,k} = tn_{i,j,k}. \quad (3.1)$$

Die Simulation beginnt stets mit einer einheitlichen Temperatur – der Starttemperatur  $t_{\text{Start}}$  – für alle Volumenelemente:

$$t_{i,j,k} = t_{\text{Start}}. \quad (3.2)$$

Sie sollte wegen der Besonderheiten beim Phasenwechsel stets unter oder oberhalb des Phasenwandebereiches liegen.

#### 3.2 Speichermaterial

Grundsätzlich wird bei der Modellierung angenommen, dass die Materialien die **Wärme sensibel und latent** speichern können. Die Stoffdaten des jeweiligen Speichermaterials für Temperaturen unterhalb eines eventuellen Phasenwandels lauten:

$\rho$  Dichte

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit des erstarrten ("festen") Materials

$c$  spezifische Wärmekapazität des erstarrten ("festen") Materials.

Wenn es sich um **Latentspeichermaterial** handelt, sind zusätzlich zu benennen:

$\lambda_{fl}$  Wärmeleitfähigkeit des geschmolzenen ("flüssigen") Materials

$c_{fl}$  spezifische Wärmekapazität des geschmolzenen ("flüssigen") Materials

$r$  Phasenwandelenthalpie

$t_{\text{Wandelu}}$  Temperatur des Materials bei Beginn des Phasenwandels ("Unterwert")

$t_{\text{Wandelo}}$  Temperatur des Materials am Ende des Phasenwandels ("Oberwert").

Zur schnelleren numerischen Berechnung werden elementbezogene Größen definiert:

$\Delta m$  Masse des Volumenelementes (Elementmasse)  $\Delta m = \Delta V \rho = \Delta x \Delta y \Delta z \rho$

$$Q_{\text{Phase}} \text{ Phasenumwandlungswärme für die Elementmasse } Q_{\text{Phase}} = \Delta m r = \Delta V \rho r \quad (3.3)$$

CE Elementwärmekapazität des erstarrten Materials  $CE = c \Delta m$

$CE_{fl}$  Elementwärmekapazität des geschmolzenen Materials  $CE_{fl} = c_{fl} \Delta m$ .

Der geschmolzene Masseanteil ist ortsabhängig unterschiedlich. Deshalb gelten für jedes Volumenelement zusätzlich die Definitionen:

Phase<sub>i,j,k</sub> Phasenzustand (geschmolzener Anteil) des Latentspeichermaterials bezogen auf das Volumenelement an der Stelle i; j; k

Phase<sub>i,j,k</sub> = 0  $\Rightarrow$  vollkommen erstarrtes ("festes") Material

Phase<sub>i,j,k</sub> = 1  $\Rightarrow$  vollkommen geschmolzenes ("flüssiges") Material

Mit Kenntnis des Phasenzustandes kann durch einfache Wichtungen die Wärmeleitfähigkeit des Latentspeichermaterials näherungsweise bestimmt werden:

$$\lambda_{PH} = \lambda (1 - \text{Phase}_{i,j,k}) + \lambda_{fl} \text{Phase}_{i,j,k}. \quad (3.4)$$

### 3.2.1 Identische Schmelz- und Erstarrungstemperatur

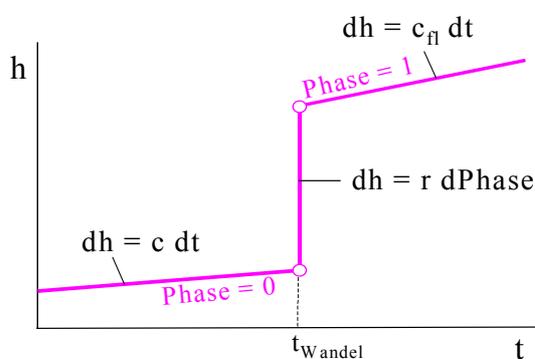
Im Idealfall liegt eine **einheitliche Schmelz- und Erstarrungstemperatur**

$t_{\text{Wandel}} (\equiv t_{\text{Wandelu}} \equiv t_{\text{Wandelo}})$

vor. Dies trifft beispielsweise auf den bekanntesten Fall Wasser / Eis zu. Auch bei reinen Paraffinen ist dies näherungsweise gegeben. Während des Phasenwandels bleibt die Temperatur ( $\equiv$  Phasenwandeltemperatur  $t_{\text{Wandel}}$ ) konstant.

Der temperaturabhängige Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t)$  ist im Bild 3.1 visualisiert. Der betrachtete Idealfall zeichnet sich durch lineare Anstiege im ungeschmolzenen ("festen") Stoff von  $dh/dt = c$  und im geschmolzenen ("flüssigen") Stoff von  $dh/dt = c_{fl}$  aus. Im Bereich des Phasenwandels von Phase 0 ... 1 ist die Temperatur konstant ( $t_{\text{Wandel}}$ ), sodass hier eine fiktive spezifische Wärmekapazität  $c_{\text{Phasenwandel}} \rightarrow \infty$  gelten würde. Zur rechnerischen Verfolgung des Schmelz- bzw. Erstarrungsvorganges wird der vertikale Enthalpiesprung vom Phasenzustand linear geteilt. Zusammenfassend stellt  $h$  somit eine Funktion der Temperatur  $t$  und des Phasenzustandes Phase dar:

$$h = h(t, \text{Phase}). \quad (3.5)$$



**Bild 3.1** Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t, \text{Phase})$  in Abhängigkeit der Materialtemperatur  $t$  und des Phasenzustandes Phase im Idealfall des Phasenwandels

Nach der Berechnung der elementweisen Wärmeleitung im Speicherkörper (siehe Abschnitt 3.4) ist die **Wärmezufuhr an das Quaderelement QE** bekannt, woraus für

- **rein sensible Wärmespeicherung** die Temperaturänderung

- rein latente Wärmespeicherung die Änderung des Phasenzustandes  
 - sensible und latente Wärmespeicherung die Temperatur- und Phasenzustandsänderungen bestimmbar sind.

Beispielsweise ergeben sich im ersten Fall – d. h. ohne Wirkung von Phasenwandeleffekten – am Ende eines Zeitschrittes  $\Delta\tau$  die neue Temperatur  $tn_{i,j,k}$  nach folgenden einfachen Rechenschritten:

$$\Delta t = \frac{QE}{\Delta m c} = \frac{QE}{CE} \quad \text{bzw. bei geschmolzenem Material} \quad \Delta t = \frac{QE}{\Delta m c_{fl}} = \frac{QE}{CE_{fl}} \quad (3.6)$$

$$tn_{i,j,k} = t_{i,j,k} + \Delta t . \quad (3.7)$$

Die Berücksichtigung des **Phasenwandels** beim Aufheizen oder Abkühlen muss differenzierter erfolgen. Hierbei ist der vorhandene Umwandlungsgrad  $Phase_{i,j,k}$  zu beachten und  $\Delta t$  sowie  $tn_{i,j,k}$  nach den Gln. (3.6) und (3.7) stellen zunächst nur Zwischenergebnisse einer Vorrechnung dar. Die erforderlichen Rechenabläufe werden zweckmäßigerweise in einer Programmstruktur dargestellt. Sie ist im Abschnitt 3.2.3 Teil einer komplexeren Wiedergabe, die auch die Hysterese beim Phasenwandel beachtet.

### 3.2.2 Unterschiedliche Schmelz- und Erstarrungsverläufe – Hystereseformen

In der Praxis werden zunehmend Latentspeichermaterialien eingesetzt, die ein deutlich verändertes Verhalten zeigen, so beispielsweise bei Salzhydraten, Paraffin-Salzhydrat-Gemischen usw. Die **Schmelz- und Erstarrungstemperatur unterscheiden sich** deutlich, es liegt eine **Hysterese** vor.

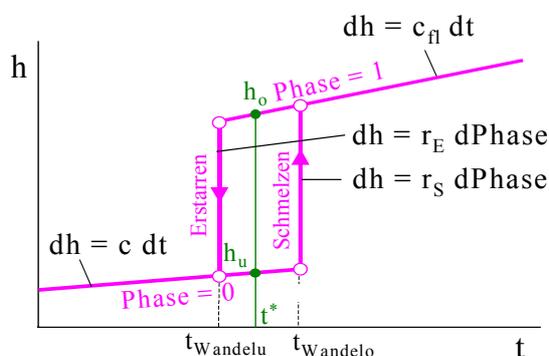
Dabei könnten die Vorgänge aufgrund der vorhandenen Anomalien in verschiedene Kategorien eingeteilt und entsprechend modelliert werden, die zum Teil aber wiederum Idealisierungen der Wirklichkeit darstellen.

- **Hysterese Form A**

Der Phasenwandel erfolgt bei unterschiedlichen Temperaturen ( $t_{Wandelo} > t_{Wandelu}$ ):

$t_{Wandelo}$  Schmelzen                       $t_{Wandelu}$  Erstarren.

Während des Phasenwandels bleibt die jeweilige Temperatur aber konstant (Bild 3.2).



**Bild 3.2** Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t, Phase)$  in Abhängigkeit der Materialtemperatur  $t$  und des verlaufsabhängigen Phasenzustandes  $Phase$  bei einer Hysterese nach Form A

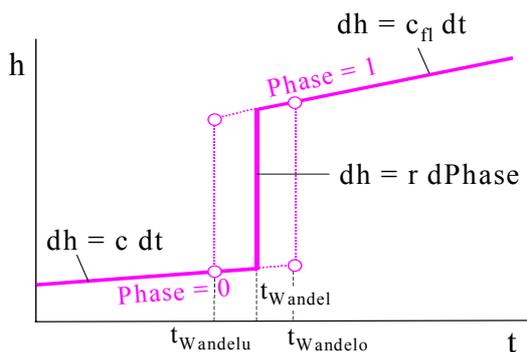
Um die im Bild 3.2 dargestellten Abläufe in einen Algorithmus zu fassen, wären die zwei Phasenwechseltemperaturen  $t_{Wandelo}$  sowie  $t_{Wandelu}$  und zwei unterschiedliche Phasenwandelenthalpien  $r_S$

(Schmelzen) sowie  $r_E$  (Erstarren) einzuführen. Letztere ergäben sich aufgrund der ungleichen Werte für die spezifischen Wärmekapazitäten  $c$  und  $c_{fl}$ , die über die Temperaturdistanz ( $t_{Wandelo} - t_{Wandelu}$ ) wirken.

Liegen die beiden Phasenwandeltemperaturen eng beieinander, kann der Phasenwandelvorgang in einfachster Weise mit dem Algorithmus der Ideallösung unter Verwendung der mittleren Phasenwandeltemperatur

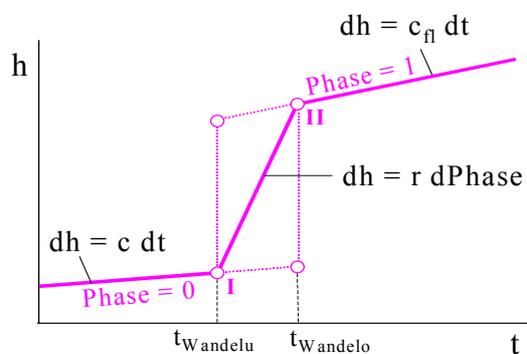
$$t_{Wandel} = 0,5 (t_{Wandelo} + t_{Wandelu}) \quad (3.8)$$

näherungsweise nachgebildet werden (Bild 3.3).



**Bild 3.3** Einfachste, näherungsweise Nachbildung der Hystereseform A durch Definition einer mittleren Temperatur  $t_{Wandel}$  und Verwendung des Idealfalls (Bild 3.1)

Eine weitere Näherung besteht darin, dass nach Bild 3.4 ein linearer Zustandsverlauf zwischen den Punkten I ( $t_{Wandelu}$ , Phase = 0) und II ( $t_{Wandelo}$ , Phase = 1) angesetzt und – wie später vorgestellt – algorithmiert wird. Damit erfolgt jedoch der Phasenwandel bei sich ändernder Temperatur.



**Bild 3.4** Näherungsweise Nachbildung der Hystereseform A durch Definition einer linearen Zustandsänderung  $h(t)$  während des Phasenwandels

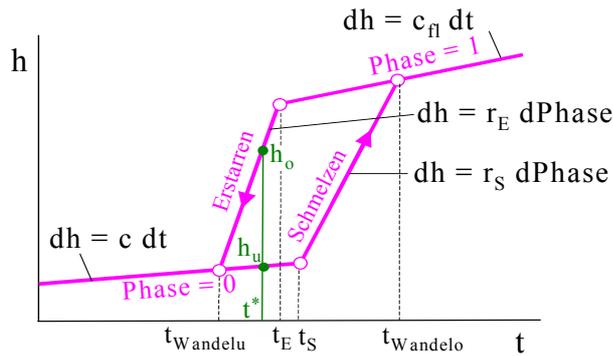
### • Hysterese Form B

Der Phasenwandel erfolgt bei gleichzeitiger Temperaturänderung (Bild 3.5). Zudem beginnt er jeweils bei unterschiedlichen Temperaturen:

$t_S$	Beginn des Schmelzens	$t_E$	Beginn des Erstarrens
$t_{Wandelo}$	Ende des Schmelzens	$t_{Wandelu}$	Ende des Erstarrens.

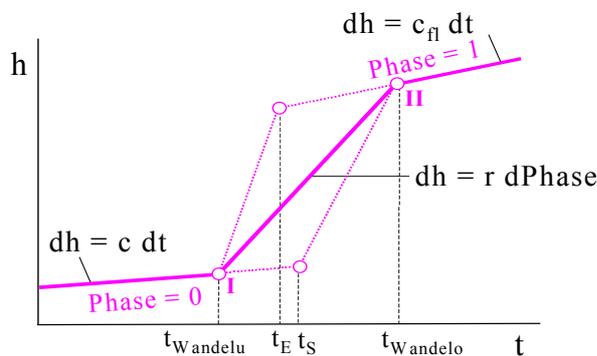
Der Gesamtvorgang vollzieht sich wiederum im Temperaturbereich:  $t_{Wandelu} \dots t_{Wandelo}$ .

Auch für diesen speziellen Ablauf könnte man bei Beachten der vier signifikanten Temperaturen, die den Phasenwandel einleiten bzw. beenden sowie der unterschiedlichen Phasenwandelenthalpien beim Schmelzen und Erstarren einen umfangreichen Algorithmus erstellen.



**Bild 3.5** Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t, \text{Phase})$  in Abhängigkeit der Materialtemperatur  $t$  und des verlaufsabhängigen Phasenzustandes  $\text{Phase}$  bei einer Hysterese nach Form B

Stark vereinfachend würde sich analog zu Bild 3.4 ein linearer Ersatzverlauf für den Phasenwandel gemäß Bild 3.6 anbieten.



**Bild 3.6** Näherungsweise Nachbildung der Hystereseform B durch Definition einer linearen Zustandsänderung  $h(t)$  während des Phasenwandels

- **Diskussion zur Hysterese und ihrer vereinfachten Nachbildung**

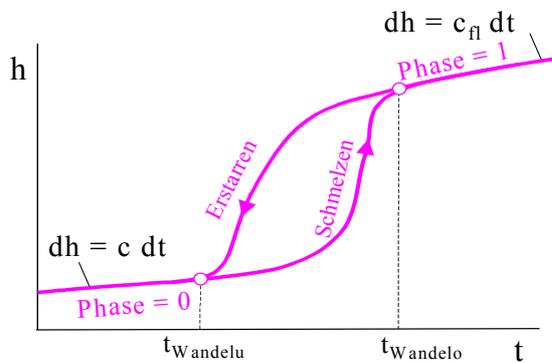
□ Das Hauptproblem besteht darin, dass die spezifische Enthalpie des Speichermaterials keine eindeutige Temperatur- oder Phasenfunktion mehr ist. Genaugenommen stellt sie somit im Bereich zwischen Schmelzen und Erstarren keine reine Zustandsgröße dar, sondern ist eine von der Prozessführung – also eine vom Weg – abhängige Größe. Im Bereich  $t_{\text{Wandelo}} \dots t_{\text{Wandelu}}$  können beispielsweise zur Temperatur  $t^*$  zwei Grenzspeicherzustände  $h_u$  und  $h_o$  gehören, wie die grünen Eintragungen in den Bildern 3.2 und 3.5 verdeutlichen.

□ Eine genaue Algorithmierung wäre nur dann zielführend, wenn die Lade- und Entladezyklen stets vollkommen erfolgten. Dies ist in praxi aber nicht gegeben, denn im Speichermaterial wird es stets Bereiche geben, die beispielsweise nach einem Teilerstarren bereits wieder eine Wärmezufuhr erhalten und umgekehrt. D. h., es sind auch Be- und Entladevorgänge im Bereich  $t_{\text{Wandelo}} \dots t_{\text{Wandelu}}$  möglich, ohne dass vorher die Zustände Phase = 0 oder Phase = 1 erreicht waren. Die Zustandsverläufe bei Teilent- und Teilbeladungen bewegen sich in unterschiedlichen Formen zwischen den Schmelz- und Erstarrungskurven.

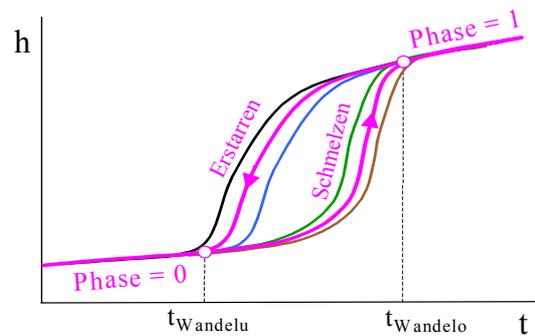
□ Hinzu kommt, dass die realen Vorgänge in der Regel dadurch gekennzeichnet sind, dass oftmals keine definierten Eckpunkte der Zustandsverläufe existieren. Es ergeben sich beispielsweise Verläufe der spezifischen Enthalpie als Funktion der Temperatur, die dem Bild 3.7 qualitativ entsprechen.

□ Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass die Temperaturänderungsgeschwindigkeit im Speichermaterial die Form des Phasenwechsels mitunter signifikant beeinflusst (Bild 3.8) [3]. Dabei

stellt die resultierende Temperaturänderungsgeschwindigkeit an den einzelnen Orten  $i, j, k$  im Latentspeichermaterial eine sehr komplexe Funktion dar. Es nehmen Einfluss: Wärmekapazität und Temperatur des Medienstromes zur Speicherbe- bzw. -entladung, die zeitlichen und örtlichen Wärmeübergangsbedingungen am Speicherkörper sowie die Wärmeleitvorgänge im Speichermaterial. Somit ist eine Vorausberechnung der real auftretenden Temperaturänderungsgeschwindigkeit in der Regel nicht möglich.



**Bild 3.7** Qualitatives Beispiel für einen realen Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t)$  in Abhängigkeit der Materialtemperatur  $t$  und der Richtung des Phasenwandels bei einer bestimmten Temperaturänderungsgeschwindigkeit



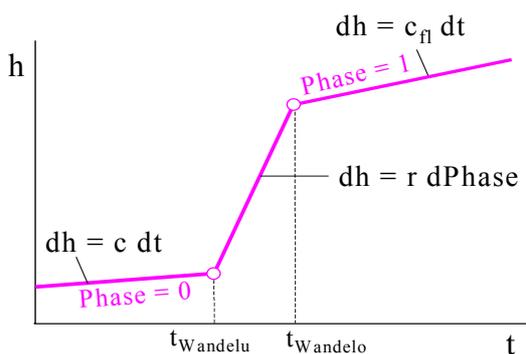
**Bild 3.8** Qualitative Beispiele für reale Verläufe der spezifischen Enthalpie  $h(t)$  in Abhängigkeit der Materialtemperatur  $t$  und der Richtung des Phasenwandels bei unterschiedlichen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten gemäß den farbigen Kurven

Als pragmatisch begründete Näherung wird im Weiteren der lineare Zustandsverlauf zwischen den Punkten I ( $t_{\text{Wandelu}}$ , Phase = 0) und II ( $t_{\text{Wandelo}}$ , Phase = 1) gemäß den Bildern 3.4 und 3.6 verwendet. Er bietet den Vorteil der eindeutigen Zuordnung  $h(t)$ .

- Einheitliche Näherung für den Phasenwandel mit Hysterese

Es wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Schmelz- und Erstarrungstemperaturen existieren, sich der gesamte Prozessablauf aber innerhalb der Grenzen  $t_{\text{Wandelu}}$  sowie  $t_{\text{Wandelo}}$  vollzieht. Der Verlauf  $h(t)$  nach Bild 3.9 stellt einen Ersatzprozess der realen Vielfalt dar. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass eine eindeutige Funktion zwischen der spezifischen Enthalpie  $h$  und der Materialtemperatur  $t$  besteht. Im Bereich  $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$  sei weiterhin ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Temperatur  $t$  und dem geschmolzenen Materialanteil Phase gegeben. Somit gelten im Unterschied zum Idealprozess nach Gl. (3.5) die Beziehungen:

$$h = h(t); \quad \text{Phase} = \text{Phase}(t = t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}). \quad (3.9)$$



**Bild 3.9** Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t)$  in Abhängigkeit der Materialtemperatur  $t$  als Approximation des Realfalles unterschiedlicher Formen des Phasenwechsels. Im Bereich  $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$  besteht ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang zwischen dem Phasenzustand und der Temperatur:  $\text{Phase} = \text{Phase}(t)$ .

Mit der bekannten Definition für den Phasenzustand  $\text{Phase}_{i,j,k}$  für das Volumenelement an der Stelle  $i, j, k$  kann dann die Zuordnung der Temperatur  $t_{i,j,k}$  hergestellt werden:

$$t_{i,j,k} = t_{\text{Wandelu}} + \text{Phase}_{i,j,k} (t_{\text{Wandelo}} - t_{\text{Wandelu}}) \quad \text{für } t_{i,j,k} = t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}} \quad (3.10)$$

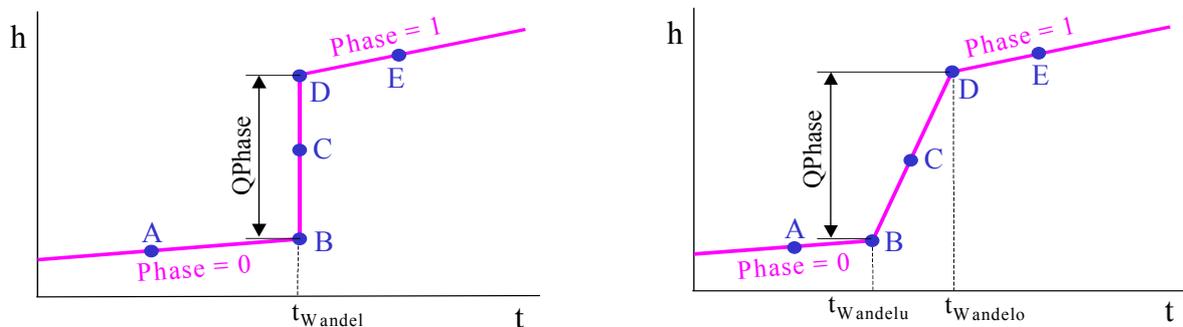
Der im Bild 3.9 dargestellte, aus drei Abschnitten bestehende temperaturabhängige Verlauf der spezifischen Enthalpie  $h(t)$  könnte nach einem einheitlichen thermodynamischen Berechnungsverfahren behandelt werden, indem lediglich unterschiedliche spezifische Wärmekapazitäten Berücksichtigung fänden. Davon wird jedoch abgesehen, um weiterhin eine Analogie zum Idealfall des Phasenwandels zu wahren und um in allen Schritten des Algorithmus auch den Phasenwandelzustand  $\text{Phase}_{i,j,k}$  zu dokumentieren. Damit gelten auch unverändert die Phasenumwandlungswärme bezogen auf die Elementmasse  $Q_{\text{Phase}}$  nach Gl. (3.3) sowie für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{PH}}$  nach Gl. (3.4).

**Hinweis:** Häufig wird als Ergebnis der experimentellen Befunde die spezifische Wärmekapazität  $c_{\text{PCM}}$  des Latentspeichermaterials einschließlich des Phasenwandelbereiches als Temperaturfunktion dargestellt. Führt man dieses Ergebnis in die numerische Berechnung ein, können mitunter relativ große Fehler entstehen. Demgegenüber stellt die Phasenwandelenthalpie  $r$  quasi eine "summarische Ergebnisgröße" dar, deren Anteile  $r \times \text{Phase}$  stets auf die "Summengröße" bezieht.

Die im Idealfall des Phasenwechsels angesprochene Komplexität des Berechnungsverfahrens erhöht sich bei Beachten der Hysterese weiter. Sie wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

### 3.2.3 Einheitlicher Algorithmus zur Ermittlung der Temperatur- und Phasenänderung

Zur rechnerischen Verfolgung der Temperaturänderung im sensiblen und im latenten Wärmespeicherbereich sowie unter den Besonderheiten des idealen Phasenwandels (Abschnitt 3.2.1) und des Phasenwandels mit Hysterese (Näherung nach Abschnitt 3.2.2) ist der nachfolgende Rechenablauf entwickelt worden. Er berücksichtigt die Zustandsänderungen, die von allen real möglichen Punkten A, B, C, D, E (Bild 3.10) ausgehen und deren Wärmeeintrag in das Volumenelement  $i, j, k$  positiv oder negativ ist ( $Q_E > 0$ ,  $Q_E = 0$ ,  $Q_E < 0$ ). Weiterhin finden unterschiedliche Größen des Wärmeeintrags Beachtung:  $|Q_E| = 0 \dots > Q_{\text{Phase}}$ . Damit ist es selbstverständlich auch möglich, den kompletten Phasenwandel von "fest" bis "flüssig" oder umgekehrt zu verfolgen.



**Bild 3.10** Links: Idealfall des Phasenwandels bei konstanter Temperatur  $t_{\text{Wandel}} = t_{\text{Wandelu}} = t_{\text{Wandelo}}$   
 Rechts: Näherung für Phasenwandel mit veränderlicher Temperatur  $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$  (Hysterese)  
 Der Algorithmus ist universell gestaltet, sodass alle Punkte A bis E Ausgangspunkte und gleichzeitig auch Endpunkte der Zustandsänderung sein können. Für die einem Volumenelement  $\Delta V$  zugeführte Wärme  $Q_E$  kann gelten:  $Q_E > 0$ ,  $Q_E = 0$ ,  $Q_E < 0$  sowie  $|Q_E| = 0 \dots > Q_{\text{Phase}}$ .

Der nachfolgend dargestellte Berechnungsablauf (Bild 3.11) berücksichtigt die Tatsache, dass der Speicherkörper aus mehreren PCM-Speicherschichten  $s$  bestehen kann.

Zur Verringerung der Zugriffszeiten sind verschiedene mit  $i, j, k$  indizierte Größen während der speziellen Berechnung durch einfache Variable ersetzt, beispielsweise gilt  $PH = \text{Phase}(i, j, k)$  usw.

```

'Übergabe der vorhandenen Feldgrößen
tE = t(i, j, k)
PH = Phase(i, j, k)
'Ermittlung der neuen Temperatur ohne Beachten des Phasenwandels
QER = 0 'QER bedeutet Restwärme im Element
If tE <= tWandelu(s) And PH = 0 Then
    tneu = tE + QE / CE(s)
    If tneu >= tWandelu(s) Then QER = QE - CE(s) * (tWandelu(s) - tE)
ElseIf tE >= tWandelo(s) And PH = 1 Then
    tneu = tE + QE / CEfl(s)
    If tneu <= tWandelo(s) Then QER = QE - CEfl(s) * (tWandelo(s) - tE)
Else
    QER = QE : tneu = tE
End If
'Phasenwandel im Idealfall oder mit Hysterese
If PH < 1 And QER > 0 Then
    'Aufheizfall
    If QER < (1 - PH) * QPhase(s) Then
        PH = PH + QER / QPhase(s)
        tneu = tWandelu(s) + PH * (tWandelo(s) - tWandelu(s))
    Else
        tneu = tWandelo(s) + (QER - (1 - PH) * QPhase(s)) / CEfl(s)
        PH = 1
    End If
ElseIf PH > 0 And QER < 0 Then
    'Abkühlfall
    If Math.Abs(QER) < PH * QPhase(s) Then
        PH = PH + QER / QPhase(s)
        tneu = tWandelu(s) + PH * (tWandelo(s) - tWandelu(s))
    Else
        tneu = tWandelu(s) + (QER + PH * QPhase(s)) / CE(s)
        PH = 0
    End If
End If
'Rückgabe der ermittelten Werte als neue Feldgrößen
tn(i, j, k) = tneu
Phase(i, j, k) = PH

```

**Bild 3.11** Universeller Algorithmus zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsänderung in Latentspeichermaterialien (vgl. auch Bild 3.10)

### 3.3 Rohre und Kanäle im Speicherkörper

Der Speicherkörper wird von Rohren und/oder Kanälen durchzogen, wie die Geometriemodellierung (Abschnitt 2) bereits kenntlich machte. Obwohl die [geometrischen Querschnitte stets Rechtecke](#) darstellen, werden die wärmetechnischen Größen [Wärmeübergangskoeffizient](#) vom Durchflussmedium an die Rohr- bzw. Kanalwand  $\alpha_R$  und [Teilwärmedurchgangskoeffizient](#)  $\kappa_R$ , der vom Durchflussmedium bis zur äußeren Rohr- bzw. Kanalwand definiert ist, für die [reale Geometrie](#) und die jeweils [aktuelle Situation](#) berechnet.

Den Rohren bzw. Kanälen  $n$  ist jeweils ein [Konstruktionstyp R1, R2, K1, K2](#) zugeordnet. D. h., es können maximal zwei unterschiedliche Rohr- und Kanalvarianten eingesetzt werden. Es sind den

Typen nachfolgend genannte Größen zugeordnet:

- **Reale Abmessungen und Materialdaten**

$d_a(\text{Typ})$	Außendurchmesser
$b_a(\text{Typ})$	äußere Kanalbreite
$h_a(\text{Typ})$	äußere Kanalhöhe
$\delta_R(\text{Typ})$	Wanddicke
$\lambda_R(\text{Typ})$	Wärmeleitfähigkeit der Wand

- **Wärme- und strömungstechnische Größen**

$M_{\text{Art}}(\text{Typ})$	Art des Durchflussmediums (1 Wasser, 2 wässrige Lösung mit Tyfocor L 40 %, 3 wässrige Lösung mit Tyfocor L 50 %, 4 Luft)
$\dot{V}_h(\text{Typ})$	Volumenstrom am Eintritt in den Speicherkörper bezogen auf $Zahl(\text{Typ})$
$Zahl(\text{Typ})$	Anzahl der Rohre bzw. Kanäle gleichen Typs
$Richtung(\text{Typ})$	Durchflussrichtung des Mediums bezogen auf die Orientierung der i-Achse nach Bild 2.4 (1 wie i-Achse, -1 entgegen i-Achse)
$T\_Typ(\text{Typ})$	Typ eines zeitlichen Temperaturverlaufs am Eintritt in den Speicherkörper (Es können je zwei Flüssigkeits- und Lufttemperaturverläufe aufgerufen werden. Zu einem Lufttemperaturverlauf gehört stets auch ein zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte. Ihre Inhalte und Darstellungsformen werden später erläutert.).

### 3.3.1 Geometrische Größen

Ausgehend vom Rohraußendurchmesser  $d_a(\text{Typ})$  bzw. von den Kanalabmessungen Außenbreite  $b_a(\text{Typ})$  und Außenhöhe  $h_a(\text{Typ})$  ergeben sich unter Beachten der Wanddicken  $\delta_R(\text{Typ})$  schrittweise:

#### Innenabmessung

$$\text{für Rohre } d_i(\text{Typ}) = d_a(\text{Typ}) - 2 \delta_R(\text{Typ})$$

$$\text{für Kanäle } b_i(\text{Typ}) = b_a(\text{Typ}) - 2 \delta_R(\text{Typ}), \quad h_i(\text{Typ}) = h_a(\text{Typ}) - 2 \delta_R(\text{Typ}) \quad (3.11)$$

#### äußere Oberfläche (Länge 1 m)

$$\text{für Rohre } A_a(\text{Typ}) = \pi d_a(\text{Typ}); \quad \text{für Kanäle } A_a(\text{Typ}) = 2 (b_a(\text{Typ}) + h_a(\text{Typ})) \quad (3.12)$$

#### innere Oberfläche (Länge 1 m)

$$\text{für Rohre } A_i(\text{Typ}) = \pi d_i(\text{Typ}), \quad \text{für Kanäle } A_i(\text{Typ}) = 2 (b_i(\text{Typ}) + h_i(\text{Typ})) \quad (3.13)$$

#### mittlere Oberfläche zur Bestimmung des Wärmeleitwiderstandes in der Wand (Länge 1 m)

$$\text{für Rohre } A_m(\text{Typ}) = \frac{A_a(\text{Typ}) - A_i(\text{Typ})}{\ln \frac{A_a(\text{Typ})}{A_i(\text{Typ})}}$$

$$\text{für Kanäle } A_m(\text{Typ}) = 0,43 A_a(\text{Typ}) + 0,57 A_i(\text{Typ}) \quad \text{nach [4]} \quad (3.14)$$

**äußere Querschnittsfläche**

$$\text{für Rohre } A_{q_a}(\text{Typ}) = \pi (d_a(\text{Typ}))^2 / 4, \quad \text{für Kanäle } A_{q_a}(\text{Typ}) = b_a(\text{Typ}) h_a(\text{Typ}) \quad (3.15)$$

**innere Querschnittsfläche**

$$\text{für Rohre } A_{q_i}(\text{Typ}) = \pi (d_i(\text{Typ}))^2 / 4, \quad \text{für Kanäle } A_{q_i}(\text{Typ}) = b_i(\text{Typ}) h_i(\text{Typ}) \quad (3.16)$$

**hydraulischer Durchmesser** (Innerer Kanalumfang  $U_i \equiv$  Maßzahl von  $A_i$ )

$$\text{für Rohre } d_h(\text{Typ}) = d_i(\text{Typ}), \quad \text{für Kanäle } d_h(\text{Typ}) = 4 A_{q_i}(\text{Typ}) / A_i(\text{Typ}). \quad (3.17)$$

Die Rohr- bzw. Kanallängen ergeben sich nach Bild 2.4 einheitlich zu  $L_R = \Delta x (iS_{\max} + 1)$ .

**3.3.2 Eintrittsparameter der Medienströme**

Die maximal **vier unterschiedlichen Temperaturverläufe** ( $T_{\text{Typ}} = 1 \dots 4$ ) werden durch **stündliche Stützstellen** definiert (Tagesstunde 1 ... 24). Die Temperatur zur Tagesstunde 0 ist identisch mit der der Tagesstunde 24. Zunächst sei angenommen, dass sich während des Speicherbetriebs die Temperaturgänge täglich wiederholen. Es sind jedoch mehrere **Entwurfstage (Designdays)** definierbar.

Bei einer Programmweiterentwicklung ist beabsichtigt, wahlweise anstelle der Entwurfstage auch Abschnitte aus dem Testreferenzjahr zu verwenden.

Es gelten am Eintritt in den Speicher nachfolgende Temperaturverläufe:

$t_{F1}(\text{ETagfix, Stunde})$  Temperatur für den **Flüssigkeitsstrom 1** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**

$t_{F2}(\text{ETagfix, Stunde})$  wie vor für den Flüssigkeitsstrom 2

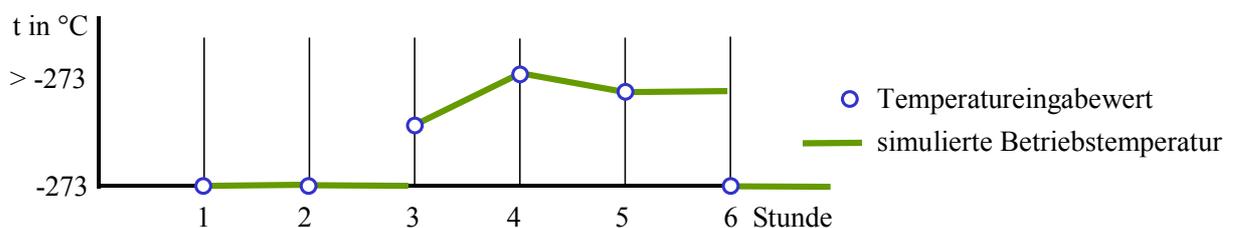
$t_{L1}(\text{ETagfix, Stunde})$  Temperatur für den **Luftstrom 1** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**

$t_{L2}(\text{ETagfix, Stunde})$  wie vor, jedoch für den Luftstrom 2

$x_{L1}(\text{ETagfix, Stunde})$  absolute Feuchte des **Luftstromes 1** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**

$x_{L2}(\text{ETagfix, Stunde})$  wie vor, jedoch für den Luftstrom 2.

Sind die Temperaturstundenwerte mit  $-273 \text{ °C}$  gefüllt, so bedeutet dies, dass zu dieser Zeit kein Mediendurchfluss erfolgen soll. Entsprechend der Simulationszeit wird zwischen den Stützstellen linear interpoliert. Hat eine der beiden Stützstellen den Wert  $-273 \text{ °C}$ , dann gilt die vorhergehende Temperatur noch die gesamte Stunde (Bild 3.12).



**Bild 3.12** Schema der Temperaturinterpolation

Die Interpolationswerte werden dem jeweiligen Temperaturverlaufstyp  $T\_Typ$  zugeordnet, der wiederum ein oder mehreren Rohr- bzw. Kanaltypen  $Typ$  zugehörig ist. Die Eintrittswerte der Medienströme können somit durch folgende Bezeichnungen aufgerufen werden:

$t_M(T\_Typ(Typ))$  Betriebstemperatur für den zum Rohr- bzw. Kanaltyp gehörigen Medienstrom

$x_M(T\_Typ(Typ))$  absolute Feuchte für den zum Rohr- bzw. Kanaltyp gehörigen Luftstrom.

### 3.3.3 Durchflussmedien und ihre Stoffwerte

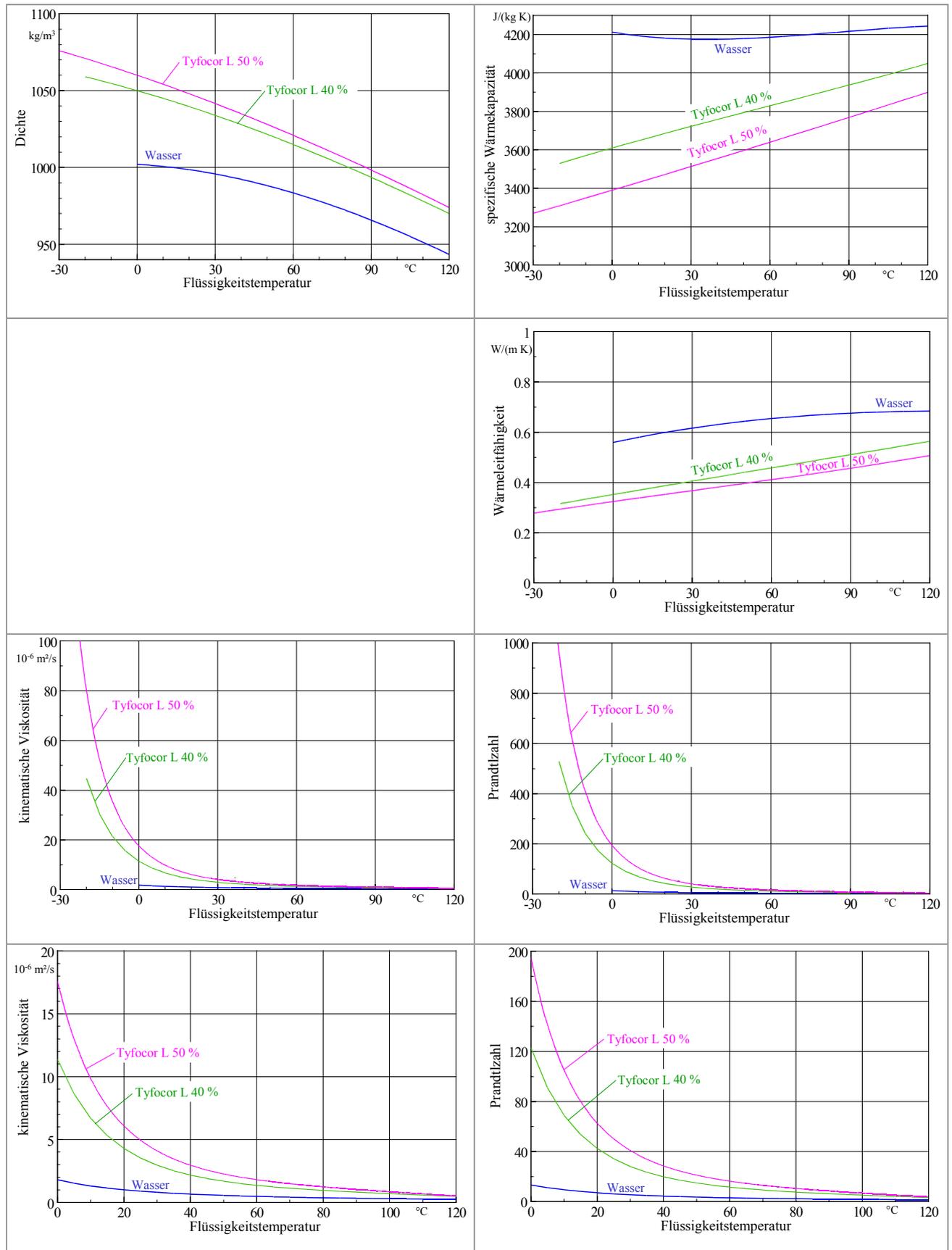
Für die Vielzahl der Einsatzfälle werden **Wasser**, **Tyfocon L** (Wasser-Propylenglykol-Gemisch bei Mischungsanteilen von ca. 40 % bis -20 °C, bei 50 % bis -30 °C frostsicher) und **feuchte Luft** als realistische, nichtgesundheitsgefährdende Medien ausgewählt. Die Kurzbezeichnungen für die wässrigen Tyfoconlösungen lauten im Weiteren **TL40** und **TL50**.

Für die genannten Flüssigkeiten und für Temperaturen bis 120 °C werden entsprechende Approximationen nach [5, 6] vorgeschlagen. Die Zusammenstellung findet sich in Tabelle 3.1, die Visualisierung zeigt die Zusammenstellung in Tabelle 3.2.

**Tabelle 3.1** Approximationen für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfoconlösungen TL40, TL50

<b>Dichte in kg/m<sup>3</sup> mit t in °C</b>
$\rho_{\text{Wasser}} = 1002,045 - 0,1029905 t - 0,003698162 t^2 + 0,000003991053 t^3$ $\rho_{\text{TL40}} = 1050 - 0,4857143 t - 0,001746031 t^2 + 0,000001984122 t^3$ $\rho_{\text{TL50}} = 1060 - 0,5744433 t - 0,001333469 t^2 + 0,00000123557 t^3$
<b>Spezifische Wärmekapazität in J/(kg K) mit t in °C</b>
$c_{\text{Wasser}} = 4212,404 - 2,271266 t + 0,0396373 t^2 - 0,0001543466 t^3$ $c_{\text{TL40}} = 3610 + 3,881099 t - 0,005363271 t^2 + 0,00002980124 t^3$ $c_{\text{TL50}} = 3390 + 4,061141 t + 0,001943512 t^2 - 0,000003081372 t^3$
<b>Wärmeleitfähigkeit in W/(m K) mit t in °C</b>
$\lambda_{\text{Wasser}} = 0,5587913 + 0,002268458 t - 0,00001248304 t^2 + 0,00000001890318 t^3$ $\lambda_{\text{TL40}} = 0,3520003 + 0,001788111 t - 0,0000005362851 t^2 + 0,00000000297968 t^3$ $\lambda_{\text{TL50}} = 0,3239999 + 0,001479443 t - 0,000001361057 t^2 + 0,00000001450588 t^3$
<b>Kinematische Viskosität in m<sup>2</sup>/s mit t in °C</b>
$\nu_{\text{Wasser}} = (556272,7 + 19703,39 t + 124,4091 t^2 - 0,3770952 t^3)^{-1}$ $\nu_{\text{TL40}} = 0,0000114 \cdot \text{Exp}(-0,0002167876 - 0,05785851 t + 0,0004864946 t^2 - 0,00000186843 t^3)$ $\nu_{\text{TL50}} = 0,0000176 \cdot \text{Exp}(-0,001128279 - 0,06354911 t + 0,0005709107 t^2 - 0,000002381843 t^3)$
<b>Prandtlzahl mit t in °C</b>
$Pr_{\text{Wasser}} = (0,07547718 + 0,00276297 t + 0,00003210257 t^2 - 0,0000001015768 t^3)^{-1}$ Die Prandtlzahlen für Tyfocon L werden aus den Einzelgrößen gebildet: $Pr = \frac{v}{a} = \frac{v \rho c}{\lambda}$

**Tabelle 3.2** Grafiken für die Stoffwerte von Wasser und wässrigen Tyfocorlösungen TL40, TL50



Die Zustands- und Stoffwerte für feuchte Luft sind von den Parametern Temperatur und Wasserdampfgehalt abhängig. Deshalb ergeben sich komplexe Zusammenhänge, die durch das Zusammenwirken von mehreren Unterprogrammen und Näherungsgleichungen zu lösen sind. Sie können Tabelle 3.3 auf der Basis von [5] entnommen werden.

**Tabelle 3.3** Näherungsgleichungen und Unterprogramme zur Ermittlung der Zustands- und Stoffdaten von feuchter Luft

Es gelten die Indizes: W für Wasserdampf, L für feuchte Luft, tL für trockene Luft, S für Sättigung.

<b>Dampf- und Sublimationsdruckkurve für Wasser (oberhalb bzw. unterhalb des Tripelpunktes)</b>
Dampfdruckkurve in Pa im Temperaturbereich $0,01\text{ °C} \leq t \leq 100\text{ °C}$ $p_S = 611 \cdot \text{Exp}(-0,000191275 + 0,07258 t - 0,0002939 t^2 + 0,0000009841 t^3 - 0,00000000192 t^4)$
Sublimationsdruckkurve in Pa im Temperaturbereich $-20\text{ °C} \leq t \leq 0,01\text{ °C}$ $p_S = 611 \cdot \text{Exp}(-0,0004909965 + 0,08183197 t - 0,0005552967 t^2 - 0,00002228376 t^3 - 0,0000006211808 t^4)$
Dampfdruckkurve in °C im Druckbereich $611\text{ Pa} \leq p \leq 101320\text{ Pa}$ $t_S = -63,16113 + 5,36859 (\ln p) + 0,973587 (\ln p)^2 - 0,0738636 (\ln p)^3 + 0,00481832 (\ln p)^4$
Sublimationsdruckkurve in °C im Druckbereich $103\text{ Pa} \leq p \leq 611\text{ Pa}$ $t_S = -61,125785 + 8,1386 (\ln p) - 0,07422003 (\ln p)^2 + 0,06283721 (\ln p)^3 - 0,0027237063 (\ln p)^4$
<b>Dichte feuchter Luft in <math>\text{kg}_L/\text{m}^3</math> mit <math>p</math> in Pa, <math>t</math> in °C und <math>x</math> in <math>\text{kg}_W/\text{kg}_L</math></b>
$\rho_L = \frac{1+x}{x+0,6222} \frac{1}{461,4} \frac{p}{273+t}$
<b>Spezifische Wärmekapazität feuchter Luft in <math>\text{J}/(\text{kg}_L \text{ K})</math> mit <math>t</math> in °C und <math>x</math> in <math>\text{kg}_W/\text{kg}_L</math></b>
$c_{tL} = 1006,5 + 0,005309587 t + 0,0004758596 t^2 - 0,0000001136145 t^3$ Näherungsweise wird für $c_W$ mit $t \geq 0\text{ °C}$ eine partialdruckunabhängige Form verwendet: $c_W = 1863 + 0,2680862 t + 0,0006794704 t^2 - 0,0000002641422 t^3$ Die Mittelung der spezifischen Wärmekapazität erfolgt mit dem Masseanteil $x$ : $c_L = \frac{c_{tL} + x c_W}{1+x}$
Bei $t < 0\text{ °C}$ gilt $c_L \approx c_{tL}$ mit einem maximalen Fehler von etwa 0,3 %.
<b>Wärmeleitfähigkeit für feuchte Luft in <math>\text{W}/(\text{m K})</math> mit <math>t</math> in °C und <math>x</math> in <math>\text{kg}_W/\text{kg}_L</math></b>
$\lambda_{tL} = 0,024178 + 0,00007634878 t - 0,00000004663859 t^2 + 0,0000000004612639 t^3$ Näherungsweise wird für $\lambda_W$ mit $t \geq 0\text{ °C}$ eine partialdruckunabhängige Form verwendet: $\lambda_W = 0,016976 + 0,000057535 t + 0,0000001277125 t^2 - 0,0000000008951228 t^3$ Die Mittelung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt mit dem Volumenanteil $\Phi$ : $\Phi = \frac{p_W}{p} = \frac{x}{0,6222+x}$ $\lambda_L = (1 - \Phi) \lambda_{tL} + \Phi \lambda_W$
Bei $t < 0\text{ °C}$ gilt $\lambda_L \approx \lambda_{tL}$ mit einem maximalen Fehler von etwa 0,2 %.

**Tabelle 3.3** (Fortsetzung)

<p><b>Dynamische und kinematische Viskosität für feuchte Luft in Pa s bzw. m<sup>2</sup>/s mit t in °C</b></p> $\eta_{tL} = 0,0000172436 + 0,0000000504587 t - 0,00000000003923361 t^2$ $+ 0,0000000000004046118 t^3$ <p>Näherungsweise wird für <math>\eta_w</math> mit <math>t \geq 0</math> °C eine partialdruckunabhängige Form verwendet:</p> $\eta_w = 0,0000091435 + 0,0000000281979 t + 0,00000000004486993 t^2$ $- 0,0000000000004928814 t^3$ <p>Die Mittelung der dynamischen Viskosität erfolgt mit dem Volumenanteil <math>\Phi</math>:</p> $\eta_L = (1 - \Phi) \eta_{tL} + \Phi \eta_w.$ <p>Bei <math>t &lt; 0</math> °C gilt <math>\eta_L \approx \eta_{tL}</math> mit einem maximalen Fehler von etwa 0,3 %.</p> $\nu_L = \eta_L / \rho_L.$
<p><b>Prandtlzahl für feuchte Luft</b></p> $Pr_L = \nu_L \rho_L c_L / \lambda_L$

Um die Daten für Luft längs der durchströmten Rohre oder Kanäle zu bestimmen, ist sowohl von den Paarungen  $t^*$ ,  $x^*$  als auch von  $h^*$ ,  $x^*$  auszugehen. Die übrigen Zustandswerte folgen dann aus zwei verschiedenen Unterprogrammen nach [5, 7]. Die zum Teil iterativ berechneten Größen sind wiederum mit  $*$  bezeichnet. Die beiden Unterprogramme sind Inhalt der Tabelle 3.4.

**Tabelle 3.4** Unterprogramme zur Bestimmung ergänzender Zustandsdaten für feuchte Luft

<p><b>Bestimmung von relativer Feuchte <math>\phi^*</math>, spezifischer Enthalpie <math>h^*</math> und Taupunkttemperatur <math>t_{\text{tau}}^*</math> aus den Ausgangsparametern <math>t^*</math> und <math>x^*</math> für feuchte Luft</b></p> <p><b>Sub ZUSTAND(<math>t^*</math>, <math>x^*</math>)</b></p> <p><math>pS = p_s(t^*)</math> nach Tabelle 3.3</p> <p><math>pW = x^* \cdot p / (0,6222 + x^*)</math></p> <p><b>If</b> <math>pS - pW \geq -0,00001</math> <b>Then</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xW = x^*</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>\phi^* = pW / pS \cdot 100</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>deltah = 0</math></p> <p><b>Else</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xS = 0,6222 \cdot pS / (p - pS)</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xW = xS</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>If</b> <math>t^* &gt; 0</math> <b>Then</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>deltah = (x^* - xS) \cdot 4,19 \cdot t^*</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>\phi^* = 200</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>Else</b></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>deltah = (x^* - xS) \cdot (-334 + 2,09 \cdot t^*)</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>\phi^* = 300</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><b>End If</b></p> <p><b>End If</b></p> <p><math>t_{\text{tau}}^* = t_s(pW)</math> nach Tabelle 3.3</p> <p><math>h^* = 1,01 \cdot t^* + xW \cdot (2501 + 1,86 \cdot t^*) + deltah</math></p> <p><b>End Sub</b></p>
---

**Tabelle 3.4** (Fortsetzung)

Bestimmung der Lufttemperatur $t^*$ aus den Ausgangsparametern $h^*$ und $x^*$ für feuchte Luft
<pre> Sub ZUSTANDH(<math>h^*</math>, <math>x^*</math>)   hv = <math>h^*</math>   xS = <math>x^*</math>   pS = <math>x^* \cdot p / (0,6222 + x^*)</math>   If pS &gt; 100 Then     ttau = <math>t_s(pS)</math> nach Tabelle 3.3     htau = <math>1,01 \cdot ttau + x^* \cdot (2501 + 1,86 \cdot ttau)</math>     If hv &lt; htau Then       <math>t^* = \text{Int}(ttau + 1)</math>       Do         hr = <math>h^*</math>         <math>t^* = t^* - 1</math>         pS = <math>p_s(t^*)</math> nach Tabelle 3.3         xS = <math>0,6222 \cdot pS / (p - pS)</math>         <math>h^* = 1,01 \cdot t^* + xS \cdot (2501 + 1,86 \cdot t^*)</math>         If <math>t^* &gt; 0</math> Then           <math>h^* = h^* + (x^* - xS) \cdot 4,19 \cdot t^*</math>         Else           <math>h^* = h^* + (x^* - xS) \cdot (-334 + 2,09 \cdot t^*)</math>         End If       Loop While hv &lt; <math>h^*</math>       If hv = hr Then         <math>t^* = t^* + (ttau - t^*) \cdot (hv - h^*) / (htau - h^*)</math>       Else         <math>t^* = t^* + (hv - h^*) / (hr - h^*)</math>       End If     Else       <math>t^* = (hv - x^* \cdot 2501) / (1,01 + x^* \cdot 1,86)</math>     End If   Else     <math>t^* = (hv - x^* \cdot 2501) / (1,01 + x^* \cdot 1,86)</math>   End If End Sub </pre>

### 3.3.4 Durchflussgrößen, Wärmeübergangskoeffizient und Teilwärmedurchgangskoeffizient

Die Zustands- und Stoffwerte der Medienströme am Eintritt in den Speicherkörper werden bestimmt und während des Durchflusses als konstant betrachtet. Die Abarbeitung erfolgt für alle Rohr- und Kanaltypen (Typ).

Zunächst wird das zum Typ gehörige Medium MArt(Typ) ausgewählt und dafür die nachfolgend genannten Größen bestimmt:

- $\rho_M$  Dichte der Flüssigkeit oder der Luft
- $c_M$  spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit oder der Luft
- $\nu_M$  kinematische Viskosität der Flüssigkeit oder der Luft
- $\lambda_M$  Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit oder der Luft

Pr Prandtlzahl.

Die Ermittlung erfolgt in Abhängigkeit der Temperatur  $t_M(\text{Typ})$  und bei Luft zusätzlich von  $x_M(\text{Typ})$  nach den in den Tabellen 3.1 und 3.3 angegebenen Approximationen.

Weiterhin werden berechnet und dem Typ zugeordnet:

**Geschwindigkeit im Rohr bzw. Kanal**

$$w(\text{Typ}) = \frac{\dot{V}_h(\text{Typ})}{A_{q_i}(\text{Typ}) \text{Zahl}(\text{Typ})} \quad (3.18)$$

**Massestrom im Rohr bzw. Kanal**

$$\dot{m}(\text{Typ}) = \frac{\dot{V}_h(\text{Typ}) \rho_M}{\text{Zahl}(\text{Typ})} \quad (3.19)$$

**Wärmekapazitätsstrom im Rohr bzw. Kanal**

$$\dot{C}(\text{Typ}) = \dot{m}(\text{Typ}) c_M. \quad (3.20)$$

Es folgt die **Berechnung des Wärmeübergangs für jeden vorkommenden Typ**:

**Reynoldszahl**

$$\text{Re} = \frac{w(\text{Typ}) d_h(\text{Typ})}{\nu_M} \quad (3.21)$$

**Nußeltzahl bei turbulenter Strömung ( $\text{Re} > 2320$ )**

$$\text{Nu} = \frac{B (\text{Re} - 1000) \text{Pr}}{1 + 12,7 B^{0,5} (\text{Pr}^{0,667} - 1)} \left( 1 + \left( \frac{d_h(\text{Typ})}{L_R} \right)^{0,667} \right) \quad (3.22)$$

mit der Hilfsgröße

$$B = \frac{1}{(5,15 \lg \text{Re} - 4,64)^2}$$

**Nußeltzahl bei laminarer Strömung ( $\text{Re} \leq 2320$ )**

$$\text{Nu} = \left( 49,028 + 4,173 \text{Re} \text{Pr} \frac{d_h(\text{Typ})}{L_R} \right)^{0,333} \quad (3.22a)$$

**Wärmeübergangskoeffizient**

$$\alpha_R = \frac{\text{Nu} \lambda_M}{d_h(\text{Typ})}. \quad (3.23)$$

**Teilwärmehübergangskoeffizient bezogen auf die Außenfläche des Rohres oder Kanals**

$$\kappa_R(\text{Typ}) = \left( \frac{\delta_R(\text{Typ})}{\lambda_R(\text{Typ}) A_m(\text{Typ})} + \frac{1}{\alpha_R A_i(\text{Typ})} \right)^{-1} \frac{1}{A_a(\text{Typ})}. \quad (3.24)$$

Der Wärmeleitwiderstand zwischen Medium und Außenfläche des Durchströmteiles wird bei der numerischen Abarbeitung als Kehrwert  $R = 1/\kappa_R$  gebildet, wenn der Medienstrom auch tatsächlich existiert ( $w(\text{Typ}) > 0$ ).

### 3.3.5 Wärmetechnische Rohr- und Kanalkenngrößen bei Stillstand

Findet kein Mediendurchfluss in den Rohren oder Kanälen statt, werden die Rohrelemente als Festkörper betrachtet. Die Stoffwerte sind als gewichtete Größen aus dem stagnierenden Medium und dem Wandmaterial der Rohr- bzw. Kanalwand zu approximieren. Die Festlegungen haben in Abhängigkeit vom Typ zu erfolgen.

Die typabhängigen Durchfluss- und Materialquerschnitte sind im Abschnitt 3.3.1 bereits bestimmt worden sowie die Materialstoffdaten für die Rohr- bzw. Kanalwandungen  $\lambda_R(\text{Typ})$ ,  $\rho_R(\text{Typ})$  und  $c_R(\text{Typ})$  stehen als Eingabewerte bereit.

Die noch fehlenden Mediendaten bei Stillstand müssten typ- und temperaturabhängig bestimmt werden. Dies wäre sehr aufwändig, da die Ermittlung für jeden Zeitschritt erneut erfolgen müsste. Der Hauptnachteil bei der numerischen Abarbeitung bestünde aber darin, dass die Prüfung der zulässigen Zeitschrittweite (siehe Abschnitt 3.4.2, "Stabilitätskriterium") in jedem Berechnungsschritt erneut erfolgen müsste. Deshalb werden für die zum Einsatz kommenden Durchflussmedien  $M_{\text{Art}}(\text{Typ})$  mittlere Werte für  $\lambda_M$ ,  $\rho_M$  sowie  $c_M$  definiert, die dann während der gesamten Simulation näherungsweise gelten:

	$\lambda_M$ W/(m K)	$c_M$ J/(kg K)	$\rho_M$ kg/m <sup>3</sup>
Wasser	0,67	4200	972
Wässrige Lösung mit 40 % Tyfocor L	0,493	3910	1001
Wässrige Lösung mit 50 % Tyfocor L	0,441	3730	1006
Luft	0,03	1010	1

Für die Rohr/Kanal-Medien-Kombination berechnen sich dann vor Beginn der Simulation:

**mittlere Wärmeleitfähigkeit**

$$\lambda_{\text{app}}(\text{Typ}) = \frac{(Aq_a(\text{Typ}) - Aq_i(\text{Typ})) \lambda_R(\text{Typ}) + Aq_i(\text{Typ}) \lambda_M}{Aq_a(\text{Typ})} \quad (3.25)$$

**Produkt: mittlere Dichte × mittlere spezifische Wärmekapazität**

$$(\rho c)_{\text{app}}(\text{Typ}) = \frac{(Aq_a(\text{Typ}) - Aq_i(\text{Typ})) \rho_R(\text{Typ}) c_R(\text{Typ}) + Aq_i(\text{Typ}) \rho_M c_M}{Aq_a(\text{Typ})} \quad (3.26)$$

### 3.4 Wärmeleitung im Speicherkörper

Es ist die FOURIERSche Differentialgleichung in dreidimensionaler Form mit einer Phasenwandlung für den homogenen, isotropen Körper bei vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen zu lösen. Die bekannte Differentialgleichung lautet

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}_E}{\rho c} \quad (3.27)$$

mit der Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (3.28)$$

und den Einzelgrößen

t	Temperatur	$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
x, y, z	Ortskoordinaten	$\rho$	Dichte
$\tau$	Zeit	c	spezifische Wärmekapazität.
$\dot{q}_E$	Quellenergiebigkeit (Leistung pro Volumeneinheit)		

Das [Material mit Latentspeichereigenschaften \(PCM\)](#) bildet den kompletten Speicherkörper 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 angenommen. Generell kann der Speicherkörper aus maximal drei derartigen Schichten bestehen.

Selbstverständlich gibt es nach Bild 1.1 auch die Möglichkeit, dass einzelne oder alle Schichten des Speicherkörpers lediglich aus sensibel wärmespeichernden Schichten – d. h. ohne Phasenwandlung im betrachteten Temperaturbereich – aufgebaut sind.

Die durch die Phasenumwandlung bedingte latente Wärme wird als innere Wärmequelle oder -senke dargestellt. Die entsprechende Vorgehensweise ist im Abschnitt 3.2 (Speichermaterial) bereits erläutert worden.

Die Rohre und Kanäle werden dagegen nicht als innere Wärmequellen im Speicherkörper behandelt, sondern die durch die Wandungen tretenden Wärmeströme als spezielle Randbedingungen des Speicherkörpers aufgefasst.

Als geeignetes [numerisches Lösungsverfahren](#) wird die [Finite-Volumen-Methode](#) ausgewählt. Die Volumenelemente werden dabei generell als Quaderelemente – wie im Abschnitt 2.2 (Gittermodellierung) bereits behandelt – angesehen (Bild 2.4).

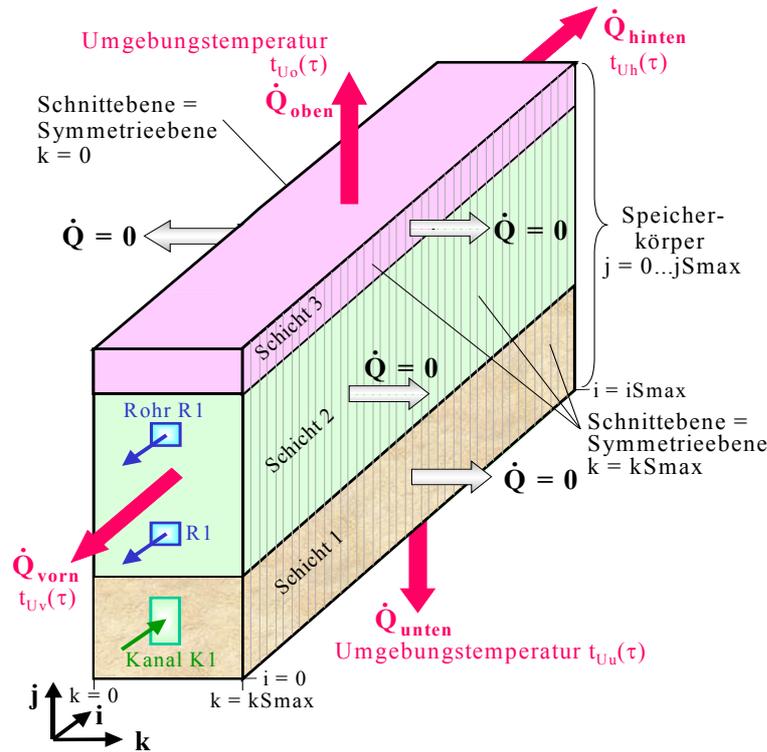
Die Wärmeleitvorgänge zwischen den Volumenelementen sind sehr anschaulich darstellbar. Für jedes Volumenelement wird über den Zeitraum  $\Delta\tau$  eine Wärmebilanz aufgestellt, d. h. alle Wärmeströme über die Elementoberflächen erfasst. Ist die Summe der Wärmeströme  $Q_E$  ungleich Null, liegt ein instationärer Wärmespeichervorgang vor. Die Temperatur- und die Phasenänderung im Element sind zu bestimmen.

Die Anpassung der Wärmetransportvorgänge an den Rändern des Speicherkörpers und an den Oberflächen der Rohre bzw. Kanäle kann beim Einsatz der Finite-Volumen-Methode in anschaulicher Weise erfolgen.

### 3.4.1 Randbedingungen am Speicherkörper

Wie die Auswahl des Simulationsgebietes am zweckmäßigsten zu treffen ist, um die Rechenzeiten möglichst klein zu halten, zeigen beispielhaft die Bilder 2.1 bis 2.3. Während an den Begrenzungsflächen des Speicherkörpers unten, oben, vorn und hinten grundsätzlich eine Wärmeübergangsbe-

dingung dritter Art angenommen werden kann, werde generell an den seitlichen Schnittebenen eine Symmetriebedingung angesetzt. Bild 3.13 verdeutlicht die wärmetechnischen Zusammenhänge.



**Bild 3.13** Kennzeichnung des Simulationsbereiches innerhalb eines Speicherkörpers

Die wärmetechnische Untersuchung des Simulationsgebietes lässt nur an den Bauteilgrenzen unten, oben, vorn und hinten Wärmeströme zu:

$\dot{Q}_{\text{unten}}$ ;  $\dot{Q}_{\text{oben}}$ ;  $\dot{Q}_{\text{vorn}}$ ;  $\dot{Q}_{\text{hinten}}$ .

An den seitlichen Schnittebenen existieren aus Symmetriegründen keine Wärmeströme.

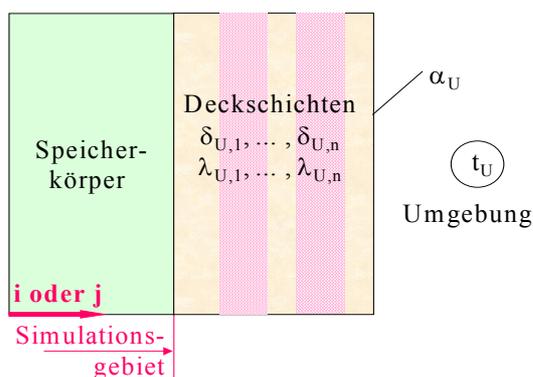
Man beachte, dass die Volumenelemente in der Realität um jeweils eine halbe Abmessung über das gekennzeichnete Gitternetz hinausragen (vgl. Bild 2.4).

### Reale Speicherbegrenzungen

Die **echten Speicherbegrenzungsflächen unten, oben, vorn und hinten** können zusätzlich auch mit einer Schicht, die die Wärme nur eindimensional in Richtung der gekennzeichneten Wärmeströme leitet, bedeckt sein. Typisch für diese Schichten sind **Dämmschichten** zur Vermeidung der Speicheraus Kühlung. Der Wärmeleitwiderstand dieser Schichten, die wiederum aus mehreren Lagen bestehen können, wird zweckmäßigerweise mit dem Wärmeübergangswiderstand  $1/\alpha$  zusammengefasst.

Damit berechnet sich der Wärmeleit- und Wärmeübergangswiderstand an die Umgebung  $R_U$ , der stellvertretend für  $R_u$ ,  $R_o$ ,  $R_v$ , und  $R_h$  steht, zu

$$R_U = \sum_{p=1}^n \frac{\delta_{U,p}}{\lambda_{U,p}} + \frac{1}{\alpha_U} \tag{3.29}$$



**Bild 3.14** Detaillierte Darstellung der Dämm- und Deckschichten auf den realen Speicherbegrenzungsflächen zur Umgebung in i- bzw. j-Richtung mit einem festdefinierten Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_U$

Die Wärmewiderstände  $R_U$  sind dann je nach Lage den entsprechenden Volumenelementen an den realen Speicherbegrenzungen zuzuordnen. Für den **Gesamtwärmeübergangskoeffizienten** (Konvektion und Strahlung)  $\alpha_U$  gelten überschlägig:

### Speicheroberflächen an die Atmosphäre grenzend

$$1/\alpha_U = 0,040 \text{ m}^2 \text{ K/W}; \alpha_U = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

### Speicheroberflächen im Gebäudeinneren

$$1/\alpha_U = 0,130 \text{ m}^2 \text{ K/W}; \alpha_U = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

Sonderfall: Wärmestrom nach unten

$$1/\alpha_U = 0,170 \text{ m}^2 \text{ K/W}; \alpha_U = 5,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

### Speicheroberflächen an das Grundwasser grenzend

$$1/\alpha_U = 0; \alpha_U \rightarrow \infty .$$

Die Umgebungstemperaturen an den realen Speicheroberflächen können Zeitfunktionen darstellen. Sie werden in analoger Weise zu den Eintrittstemperaturen für die Medienströme mit stündlichen Stützstellen definiert. Es gelten:

$t_{Uu}(\text{ETagfix, Stunde})$  Temperatur der Umgebung an der **Speicherunterseite** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**

$t_{Uo}(\text{ETagfix, Stunde})$  Temperatur der Umgebung an der **Speicheroberseite** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**

$t_{Uv}(\text{ETagfix, Stunde})$  Temperatur der Umgebung an der **Speichervorderseite** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**

$t_{Uh}(\text{ETagfix, Stunde})$  Temperatur der Umgebung an der **Speicherhinterseite** am ausgewählten Entwurfstag **ETagfix** zur Zeit **Stunde**.

Sind die Temperaturstundenwerte mit  $-273 \text{ }^\circ\text{C}$  gefüllt, so bedeutet dies, dass zu dieser Zeit der Wärmestrom vom Volumenelement nach außen null sein soll.

Für den betrachteten Simulationszeitpunkt wird zwischen den Stützstellen linear interpoliert bzw. im Sonderfall ein Stundenwert über ein Intervall beibehalten, so wie im Bild 3.12 bereits beschrieben.

Die aktuellen Interpolationswerte tragen die Bezeichnungen:  $t_{Uua}$ ,  $t_{Uoa}$ ,  $t_{Uva}$ ,  $t_{Uha}$ .

### Fiktive Speicherbegrenzungen

Die fiktiven Speicherbegrenzungen werden eingeführt, um die Simulationsgebiete und damit die Rechenzeiten möglichst klein zu halten.

Hierzu gehören stets die **Symmetrieebenen**, die für  $k = 0$  und  $k = k_{\text{Smax}}$  automatisch definiert sind. Von diesen Schnittebenen tritt kein Wärmestrom an die Umgebung.

**Hinweis:** Umfasste der Bereich  $k = 0 \dots k_{\text{Smax}}$  die gesamte Breite des Speicherkörpers, dann würde die Annahme adiabater Seitenflächen – die ja der Bedingung Wärmestrom gleich null entspricht – zu

einem Simulationsfehler führen. Er könnte durch eine wirksame, seitliche Dämmung verringert werden.

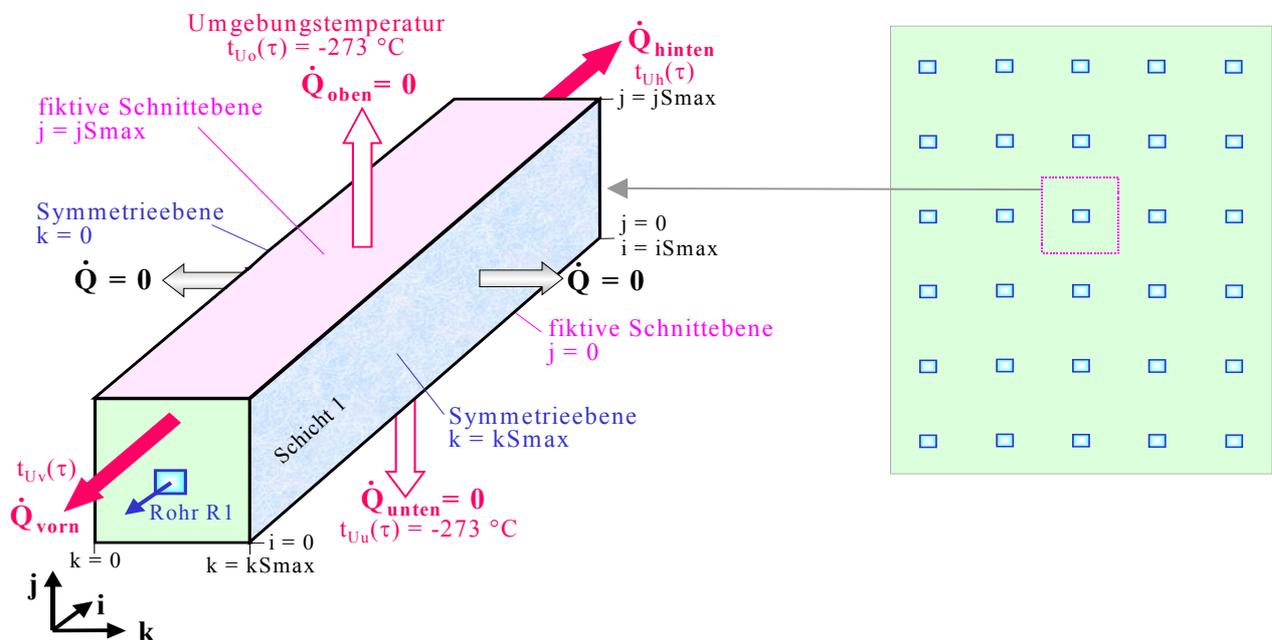
Weitere **fiktive Speicherbegrenzungen** können in einfacher Weise auch in i- oder j-Richtung gebildet werden, wenn die jeweilige Umgebungstemperatur  $t_{Uua}$ ,  $t_{Uoa}$ ,  $t_{Uva}$ ,  $t_{Uha}$  den Wert  $-273\text{ °C}$  besitzt. In i-Richtung ist eine Speicherverkürzung natürlich nur sinnvoll, wenn keine Rohre bzw. Kanäle vorhanden sind, d. h., wenn der Speicherkörper nur über eine der Begrenzungen thermisch aktiviert würde.

**Merke:** Durch die fiktive Speicherbegrenzung fließt kein Wärmestrom, sodass auch Wärmeverluste im Realfall nicht erfassbar sind.

- **Beispiel für einen Ausschnitt aus einem aktivierten Speicherkörper (Bild 3.15)**

Ein Speicherkörper von großer Breite und großer Höhe enthält in regelmäßigen Abständen zahlreiche parallele Rohre gleicher Abmessung. Alle Oberflächen sind gegenüber der Umgebung gut wärmegeklämt.

Zur Verkürzung der Modellierung werde ein in j- und k-Richtung symmetrischer Speicherkörper in Quaderform mit einem einzigen Rohr betrachtet. Die im Algorithmus stets vorgesehenen Symmetrieebenen  $k = 0$  und  $kSmax$  sind entsprechend zu wählen. Die fiktiven Schnittebenen entstehen durch die Festlegung von  $j = 0$  und  $j = jSmax$ . Die nach oben und unten orientierten Wärmeströme werden durch die Umgebungstemperaturvorgaben von  $t_{Uua} = t_{Uoa} = -273\text{ °C}$  null.



**Bild 3.15** Definition eines Ausschnitts (links) aus einem Speicherkörper mit Rohrdurchgang (rechts) zur Verkürzung der Simulationszeit

Die Symmetrieebenen sind durch die Lage von  $k = 0$  und  $k = kSmax$  definiert. Die fiktiven Schnittebenen folgen aus den Festlegungen von  $j = 0$  und  $j = jSmax$ .

Die Volumenelemente ragen jeweils um eine halbe Abmessung über das Gitternetz hinaus (vgl. Bild 2.4).

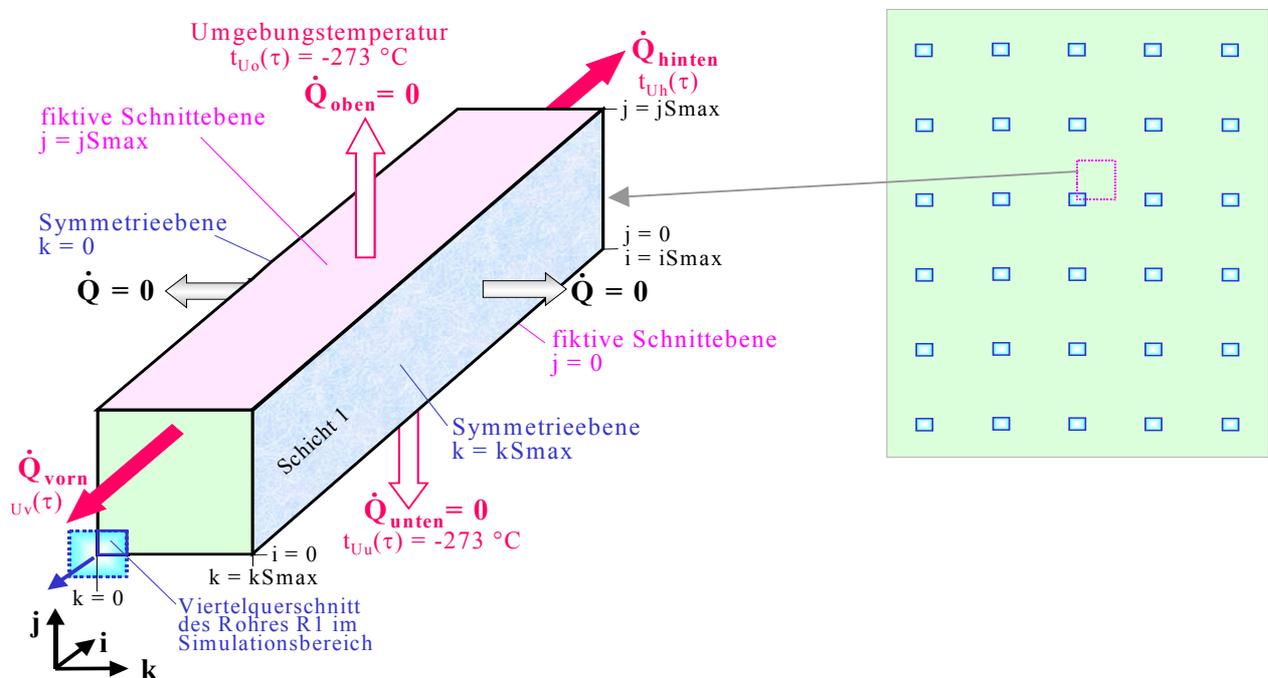
Bei der Simulation bleiben somit die Wärmeströme an die linke, rechte, untere und obere Umgebung unberücksichtigt. Die Wärmeströme an die vordere und hintere Umgebung werden entsprechend den realen Verhältnissen bestimmt. Die eingeschränkte Modellform wird bei einem breiten und hohen Speicherkörper und/oder bei sehr guter Dämmung zu Ergebnissen mit kleinem Fehler führen.

- **Beispiel für einen Minimalausschnitt aus einem aktivierten Speicherkörper (Bild 3.16)**

Der im Bild 3.15 gezeigte Simulationsbereich, der durch vier Symmetrieebenen begrenzt ist, kann noch weiter verkleinert werden, indem das Rohr oder der Kanal nur mit einem Viertel seines Querschnittes einbezogen wird.

Es gelten die bereits beschriebenen Randbedingungen weiterhin.

Die Rechenzeit wird sich gegenüber der im Bild 3.15 definierten Situation auch auf etwa ein Viertel reduzieren.

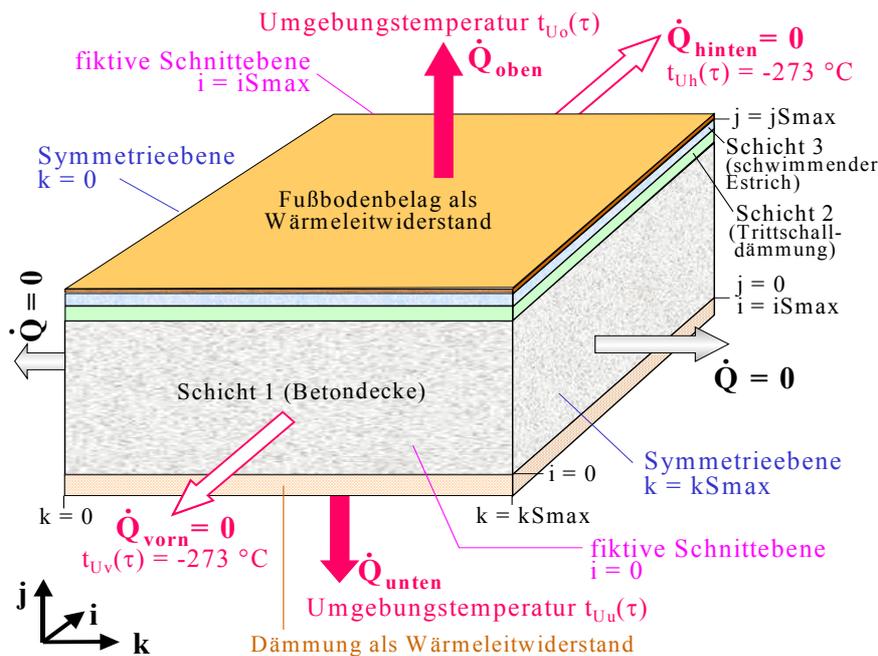


**Bild 3.16** Definition eines Minimalausschnittes (links) aus einem Speicherkörper mit Rohrdurchgang (rechts) zur Verkürzung der Simulationszeit  
Der Simulationsbereich beträgt nur noch ein Viertel des im Bild 3.15 definierten Bereiches.

- **Beispiel für einen Ausschnitt aus einer passiven Speicherdecke (Bild 3.17)**

Ein Speicherkörper von großer Breite und großer Länge, der keine Rohre und/oder Kanäle beinhaltet, wird bezüglich dieser Abmessungen sehr verkürzt dargestellt. Dagegen gibt das Simulationsgebiet den höhenmäßigen Aufbau komplett wieder.

Wärmeströme in und aus dem Speicherkörper sind lediglich über die Unter- bzw. Oberseite des Simulationsbereiches möglich. Somit kann beispielsweise die Speicherdynamik in einer Decke im Tagesgang nachgebildet werden. Da die Deckenfläche in der Regel sehr groß ist, entsteht durch die Vernachlässigung der Wärmeleitung an den Schnittebenen nur ein sehr geringer Fehler.



Beachte zur Skizze:  
Die Volumenelemente ragen jeweils um eine halbe Abmessung über das Gitternetz hinaus (vgl. Bild 2.4).

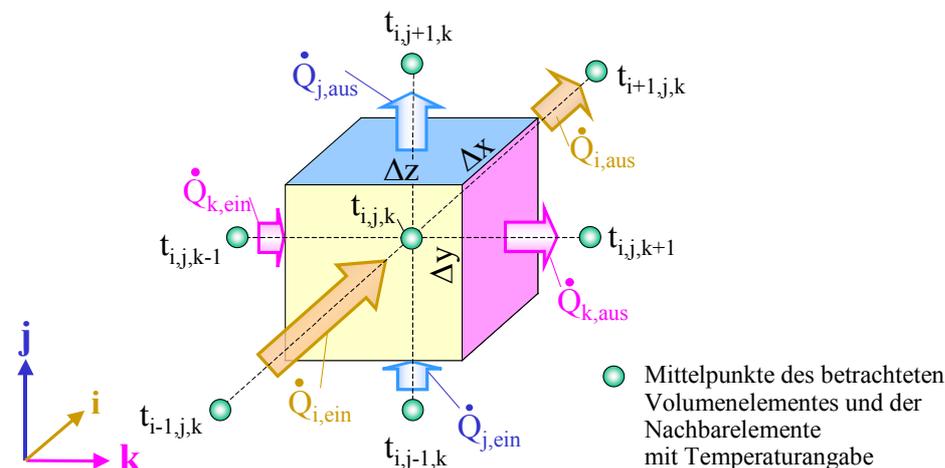
**Bild 3.17** Definition eines Ausschnittes zur verkürzten Simulation eines passiv wirkenden Deckenspeichers über einem Kellerraum (keine Rohrbestückung)  
Die Symmetrieebenen sind durch die Lage von  $k = 0$  und  $k = kS_{max}$  definiert. Die fiktiven Schnittebenen folgen aus den Festlegungen von  $i = 0$  und  $i = iS_{max}$ .  
Als Besonderheiten sind an den Unter- und Oberseiten des Speicherkörpers eindimensional wärmeleitende Schichten ohne Wärmespeicherfähigkeit angeordnet.

### 3.4.2 Wärmebilanz für ein Volumenelement

Die **instationäre Wärmeleitung** im Inneren des Speicherkörpers kann durch die **Wärmeströme**, die die sechs Oberflächen des Quaderelementes passieren, ihre **Bilanzierung** und die daraus resultierende **Temperatur- und/oder Phasenänderung** im Volumenelement numerisch nachgebildet werden.

#### Wärmeströme durch Wärmeleitung

Im Bild 3.18 sind ein Volumenelement im Gitternetz an der Stelle  $i, j, k$  gezeigt und die durch die Oberflächen tretenden Wärmeströme dargestellt.



**Bild 3.18** Quaderelement  $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$  im Gitternetz an der Stelle  $i, j, k$  mit der Temperatur  $t_{i,j,k}$  sowie Kennzeichnung der Temperaturen der Nachbarerlemente und die durch Wärmeleitung übertragenen Wärmeströme

Nach dem FOURIERSchen Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung lautet der Wärmestrom  $\dot{Q}$

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{dt}{dn} A \quad (3.30)$$

mit

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$A$	Fläche, in der die Isothermenfläche $t$ liegt
$dt/dn$	Temperaturgradient.

Würde eine reine Wärmeleitung innerhalb einer Materialschicht von Volumenelement zu Volumenelement durch eine gemeinsame Berührungsfläche erfolgen, dann könnte man beispielsweise nach Bild 3.18 für den in Richtung  $j$  eintretenden Wärmestrom  $\dot{Q}_{j,\text{ein}}$  schreiben:

$$\dot{Q}_{j,\text{ein}} = \lambda \frac{t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}}{\Delta y} \Delta x \Delta z. \quad (3.31)$$

Wäre aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen auch die Wärmeleitfähigkeit in den einzelnen Volumenelementen verschieden, dann könnte man dies durch eine Mittelwertbildung berücksichtigen:

$$\dot{Q}_{j,\text{ein}} = \frac{\lambda_{i,j-1,k} + \lambda_{i,j,k}}{2} \frac{(t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k})}{\Delta y} \Delta x \Delta z.$$

Befindet sich das Volumenelement jedoch an einer **Trennebene** von zwei Schichten  $s$ , wobei möglicherweise unterschiedliche Gitterabstände zusammenstoßen (vgl. Bild 2.4), dann müssen die Wärmeleitwiderstände getrennt berücksichtigt werden:

$$\dot{Q}_{j,\text{ein}} = \left( \frac{\Delta y(s-1)}{2 \lambda_{i,j-1,k}} + \frac{\Delta y(s)}{2 \lambda_{i,j,k}} \right)^{-1} (t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}) \Delta x \Delta z.$$

Dieser Ansatz kann sinngemäß auch bei einer Randbedingung dritter Art (Wärmeübergang) angewendet werden. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn das Volumenelement an den Außenflächen des Speicherkörpers oder an einem Durchflusskanal liegt. Die Temperatur des betrachteten Nachbarelementes ist dann identisch mit der Umgebungstemperatur ( $t_{i,j-1,k} \equiv t_U$ ) oder mit der Temperatur des Durchflussmediums an dieser Stelle ( $t_{i,j-1,k} \equiv t_M$ ). Die angesprochene Randbedingung beinhaltet bei diesen Betrachtungen anstelle des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  den Teilwärmedurchgangskoeffizienten  $\kappa_R$  nach der Definition für Rohre Gl. (3.24) oder am Speicherrand den Wärmeübergangswiderstand  $R_U$  nach Gl. (3.29), der nach Bild 3.14 auch nichtspeichernde Deckschichten beinhaltet:

$$\dot{Q}_{j,\text{ein}} = \left( \frac{1}{\kappa_R} + \frac{\Delta y(s)}{2 \lambda_{i,j,k}} \right)^{-1} (t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}) \Delta x \Delta z ; \quad \dot{Q}_{j,\text{ein}} = \left( R_U + \frac{\Delta y(s)}{2 \lambda_{i,j,k}} \right)^{-1} (t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}) \Delta x \Delta z.$$

Zweckmäßigerweise arbeitet man generell mit der Definition für den Wärmeleitwiderstand des Elementes (hier beispielsweise in  $j$ -Richtung)  $RE_{j,i,j,k}$  und setzt variantenabhängig:

$$\text{RE}_{j_{i,j,k}} = \frac{\Delta y(s)}{2 \lambda_{i,j,k}} \quad \text{bzw.} \quad \text{RE}_{j_{i,j-1,k}} = \frac{\Delta y(s)}{2 \lambda_{i,j-1,k}} \quad \text{für ein Volumenelement innerhalb der Schicht } s$$

$$\text{RE}_{j_{i,j-1,k}} = \frac{\Delta y(s-1)}{2 \lambda_{i,j-1,k}} \quad \text{für ein angrenzendes Volumenelement, das in der Schicht } s-1 \text{ liegt}$$

$$\text{RE}_{j_{i,j-1,k}} = \frac{1}{\kappa_R} \quad \text{für ein angrenzendes Volumenelement, das im Rohr bzw. Kanal liegt}$$

$$\text{RE}_{j_{i,j-1,k}} = R_U \quad \text{für ein angrenzendes Volumenelement, das am Speicherkörpertrand liegt.}$$

Die ergänzende Zuordnung Typ – z. B. für das Rohr oder den Kanal – und für die Randorientierung des Speicherkörpers – z. B. für die untere Speicherberandung  $R_{Uu}$  usw. – ist Inhalt der Rechenorganisation.

Nach diesen Vorüberlegungen kann dann generell beispielsweise für den **in j-Richtung in das Volumenelement eintretenden Wärmestrom**

$$\dot{Q}_{j,\text{ein}} = \left( \text{RE}_{j_{i,j-1,k}} + \text{RE}_{j_{i,j,k}} \right)^{-1} (t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}) \Delta x \Delta z. \quad (3.32)$$

gesetzt werden.

**In analoger Weise erfolgt die Ermittlung für die Wärmeströme:**  $\dot{Q}_{i,\text{ein}}, \dot{Q}_{k,\text{ein}}, \dot{Q}_{j,\text{aus}}, \dot{Q}_{i,\text{aus}}, \dot{Q}_{k,\text{aus}}$ .

Die Abarbeitung erfolgt für alle Elemente  $i, j, k$ . Der aus einem Volumenelement austretende Wärmestrom ist selbstverständlich identisch dem Wärmestrom, der ins Nachbarelement eintritt. Durch eine entsprechende Rechenorganisation könnte der Berechnungsaufwand stark reduziert werden. Wegen der Unterschiedlichkeit der Nachbarelemente (Randbedingungen) wäre der Organisationsaufwand aber dennoch sehr beachtlich, sodass darauf verzichtet wird.

### Datenbereitstellung zur rationellen numerischen Wärmestromberechnung

Es ist sinnvoll, für die wiederholenden Berechnungen **einmalige Vorarbeiten** zu treffen. Sie beziehen sich vor allem auf die Geometrie und die fixen Stoffwerte der Volumenelemente (siehe Bilder 2.4 und 3.18). Die nachfolgende Darstellung und Variablenschreibweise bezieht sich bereits auf die Programmdarstellung:

$AE_j = \Delta x \Delta z$	Querschnittsfläche des Elementes in j-Richtung
$AE_i(s) = \Delta y(s) \Delta z$	Querschnittsfläche des Elementes in i-Richtung für $s = 1 \dots 3$
$AE_k(s) = \Delta y(s) \Delta x$	Querschnittsfläche des Elementes in k-Richtung für $s = 1 \dots 3$
$VE(s) = \Delta x \Delta y(s) \Delta z$	Volumen des Elementes für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$CE(s) = VE(s) \rho(s) c(s)$	Wärmekapazität des Elementes bei festem Speichermaterial (Phase = 0) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$CEfl(s) = VE(s) \rho(s) cfl(s)$	Wärmekapazität des Elementes bei geschmolzenem (flüssigem) Speichermaterial (Phase = 1) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$

$Q_{\text{Phase}(s)} = VE(s) \rho(s) r(s)$	Phasenwandelenthalpie (Schmelzwärme) des Elementes beim Übergang des Speichermaterials von Phase = 0 ... 1
$RE_{\text{fest}i}(s) = \Delta x / 2 / \lambda(s)$	Wärmeleitwiderstand im halben Volumenelement in i-Richtung bei festem Speichermaterial (Phase = 0) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$RE_{\text{fest}j}(s) = \Delta y(s) / 2 / \lambda(s)$	Wärmeleitwiderstand im halben Volumenelement in j-Richtung bei festem Speichermaterial (Phase = 0) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$RE_{\text{fest}k}(s) = \Delta z / 2 / \lambda(s)$	Wärmeleitwiderstand im halben Volumenelement in k-Richtung bei festem Speichermaterial (Phase = 0) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$RE_{\text{fli}i}(s) = \Delta x / 2 / \lambda(s)$	Wärmeleitwiderstand im halben Volumenelement in i-Richtung bei flüssigem Speichermaterial (Phase = 1) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$RE_{\text{fli}j}(s) = \Delta y(s) / 2 / \lambda(s)$	Wärmeleitwiderstand im halben Volumenelement in j-Richtung bei flüssigem Speichermaterial (Phase = 1) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$
$RE_{\text{fli}k}(s) = \Delta z / 2 / \lambda(s)$	Wärmeleitwiderstand im halben Volumenelement in k-Richtung bei flüssigem Speichermaterial (Phase = 1) für jede Schicht $s = 1 \dots 3$

In der **j-k-Ebene** wird außerdem jeder Gitterpunkt  $j, k$  gekennzeichnet, ob dieser zum eigentlichen **Speicherkörper** oder zu einem **Rohr bzw. Kanal** gehört:

$RB(j, k) = 0$  Rohrbereich = 0 bei Vorhandensein von Speichermaterial

$RB(j, k) = n$  Rohrbereich = 1 ...  $n_{\text{max}}$  bei Vorhandensein des Rohres bzw. Kanals der Nummer  $n$

Die vorbereiteten Größen gelten stets während der Simulation (z. B.  $AE_j$ ), sie werden in Abhängigkeit des Phasenzustandes zum Berechnungsstart eingegeben (z. B.  $RE_{\text{fest}i}(s)$  oder  $RE_{\text{fli}i}(s)$ ) oder aber sie dienen der Kennzeichnung der Rohr- bzw. Kanallage (z. B.  $RB(j, k) = n$ ) sowie der typ- und durchflussabhängigen Stoffwertfüllung.

### Wärmebilanz

Die Gl. (3.32) gibt den Wärmestrom in das Volumenelement aus j-Richtung an. Im Zeitintervall  $\Delta\tau$  wird unter der Annahme konstantbleibender Randbedingungen somit die Wärme übertragen:

$$Q_{j,\text{ein}} = \left( RE_{j,i,j-1,k} + RE_{j,i,j,k} \right)^{-1} (t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}) \Delta x \Delta z \Delta\tau. \quad (3.33)$$

Schließlich ergibt sich die **Wärmezufuhr an das Volumenelement während des betrachteten Zeitintervalls**:

$$QE = Q_{i,\text{ein}} + Q_{j,\text{ein}} + Q_{k,\text{ein}} - Q_{i,\text{aus}} - Q_{j,\text{aus}} - Q_{k,\text{aus}}. \quad (3.34)$$

Erfolgt **kein Phasenwandel**, so kann die Temperaturänderung im Volumenelement  $\Delta t$  nach Gl. (3.6) und die **neue Elementtemperatur**  $tn_{i,j,k}$  nach Gl. (3.7) am Ende des Zeitintervalls  $\Delta\tau$  berechnet werden.

Tritt ein **Phasenwandel im Speichermaterial** auf, dann ist die Temperatur- und Phasenänderung nach dem im Bild 3.11 vorgestellten Algorithmus bestimmbar, sodass als **neue Elementgrößen** folgen:

$tn_{i,j,k}$ ;  $Phase_{i,j,k}$ .

### Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung im Speicherkörper

Um die Rechenzeiten zu verringern, ist man bestrebt, mit großen Zeitschritten  $\Delta\tau$  zu arbeiten. Das Ergebnis wird dann logischerweise ungenauer, da man die Randbedingungen über diesen Zeitraum als konstant betrachtet. Sind die Zeitschritte zu groß gewählt, kann das Ergebnis sogar falsch werden.

Die logischen Grenzen der möglichen Temperaturänderungen sind durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gegeben. So kann die neue Temperatur eines Elementes z. B. nicht durch Wärmeaufnahme aus einer Umgebung niedrigerer Temperatur hervorgehen und umgekehrt.

Für Verfahren, die **rein explizit im Zeitschritt** arbeiten, gilt aus Stabilitätsgründen folgende Beschränkung für den Zeitschritt:

$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)}. \quad (3.35)$$

Wird der angegebene Grenzwert eingehalten, ist eine konvergente Lösungsentwicklung gegeben. Da die **Temperaturleitfähigkeit a** einen **stoffabhängigen Wert** darstellt (unterschiedliche Speicherschichten  $s$  sowie Phasenzustände Phase, Rohr- bzw. Kanalkenngrößen bei Stillstand  $\lambda_{\text{app}}(\text{Typ})$ ,  $(\rho c)_{\text{app}}(\text{Typ})$ ) ist Gl. (3.35) zu Beginn der numerischen Berechnung für **alle denkbaren Konstellationen zu überprüfen**.

### 3.5 Wärmetransport in Rohren und Kanälen

Die Achsen aller Rohre und Kanäle  $n$  sind in  $i$ -Richtung orientiert (siehe Bild 2.4). Ihre Längen betragen somit  $L_R = \Delta x (i_{\text{Smax}} + 1)$ . Diese Durchströmteile bestehen demzufolge aus Volumenelementen der Länge  $\Delta x$ . Der Querschnitt kann selbstverständlich von mehreren parallelliegenden Volumenelementen ausgefüllt sein (siehe beispielsweise die Kanäle K1 und K2 im Bild 2.4). Definitionsgemäß hat jedes Volumenelement innerhalb des jeweils betrachteten Zeitintervalls eine konstante Temperatur  $t_{i,j,k}$ , die die Wärmeaufnahme QE bewirkt. Die Temperaturen der Volumenelemente  $t_{i,j,k}$  innerhalb eines Rohr- bzw. Kanalquerschnittes ( $i = \text{const}, j, k$ ) sind jedoch gleich. In QE bilden sich somit nur die Wärmeströme durch die Rohr- bzw. Kanalberandungen ab. Die Wärmeaufnahme dieses Durchflussquerschnittes wird aus den entsprechenden Einzelwärmern QE zu  $QR(n, i)$  aufsummiert.

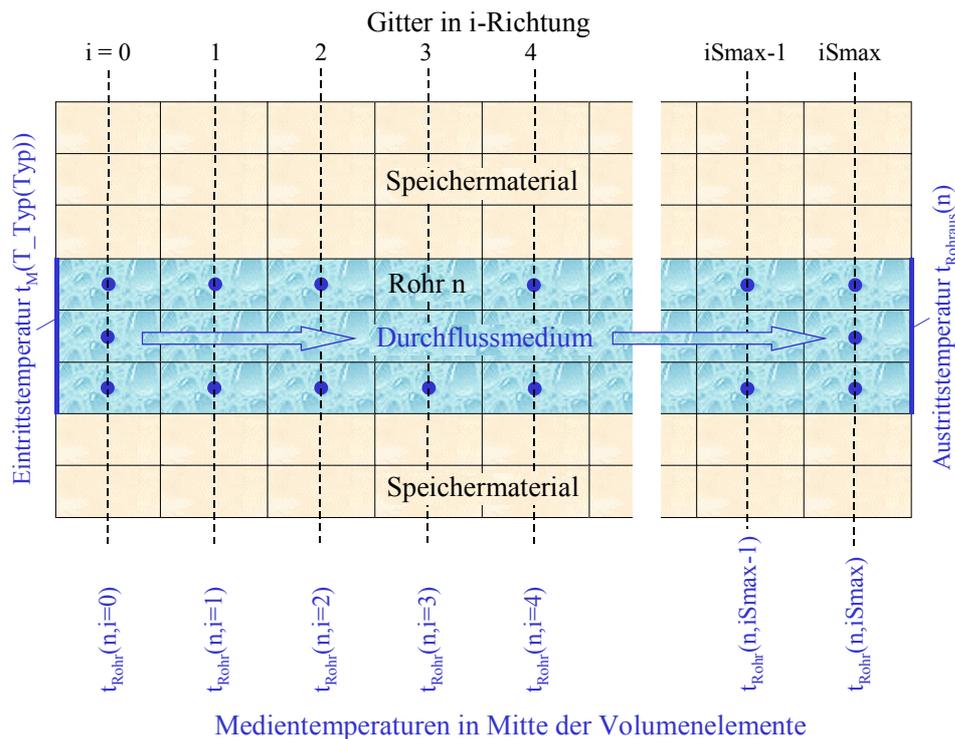
Wenn **keine Strömung** im Rohr bzw. Kanal vorhanden ist ( $w(\text{Typ}) = 0$ ), dann wird das Innere des Durchströmteiles gemäß Abschnitt 3.3.5 **wie ein Festkörper** mit den Materialdaten  $\lambda_{\text{app}}(\text{Typ})$  und  $(\rho c)_{\text{app}}(\text{Typ})$  behandelt. D. h., es bedarf gegenüber der normalen Speicheruntersuchung keines neuen Algorithmus.

Bei **Durchströmung des Rohres bzw. Kanals** ( $w(\text{Typ}) > 0$ ), bleibt die Änderung der Wandtemperatur unbeachtet und die gesamte Elementwärme QE werde nach der Summierung zu  $QR(n, i)$  dem Medium (Flüssigkeit oder Luft) zugeordnet. Eine weitere Vereinfachung stellt die Annahme dar, dass keine Wärmeleitung innerhalb der Flüssigkeit erfolgt. Diese ist in der Regel gegenüber der bedeutend größeren Mediengeschwindigkeit tatsächlich auch vernachlässigbar. Damit bewirkt die im Ab-

schnitt  $i$  zugeführte Wärme  $QR(n,i)$  eine eindeutige **Änderung der Medientemperatur**.

Die Medientemperaturen sind selbstverständlich in Abhängigkeit von der **Durchflussrichtung** (Richtung(Typ)) zu ermitteln. Damit ist es möglich, auch die thermodynamischen Vor- bzw. Nachteile bei Gleich- und Gegenstromführung in Überlagerung mit den Wärmespeichervorgängen zu bewerten.

Die Lage der Volumenelemente und die Zuordnung der Temperaturen gehen aus Bild 3.19 hervor. Die **Eintrittstemperatur** folgt für das ausgewählte Rohr bzw. Kanal Typ und den zugehörigen Temperaturgang  $T\_Typ$  nach Abschnitt 3.3.2. Die zeitabhängige Größe stellt sich als  $t_M(T\_Typ(Typ))$  dar.



**Bild 3.19** Rohr oder Kanal mit angrenzendem Speicherkörper und i-Gitter

Die den Quaderelementen im Rohr bzw. Kanal zugeordneten Temperaturen dienen dem Verständnis für die Verknüpfung der den Elementen zugeführten Wärme QE und der daraus folgenden Berechnung der neuen Medientemperaturen in Strömungsrichtung. Für die dargestellte Durchflussrichtung gilt: Richtung(Typ) = 1.

Die Ermittlung der **neuen Medientemperaturen am Ende des Zeitintervalls** wird mit Kenntnis des Wärmekapazitätsstromes  $\dot{C}(Typ)$  gemäß Gl. (3.20) folgendermaßen vorgenommen, wenn **Richtung(Typ) = 1** gilt:

$$t_{Rohr}(n,0) = t_M(T\_Typ(Typ)) + \frac{QR(n,i=0)}{2 \dot{C}(Typ) \Delta\tau} \quad (3.36)$$

$$t_{Rohr}(n,i) = t_{Rohr}(n,i-1) + \frac{QR(n,i-1) + QR(n,i)}{2 \dot{C}(Typ) \Delta\tau} \quad (3.37)$$

$$t_{Rohraus}(n) = t_{Rohr}(n,iSmax) + \frac{QR(n,iSmax)}{2 \dot{C}(Typ) \Delta\tau} \quad (3.38)$$

Bei entgegengesetzter Stromrichtung (**Richtung = -1**) folgen:

$$t_{\text{Rohr}}(n, iS_{\text{max}}) = t_{\text{M}}(T_{\text{Typ}}(\text{Typ})) + \frac{QR(n, i = iS_{\text{max}})}{2 \dot{C}(\text{Typ}) \Delta\tau} \quad (3.39)$$

$$t_{\text{Rohr}}(n, i) = t_{\text{Rohr}}(n, i+1) + \frac{QR(n, i+1) + QR(n, i)}{2 \dot{C}(\text{Typ}) \Delta\tau} \quad (3.40)$$

$$t_{\text{Rohr}}(n) = t_{\text{Rohr}}(n, 0) + \frac{QR(n, i = 0)}{2 \dot{C}(\text{Typ}) \Delta\tau} \quad (3.41)$$

Im Falle geschnittener Durchflussquerschnitte nach Bild 3.16 müssen die  $QR(n, i)$ -Werte bei einfacher Symmetrie mit dem Faktor 2 und bei doppelter Symmetrie mit dem Faktor 4 multipliziert werden.

Handelt es sich bei dem Durchflussmedium um **Luft**, dann schließt sich eine zusätzliche **Näherungs-betrachtung** an, da unter Umständen beim **Abkühlen** der Luft auch **Kondensation** auftreten kann. Für jedes Rohr bzw. Kanal mit  $t_{\text{ein}} = t_{\text{M}}(T_{\text{Typ}}(\text{Typ}))$  sowie  $x_{\text{ein}} = x_{\text{M}}(T_{\text{Typ}}(\text{Typ}))$  und dem Ergebnis  $t_{\text{Rohr}}(n)$  werden schrittweise berechnet:

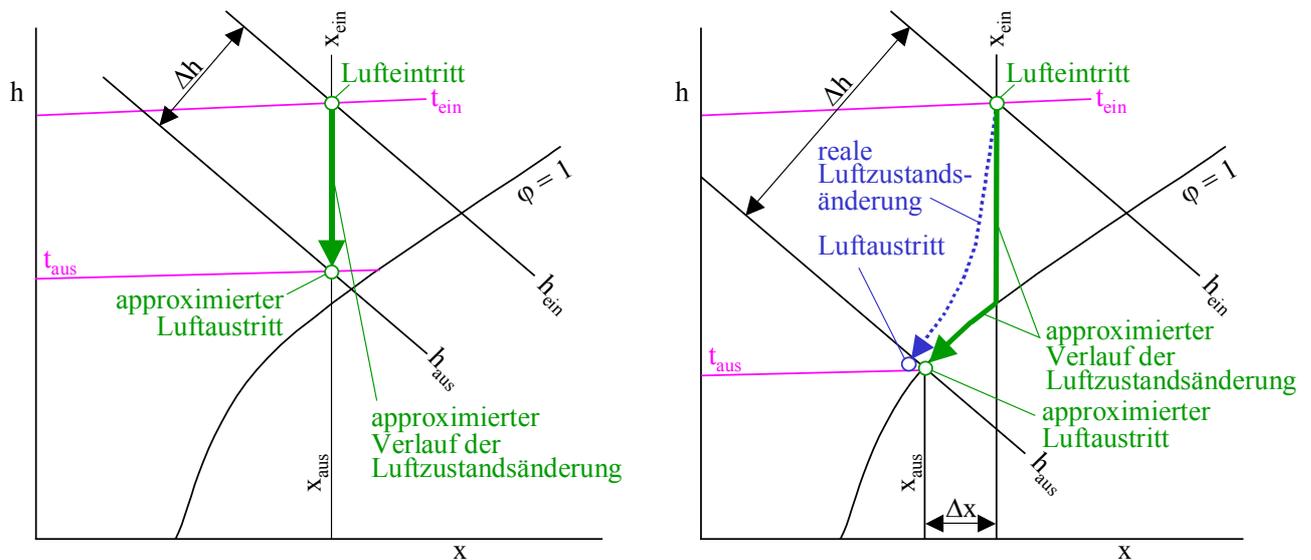
- Mit dem Unterprogramm ZUSTAND (Tabelle 3.4) folgt aus  $t_{\text{Rohr}}(n)$  und  $x_{\text{ein}}$  der Sättigungsdampfgehalt  $x_{\text{S}}$ .
- Wenn  $x_{\text{S}} < x_{\text{ein}}$  gilt, wird am Rohr- oder Kanalende  $x_{\text{aus}} = x_{\text{S}}$  betragen und es fällt die Kondensatmenge  $x_{\text{ein}} - x_{\text{aus}}$  aus.
- Die für den Rohr- bzw. Kanaltyp insgesamt ausgeschiedene Kondensatmenge wird durch Summation gebildet:

$$\text{Kondensat}(\text{Typ}) = \sum_{n \in \text{Typ}} (x_{\text{ein}} - x_{\text{aus}})_n \quad (3.42)$$

**Anmerkung 1:** Generell wird vereinfachend angenommen, dass die abschnittsweise berechneten Lufttemperaturen gelten. Dies ist im ungesättigten Gebiet ( $\varphi < 1$ ) sofort verständlich, bei fiktiven Luftaustrittszuständen im Nebelgebiet ( $\varphi > 1$ ) müsste man dagegen eigentlich die Lufttemperatur am Ende eines jeden Abschnittes  $i$  mittels Enthalpiebilanzen berechnen. Dazu wäre von der Eintrittsenthalpie  $h_{\text{ein}}(t_{\text{ein}}, x_{\text{ein}})$  – Berechnung mit ZUSTAND (Tabelle 3.4) – auszugehen und  $QR(n, i)$  davon zu subtrahieren, sodass die Austrittsenthalpie  $h_{\text{aus}}$  folgte. Mit ZUSTANDH (Tabelle 3.4) könnte dann zu  $h_{\text{aus}}$  und  $x_{\text{aus}}$  abschnittsweise die Luftaustrittstemperatur  $t_{\text{Rohr}}(n, i)$  ermittelt werden. Dieser Berechnungsgang könnte aber nicht nach Abschluss einer Zeitschrittermittlung erfolgen, da die Lufttemperaturen dann stets nach oben korrigiert würden, sondern er müsste nach jeder Abarbeitung eines  $i$ -Abschnittes integriert werden. Dies bedürfte der Änderung der gesamten Berechnungsphilosophie und brächte Probleme bei Einsatz von Rohren bzw. Kanälen mit wechselnder Durchströmrichtung. Deshalb wird auf die detaillierte Berechnung verzichtet. Ersatzweise erfolgt die wärmetechnische Berechnung für die spezifische Wärmekapazität  $c_{\text{M}}$ , die den Wasserdampfgehalt der Luft am Eintritt berücksichtigt.

**Anmerkung 2:** Der genaue Kondensationsverlauf ist praktisch kaum ermittelbar, da sowohl die Strömung im Luftkanal als auch die kalten Elementoberflächen am Kanalrand detailliert erfasst werden müssten. So könnte beispielsweise örtlich auch Kondensation auftreten, obwohl die

Luftaustrittstemperatur im ungesättigten Gebiet liegt. Die angenommenen Näherungsverläufe während der Kanaldurchströmung sind im Bild 3.20 veranschaulicht.



**Bild 3.20** Näherungsweise Ermittlung der Luftzustandsänderung bei Abkühlung ohne (linkes Bild) und mit (rechtes Bild) Kondensation  
Der im rechten Bild eingetragene reale Verlauf der Luftzustandsänderung ist selbstverständlich nur als Beispiel zu verstehen!

Der **Kondensatstrom** für den Rohr- bzw. Kanaltyp folgt zu:

$$\text{Kondensatstrom(Typ)} = \text{Kondenstat(Typ)} \cdot \dot{m}(\text{Typ}). \quad (3.43)$$

Da in den Rohren bzw. Kanälen  $n$  des gleichen Typs gemäß Annahme auch stets die gleichen Wärmekapazitätsströme fließen, kann eine einfache arithmetische **Mittelung der Austrittstemperaturen**  $t_{\text{Rohraus}(n)_{\text{Typ}} = \text{const}}$  zu  $t_{\text{RohrausTyp}}(\text{Typ})$  erfolgen.

### Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung im Rohr- bzw. Kanalbereich

Das im Abschnitt 3.4 vorgestellte Stabilitätskriterium bezieht sich nur auf die mit Speichermaterial gefüllten Volumenelemente. Im Rohr- bzw. Kanalbereich kann sich vor allem bei

- sprunghaften Änderungen der Medientemperatur
- Volumenelementen großer Länge in  $i$ -Richtung
- großen Zeitschritten
- geringem Wärmekapazitätsstrom

nachfolgende Situation einstellen.

Eine große Wärmemenge strömt in die im Abschnitt  $i$  im Rohr- bzw. Kanalquerschnitt liegenden Volumenelemente. Am Ende des Zeitschrittes liefern die Wärmebilanzen nach Gl. (3.36) bis (3.41) Medientemperaturen  $t_{\text{Rohr}(n, i)}$  die höher liegen als die Temperaturen der angrenzenden mit Speichermaterial gefüllten Volumenelemente. **Dies ist ein Verstoß gegen den II. Hauptsatz der Thermodynamik, da niemals Wärme vom niederen zum höheren Temperaturniveau fließen kann.** Diese hohen Temperaturen bewirken im folgenden Zeitschritt einen Wärmestrom in gegensätzlicher Richtung, die Lösungsentwicklung schwingt eine zeitlang bzw. ist überhaupt nicht konvergent. In diesem Fall kann wegen der zahlreichen Einflüsse kein Kriterium wie in Gl. (3.35) formuliert werden.

In einem rechenorganisatorischen aufwändigen Verfahren bildet man die maximale und minimale Umgebungstemperatur:

$$t_{R\max} = \text{Max} \{t(i, j, k)_{i = \text{const}, j \in \text{Rohrumgebung}, k \in \text{Rohrumgebung}}\} \quad (3.44)$$

$$t_{R\min} = \text{Min} \{t(i, j, k)_{i = \text{const}, j \in \text{Rohrumgebung}, k \in \text{Rohrumgebung}}\}. \quad (3.45)$$

Ist beim Wärmestrom an den Rohr- bzw. Kanalabschnitt  $i$  ( $QR(n, i) > 0$ ) die errechnete Rohrabschnittstemperatur  $t_{\text{Rohr}}(n, i) > t_{R\max}$ , erfolgt zur numerischen Stabilisation eine Korrektur

$$t_{\text{Rohr}}(n, i) = t_{R\max}. \quad (3.46)$$

Im umgekehrten Fall ( $QR(n, i) < 0$  und  $t_{\text{Rohr}}(n, i) < t_{R\min}$ ) gilt analog:

$$t_{\text{Rohr}}(n, i) = t_{R\min}. \quad (3.46a)$$

### 3.6 Umspeichern der Elementtemperaturen

Nach Abschluss der Temperaturermittlung im Zeitintervall  $\Delta t$  werden die "neuen" Temperaturen  $t_{i,j,k}$  für die Betrachtung des nächsten Zeitschrittes auf die früheren "Eingangsplätze"  $t_{i,j,k}$  gesetzt.

Für den mit **Speichermaterial gefüllten Körper** ( $RB(j, k) = 0$ ) und für den **Rohr- bzw. Kanalbereich ohne Durchfluss** ( $RB(j, k) = 1$  und  $w(\text{Typ}) = 0$ ) gilt:

$$t(i, j, k) = t_n(i, j, k). \quad (3.47)$$

Die durchströmten Rohre bzw. Kanäle  $n$  sind einzeln zu betrachten. Für den Querschnitt des Durchströmteiles  $RB(j, k) = n$  gilt stets die gleiche Temperatur:

$$t(i, j, k) = t_{\text{Rohr}}(n, i). \quad (3.48)$$

### 3.7 Stündliche Wärmebilanzen für den Gesamtspeicher

Um die Lade- und Entladedynamik des Speichers verfolgen zu können, werden die in jedem Zeitintervall getauschten Wärmemengen zu Stundenwerten summiert. Ihre Ermittlung erfolgt bezogen auf die Betriebsstunde  $BS$ . Sie folgt als  $BS = \text{INT}(\tau_{\text{Stunde}})$ , wobei  $\tau_{\text{Stunde}}$  die Simulationszeit in Stunden darstellt. (D. h., es werden alle Ergebnisse innerhalb der Simulationszeit mit dem gleichen Vorkommawert summiert.) Im Einzelnen werden die nachfolgenden Größen betrachtet.

#### Wärme an die Umgebung

Die im Zeitintervall an den unten, oberen, vorderen und hinteren Speicherrändern nach außen fließende Wärme wird bei der Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen separat als  $QU$  bestimmt, sodass die Summierung  $n$  in einfacher Weise möglich wird:

$$Q_{\text{Umgebung}}(BS) = Q_{\text{Umgebung}}(BS) + QU. \quad (3.49)$$

#### Wärme an das fließende Medium

Die während eines Zeitintervalls an das Rohr bzw. an den Kanal  $n$  im Abschnitt  $i$  übertragene Wärme wird im Verlauf der Berechnung bereits in der Größe  $QR(n, i)$  zusammengefasst. Für die Veranschaulichung der Gesamtwärme erscheint es sinnvoll, alle Rohre bzw. Kanäle  $n$ , die zu einem Typ gehören, zusammenzufassen. Somit gilt die Summationsformel:

$$Q_{\text{Rohrtyp}}(\text{Typ}, \text{BS}) = Q_{\text{Rohrtyp}}(\text{Typ}, \text{BS}) + \sum_n \sum_i QR(n, i). \quad (3.50)$$

Hierbei werden geschnittene Durchströmteile (siehe Bild 3.16) nur innerhalb des Simulationsgebietes betrachtet.

### Gespeicherte Wärme im eigentlichen Speichermaterial

Am Ende einer Stunde erfolgt eine Bestandsaufnahme der in den maximal drei Schichten  $s$  des Speicherkörpers vorhandenen Wärme. Zu betrachten sind die Volumenelemente  $i, j, k$  für die  $RB(j, k) = 0$  gilt, d. h., die nicht Teil eines Rohres bzw. Kanals sind.

Um die Speicherwärme zu ermitteln, ist vorher die Bezugstemperatur  $t_{\text{Bezug}}$  zu definieren. Sie stellt einen Eingabewert dar. Üblicherweise wird man  $t_{\text{Bezug}} = 0 \text{ °C}$  wählen. Würde man einen Eisspeicher betrachten wollen, wäre eine niedrigere Temperatur sinnvoll, beispielsweise  $t_{\text{Bezug}} = -10 \text{ °C}$ . Auf jeden Fall muss die Bezugstemperatur aber unter der unteren Phasenwandeltemperatur liegen ( $t_{\text{Bezug}} < t_{\text{Wandelu}}$ ). Die Bestimmung der Speicherwärme  $Q_{\text{Speicher}}(\text{BS})$  ist abhängig vom Stand der Phasenumwandlung  $\text{Phase}_{i,j,k}$  in den einzelnen Volumenelementen  $i, j, k$ , über die zu summieren ist. Beim Lauf über  $i$  ist die unterschiedliche Schichtzugehörigkeit zu beachten. Für ein Volumenelement in der Schicht  $s$  gilt:

$$\text{Phase}_{i,j,k} = 0 \quad \Rightarrow \quad DQ_{i,j,k} = CE(s) \cdot (t_{i,j,k} - t_{\text{Bezug}})$$

$$0 < \text{Phase}_{i,j,k} < 1 \Rightarrow DQ_{i,j,k} = CE(s) \cdot (t_{\text{Wandelu}}(s) - t_{\text{Bezug}}) + Q_{\text{Phase}}(s) \cdot \text{Phase}_{i,j,k}$$

$$\text{Phase}_{i,j,k} = 1 \quad \Rightarrow \quad DQ_{i,j,k} = CE(s) \cdot (t_{\text{Wandelu}}(s) - t_{\text{Bezug}}) + Q_{\text{Phase}}(s) + CE_{\text{fl}}(s) \cdot (t_{i,j,k} - t_{\text{Wandelo}}(s)).$$

Die Summation liefert schließlich:

$$Q_{\text{Speicher}}(\text{BS}) = Q_{\text{Speicher}}(\text{BS}) + \sum_i \sum_j \sum_k DQ_{i,j,k}. \quad (3.51)$$

### Gespeicherte Wärme in Rohren bzw. Kanälen bei stehenden Medien

Ist kein Durchfluss vorhanden, dann wird die Speicherwärme in den Rohr- bzw. Kanalwandungen und im Fluid unter Annahme der gemittelten Werte  $(\rho c)_{\text{app}}(\text{Typ})$  nach Gl. (3.26) typabhängig bestimmt. Die zu betrachtenden Volumenelemente können durch  $RB(j, k) > 0$  und  $w(\text{Typ}) = 0$  selektiert werden. Die bei der Eingabe definierte Bezugstemperatur  $t_{\text{Bezug}}$  gilt selbstverständlich auch hierfür. Es ist die folgende Summierung vorzunehmen, wobei das jeweilige Volumenelement  $i, j, k$  im internen Rechengang sowohl dem Rohr- bzw. Kanaltyp  $\text{Typ}$  und der Schicht  $s$  zuzuordnen ist:

$$Q_{\text{Medium}}(\text{BS}) = Q_{\text{Medium}}(\text{BS}) + \sum_i \sum_j \sum_k (\rho c)_{\text{app}}(\text{Typ}) \cdot VE(s) \cdot (t_{i,j,k} - t_{\text{Bezug}}). \quad (3.52)$$

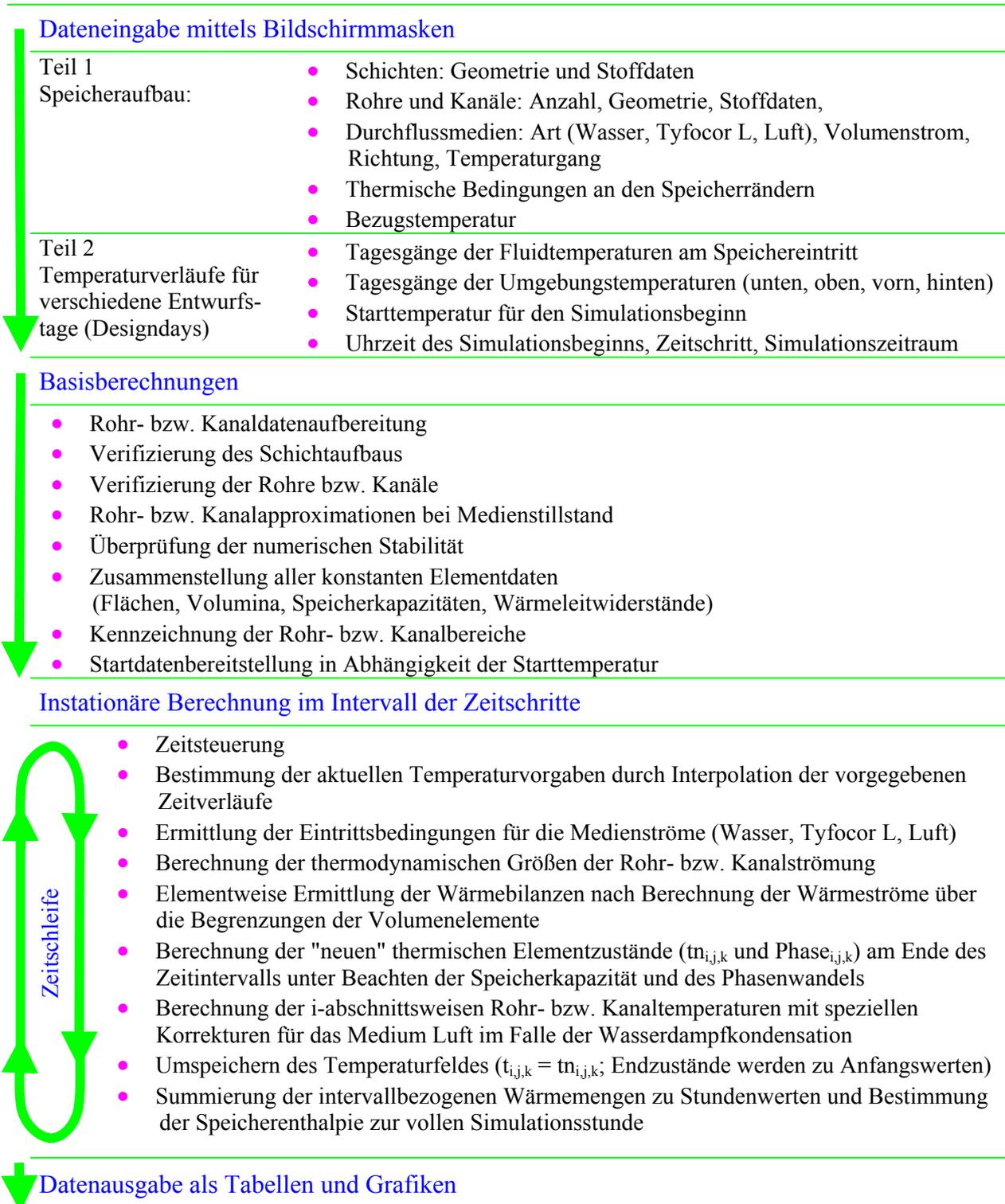
Auch in diesem Fall werden geschnittene Durchströmteile (siehe Bild 3.16) nur innerhalb des Simulationsgebietes berücksichtigt.

Damit sind die am Ende einer Betriebsstunde  $\text{BS}$  gespeicherten und innerhalb der jeweils letzten Stunde zugeführten Wärmemengen bilanzierbar und stundenweise vergleichbar.

## 4 Rechenprogramm

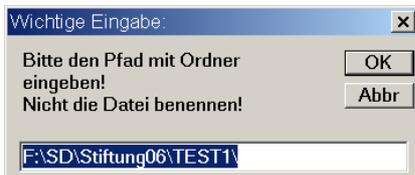
### 4.1 Ablaufplan mit Unterstruktur

Er ist im Bild 4.1 dargestellt. Im Weiteren werden daraus die üblichen Programmteile (Eingabe, Datenspeicherung, Unterprogramme Datenaufbereitung und instationäre Berechnung mit Wiederholung in einer Zeitschleife, Ergebnisspeicherung, tabellarische und grafische Ausgabe) gebildet.



**Bild 4.1** Ablaufplan des Rechenprogramms zur wärmetechnischen Simulation eines mehrschichtigen Wärmespeichers aus sensiblem und latentem Material mit integrierten Rohren bzw. Kanälen

Beim **Programmstart** erscheint ein Fenster (Bild 4.2) mit dem Vorschlag einer Pfadangabe und des Ordners. Diese Angabe kann programmintern geändert werden. Der gewünschte und für das Objekt vorbereitete Pfad und Ordner sind einzugeben. Nach der einmaligen Korrektur wird er für das Beispiel beibehalten.



**Bild 4.2** Fenster mit Pfad- und Ordnerangabe, die für den jeweiligen Fall anzupassen ist  
Sie wird für das gesamte Beispiel beibehalten.

Im angegebenen Ordner werden alle zum Beispiel gehörigen, relevanten Dateien gespeichert. Einzelheiten finden sich im Abschnitt 4.3 unter "Datenverwaltung".

## 4.2 Eingaben

### 4.2.1 Teil 1: Speicherdaten

Nachfolgend werden die Eingabedaten erläutert. Im Bild 4.3 findet sich die Eingabeoberfläche mit den eingetragenen Daten bei einem Neustart.

**Speicher mit sensiblem / latentem Speicher material und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (VI/2006)  Entwurfstag

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273	0
Flüssigwerte >>						-273	0
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	273	0
Flüssigwerte >>						273	0
Schicht s = 1	0	0	0	0	0	-273	0
Flüssigwerte >>						-273	0

\* Bei Phasenwandmaterial Lambda- sowie c-Flüssigzustand, r und t-Wandel (Ober- und Unterwert) angeben!

**Gitterdaten für x- und z-Achse:**

Ro oberer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_oben: 0 m²KW  
 Ru unterer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_unten: 0 m²KW  
 Rv vorderer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_vorn: 0 m²KW  
 Rh hinterer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_hinten: 0 m²KW  
 Bezugstemperatur für Speicherwärmebestimmung: 0 °C

**Rohr-, Kanal- und Mediendaten**

Typ	da in mm	Wanddicke mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Rohr-/Kanalzahl	Art des Mediums	Medienstrom l/h	Strömungsrichtung	Temp. Typ
R1	0	0	0	0	0	0	Tyfoacor L	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	Wasser	0	0	0
K1	0	0	0	0	0	0	Luft	0	0	0
K2	0	0	0	0	0	0	Wasser	0	0	0

**Geometrie der Rohre und Kanäle**

Rohr Kanal n	jmin	jmax	kmin	kmax	Rohr / Kanal Typ
1	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	

**Abläufe:**

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. DATENSPEICHERUNG drücken!
5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!

**Buttons:** STARTEN, DATEILADEN, ZEITVERLAUF, DATENSPEICHERUNG, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE, DIAGRAMM, DRUCK ERGEBNISSE, BEENDEN

**Bild 4.3** Benutzeroberfläche (Maske 1) für die Wärmespeichersimulation mit der Standarddatenfüllung nach Programmneustart

Mit Hilfe der angeordneten Steuerelemente können alle Eingaben, Berechnungsabläufe und Ausgaben einschließlich der Öffnungen weiterer Bedienflächen ("Fenster") betätigt werden.

Die bei der Erläuterung der Eingabedaten verwendeten Bezeichnungen und Einheiten entsprechen im Allgemeinen den Beschriftungen in der Eingabeoberfläche. Sie unterscheiden sich mitunter von den programmintern verwendeten Größen, die im Listung Verwendung finden.

Festlegung des Entwurfstages für die Simulationsdurchführung		
Entwurfstag	-	Nummer des Entwurfstages (DesignDay) für den die Simulation durchgeführt werden soll 1 für Entwurfstag 1 usw.

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen, Vorgabe der Bezugstemperatur		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Größen werden für die Schichten <math>s = 1 \dots 3</math> benannt, soweit diese existent sind. Es ist mindestens die Schicht <math>s = 1</math> mit Daten zu füllen.</li> <li>Die geometrischen Daten sind im <a href="#">Bild 2.4</a> veranschaulicht.</li> </ul>		
Delta_y(s)	mm	Gitterweite in j-Richtung für die Schicht s
Rho(s)	kg/m <sup>3</sup>	Dichte der Speicherschicht s
Lambda(s)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Schicht s für sensibles Speicher material oder für Phasenwandelmateri al im ungeschmolzenen (festen) Zustand
Lambda(s) "Flüssigwert"	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Schicht s bei Phasenwandelmateri al im geschmolzenen (flüssigen) Zustand
c(s)	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität der Schicht s für sensibles Speicher material oder für Phasenwandelmateri al im ungeschmolzenen (festen) Zustand
c(s) "Flüssigwert"	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität der Schicht s bei Phasenwandelmateri al im geschmolzenen (flüssigen) Zustand

r(s)	kJ/kg	Phasenwandelenthalpie (Schmelzwärme) der Speicherschicht s	
t_Wandel(s) "Untwert"	°C	Temperatur bei der Phasenwandel beginnt (noch ungeschmolzen)	Bei Material mit rein sensiblem Speichervermögen: -273 eingeben! Wenn keine Hysterese auftritt gilt: Untwert ≡ Oberwert
t_Wandel(s) "Oberwert"	°C	Temperatur bei der Phasenwandel endet (vollkommen geschmolzen)	
iSSmax(s)	-	maximale Gitterzahl in j-Richtung bei Schicht s	
Delta_x	mm	Gitterweite in i-Richtung für alle Schichten des Speicherkörpers	
iSmax	-	maximale Gitterzahl in i-Richtung (gesamte Länge des Speichers)	
Delta_z	mm	Gitterweite in k-Richtung für alle Schichten des Speicherkörpers	
kSmax	-	maximale Gitterzahl in k-Richtung (Breite des Simulationsbereiches)	
Ro	m <sup>2</sup> K/W	Wärmeleitwiderstand des Speichers zur oberen Umgebung (Dämmung + 1/α <sub>o</sub> )	
Ru	m <sup>2</sup> K/W	Wärmeleitwiderstand des Speichers zur unteren Umgebung (Dämmung + 1/α <sub>u</sub> )	
Rv	m <sup>2</sup> K/W	Wärmeleitwiderstand des Speichers zur vorderen Umgebung (Dämmung + 1/α <sub>v</sub> )	
Rh	m <sup>2</sup> K/W	Wärmeleitwiderstand des Speichers zur hinteren Umgebung (Dämmung + 1/α <sub>h</sub> )	

t_Bezug	°C	Bezugstemperatur zur Ermittlung der Speicherenthalpie für jede volle Stunde Üblicherweise sollte t_Bezug = 0 °C gelten! Falls Eisspeicher untersucht werden, ist t_Bezug < 0 °C zu wählen. t_Bezug muss stets < t_Wandel(s) "Unterwert" sein!
---------	----	---

### Geometrie der Rohre und Kanäle

- Die Größen werden für die Rohre bzw. Kanäle  $n = 1 \dots 15$  benannt, soweit diese existent sind.
- Es können  $n$  mit 0 belegt sein. Das letzte reale  $n$  wird intern  $n_{\max}$  gesetzt.
- Die geometrischen Daten sind im [Bild 2.4](#) veranschaulicht.
- Beispiele für weitere Rohr- und Kanaleinordnungen zeigen die Bilder 3.13, 3.15 sowie 3.16.
- Wenn der gleiche Rohrtyp in verschiedenen Schichten  $s_1$  und  $s_2$  liegen soll, muss gelten:  $\Delta y(s_1) = \Delta y(s_2)$ .

jmin(n)	-	minimale Gitterzahl in j-Richtung bei der das Rohr bzw. der Kanal beginnt (unten)
jmax(n)	-	maximale Gitterzahl in j-Richtung bei der das Rohr bzw. der Kanal endet (oben)
kmin(n)	-	minimale Gitterzahl in k-Richtung bei der das Rohr bzw. der Kanal beginnt (links)
kmax(n)	-	maximale Gitterzahl in k-Richtung bei der das Rohr bzw. der Kanal endet (rechts)
Typ(n)	-	Bezeichnung des Rohr- bzw. Kanaltyps Es sind einzutragen: R1 für Rohrtyp 1; R2 für Rohrtyp 2; K1 für Kanaltyp 1; K2 für Kanaltyp 2

### Rohr-, Kanal- und Mediendaten

da(Typ)	mm	Rohraußendurchmesser	
ba(Typ)	mm	Kanalaußenbreite	
ha(Typ)	mm	Kanalaußenhöhe	
Wanddicke(Typ)	mm	Materialdicke des Rohr- bzw. Kanalmantels	
Rho(Typ)	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des Rohr- bzw. Kanalmantels	
Lambda(Typ)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Rohr- bzw. Kanalmantels	
c(Typ)	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität des Rohr- bzw. Kanalmantels	
Rohr- bzw. Kanalzahl(Typ)	-	Anzahl der Rohre bzw. Kanäle gleichen Typs im Speicherkörper	Die Anzahl und der Volumenstrom sind für den gesamten Speicherkörper oder für das Simulationsgebiet anzugeben! Es gelten stets volle Rohr- oder Kanalquerschnitte!
Medienstrom (Typ)	l/h	Volumenstrom für jeden Rohr- bzw. Kanaltyp im Speicherkörper	
Strömungsrichtung(Typ)	-	1 für Durchströmung in i-Richtung; -1 für Gegenrichtung	
Temp_Typ(Typ)	-	Angabe welcher zeitliche Temperaturverlauf (siehe Eingabemaske 2) für den Rohrtyp zum Einsatz kommt 1 für Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 1 2 für Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 2 3 für Temperaturverlauf des Luftstromes 1 4 für Temperaturverlauf des Luftstromes 2	

Art des Mediums(Typ)	-	Es ist das Medium zu kennzeichnen, das das Rohr bzw. den Kanal beaufschlagt. Zur Auswahl stehen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasser</li> <li>• wässrige Lösung mit 40 % Tyfocor L</li> <li>• wässrige Lösung mit 50 % Tyfocor L</li> <li>• Luft</li> </ul>
----------------------	---	---

Sollen die eingegebenen Werte in der Datei **EINGABE.dat** gespeichert werden, so ist in der Steuerleiste der Bedienoberfläche (Bild 4.3) der Button **DATENSPEICHERUNG** zu betätigen.

Zur Kontrolle der eingegebenen Größen kann eine komplette Ausgabe der Speichereingaben durch Betätigen des Buttons **DRUCK EINGABEWERTE** in einer MS Word-Datei erzeugt und anschließend ausgedruckt werden.

Durch Betätigung des Buttons **ZEITVERLAUF** gelangt man zur nachfolgend beschriebenen Eingabe.

### 4.2.2 Teil 2: Zeitverläufe der Randbedingungen

Die Eingabe- und Bedienoberfläche für die zeitlichen Temperaturverläufe (Tagesgänge) ist im Bild 4.4 im Falle der Neueingabe gezeigt.

**Bild 4.4** Eingabe- und Bedienoberfläche (Maske 2) für die Temperaturverläufe (Tagesgänge), die die Randbedingungen für die Be- und Entladung des Wärmespeichers und für seine Umgebung darstellen. Mit Hilfe der angeordneten Steuerelemente können Neueingaben (hier dargestellt), Eingabekorrekturen sowie Kontrolldrucke und grafische Darstellungen bewirkt werden.

Zunächst ist die Auswahl zwischen einer Neueingabe der Daten mit automatischem Anlegen der Datei **ZVERLAUF.dat** oder der Kontrolle bzw. Datenergänzung der bereits vorhandenen Datei zu wählen. Der Aufforderung Button zu setzen (Bild 4.5), ist unbedingt Folge zu leisten und durch Drücken des Buttons **WEITER** zu bestätigen. Der Pfad mit Ordner und vorhandenem bzw. zukünftigem Dateinamen werden stets in Maske 2 oben rechts angezeigt.

**Bild 4.5** Aufforderung zur Festlegung der Zielstellung

Bei der Neueingabe erfolgt eine "neutrale" Datenfüllung. Bei einer beabsichtigten Korrektur werden nach Drücken von **ANZEIGEN** die gespeicherten Daten in den Feldern angezeigt. In beiden Fällen können alle Felder überschrieben werden. Die Aktivierung von **DATENSPEICHERUNG** aktualisiert den Bestand in der Datei ZVERLAUF.dat.

Die bei der folgenden Eingabeerläuterung verwendeten Bezeichnungen und Einheiten entsprechen den Beschriftungen in der Eingabeoberfläche (Bild 4.4). Programmintern sind mitunter detailliertere Größenbezeichnungen notwendig (Einzelheiten finden sich im Programmlisting).

Generell werden alle Größen für die vollen Stunden von 1<sup>00</sup> bis 24<sup>00</sup> Uhr angegeben. Intern wird der Wert für 0<sup>00</sup> Uhr gleich dem für 24<sup>00</sup> Uhr gesetzt, sodass der jeweilige Tagesgang in rhythmischer Folge für alle Tage der Simulationszeit gilt.

Festlegung des Entwurfstages		
Entwurfstag	-	Nummer des Entwurfstages (Design day) für den die gezeigten Tagesgänge gelten; z. B. 1 für Entwurfstag 1 usw. Entwurfstag wird im Weiteren mit ETag abgekürzt!
24 Stunden-Tagesgänge für die Temperaturen der Durchflussmedien		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• T_Typ stellt die Nummer des Temperaturverlauftyps dar. Er ist fest vorgegeben (Bild 4.4).</li> <li>• Die Werte gelten jeweils für die volle Stunde. Zwischenwerte werden programmintern nach dem im Bild 3.12 bzw. 4.6 gezeigten Schema interpoliert.</li> <li>• Temperaturen &gt; -273 °C werden als Temperaturen anerkannt und im Programm verarbeitet.</li> <li>• Temperaturen -273 °C dienen als Steuergrößen für einen inaktiven Durchfluss, d. h., Stillstand im Rohr bzw. Kanal. Die Definition bzw. Steuerung der Betriebszeit gibt Bild 4.6 wieder. Um die Auswirkungen von Sprungfunktionen nach einem Stillstand zu vermeiden, können Angaben für die Stundenwerte nach einer "Einlaufkurve" sinnvoll sein.</li> </ul>		
tF1(ETag, Stunde)	°C	Temperatur des Flüssigkeitsstromes 1 (Wasser oder Tyfocor L)
tF2(ETag, Stunde)	°C	Temperatur des Flüssigkeitsstromes 2 (Wasser oder Tyfocor L)
tL1(ETag, Stunde)	°C	Temperatur des Luftstromes 1
tL2(ETag, Stunde)	°C	Temperatur des Luftstromes 2
xL1(ETag, Stunde)	g <sub>w</sub> /kg <sub>L</sub>	Absolute Feuchte des Luftstromes 1
xL2(ETag, Stunde)	g <sub>w</sub> /kg <sub>L</sub>	Absolute Feuchte des Luftstromes 2

### 24 Stunden-Tagesgänge für Umgebungstemperaturen

- Wenn die Temperaturen der Stützstellen (Stundenwerte)  $> -273$  °C sind, erfolgen zwischenzeitlich programminterne Interpolationen nach den Bildern 3.12 bzw. 4.6. Sie haben im Gegensatz zu den Medientemperaturen aber keine Steuerungsfunktion.
- Bei Temperaturangaben von  $-273$  °C findet **kein** Wärmeaustausch mit der Umgebung statt.

tUo(ETag, Stunde)	°C	Temperatur der oberen Speicherumgebung
tUu(ETag, Stunde)	°C	Temperatur der unteren Speicherumgebung
tUv(ETag, Stunde)	°C	Temperatur der vorderen Speicherumgebung
tUh(ETag, Stunde)	°C	Temperatur der hinteren Speicherumgebung

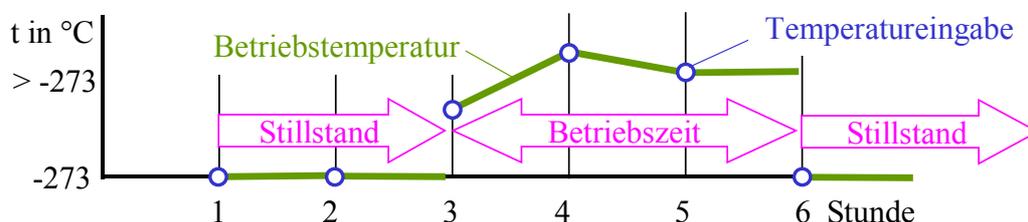
### Starttemperatur

tStart	°C	Temperatur des Speicherkörpers zu Beginn der Simulation Um eindeutige Startbedingungen zu haben, muss die Starttemperatur unter dem Unterwert der Phasenwandeltemperatur oder über dem Oberwert der Phasenwandeltemperatur liegen!
--------	----	---

### Zeiten und Zeitschritte

Uhrbeginn	h	Tageszeit bei der die Simulation beginnen soll
Dtau	s	Zeitschrittweite (Zeitintervall) für die Simulation während der konstante Randbedingungen gelten (Dtau muss durch 3600 ganzzahlig teilbar sein.)
Zeitmax	-	Anzahl der Zeitschritte als Simulationsumfang Simulationszeit = Dtau $\times$ Zeitmax Bezüglich einer sinnvollen Auswertung sind volle Stunden zu wählen!

Zur Kontrolle der Temperaturverläufe und der zeitlichen Randbedingungen können durch Betätigen des Buttons **KONTROLLDRUCK** die Eingabewerte in einer MS Word-Datei erzeugt und anschließend ausgedruckt werden. Bei Aktivierung von **KONTROLLGRAFIK** zeigt eine Vektorgrafik die Temperaturtagesgänge.



**Bild 4.6** Definition der Stillstands- und Betriebszeiten durch die Temperatureingabe für die Mediendurchflüsse (Flüssigkeits- und/oder Luftströme)  
Sie bilden die Grundlage für die programminterne Steuerung.

### 4.3 Datenverwaltung

In dem vom Nutzer angelegten Ordner befinden sich oder werden bei Neueingabe die folgenden Dateien angelegt:

**EINGABE.dat**

(Speicherdaten gemäß Maske 1, Bild 4.3)

**ZVERLAUF.dat** (Zeitverläufe der Randbedingungen gemäß Maske 2, Bild 4.4)

**ERGEBNIS.dat** (Ergebnisdaten der Simulation).

- Erfolgt eine Neueingabe über die beiden Oberflächen (Maske 1 und Maske 2), dann werden die Dateien automatisch angelegt.
- Soll ein vorhandenes Simulationsbeispiel durch Aktivierung des Buttons **BERECHNUNG** (Maske 1, Bild 4.3) abgearbeitet werden, müssen die Dateien EINGABE.dat und ZEITVERLAUF.dat bereits existieren und ordnungsgemäß gefüllt sein.
- Am Ende der Berechnung werden die Ergebnisse automatisch in die Datei ERGEBNIS.dat geschrieben. Existiert die Datei bereits, erfolgt ein Überschreiben.

#### 4.4 Programmlisting, Programmgrundlagen, Installation und Abarbeitung

Die komplette Darstellung des Berechnungsablaufes – das **Programmlisting** – befindet sich im Anhang, und das lauffähige Programm ist auf der beigelegten CD-ROM bzw. als Download unter <http://www.rom-umwelt-stiftung.de/> (Rubrik: Arbeit bisher; Projekt 14 Teil 3) verfügbar.

Alle Module sind gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen, sodass eine Einarbeitung rasch möglich ist. Die Programmierung erfolgte in sehr einfacher Form, Anregungen zu eigenen Verbesserungen sind vielfach offensichtlich.

Das Rechenprogramm ist in Visual Basic.NET geschrieben. Es sollte vorzugsweise direkt in der verwendeten Programmierumgebung **MICROSOFT VISUALBASIC.NET STANDARD** genutzt werden, da somit mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar sind.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetabellen – bewirkt hätte, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu MICROSOFT WORD hergestellt.

#### Gliederung des Rechenprogramms:

Form1.vb	Hauptprogramm mit Ablaufsteuerung und Ergebnisausdruck
Form2.vb	Eingabe der thermischen Randbedingungen mit Kontrollausdruck
Form3.vb	Anzeige zum Simulationsstand in Stunden während der Berechnung
Form4.vb	Kontrollgrafik als Zeitverläufe von Medientemperaturen und Temperaturen der Speicherumgebung in Abhängigkeit der Entwurfstage und Tagesstunden Ergebnisgrafik in Form von Zeitverläufen für die Wärmeströme, Speicherenthalpien und Wärmeleistungen in Abhängigkeit eines frei auswählbaren Betriebszeitraumes

#### Grundlagen für die Programmanwendung:

Voraussetzung für die Programmnutzung sind die Betriebssysteme:

**Microsoft Windows 2000 Professional mit Service Pack 4** oder  
**Microsoft Windows XP mit Service Pack 1.**

Für beide Betriebssysteme werden zum Ablauf des "Raummodells" zusätzlich maximal zwei Datei-

en benötigt, die man unter <http://www.microsoft.com/germany/default.aspx> kostenlos downloaden kann.

1. Datei: [Microsoft® .NET Framework Version 1.1 Redistributable Package](#)

Quickinfo	Dateiname:	dotnetfx.exe
	Downloadgröße:	23709 KB
	Veröffentlichungsdatum:	22.05.2003
	Version:	1.1 bzw. 1.1.4322
Die Datei findet man z. B. unter dem Suchbegriff: Net Framework		

2. Datei: [Sprachpaket Deutsch für Microsoft® .NET Framework Version 1.1](#)

Quickinfo	Dateiname:	langpack.exe
	Downloadgröße:	1408 KB
	Veröffentlichungsdatum:	21.05.2003
	Version:	1.1
Die Datei findet man z. B. unter dem Suchbegriff: Net Sprachpaket		
Das Sprachpaket enthält deutsche Texte, z.B. Fehlermeldungen.		

### Start des Rechenprogramms:

Die übergebenen **.zip-Dateien** sind zu **entpacken** und in ein **eigenes Verzeichnis** auf die Festplatte zu schreiben, z. B. in F:\Stiftung06\. Es werden die Ordner **SPEICHER**, **TEST1** und **TEST2** mit den entsprechenden Dateien angelegt.

Abarbeitung ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner "**SPEICHER**" öffnen ⇒ Datei "bin" öffnen ⇒ "**Speicher.exe**" Doppelklick

Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

**Visual Basic.NET** starten ⇒ Menüleiste "**Datei**" ⇒ "**Öffnen**" ⇒ "**Projekt**" Einfachklick  
 ⇒ Ordner "**SPEICHER**" auswählen ⇒ "**Speicher.sin**" Doppelklick  
 ⇒ Menüleiste "**Debuggen**" Einfachklick ⇒ "**Starten**" Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben!

### Bearbeitung des Programmlistings:

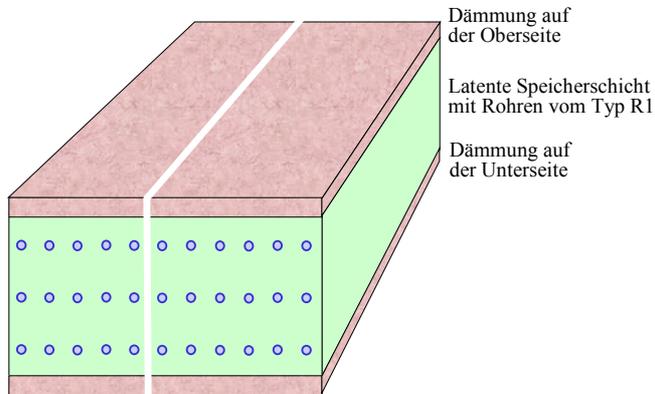
Im Ordner "**SPEICHER**" sind alle Dateien mit den Quellcodes (Form 1 bis 4: Formulare für die Benutzeroberflächen und Programmcodes) enthalten (Auswahl mit Hilfe des Projektmappen-Explorers).

## 4.5 Ausgaben

Die Zusammenstellungen der Eingabewerte sowie der Ergebnisse werden als Word-Datei angezeigt, können individuell geändert, gespeichert und ausgedruckt werden. Zusätzlich ist eine umfangreiche Grafikausgabe möglich. Die Ausgaben sind selbsterklärend und anhand der Testbeispiele ersichtlich.

## 5 Testbeispiele für einen Speicher mit Paraffin-Salzhydrat-Gemisch und flüssigkeitsdurchströmten Kunststoff-Kapillarrohrmatten

Für die Tests dieser Reihe wird im Weiteren ein Speicherkörper mit drei Lagen von Kunststoff-Kapillarrohrmatten nach Bild 5.1 betrachtet.

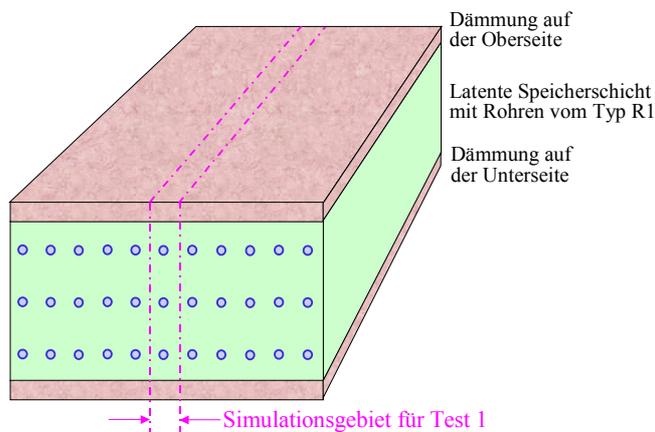


**Bild 5.1** Wärmespeicher mit drei Lagen Kunststoff-Kapillarrohrmatten und allseitiger Dämmung gleicher Dicke, wobei nur die obere und die untere Dämmschicht dargestellt sind

Die numerische Simulation des gezeigten Speichers in der realen Größe würde eine außerordentlich große Rechenzeit erfordern. Deshalb werden drei verschiedene Varianten mit unterschiedlicher Größe der Simulationsgebiete gewählt und abschließend die Ergebnisse verglichen.

### 5.1 Basisbeispiel mit detaillierten Erläuterungen zum Ablauf der Simulation: Test 1

Als erste Variante für die Simulation werde ein symmetrisches Gebiet gemäß dem im Bild 5.2 gezeigten Abschnitt betrachtet. Der Speicherkörper wird in seiner Höhe und in seiner Länge real dargestellt. Die Dämmungen und die außerhalb dieser wirkenden Umgebungstemperaturen entsprechen ebenfalls der Wirklichkeit. Die Symmetrieebenen stellen wärmetechnisch adiabate Begrenzungen dar. Der reale Speicher wird somit nur bei sehr breiten Speichern nahezu fehlerfrei wiedergegeben, da der Randeinfluss dann vernachlässigbar ist. Bild 5.3 zeigt die detaillierte Geometrie des Speichers.



**Bild 5.2** Wärmespeicher nach Bild 5.1 mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes für Test 1

Die Kapillarrohre der drei Matten liegen übereinander. Sie befinden sich bezüglich der Speicherbreite symmetrisch im Simulationsgebiet.

Die Dämmung an den oberen, unteren, vorderen und hinteren Speicherflächen von je 40 mm Dicke ( $\lambda_D = 0,04 \text{ W}/(\text{m K})$ ) und die jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten ( $\alpha_U \approx 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) finden Beachtung.



zu entnehmen.

Im ersten Fall der Programmanwendung werde die Handhabung detailliert beschrieben.

- **Start und Dateneingabe für den Speicher**

Nach dem Programmstart (Betätigen von **STARTEN**) und der Bestätigung oder Änderung der Pfadangebe entsprechend Bild 4.2 kann die Dateneingabe erfolgen. Im Ergebnis der Arbeit ist die Maske – wie im Bild 5.4 dargestellt – gefüllt.

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (VI/2006) Entwurfstag 1

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax	
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273 < Unterwert	0	
Flüssigwerte >>							-273 < Oberwert	
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273 < Unterwert	0	
Flüssigwerte >>							-273 < Oberwert	
Schicht s = 1	1,75	1380	0,5	2500	120	22 < Unterwert	95	
Flüssigwerte >>							0,6 < Oberwert	

\* Bei Phasenwandelmaterial Lambda- sowie c-Flüssigzustand, r und t-Wandel (Ober- und Unterwert) angeben!

**Gitterdaten für x- und z-Achse:**

Ro oberer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_oben: 1,13 m²KW  
 Ru unterer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_unten: 1,13 m²KW  
 Rv vorderer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_vorn: 1,13 m²KW  
 Rh hinterer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha\_hinten: 1,13 m²KW

Bezugstemperatur für Speicherwärmebestimmung: 0 °C

Dx: 100 mm  
 iSmax: 19  
 Dz: 1,65 mm  
 kSmax: 17

**Geometrie der Rohre und Kanäle**

Rohr Kanal n	jmin	jmax	kmin	kmax	Rohr / Kanal Typ
1	15	16	8	9	R1
2	47	48	8	9	R1
3	79	80	8	9	R1
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	

**Rohr-, Kanal- und Mediendaten**

Typ	da in mm	Wanddicke mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Rohr-/Kanalzahl	Art des Mediums Tyfooor L Wasser Luft	Medienstrom l/h	Strömungsrichtung	Temp. Typ
R1	4,3	0,8	897	0,21	2000	3	40% 50%	10	1	1
R2	0	0	0	0	0	0		0	0	0
K1	0	0	0	0	0	0		0	0	0
K2	0	0	0	0	0	0		0	0	0

**Abläufe:**

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. DATENSPEICHERUNG drücken!
5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!

**Buttons:** STARTEN, DATEI LADEN, ZEITVERLAUF, DATENSPEICHERUNG, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE, DIAGRAMM, DRUCK ERGEBNISSE, BEENDEN

**Bild 5.4** Benutzeroberfläche 1 nach dem Eintragen der Speicherdaten für Test 1

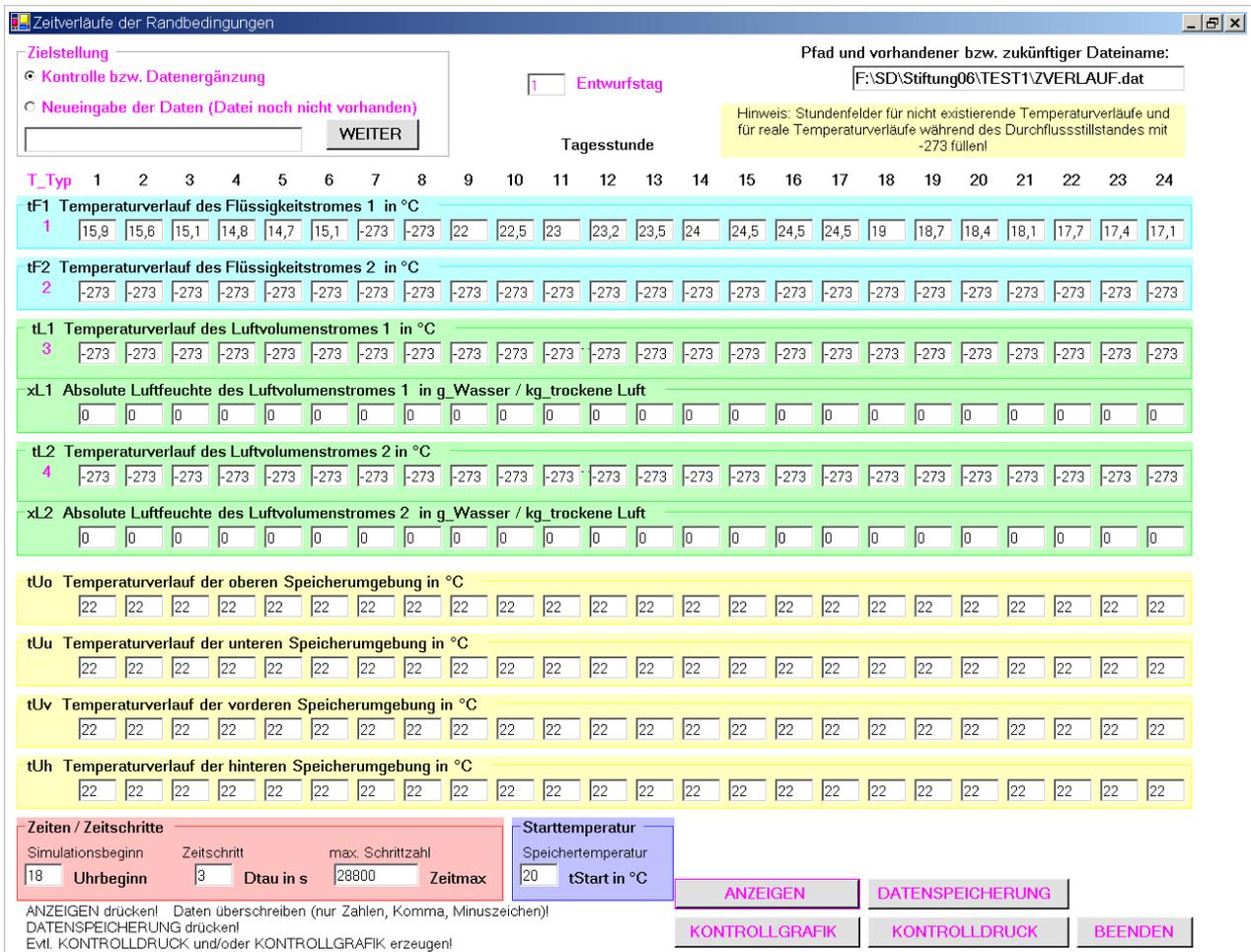
Zur Sicherung der eingegebenen Daten muss unbedingt der Button **DATENSPEICHERUNG** aktiviert werden. Mittels Button **DRUCK EINGABEWERTE** folgt die Zusammenstellung der Speicherdaten als separater Ausdruck in MS WORD. Dieser ermöglicht eine gewissenhafte Kontrolle der Eingaben vor dem eigentlichen Berechnungsstart und wird dringend empfohlen. Die detaillierte Überprüfung der Schichtdaten in Verbindung mit der Zeitschrittweite erfolgt jedoch erst bei der "Basisberechnung".

- **Dateneingabe der thermischen Randbedingungen als Zeitfunktionen**

Durch Betätigen des Buttons **ZEITVERLAUF** in der Maske 1 gelangt man zur zweiten Eingabeoberfläche. Je nachdem, ob es sich um eine Datenergänzung oder eine Neueingabe handelt, ist gemäß Bild 4.5 zu verfahren. Nach dem Drücken von **ANZEIGEN** kann das Ausfüllen der Maske erfolgen. Im betrachteten Testbeispiel würde abschließend der Stand nach Bild 5.5 vorliegen. Der Button **DATENSPEICHERUNG** ist zu betätigen. Danach kann auch ein weiterer Entwurfstag (maximal 5) bear-

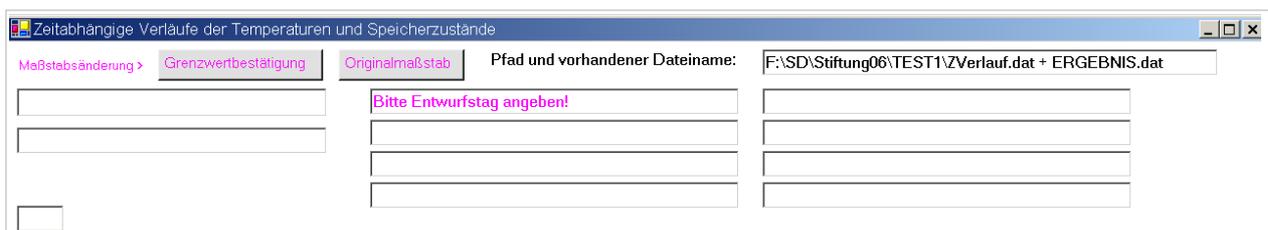
beitet werden.

Die Aktivierung des Buttons **KONTROLLDRUCK** in Maske 2 liefert die Zusammenstellung der zeitbezogenen Eingaben (Temperaturverläufe) in MS WORD.



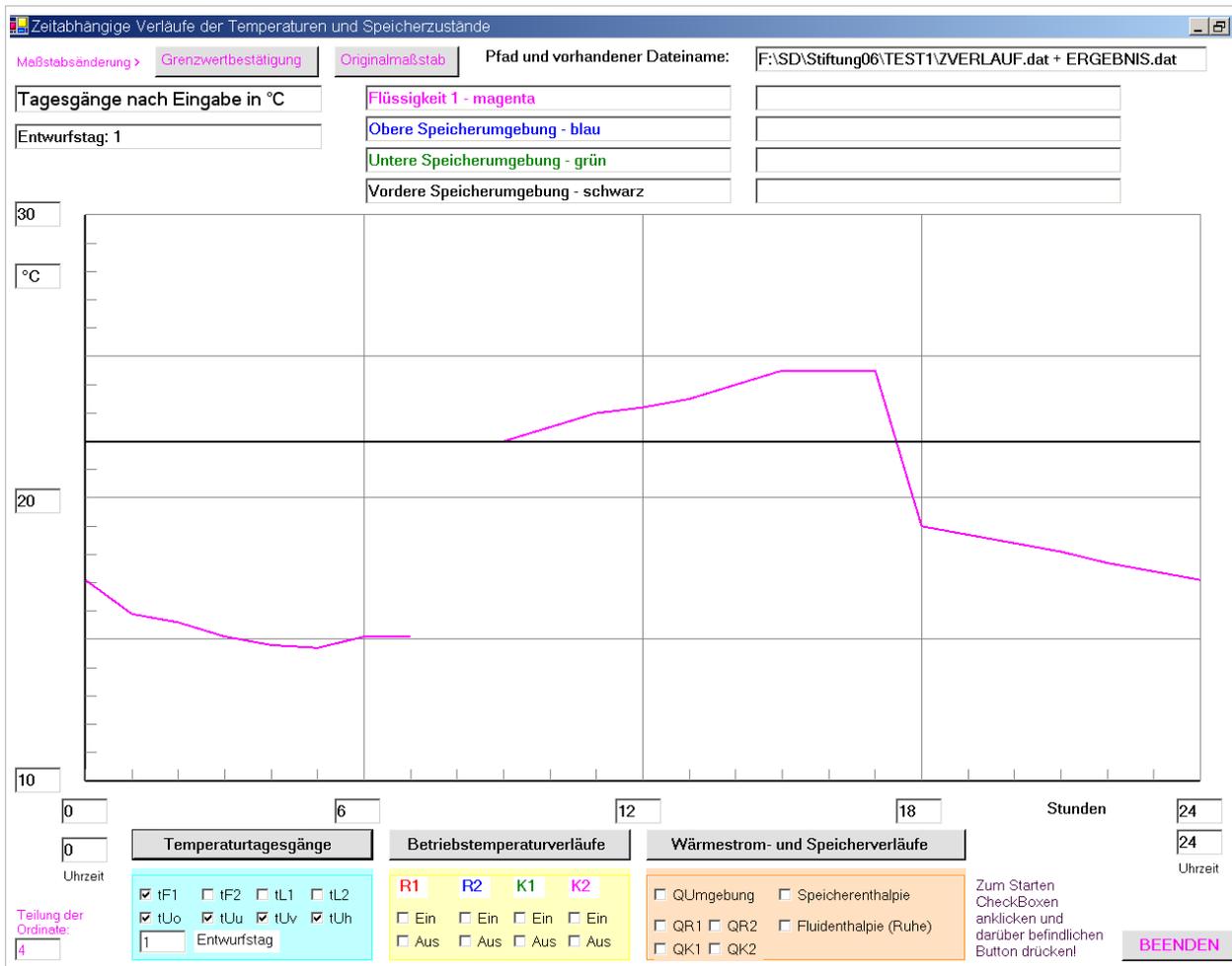
**Bild 5.5** Benutzeroberfläche 2 nach dem Eintragen der Temperaturtagesgänge und Zeitdaten zum Simulationsablauf sowie der Starttemperatur für Test 1

Schließlich ist noch ausgehend von Maske 2 mittels Buttonbetätigung **KONTROLLGRAFIK** die Visualisierung der Temperaturverläufe möglich (Bild 5.7). Die Tagesgänge gelten jeweils für den 24-Stundentag. Welche Verläufe angezeigt werden sollen, ist anhand der CHECKBOXEN zu kennzeichnen. Die farblichen Kurvendarstellungen stimmen mit den Beschreibungen überein. Es können maximal vier Temperaturgänge ausgewählt und gleichzeitig dargestellt werden. Der Entwurfstag ist einzutragen. Falls dies unterlassen wurde, erfolgt der Ausdruck nach Bild 5.6. Das Diagramm wird nach der Buttonbetätigung **TEMPERATURTAGESGÄNGE** gezeichnet.



**Bild 5.6** Diagramm zur Ausgabe der Temperaturverläufe mit Hinweis auf die fehlende Angabe des Entwurfstages

Nach ordnungsgemäßer Eingabe des Entwurfstages erfolgt die Ausgabe nach Bild 5.7. Die Zeitachse (Abszisse) ist bei dieser Darstellung (Tagesgang) fest definiert ( $0^{00} \dots 24^{00}$  Uhr), die Temperaturachse (Ordinate) kann aber durch Überschreiben der Grenzwerte, dem Drücken des Buttons **Grenzwertbestätigung** und erneuter Betätigung **Temperaturtagesgänge** beliebig verändert werden. Gleiches gilt für die Achsteilung, die ebenfalls wählbar ist, sodass gut ablesbare Darstellungen entstehen. Zwischen den Hauptunterteilungen werden automatisch fünf Subunterteilungen mit kurzen Achsstrichen gestaltet. Will man die voreingestellte Achsteilung wieder herstellen, dann sind **Originalmaßstab** und danach **Temperaturtagesgänge** zu drücken.



**Bild 5.7** Tagesgänge der Wassereintrittstemperatur (zwischen  $7^{00}$  Uhr und  $9^{00}$  Uhr erfolgt kein Durchfluss) und der Umgebungstemperaturen (letztere liegen übereinander,  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

In der Maske 2 (Bild 5.5) sind für den Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 1 die Temperaturfelder für  $7^{00}$  und  $8^{00}$  Uhr mit  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  gefüllt, was den Stillstand des Mediendurchflusses kennzeichnet. Da die Interpolation der Zwischenwerte nach Bild 4.6 mit ca. einer Stunde "Nachwirkung" vorgenommen wird, ist die Wassertemperatur im Simulationszeitraum bis  $<7^{00}$  Uhr (real bis 3 s vorher) und ab  $9^{00}$  Uhr bei gleichzeitigem Wasserdurchfluss definiert.

- **Berechnung**

Nach dem Betätigen von **BERECHNUNG** erfolgen programmintern eine Reihe von Prüfungen, die auf wichtige Strukturfehler bei der Eingabe hinweisen. Hierzu gehören beispielsweise eine Überprüfung der Schichtenfolge, der Gittergrenzen, der Rohr- bzw. Kanaltypen sowie der Zuordnung unterschied-

licher Außenabmessungen. Diese Eingabekontrolle ist nur als Grobprüfung zu verstehen.

Detailliert werden für alle Schichten, Materialzustände (geschmolzen oder ungeschmolzen) und für die Durchflussteile bei Stillstand die zulässigen Zeitschrittweiten mit der gewählten – hier  $\Delta\tau$  ( $\equiv \Delta\tau$ ) = 3 s – verglichen, damit in allen Fällen das Stabilitätskriterium nach Gl. (3.35) erfüllt ist.

Falls Unkorrektheiten erkennbar sind, wird durch entsprechende Ausschriften darauf verwiesen. Bild 5.8 zeigt einige Beispiele.

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Autoren: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2006)  Entwurfstag

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 1	0	1380	0,5	2500	120	22	95

Flüssigwerte >>: 0, 0, 0,6

**Geometrie der Röhre und Kanäle**

Rohr Kanal n	jmin	jmax	kmin	kmax	Typ
1	15	16	8	9	R1
2	47	48	8	9	R1
3	79	80	8	9	R1
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	

**Warnungen:** Schichtaufbau unreal! Fehlende Gitterabmessung!

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Autoren: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2006)  Entwurfstag

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 1	0	1380	0,5	2500	120	22	95

Flüssigwerte >>: 0, 0, 0,6

**Geometrie der Röhre und Kanäle**

Rohr Kanal n	jmin	jmax	kmin	kmax	Typ
1	15	16	8	9	R1
2	47	48	8	9	R1
3	99	80	8	9	R1
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	

**Warnung:** Rohr-/Kanaldaten unreal! n = 3

Min. Rohrbegrenzung größer als max. Rohrbegrenzung und größer als max. Schichtgrenze!

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Autoren: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2006)  Entwurfstag

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 1	1,75	1380	0,5	2500	120	22	95

Flüssigwerte >>: 0,6, 1000

**Geometrie der Röhre und Kanäle**

Rohr Kanal n	jmin	jmax	kmin	kmax	Typ
1	15	16	8	9	R1
2	47	48	8	9	R1
3	79	80	8	9	R1
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	

**Warnung:** Zeitschritt 's = 1 flüssig' kleiner! 1,65720

Aufgrund einer Falscheingabe ergibt sich die zulässige Zeitschrittweite kleiner als der gewählte Wert von 3 s!

**Bild 5.8** Beispiele für Hinweisausschriften bei fehlerhaften Eingaben

**Hauptprogramm** | Temperaturverlauf fehlt! Typ = 1 | F:\SD\Stiftung06\TEST1\

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Author: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2006) | Entwurfstag

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 1	1,75	1380	0,5	2500	120	22	95

Bei Phasenwandelmaterial Lambda- sowie c-Flüssigzustand, r und t-Wandel (Ober- und Unterwert) angeben!

**Wärmeleitwiderstände:** Ro: 1,13 m²KW, Ru: 1,13 m²KW, Rv: 1,13 m²KW, Rh: 1,13 m²KW

**Gitterdaten für x- und z-Achse:** Dx: 100 mm, iSmax: 19, Dz: 1,65 mm, kSmax: 17

**Rohr-, Kanal- und Mediendaten**

Typ	da in mm	Wanddicke mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Rohr-/Kanalzahl	Art des Mediums	Medienstrom l/h	Strömungsrichtung	Temp. Typ
R1	4,3	0,8	897	0,21	2000	3	40% 50%	10	1	0

**Abläufe:**  
1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!  
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe

Fehlende Eingabe des Temperaturtyps für den Wasserstrom bei Rohrtyp 1!

**Hauptprogramm** | Rohrtyp R1 unreal! | F:\SD\Stiftung06\TEST1\

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Author: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (V1/2006) | Entwurfstag

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t_Wandel °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273	0
Schicht s = 1	1,75	1380	0,5	2500	120	22	95

Bei Phasenwandelmaterial Lambda- sowie c-Flüssigzustand, r und t-Wandel (Ober- und Unterwert) angeben!

**Wärmeleitwiderstände:** Ro: 1,13 m²KW, Ru: 1,13 m²KW, Rv: 1,13 m²KW, Rh: 1,13 m²KW

**Gitterdaten für x- und z-Achse:** Dx: 100 mm, iSmax: 19, Dz: 1,65 mm, kSmax: 17

**Rohr-, Kanal- und Mediendaten**

Typ	da in mm	Wanddicke mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Rohr-/Kanalzahl	Art des Mediums	Medienstrom l/h	Strömungsrichtung	Temp. Typ
R1	0	0,8	897	0,21	2000	3	40% 50%	10	1	1

**Abläufe:**  
1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!  
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe

Fehlende Eingabe des Außendurchmessers für den Rohrtyp 1!

**Bild 5.8** (Fortsetzung) Beispiele für Hinweisausschriften bei fehlerhaften Eingaben

Es sei aber nochmals hervorgehoben, dass keine Komplettprüfung erfolgen kann!

Während der Berechnung wird in einem separaten Fenster (Bild 5.9) der Simulationsstand für volle

Stunden angezeigt. Am Ende kommt eine Hinweisschrift (Bild 5.10).

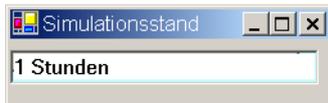


Bild 5.9 Anzeige des Simulationsstandes



Bild 5.10 Kennzeichnung des Simulationendes in der Bedienoberfläche 1

- **Simulationsergebnisse anhand des Rechnerausdrucks**

Zunächst wird der Ergebnisdruck komplett wiedergegeben. Er beinhaltet die gesamte, für die Simulation zutreffende Eingabe und die Stundenergebnisse für den ersten Simulationstag.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST1\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen:

Schicht	Delta_y	Rho	Lambda		c		r	t_Wandel		jSSmax
			fest	flüssig	fest	flüssig		Beginn	Ende	
	mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)		J/(kg K)		kJ/kg	°C		
1	1,75	1380,0	0,500	0,600	2500,0	2000,0	120,0	22,0	24,0	95

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: 0,1680 m  
Höhe der Schicht 2: 0,0000 m  
Höhe der Schicht 3: 0,0000 m  
Breite des Speicherkörpers (Simulationsausschnitt): 0,0297 m  
Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 2,0000 m

Delta_x	Delta_z	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
				R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
mm	mm			m <sup>2</sup> K/W			
100,00	1,65	19	17	1,13000	1,13000	1,13000	1,13000

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  
Die Wärmeleitwiderstände schließen Dämmschichten und Wärmeübergang ein!

## Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	15	16	8	9	R1
2	47	48	8	9	R1
3	79	80	8	9	R1

## 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	4,3			0,80	897,0	0,21	2000,0	3	10,0	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)

## Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1:

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

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



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

## Legende:

BS	Betriebsstunden des Speichers (= 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:	-

- Grundsätzliche Feststellungen

- Die in den Bedienoberflächen 1 und 2 (Bilder 5.4 und 5.5) eingetragenen Werte bezüglich des Speichers und der Temperaturverläufe sind richtig ins Rechenprogramm übernommen worden. Sie finden sich im Ausdruck wieder.
- Die Abmessungen des Simulationsgebietes sind in Ordnung:
- Höhe 168 mm und Länge 2000 mm entsprechen den realen Abmessungen des Speicherkörpers, die Breite von 29,7 mm ist mit dem Ausschnitt des Simulationsgebietes (Bilder 5.2 und 5.3) identisch.
- Die Einordnung der Rohre nach Bild 5.3 ist ebenfalls richtig erfolgt.

- Ergebnisbewertungen

- Es ist zu beachten, dass die Wärme an die Umgebung und an die Rohre jeweils Summenergebnisse über die vergangene Stunde darstellen. Dadurch treten natürlich gegenüber Momentanwerten des Wärmestromes am Ende einer vollen Stunde Abweichungen auf, sodass nur näherungsweise Vergleiche möglich sind.
- Der Wärmestrom an die Umgebung kann besonders einfach zu Beginn (0. Betriebsstunde) kon-

trolliert werden, da die Speichertemperatur am Rand noch die Starttemperatur von 20 °C besitzt und die Umgebungstemperatur einheitlich 22 °C beträgt. Es gelten:

$$A = 2 (0,0297 \cdot 2 + 0,0297 \cdot 0,168) \text{ m}^2 = 0,12878 \text{ m}^2$$

$$R = 1,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\Delta t = 2 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = A R^{-1} \Delta t = 0,23 \text{ W.}$$

Während der ersten Betriebsstunde nimmt der Speicher von der Umgebung 0,24 Wh auf, d. h., es besteht Übereinstimmung.

- Der Wasserstrom von etwa  $\dot{V}_W = 10 \text{ l/h}$  durch die drei Rohre wird während der 3. bis 6. Betriebsstunde um jeweils ca. 0,3 K erwärmt. Dabei erfolgt eine Wärmezufuhr an die Rohre von:

$$\dot{Q} = \dot{m}_W c_W \Delta t = \frac{0,010}{3600} 1000 \cdot 4200 \cdot 0,3 \text{ W} = 3,5 \text{ W.}$$

Die Simulationsergebnisse – im Mittel 3,54 Wh – bestätigen die Überschlagsrechnung. Bei Inbetriebnahme erfolgt eine größere, zeitlich nichtkonstante Wärmeaufnahme.

- Die stündliche Wärmebilanz sei für die 6. Betriebsstunde vorgestellt.

Speicherwärme im Speicherkörper am Ende der 5. Betriebsstunde:	173,00 Wh
Wärme zwischen der 5. und 6. Betriebsstunde an das Rohr:	-3,47 Wh
Wärme zwischen der 5. und 6. Betriebsstunde von der Umgebung an den Speicherkörper:	+0,42 Wh
Speicherwärme im Speicherkörper am Ende der 5. Betriebsstunde:	169,95 Wh

Es besteht Identität mit dem Rechnerausdruck. Die ausgewiesene Differenz  $DQ = 0$  stimmt.

- Die Bilanz wird zu Beginn des Stillstandes des Medienflusses etwas gestört. Ursache ist die Bilanzdefinition, die die Enthalpie ("Wärmeinhalt") des fließenden Medienstromes unbeachtet lässt, die gespeicherte Wärme in Rohrregistern mit stehendem Wasser aber ermittelt. Beide Vorgehensweisen sind während der Phasen "Durchfluss" bzw. "Stillstand" begründet, beim Übergang ergeben sich dann aber logischerweise Diskrepanzen.
- Die im Rohrregister gespeicherte Wärme ist gegenüber der im Speicher material sehr gering. Sie beträgt in diesem Fall um 7<sup>00</sup> Uhr unter Verwendung der Gl. (3.26):

$$Q = V_{\text{Rohr}} (\rho c)_{\text{app}} \Delta t = 4 \cdot \underbrace{1,75 \cdot 1,65 \cdot 10^{-6}}_{\substack{\text{Elementzahl} \\ \text{Elementabmessungen}}} \cdot \underbrace{3 \cdot 2}_{\substack{\text{Rohrzahl} \\ \text{Rohrlänge}}} \cdot 2696241 \cdot \underbrace{15,15}_{\substack{(\rho c)_{\text{app}} \\ \text{(Rohrtemperatur - Bezugstemperatur)}}} / 3600 \text{ Wh} = 0,79 \text{ Wh.}$$

Rohrtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene  $k = 9$  zur Zeit 7<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
48	15,13	15,11	15,11	15,12	15,12	15,12	15,13	15,13	15,13	15,14	15,14	15,14	15,15	15,15	15,16	15,16	15,17	15,17	15,18	15,20
47	15,13	15,11	15,11	15,12	15,12	15,12	15,13	15,13	15,13	15,14	15,14	15,14	15,15	15,15	15,16	15,16	15,17	15,17	15,18	15,20

Bezugstemperatur für die Speicherenthalpie: 0 °C.

Es besteht völlige Übereinstimmung mit dem Rechnerausdruck. Die im stehenden Rohr gespeicherte Wärme tritt in der Bilanz bei Beginn und am Ende des Medienstillstandes als Differenz DQ mit unterschiedlichem Vorzeichen auf. Das Ergebnis über die Gesamtbetriebszeit ist nicht fehlerbehaftet.

- Beginnt der Mediendurchfluss – wie beispielsweise in der 15. Betriebsstunde um 9<sup>00</sup> Uhr Tageszeit mit der Wassereintrittstemperatur von 22 °C – dann wird die "Medienneufüllung" in allen Rohr- bzw. Kanalelementen mit 22 °C sofort bei der Ermittlung der Wärmeströme wirksam. Die jeweils neue Elementtemperatur im Rohr- bzw. Kanalbereich am Ende des Zeitschrittes unterliegt jedoch den Temperaturbegrenzungen, die durch das Stabilitätskriterium gegeben sind. Die vorhandene Sprungfunktion führt zu Wärmestromspitzen zwischen Rohr und Speichermaterial, die rasch abklingen. Auf das Gesamtergebnis nehmen die kurzzeitigen Überzeichnungen keinen Einfluss, da die Zeitschritte beispielsweise mit 3 s sehr klein sind und die Auswertung im Stundenrhythmus vorgenommen wird.

Falls dennoch das Bedürfnis zur Verfeinerung der Abläufe bestünde, könnte man anstelle des Temperatursprunges Einlaufkurven gestalten, die dann sinnvollerweise aber auch real begründete Totzeiten beinhalten sollten.

- **Simulationsergebnisse anhand der Grafikausgabe**

Zur Grafikausgabe kann man von der Bedienoberfläche 1 aus durch die Betätigung des Buttons **DIAGRAMM** gelangen. Da das gleiche Unterprogramm auch über den **KONTROLLAUSDRUCK** von der Maske 2 aus erreichbar ist, wäre prinzipiell auch dieser Weg denkbar.

#### Betriebstemperaturverläufe

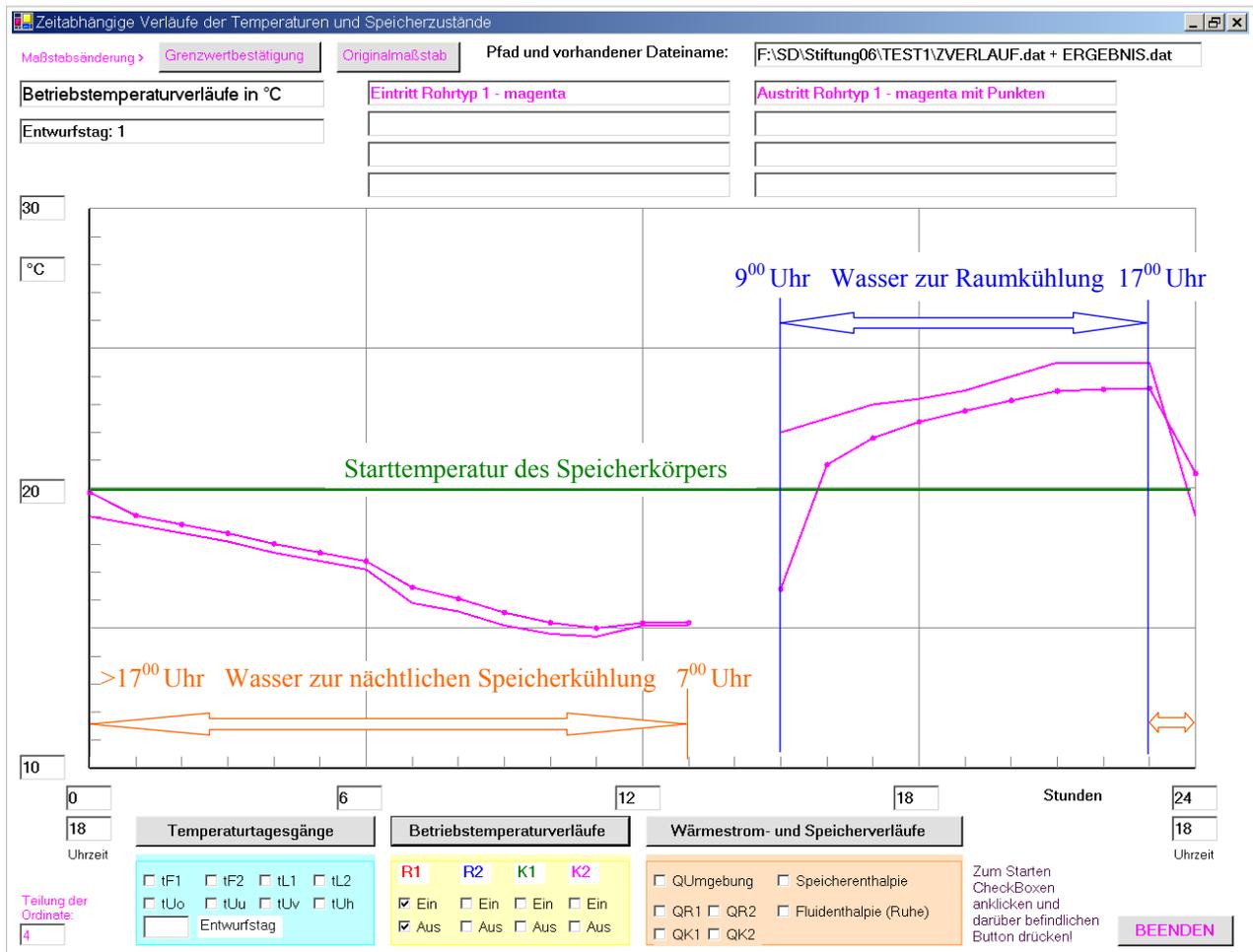
Bild 5.11 zeigt die **Betriebstemperaturverläufe** für die Wasserein- und -austrittstemperatur an. Die Auswahl wurde anhand der CHECKBOXEN getroffen. Zum Bild 5.7 ist die Handhabung der Maßstabsveränderung bereits beschrieben worden. Sie gilt bei den Betriebstemperaturverläufen sowie bei den Wärmestrom- und Speicherverläufen auch für die Auswahl des Betriebsstundenbereiches. Anfang und Ende der Betriebsstunden sind überschreibbar. Nach der **Grenzwertbestätigung** und erneutem Drücken beispielsweise der **Betriebstemperaturverläufe** werden diese aktuell angezeigt. Die Tageszeit wird zugehörig zur Betriebsstunde vermerkt. Sie ist nicht eingebbar.

#### Anmerkungen zu den speziellen Wassertemperaturverläufen:

- Der Verlauf der Wassereintrittstemperatur entspricht selbstverständlich dem Bild 5.7, wobei die Verschiebung der Zeitachse (Tageszeit) zu beachten ist.
- Die Wassereintrittstemperatur liegt beim Simulationsstart unter der Speichertemperatur, sodass sich das eintretende Wasser erwärmt. Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt steigt mit überproportional sinkender Wassertemperatur an, da das treibende Potential zwischen den Rohroberflächen und dem Speichermaterial wächst.
- Zwischen 6<sup>00</sup> und 7<sup>00</sup> Uhr bleibt die Eintrittstemperatur konstant, damit geht die Temperaturdifferenz zum Speichermaterial im angrenzenden Rohrbereich zurück und infolge des sinkenden Wärmestromes nähert sich die Wasseraustrittstemperatur der Eintrittstemperatur an.
- Nach der Durchflussunterbrechung beginnt die Aufwärmung des Speichermaterials, da die Was-

sereintrittstemperatur deutlich angestiegen ist. Der große Temperaturunterschied zum Speicher material bewirkt zum Neustart des Wasserdurchflusses einen großen Wärmestrom und damit eine relativ niedrige Wasseraustrittstemperatur.

- Nach 17<sup>00</sup> Uhr kehren sich die Verhältnisse um, das Speichermaterial wird wieder gekühlt.
- Beispielhaft ist im Bild 5.11 ein denkbare praktisches Belastungsregime (tags Anschluss eines Raumkühl systems, nachts Speicherkühlung durch Kühlturbetrieb) eingetragen.



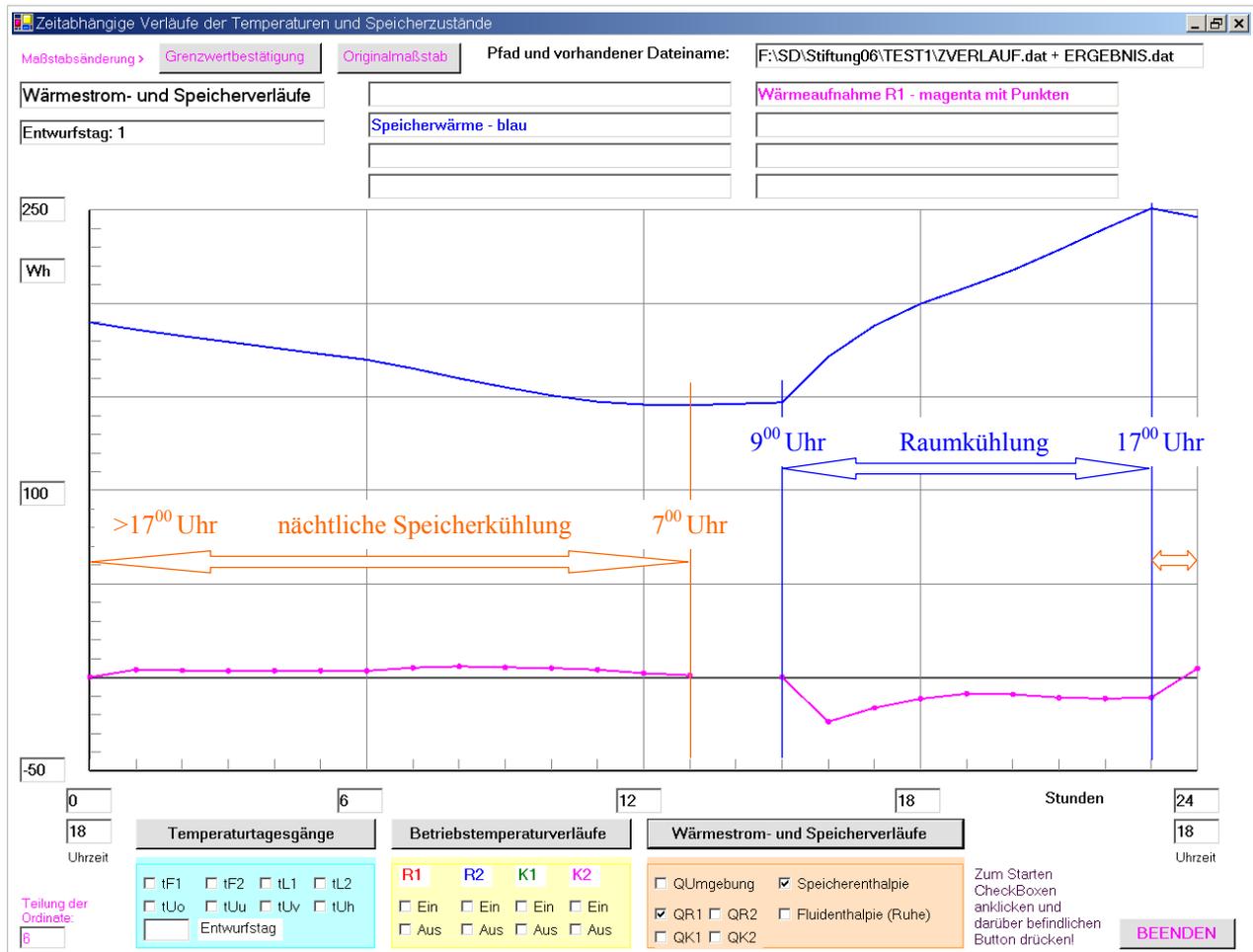
**Bild 5.11** Wassertemperaturen am Ein- und Austritt des Speichers mit Kennzeichnung möglicher Betriebsbedingungen (Der quantitative Verlauf in der Darstellung ist identisch mit dem Rechnerausdruck!)

### Wärmestrom- und Speicherverläufe

Die Bilder 5.12 und 5.13 zeigen die Wärmestrom- und Speicherverläufe in getrennten Darstellungen, da sich ihre absoluten Größen zu stark unterscheiden. Es müssen unbedingt ungleiche Maßstäbe gewählt werden.

Die Auswahl der Kurvendarstellung erfolgt wiederum durch Markierung der CHECKBOXEN. Die Kurven und ihre Beschreibungen sind farblich identisch.

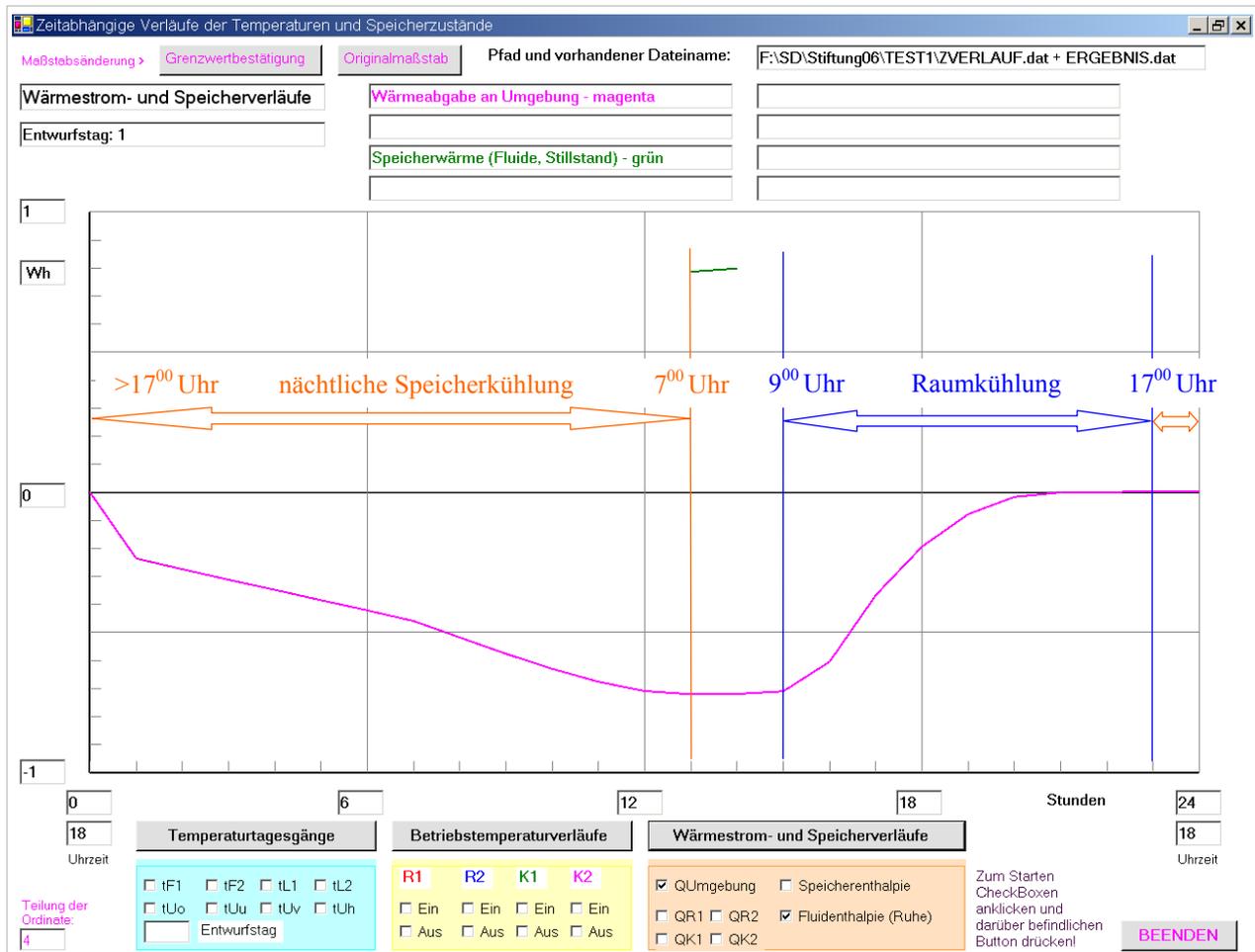
Die kompletten Bildschirmdarstellungen werden letztmalig gezeigt, im Weiteren folgen dann nur noch Ausschnitte.



**Bild 5.12** Enthalpie ("Wärmeinhalt") des Speichermaterials – ermittelt am Ende einer jeden Simulationsstunde – und Wärmeaufnahme durch das Rohrregister – summiert über die jeweils vorhergehende Simulationsstunde – für die Simulationszeit von 24 Stunden (Der Verlauf in der Darstellung ist identisch mit dem Rechnerausdruck!) Zusätzlich sind zur Verbesserung der Anschaulichkeit die denkbaren Nutzungsmöglichkeiten vermerkt.

#### Anmerkungen zu den im Bild 5.12 dargestellten Verläufen:

- Zum eindeutigen Verständnis sei nochmals hervorgehoben, dass die Wärmeaufnahme des Rohrregisters sich auf die stets vorhergehende Betriebsstunde ( $\equiv$  Simulationsstunde) bezieht. Deshalb hat die Wärmeaufnahme sowohl zur Betriebsstunde = 0 als auch zum Wiederbeginn des Wasserdurchflusses – Betriebsstunde = 15 – den Wert null.
- Während des Stillstandes des Wasserdurchflusses zwischen 7<sup>00</sup> und 9<sup>00</sup> Uhr erfolgt richtigerweise kein Wärmestrom an das Rohrregister.
- Nachts erfolgt die Kühlung des Speicherkörpers, folglich ist der Wärmestrom an das Rohrregister positiv. Er beträgt im Mittel 3,9 W, was in 13 Stunden die Summe von ca. 50,6 Wh ergibt.
- Der Speicherkörper wird nachts um etwa 44,3 Wh entspeichert. Durch die Nutzung am Tage steigt seine Enthalpie ("Wärmeinhalt") um ca. 99 Wh an.
- Da am Ende des 24-Stundenintervalls auch nicht annähernd der willkürlich gewählte Anfangszustand erreicht wird (kein eingeschwungener Zustand), kann kein Gleichgewicht zwischen den getauschten Wärmemengen vorliegen.



**Bild 5.13** Fluidenthalpie ("Wärmeinhalt") des stehenden Wassers im Rohr – ermittelt am Ende der betreffenden Simulationsstunde – und Wärmeabgabe des Speicherkörpers an die Umgebung – summiert über die jeweils vorhergehende Simulationsstunde – für die Simulationszeit von 24 Stunden (Der Verlauf in der Darstellung ist identisch mit dem Rechnerausdruck!)

Zusätzlich sind zur Verbesserung der Anschaulichkeit die denkbaren Nutzungsmöglichkeiten vermerkt.

#### Anmerkungen zu den im Bild 5.13 dargestellten Verläufen:

- Wegen der Kleinheit der Ergebniswerte ist der Ordinatenmaßstab extrem groß gewählt worden.
- Die Wärmeabgabe des Speicherkörpers an die Umgebung (hier  $\leq 0$ ) bezieht sich stets auf die vorhergehende Betriebsstunde ( $\equiv$  Simulationsstunde). Deshalb ist zur Betriebsstunde = 0 auch die Wärmeabgabe null.
- In den ersten 13 Betriebsstunden nimmt der Speicherkörper von der Umgebung ( $22\text{ °C}$ )  $6,3\text{ Wh}$  auf. Damit ist die Bilanz um den Speicherkörper erfüllt:

Wärme vom Speichermaterial an das Rohrregister	50,6 Wh
Wärme von der Umgebung an das Speichermaterial	-6,3 Wh
Enthalpieverringerung des Speichermaterials	<u>44,3 Wh</u>

Dies entspricht richtigerweise der nächtlichen Abkühlung des Speicherkörpers nach den Anmerkungen zu Bild 5.12.

- Von  $7^{00}$  bis  $9^{00}$  Uhr besteht kein Wasserdurchfluss. Da er genau  $9^{00}$  Uhr wieder beginnt, werden nur für  $7^{00}$  und  $8^{00}$  Uhr die im Rohrregister gespeicherten Wärmemengen bestimmt. Dies ist im Diagramm richtig wiedergegeben.

• Simulationsergebnisse anhand spezieller Temperaturfelder

Zur detaillierten Überprüfung der Wärmetransportvorgänge können mittels eines speziellen Programmiergriffs zu jeder vollen Stunde Temperaturfelder quer und längs im Speicherkörper erzeugt werden. Für einige interessante Fälle seien nachfolgende Ausdrücke vorgestellt.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST1\

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17
95	18,77	18,77	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,77
94	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75
93	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74
92	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72
91	18,71	18,71	18,71	18,71	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,71	18,71	18,71	18,71
90	18,69	18,69	18,69	18,69	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,69	18,69	18,69	18,69
89	18,67	18,67	18,67	18,67	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,67	18,67	18,67	18,67
88	18,65	18,65	18,64	18,64	18,64	18,64	18,63	18,63	18,63	18,63	18,63	18,63	18,64	18,64	18,64	18,64	18,65	18,65
87	18,63	18,62	18,62	18,62	18,61	18,61	18,61	18,60	18,60	18,60	18,60	18,61	18,61	18,61	18,62	18,62	18,62	18,63
86	18,60	18,60	18,60	18,59	18,59	18,58	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,58	18,59	18,59	18,60	18,60	18,60
85	18,58	18,58	18,57	18,57	18,56	18,55	18,54	18,53	18,53	18,53	18,54	18,55	18,56	18,57	18,57	18,58	18,58	18,58
84	18,56	18,55	18,55	18,54	18,53	18,51	18,50	18,49	18,48	18,48	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,55	18,56
83	18,54	18,53	18,53	18,51	18,50	18,48	18,46	18,44	18,43	18,43	18,44	18,46	18,48	18,50	18,51	18,53	18,53	18,54
82	18,52	18,51	18,50	18,49	18,47	18,44	18,41	18,38	18,35	18,38	18,41	18,44	18,47	18,49	18,50	18,51	18,52	18,52
81	18,50	18,50	18,49	18,47	18,44	18,41	18,36	18,31	18,25	18,25	18,31	18,36	18,41	18,44	18,47	18,49	18,50	18,50
80	18,49	18,49	18,48	18,46	18,43	18,39	18,33	18,24	17,86	17,86	18,24	18,33	18,39	18,43	18,46	18,48	18,49	18,49
79	18,49	18,48	18,47	18,45	18,42	18,38	18,32	18,23	17,86	17,86	18,23	18,32	18,38	18,42	18,45	18,47	18,48	18,49
64	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
63	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
62	18,60	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,60
61	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59
60	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58
59	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
58	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
57	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
56	18,54	18,54	18,54	18,53	18,53	18,53	18,53	18,52	18,52	18,52	18,52	18,53	18,53	18,53	18,53	18,54	18,54	18,54
55	18,52	18,52	18,52	18,52	18,51	18,51	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,51	18,51	18,52	18,52	18,52	18,52	18,52
54	18,51	18,51	18,50	18,50	18,49	18,49	18,48	18,48	18,48	18,47	18,47	18,48	18,48	18,49	18,49	18,50	18,50	18,51
53	18,49	18,49	18,49	18,48	18,47	18,46	18,46	18,45	18,44	18,44	18,45	18,46	18,46	18,47	18,48	18,49	18,49	18,49
52	18,48	18,48	18,47	18,46	18,45	18,44	18,42	18,41	18,41	18,41	18,41	18,42	18,44	18,45	18,46	18,47	18,48	18,48
51	18,46	18,46	18,45	18,44	18,43	18,41	18,39	18,37	18,36	18,36	18,37	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45	18,46	18,46
50	18,45	18,45	18,44	18,43	18,41	18,38	18,35	18,32	18,30	18,30	18,32	18,35	18,38	18,41	18,43	18,44	18,45	18,45
49	18,44	18,44	18,43	18,41	18,39	18,36	18,31	18,26	18,21	18,21	18,26	18,31	18,36	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45
48	18,44	18,44	18,42	18,40	18,38	18,34	18,28	18,20	17,85	17,85	18,20	18,28	18,34	18,38	18,40	18,42	18,44	18,44
47	18,44	18,44	18,42	18,40	18,38	18,34	18,28	18,20	17,85	17,85	18,20	18,28	18,34	18,38	18,40	18,42	18,44	18,44
46	18,45	18,44	18,43	18,41	18,39	18,36	18,31	18,26	18,21	18,21	18,26	18,31	18,36	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45
45	18,45	18,45	18,44	18,43	18,41	18,38	18,35	18,32	18,30	18,30	18,32	18,35	18,38	18,41	18,43	18,44	18,45	18,45
44	18,46	18,46	18,45	18,44	18,43	18,41	18,39	18,37	18,36	18,36	18,37	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45	18,46	18,46
43	18,48	18,48	18,47	18,46	18,45	18,44	18,42	18,41	18,41	18,41	18,41	18,42	18,44	18,45	18,46	18,47	18,48	18,48
42	18,49	18,49	18,49	18,48	18,47	18,46	18,46	18,45	18,44	18,44	18,45	18,46	18,46	18,47	18,48	18,49	18,49	18,49
41	18,51	18,51	18,50	18,50	18,49	18,49	18,48	18,48	18,47	18,47	18,48	18,48	18,49	18,49	18,50	18,50	18,51	18,51
40	18,52	18,52	18,52	18,52	18,51	18,51	18,50	18,50	18,50	18,50	18,50	18,51	18,51	18,52	18,52	18,52	18,52	18,52
39	18,54	18,54	18,54	18,53	18,53	18,53	18,53	18,52	18,52	18,52	18,53	18,53	18,53	18,53	18,54	18,54	18,54	18,54
38	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
37	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
36	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
35	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58
34	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59
33	18,60	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,60
32	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
31	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
18	18,49	18,49	18,48	18,46	18,44	18,42	18,38	18,35	18,33	18,33	18,35	18,38	18,42	18,44	18,46	18,48	18,49	18,49
17	18,49	18,48	18,47	18,45	18,43	18,39	18,35	18,29	18,23	18,23	18,29	18,35	18,39	18,43	18,45	18,47	18,48	18,49
16	18,49	18,48	18,47	18,45	18,42	18,38	18,32	18,23	17,86	17,86	18,23	18,32	18,38	18,42	18,45	18,47	18,48	18,49
15	18,49	18,49	18,48	18,46	18,43	18,39	18,33	18,24	17,86	17,86	18,24	18,33	18,39	18,43	18,46	18,48	18,49	18,49
14	18,50	18,50	18,49	18,47	18,44	18,41	18,36	18,31</										

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 9 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	18,66	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,87	18,88	18,93
94	18,67	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,82	18,83	18,84	18,85	18,87	18,92
93	18,66	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,90
92	18,64	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,73	18,75	18,76	18,77	18,79	18,80	18,81	18,82	18,84	18,89
91	18,62	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,73	18,74	18,75	18,77	18,78	18,79	18,81	18,82	18,87
90	18,60	18,57	18,58	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,73	18,75	18,76	18,77	18,79	18,80	18,85
89	18,57	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,82
88	18,54	18,52	18,53	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,80
87	18,51	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,77
86	18,48	18,46	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,73
85	18,43	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,69
84	18,38	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,44	18,45	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,61	18,65
83	18,32	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,59
82	18,25	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,52
81	18,14	18,13	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,42
80	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
79	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
64	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
63	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
62	18,51	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,76
61	18,51	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,76
60	18,50	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,75
59	18,49	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,67	18,69	18,74
58	18,47	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,73
57	18,46	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,71
56	18,44	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,69
55	18,41	18,39	18,40	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,67
54	18,39	18,36	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,64
53	18,35	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,61
52	18,31	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,57
51	18,26	18,25	18,26	18,28	18,29	18,30	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,52
50	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
49	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
48	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
47	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
46	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
45	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
44	18,26	18,25	18,26	18,28	18,29	18,30	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,52
43	18,31	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,57
42	18,35	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,61
41	18,39	18,36	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,64
40	18,41	18,39	18,40	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,67
39	18,44	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,69
38	18,46	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,71
37	18,47	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,73
36	18,49	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,67	18,69	18,74
35	18,50	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,75
34	18,51	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,76
33	18,51	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,76
32	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
31	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
18	18,22	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,36	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,46	18,49
17	18,12	18,11	18,13	18,14	18,16	18,17	18,19	18,20	18,22	18,23	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,40
16	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
15	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
14	18,14	18,13	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,42
13	18,25	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18									

- Die Elementtemperaturen sind nur bezogen auf das mittlere Rohr symmetrisch, wie die gelben und grünen Markierungen demonstrieren.

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 9 zur Zeit 8<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	15,72	15,61	15,61	15,61	15,62	15,63	15,64	15,65	15,66	15,67	15,68	15,69	15,70	15,71	15,72	15,73	15,74	15,75	15,77	15,89
94	15,70	15,59	15,59	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,64	15,65	15,66	15,67	15,68	15,69	15,70	15,71	15,72	15,73	15,75	15,88
93	15,68	15,57	15,57	15,58	15,58	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,64	15,65	15,66	15,67	15,68	15,69	15,70	15,71	15,73	15,86
92	15,66	15,55	15,55	15,56	15,57	15,58	15,58	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,64	15,65	15,66	15,67	15,68	15,69	15,71	15,84
91	15,65	15,53	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,58	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,64	15,65	15,66	15,67	15,68	15,70	15,82
90	15,63	15,52	15,51	15,52	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,58	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,64	15,65	15,66	15,68	15,81
89	15,61	15,50	15,50	15,51	15,51	15,52	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,58	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,64	15,66	15,79
88	15,60	15,48	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,58	15,59	15,60	15,61	15,62	15,63	15,65	15,77
87	15,58	15,47	15,47	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,58	15,59	15,60	15,61	15,63	15,76
86	15,57	15,45	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,52	15,53	15,54	15,56	15,57	15,58	15,59	15,60	15,62	15,74
85	15,55	15,44	15,44	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,58	15,60	15,73
84	15,54	15,42	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,54	15,55	15,56	15,57	15,59	15,72
83	15,52	15,41	15,41	15,42	15,43	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,54	15,56	15,58	15,70
82	15,51	15,40	15,40	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,54	15,56	15,69
81	15,50	15,38	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,55	15,68
80	15,49	15,37	15,37	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,43	15,44	15,45	15,46	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,54	15,67
79	15,47	15,36	15,36	15,37	15,37	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,53	15,65
64	15,35	15,24	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,37	15,38	15,40	15,53
63	15,35	15,23	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,40	15,53
62	15,35	15,23	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,37	15,39	15,52
61	15,34	15,22	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,52
60	15,34	15,22	15,22	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,52
59	15,33	15,21	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,51
58	15,33	15,21	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,38	15,51
57	15,33	15,21	15,21	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,37	15,51
56	15,33	15,21	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,37	15,50
55	15,32	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,37	15,50
54	15,32	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,35	15,37	15,50
53	15,32	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,38	15,50
52	15,32	15,20	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,50
51	15,32	15,20	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
50	15,32	15,20	15,19	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
49	15,32	15,20	15,19	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
48	15,32	15,20	15,19	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
47	15,32	15,20	15,19	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
46	15,32	15,20	15,19	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
45	15,32	15,20	15,19	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
44	15,32	15,20	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,49
43	15,32	15,20	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,50
42	15,32	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,50	
41	15,32	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,35	15,37	15,50
40	15,32	15,20	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,37	15,50
39	15,33	15,21	15,20	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,37	15,50
38	15,33	15,21	15,21	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,37	15,51
37	15,33	15,21	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,36	15,38	15,51
36	15,33	15,21	15,21	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,51
35	15,34	15,22	15,22	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,52
34	15,34	15,22	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,37	15,39	15,52
33	15,35	15,23	15,22	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,37	15,39	15,52
32	15,35	15,23	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,38	15,40	15,53
31	15,35	15,24	15,23	15,24	15,25	15,26	15,27	15,28	15,29	15,30	15,31	15,32	15,33	15,34	15,35	15,36	15,37	15,38	15,40	15,53
18	15,45	15,34	15,33	15,34	15,35	15,36	15,37	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,50	15,63
17	15,46	15,35	15,35	15,35	15,36	15,37	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,51	15,64
16	15,47	15,36	15,36	15,37	15,37	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,53	15,65
15	15,49	15,37	15,37	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,43	15,44	15,45	15,46	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,54	15,67
14	15,50	15,38	15,38	15,39	15,40	15,41	15,42	15,43	15,44	15,45	15,46	15,47	15,48	15,49	15,50	15,51	15,52	15,53	15,55	15,68
13	15,51	15,40	15,40	15,40</																

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 17<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17
95	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
94	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,03	22,03	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
93	22,02	22,02	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,02
92	22,03	22,03	22,03	22,03	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,03	22,03	22,03
91	22,04	22,04	22,04	22,04	22,05	22,05	22,05	22,05	22,06	22,06	22,05	22,05	22,05	22,05	22,04	22,04	22,04	22,04
90	22,05	22,05	22,06	22,06	22,06	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,06	22,06	22,06	22,05	22,05
89	22,07	22,07	22,07	22,08	22,08	22,09	22,09	22,10	22,10	22,10	22,10	22,09	22,09	22,08	22,08	22,07	22,07	22,07
88	22,09	22,09	22,09	22,10	22,11	22,12	22,12	22,13	22,13	22,13	22,13	22,12	22,12	22,11	22,11	22,10	22,09	22,09
87	22,11	22,11	22,12	22,13	22,14	22,15	22,16	22,17	22,18	22,18	22,17	22,16	22,15	22,14	22,13	22,12	22,11	22,11
86	22,13	22,14	22,15	22,16	22,18	22,20	22,21	22,23	22,23	22,23	22,23	22,21	22,20	22,18	22,16	22,15	22,14	22,13
85	22,16	22,16	22,18	22,20	22,22	22,25	22,27	22,30	22,31	22,31	22,30	22,27	22,25	22,22	22,20	22,18	22,16	22,16
84	22,18	22,19	22,21	22,24	22,27	22,31	22,35	22,38	22,40	22,40	22,38	22,35	22,31	22,27	22,24	22,21	22,19	22,18
83	22,21	22,22	22,25	22,28	22,33	22,38	22,44	22,49	22,53	22,53	22,49	22,44	22,38	22,33	22,28	22,25	22,22	22,21
82	22,23	22,25	22,28	22,32	22,38	22,45	22,54	22,63	22,70	22,70	22,63	22,54	22,45	22,38	22,32	22,28	22,25	22,23
81	22,25	22,27	22,30	22,35	22,42	22,52	22,65	22,80	22,95	22,95	22,80	22,65	22,52	22,42	22,35	22,30	22,27	22,25
80	22,26	22,28	22,31	22,37	22,45	22,57	22,73	22,97	24,01	24,01	22,97	22,73	22,57	22,45	22,37	22,31	22,28	22,26
79	22,26	22,28	22,31	22,37	22,45	22,57	22,73	22,97	24,01	24,01	22,97	22,73	22,57	22,45	22,37	22,31	22,28	22,26
64	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
63	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
62	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
61	22,02	22,02	22,02	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,02	22,02
60	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03
59	22,04	22,04	22,04	22,04	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,04	22,04	22,04	22,04
58	22,05	22,05	22,05	22,06	22,06	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,06	22,06	22,05	22,05	22,05
57	22,07	22,07	22,07	22,08	22,08	22,09	22,09	22,10	22,10	22,10	22,10	22,09	22,09	22,08	22,08	22,07	22,07	22,07
56	22,08	22,09	22,09	22,10	22,11	22,12	22,12	22,13	22,13	22,13	22,12	22,12	22,11	22,10	22,09	22,09	22,08	22,08
55	22,11	22,11	22,12	22,13	22,14	22,15	22,16	22,17	22,18	22,18	22,17	22,16	22,15	22,14	22,13	22,12	22,11	22,11
54	22,13	22,13	22,14	22,16	22,18	22,19	22,21	22,23	22,23	22,23	22,23	22,21	22,19	22,18	22,16	22,14	22,13	22,13
53	22,16	22,16	22,18	22,20	22,22	22,25	22,27	22,29	22,31	22,31	22,29	22,27	22,25	22,22	22,20	22,18	22,16	22,16
52	22,18	22,19	22,21	22,24	22,27	22,31	22,35	22,38	22,40	22,40	22,38	22,35	22,31	22,27	22,24	22,21	22,19	22,18
51	22,21	22,22	22,24	22,28	22,32	22,38	22,44	22,49	22,52	22,52	22,49	22,44	22,38	22,32	22,28	22,24	22,22	22,21
50	22,23	22,24	22,27	22,32	22,38	22,45	22,54	22,63	22,69	22,69	22,63	22,54	22,45	22,38	22,32	22,27	22,24	22,23
49	22,25	22,26	22,30	22,35	22,42	22,52	22,64	22,79	22,94	22,94	22,79	22,64	22,52	22,42	22,35	22,30	22,26	22,25
48	22,26	22,27	22,31	22,37	22,45	22,56	22,73	22,97	24,01	24,01	22,97	22,73	22,56	22,45	22,37	22,31	22,27	22,26
47	22,26	22,27	22,31	22,37	22,45	22,56	22,73	22,97	24,01	24,01	22,97	22,73	22,56	22,45	22,37	22,31	22,27	22,26
46	22,25	22,26	22,30	22,35	22,42	22,52	22,64	22,79	22,94	22,94	22,79	22,64	22,52	22,42	22,35	22,30	22,26	22,25
45	22,23	22,24	22,27	22,32	22,38	22,45	22,54	22,63	22,69	22,69	22,63	22,54	22,45	22,38	22,32	22,27	22,24	22,23
44	22,21	22,22	22,24	22,28	22,32	22,38	22,44	22,49	22,52	22,52	22,49	22,44	22,38	22,32	22,28	22,24	22,22	22,21
43	22,18	22,19	22,21	22,24	22,27	22,31	22,35	22,38	22,40	22,40	22,38	22,35	22,31	22,27	22,24	22,21	22,19	22,18
42	22,16	22,16	22,18	22,20	22,22	22,25	22,27	22,29	22,31	22,31	22,29	22,27	22,25	22,22	22,20	22,18	22,16	22,16
41	22,13	22,13	22,14	22,16	22,18	22,19	22,21	22,23	22,23	22,23	22,23	22,21	22,19	22,18	22,16	22,14	22,13	22,13
40	22,11	22,11	22,12	22,13	22,14	22,15	22,16	22,17	22,18	22,18	22,17	22,16	22,15	22,14	22,13	22,12	22,11	22,11
39	22,08	22,09	22,09	22,10	22,11	22,12	22,12	22,13	22,13	22,13	22,12	22,12	22,11	22,10	22,09	22,09	22,08	22,08
38	22,07	22,07	22,07	22,08	22,08	22,09	22,09	22,10	22,10	22,10	22,10	22,09	22,09	22,08	22,08	22,07	22,07	22,07
37	22,05	22,05	22,05	22,06	22,06	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,07	22,06	22,06	22,05	22,05	22,05
36	22,04	22,04	22,04	22,04	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,05	22,04	22,04	22,04	22,04
35	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,04	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03
34	22,02	22,02	22,02	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,02	22,02	22,02
33	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
32	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
31	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
18	22,23	22,25	22,28	22,32	22,38	22,45	22,54	22,63	22,70	22,70	22,63	22,54	22,45	22,38	22,32	22,28	22,25	22,23
17	22,25	22,27	22,30	22,35	22,42	22,52	22,64	22,80	22,94	22,94	22,80	22,64	22,52	22,42	22,35	22,30	22,27	22,25
16	22,26	22,28	22,31	22,37	22,45	22,57	22,73	22,97	24,01	24,01	22,97	22,73	22,57	22,45	22,37	22,31	22,28	22,26
15	22,26	22,28	22,31	22,37	22,45	22,57	22,73	22,97	24,01	24,01	22,97	22,73	22,57	22,45	22,37	22,31	22,28	22,26
14	22,25	22,27	22,30	22,35	22,42	22,52	22,65	22,80	22,95	22,95	22,80	22,65	22,52	22,42	22,35	22,30	22,27	22,25
13	22,23	22,25	22,28	22,32	22,38	22,45	22,54	22,63	22,70	22,70	22,63	22,54	22,45	22,38	22,32	22,28	22,25	22,23
2	22,02	22,02	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,03	22,02	22,02	22,02
1	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,03	22,03	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02
0	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02	22,02

- Das Ende der Speichererwärmung zeigt im ausgewählten Querschnitt des Speicherkörpers, dass alle Elementtemperaturen über 22 °C liegen. Der Maximalwert beträgt 22,97 °C. Er liegt seitlich der Rohrquerschnitte.

• Simulationsergebnisse anhand spezieller Phasenzustandsfelder

Analog zur Ausgabe von Temperaturfeldern kann auch der Phasenzustand ausgegeben werden. Zur detaillierten Überprüfung sind wiederum mittels eines speziellen Programmeingriffs zu jeder vollen Stunde Phasenzustandsfelder quer und längs im Speicherkörper erzeugbar.

Der Phasenwechsel erfolgt im vorliegenden Testfall zwischen 22 °C und 24 °C. Dies bedeutet, dass vom Start um 18<sup>00</sup> Uhr bis zu Beginn der Raumkühlung um 9<sup>00</sup> Uhr nur ungeschmolzenes Material vorhanden ist und um 17<sup>00</sup> Uhr ein Maximum des Speicherkörpers einen Phasenwandel erfahren hat.

Tatsächlich sind um 22<sup>00</sup> Uhr und um 8<sup>00</sup> Uhr zugehörig zu den gezeigten Temperaturfeldern alle Elemente mit Phase = 0 gefüllt. Die entsprechenden Ausdrücke werden nicht wiedergegeben. Im

Gegensatz dazu müssten um 17<sup>00</sup> Uhr alle Elemente des Speichermaterials einen beginnenden Phasenzustand anzeigen, da – wie bereits festgestellt – die Temperaturen > 22 °C betragen.

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 17<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17
95	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
94	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
93	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
92	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
91	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
89	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
88	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
87	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05
86	0,07	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07
85	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
84	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09
83	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,25	0,26	0,26	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10
82	0,12	0,12	0,14	0,16	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,16	0,14	0,12	0,12
81	0,12	0,13	0,15	0,18	0,21	0,26	0,32	0,40	0,47	0,47	0,40	0,32	0,26	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12
80	0,13	0,14	0,16	0,18	0,23	0,28	0,36	0,48	0,00	0,00	0,48	0,36	0,28	0,23	0,18	0,16	0,14	0,13
79	0,13	0,14	0,16	0,18	0,23	0,28	0,36	0,48	0,00	0,00	0,48	0,36	0,28	0,23	0,18	0,16	0,14	0,13
64	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
63	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
62	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
61	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
60	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
59	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
58	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
57	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
56	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
55	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
54	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06
53	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
52	0,09	0,10	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,10	0,09
51	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,24	0,26	0,26	0,24	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10
50	0,12	0,12	0,14	0,16	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,16	0,14	0,12	0,12
49	0,12	0,13	0,15	0,17	0,21	0,26	0,32	0,40	0,47	0,47	0,40	0,32	0,26	0,21	0,17	0,15	0,13	0,12
48	0,13	0,14	0,16	0,18	0,22	0,28	0,36	0,48	0,00	0,00	0,48	0,36	0,28	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13
47	0,13	0,14	0,16	0,18	0,22	0,28	0,36	0,48	0,00	0,00	0,48	0,36	0,28	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13
46	0,12	0,13	0,15	0,17	0,21	0,26	0,32	0,40	0,47	0,47	0,40	0,32	0,26	0,21	0,17	0,15	0,13	0,12
45	0,12	0,12	0,14	0,16	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,16	0,14	0,12	0,12
44	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,24	0,26	0,26	0,24	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10
43	0,09	0,10	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,10	0,10	0,09
42	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08
41	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06
40	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
39	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
38	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
37	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
36	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
35	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
34	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
33	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
32	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
31	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
18	0,12	0,12	0,14	0,16	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,16	0,14	0,12	0,12
17	0,12	0,13	0,15	0,18	0,21	0,26	0,32	0,40	0,47	0,47	0,40	0,32	0,26	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12
16	0,13	0,14	0,16	0,18	0,23	0,28	0,36	0,48	0,00	0,00	0,48	0,36	0,28	0,23	0,18	0,16	0,14	0,13
15	0,13	0,14	0,16	0,18	0,23	0,28	0,36	0,48	0,00	0,00	0,48	0,36	0,28	0,23	0,18	0,16	0,14	0,13
14	0,12	0,13	0,15	0,18	0,21	0,26	0,32	0,40	0,47	0,47	0,40	0,32	0,26	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12
13	0,12	0,12	0,14	0,16	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,16	0,14	0,12	0,12
2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 9 zur Zeit 17<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
94	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
93	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
92	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
91	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
89	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06															

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
58	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
57	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
56	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
55	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
54	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
53	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11
52	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15
51	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
50	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26
49	0,59	0,58	0,56	0,55	0,53	0,52	0,51	0,50	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39	0,38	0,37	0,37
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46	0,59	0,58	0,56	0,55	0,53	0,52	0,51	0,50	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39	0,38	0,38	0,37
45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26
44	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
43	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15
42	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11
41	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
40	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06
39	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
38	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
37	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
36	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
35	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
34	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
33	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
32	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
31	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
18	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26
17	0,59	0,58	0,56	0,55	0,54	0,52	0,51	0,50	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,59	0,58	0,56	0,55	0,54	0,52	0,51	0,50	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37
13	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26
2	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

- Es hat in allen Materialelementen der Phasenwandel begonnen. Die Rohrbereiche – durch die blaue Markierung gekennzeichnet – sind logischerweise nicht betroffen.
- Im Querschnitt lagen die höchsten Elementtemperaturen neben dem Rohrquerschnitt. Sie betragen 22,97 °C. Zu dieser Temperatur gehört nach Gl. (3.10) der Phasenzustand von 0,48. Dieser Wert findet sich im Querschnittsausdruck in den gelb markierten Elementen wieder.
- Völlig analog zu den Temperaturfeldern ist der Querschnitt durch eine zweiachsige und der Längsschnitt durch eine einachsige Symmetrie gekennzeichnet.
- **Fazit**
- Alle Überprüfungen lieferten plausible Erklärungen für die Simulationsergebnisse.
- Die zahlreichen, zusätzlich durchgeführten manuellen Nachrechnungen ergaben auch Übereinstimmung mit den entsprechenden Detailwerten.
- Bei der untersuchten Betriebsweise wird das Speichermedium völlig ungenügend zur Wärmespeicherung ausgenutzt. Die Ursachen sind vielfältig, sie werden später detailliert untersucht.

**5.2 Beispiel: Test 1a (Gegenstrom)**

Im Gegensatz zum Test 1 wird lediglich die Durchflussrichtung verändert, wie Bild 5.14 zeigt.

Rohr-, Kanal- und Mediendaten							Art des Mediums			Medienstrom l/h	Strömungs- richtung	Temp. Typ	
Typ	da in mm	Wanddicke mm	Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Rohr-/ Kanalzahl	Tyfocon 40 %	L 50 %	Wasser				Luft
R1	4,3	0,8	897	0,21	2000	3	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	10	-1	1
R2	0	0	0	0	0	0	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	0	0	0

**Bild 5.14** Teil der Oberfläche mit Eingabe der Strömungsrichtung

Die Ergebnisse sind selbstverständlich identisch mit denen des Testes 1 (vgl. Seite 57), wie der nachfolgende Auszug aus dem Ergebnisdruck bis auf eine minimale Rundungsgenauigkeit zeigt:

Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
0 18	-	-	-	-	-	189,95	0,00	0,0
1 19	-0,24	4,13	-	-	-	186,05	0,00	0,0
2 20	-0,27	3,70	-	-	-	182,62	0,00	0,0
3 21	-0,31	3,50	-	-	-	179,44	0,00	-0,0
4 22	-0,35	3,58	-	-	-	176,21	0,00	-0,0

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

Stunden	Rohrtyp	R1			R2			K1			K2			
		BS TZ	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 19		18,7	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 20		18,4	18,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 21		18,1	18,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 22		17,7	18,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Besonders überzeugend für die wärmetechnische Gleichheit der beiden Varianten spricht das Temperaturfeld im Längsschnitt durch den Speicherkörper. Es ist anschließend für Test 1a und Test 1 nach einer Betriebszeit von vier Stunden 22<sup>00</sup> Uhr gegenübergestellt.

- In den Rohren – gelbe Kennzeichnung – ist der entgegengesetzte Durchfluss des Wassers deutlich zu erkennen. Die Wasseraustrittstemperaturen sind für das jeweilige Rohr identisch.
- Die gelb und blau markierten Speicherkörpertemperaturen zeigen ebenfalls Übereinstimmung.

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

Test 1a: Strömungsrichtung von rechts nach links ←

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	18,93	18,88	18,87	18,85	18,84	18,83	18,81	18,80	18,79	18,78	18,76	18,75	18,74	18,72	18,71	18,70	18,68	18,67	18,66	18,66
94	18,92	18,87	18,85	18,84	18,83	18,82	18,80	18,79	18,78	18,76	18,75	18,74	18,72	18,71	18,70	18,68	18,67	18,66	18,65	18,67
93	18,90	18,85	18,84	18,83	18,81	18,80	18,79	18,78	18,76	18,75	18,74	18,72	18,71	18,70	18,68	18,67	18,66	18,64	18,63	18,66
92	18,89	18,84	18,82	18,81	18,80	18,79	18,77	18,76	18,75	18,73	18,72	18,71	18,69	18,68	18,67	18,65	18,64	18,63	18,61	18,64
83	18,59	18,55	18,54	18,52	18,51	18,50	18,48	18,47	18,45	18,44	18,43	18,41	18,40	18,38	18,37	18,35	18,34	18,32	18,31	18,32
82	18,52	18,48	18,47	18,45	18,44	18,43	18,41	18,40	18,38	18,37	18,35	18,34	18,32	18,31	18,30	18,28	18,27	18,25	18,24	18,25
81	18,42	18,38	18,37	18,35	18,34	18,33	18,31	18,30	18,28	18,27	18,25	18,24	18,22	18,21	18,19	18,18	18,16	18,15	18,13	18,14
80	18,02	18,00	17,99	17,97	17,95	17,94	17,92	17,91	17,89	17,87	17,86	17,84	17,82	17,81	17,79	17,78	17,76	17,74	17,73	17,71
79	18,02	18,00	17,99	17,97	17,95	17,94	17,92	17,91	17,89	17,87	17,86	17,84	17,82	17,81	17,79	17,78	17,76	17,74	17,73	17,71
64	18,77	18,72	18,70	18,69	18,68	18,66	18,65	18,64	18,62	18,61	18,60	18,58	18,57	18,56	18,54	18,53	18,51	18,50	18,49	18,52
63	18,77	18,72	18,70	18,69	18,68	18,66	18,65	18,64	18,62	18,61	18,60	18,58	18,57	18,56	18,54	18,53	18,51	18,50	18,49	18,52
50	18,46	18,42	18,41	18,40	18,38	18,37	18,35	18,34	18,33	18,31	18,30	18,28	18,27	18,26	18,24	18,23	18,21	18,20	18,18	18,20
49	18,37	18,34	18,32	18,31	18,29	18,28	18,26	18,25	18,24	18,22	18,21	18,19	18,18	18,16	18,15	18,14	18,12	18,11	18,09	18,10
48	18,00	17,98	17,97	17,95	17,94	17,92	17,91	17,89	17,88	17,86	17,85	17,83	17,82	17,80	17,79	17,77	17,75	17,74	17,72	17,71
47	18,00	17,98	17,97	17,95	17,94	17,92	17,91	17,89	17,88	17,86	17,85	17,83	17,82	17,80	17,79	17,77	17,75	17,74	17,72	17,71
46	18,37	18,34	18,32	18,31	18,29	18,28	18,26	18,25	18,24	18,22	18,21	18,19	18,18	18,16	18,15	18,14	18,12	18,11	18,09	18,10
45	18,46	18,42	18,41	18,40	18,38	18,37	18,35	18,34	18,33	18,31	18,30	18,28	18,27	18,26	18,24	18,23	18,21	18,20	18,18	18,20
32	18,77	18,72	18,70	18,69	18,68	18,66	18,65	18,64	18,62	18,61	18,60	18,58	18,57	18,56	18,54	18,53	18,51	18,50	18,49	18,52
31	18,77	18,72	18,70	18,69	18,68	18,66	18,65	18,64	18,62	18,61	18,60	18,58	18,57	18,56	18,54	18,53	18,51	18,50	18,49	18,52
18	18,49	18,46	18,44	18,43	18,41	18,40	18,38	18,37	18,36	18,34	18,33	18,31	18,30	18,28	18,27	18,25	18,24	18,22	18,21	18,22
17	18,40	18,37	18,35	18,34	18,32	18,31	18,29	18,28	18,26	18,25	18,23	18,22	18,20	18,19	18,17	18,16	18,14	18,13	18,11	18,12
16	18,02	18,00	17,99	17,97	17,95	17,94	17,92	17,91	17,89	17,87	17,86	17,84	17,82	17,81	17,79	17,78	17,76	17,74	17,73	17,71
15	18,02	18,00	17,99	17,97	17,95	17,94	17,92	17,91	17,89	17,87	17,86	17,84	17,82	17,81	17,79	17,78	17,76	17,74	17,73	17,71
14	18,42	18,38	18,37	18,35	18,34	18,33	18,31	18,30	18,28	18,27	18,25	18,24	18,22	18,21	18,19	18,18	18,16	18,15	18,13	18,14
13	18,52	18,48	18,47	18,45	18,44	18,43	18,41	18,40	18,38	18,37	18,35	18,34	18,32	18,31	18,30	18,28	18,27	18,25	18,24	18,25
2	18,90	18,85	18,84	18,83	18,81	18,80	18,79	18,78	18,76	18,75	18,74	18,72	18,71	18,70	18,68	18,67	18,66	18,64	18,63	18,66
1	18,92	18,87	18,85	18,84	18,83	18,82	18,80	18,79	18,78	18,76	18,75	18,74	18,72	18,71	18,70	18,68	18,67	18,66	18,65	18,67
0	18,93	18,88	18,87	18,85	18,84	18,83	18,81	18,80	18,79	18,78	18,76	18,75	18,74	18,72	18,71	18,70	18,68	18,67	18,66	18,66

Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 1: 18,03 °C  
 Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 2: 18,00 °C  
 Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 3: 18,03 °C

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

Test1: Strömungsrichtung von links nach rechts →

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	18,68	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,87	18,88	18,93
94	18,67	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,82	18,83	18,84	18,85	18,87	18,92
93	18,66	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,90
92	18,64	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,73	18,75	18,76	18,77	18,79	18,80	18,81	18,82	18,84	18,89
83	18,32	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,59
82	18,25	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,52
81	18,14	18,13	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,42
80	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
79	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
64	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
63	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
50	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
49	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
48	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
47	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
46	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
45	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
32	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
31	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
18	18,22	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,36	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,46	18,49
17	18,12	18,11	18,13	18,14	18,16	18,17	18,19	18,20	18,22	18,23	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,40
16	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
15	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
14	18,14	18,13	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,42
13	18,25	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,52
2	18,66	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,90
1	18,67	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,82	18,83	18,84	18,85	18,87	18,92
0	18,68	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,87	18,88	18,93

Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 1: 18,03 °C  
 Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 2: 18,00 °C  
 Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 3: 18,03 °C

5.3 Beispiel: Test 2 (Einfache Symmetrie)

Als zweite Variante für die Simulation wird gegenüber dem Bild 5.2 (Test 1) das Simulationsgebiet nochmals halbiert, indem man die Symmetrieebene durch die Rohre legt. Dies ist im Bild 5.15 dargestellt. Damit ändert sich natürlich auch das im Bild 5.3 verwendete Ursprungsgitter auf die halbe Breite. Die neue Variante gibt Bild 5.16 wieder.

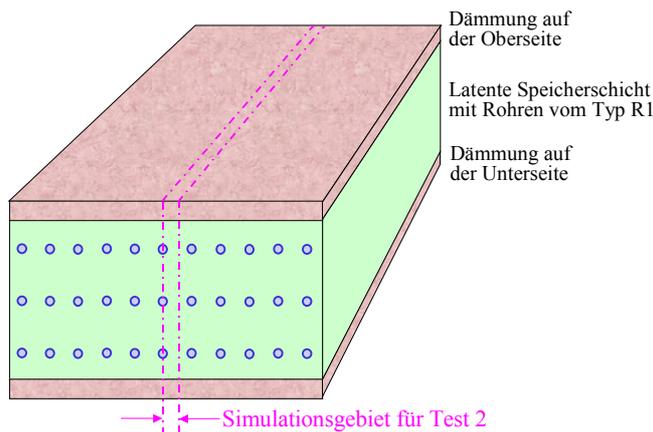


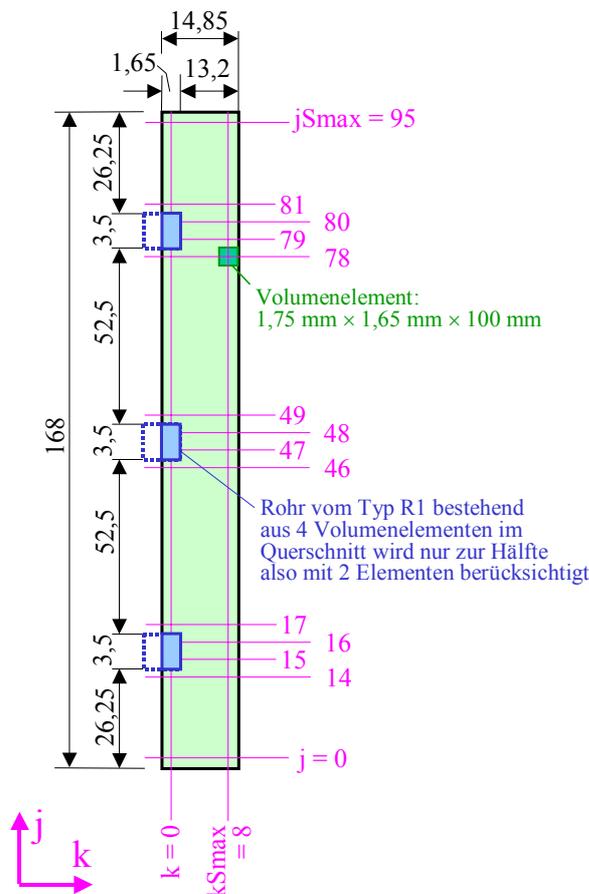
Bild 5.15 Wärmespeicher nach Bild 5.1 mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes für Test 2

Die Kapillarrohre der drei Matten liegen übereinander. Sie werden in der Mitte geschnitten. Die Dämmung an den oberen, unteren, vorderen und hinteren Speicherflächen findet wie im Test 1 Beachtung.

- Alle zu Test 1 gültigen Aussagen zum Speichermaterial und bezüglich der Rohre gelten auch für Test 2.
- Die bisherige Gitterteilung wird beibehalten:  
 i-Richtung:  $\Delta x = 100 \text{ mm}$ ; j-Richtung:  $\Delta y(s = 1) = 1,75 \text{ mm}$ ; k-Richtung:  $\Delta z = 1,65 \text{ mm}$ .
- Die Rohre sind im Querschnitt als Rechtecke dargestellt, die wiederum aus 4 Elementen bestehen, wobei nur noch eine Symmetriehälfte – also zwei Volumenelemente – im Simulationsge-

biet liegen.

- Die thermischen Randbedingungen, wie beispielsweise Umgebungstemperaturen (22 °C) und Wassereintrittstemperaturen nach Bild 5.7 gelten wie für Test 1.
- Die Rohre (Anzahl 3 Stück) werden mit Wasser (zugehöriger Volumenstrom 10 l/h, Wassergeschwindigkeit ca. 0,16 m/s) beaufschlagt. Es werden die gleichen Bezugsgrößen wie im Test 1 gewählt. Es ist lediglich wichtig, dass der Wasservolumenstrom sich auf die Rohrzahl bezieht!
- Die Simulation beginnt um 18<sup>00</sup> Uhr und wird über 4 Stunden geführt. Die Starttemperatur beträgt 20 °C.



**Bild 5.16** Geometrie des Simulationsgebietes für Test 2 mit Angaben in mm (nicht maßstäblich) In i-Richtung – in die Tafelenebene hinein – gelten die Unterteilungen  $i = 0$  bis  $iSmax = 19$ , sodass die Länge des Speicherkörpers 2000 mm beträgt.

Der Ergebnisausdruck für den ersten Simulationstag ist nachfolgend wiedergegeben.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST2\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen:

Schicht	Delta_y	Rho	Lambda		c		r	t_Wandel		jSSmax
			fest	flüssig	fest	flüssig		Beginn	Ende	
	mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)	W/(m K)	J/(kg K)	J/(kg K)	kJ/kg	°C		
1	1,75	1380,0	0,500	0,600	2500,0	2000,0	120,0	22,0	24,0	95

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 (Untervwert)
t_Wandel_Ende(s)	Ende des Phasenwandels (Oberwert)
jSSmax(s)	maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1:	0,1680 m
Höhe der Schicht 2:	0,0000 m
Höhe der Schicht 3:	0,0000 m
Breite des Speicherkörpers (Simulationsausschnitt):	0,0149 m
Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge):	2,0000 m

Delta_x	Delta_z	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
				R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
mm	mm			m²K/W			
100,00	1,65	19	8	1,13000	1,13000	1,13000	1,13000

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  
Die Wärmeleitwiderstände schließen Dämmschichten und Wärmeübergang ein!

### Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	15	16	0	0	R1
2	47	48	0	0	R1
3	79	80	0	0	R1

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

} wie Test 1  
Seite 56

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1

### Allgemeine Simulationsdaten:

Entwurfstag: 1  
Startzeit: 18 Uhr Starttemperatur: 20,0 °C  
Zeitschritt: 3 s Anzahl der Zeitschritte: 4800 Simulationszeit: 4 Stunden  
Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 0,0 °C

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden	BS	TZ	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
			Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
0	18	-	-	-	-	-	-	94,95	0,00	0,0
1	19	-0,12	2,06	-	-	-	-	93,02	0,00	-0,0
2	20	-0,14	1,85	-	-	-	-	91,31	0,00	-0,0
3	21	-0,16	1,75	-	-	-	-	89,72	0,00	-0,0
4	22	-0,17	1,79	-	-	-	-	88,10	0,00	0,0

Legende:

BS Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)  
TZ Tageszeit (= Uhrzeit)  
QU Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die 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  
 QSpeicher Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial am Ende der Stunde  
 QRK Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand  
 DQ Differenz in der Wärmebilanz der letzten Stunde

Detaillierte 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	19		18,7	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	20		18,4	18,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	21		18,1	18,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	22		17,7	18,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende:

BS Betriebsstunden des Speichers (= 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: -

• Ergebnisgegenüberstellung zum Test 1

- Alle Eingaben sind korrekt. Gegenüber Test 1 ist lediglich die Breite des Speicherkörpers halbiert.
- Alle Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) betragen bei Test 2 genau die Hälfte von Test 1.
- Die Wasseraustrittstemperaturen sind in beiden Testvarianten identisch.

• Auswertung der Temperaturfelder

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
95	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,77	18,77
94	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75
93	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74
92	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72	18,72
91	18,70	18,70	18,70	18,70	18,70	18,71	18,71	18,71	18,71
90	18,68	18,68	18,68	18,68	18,68	18,69	18,69	18,69	18,69
89	18,66	18,66	18,66	18,66	18,66	18,67	18,67	18,67	18,67
88	18,63	18,63	18,63	18,64	18,64	18,64	18,64	18,65	18,65
87	18,60	18,60	18,61	18,61	18,61	18,62	18,62	18,62	18,63
86	18,57	18,57	18,57	18,58	18,59	18,59	18,60	18,60	18,60
85	18,53	18,53	18,54	18,55	18,56	18,57	18,57	18,58	18,58
84	18,48	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,55	18,56
83	18,43	18,44	18,46	18,48	18,50	18,51	18,53	18,53	18,54
82	18,35	18,38	18,41	18,44	18,47	18,49	18,50	18,51	18,52
81	18,25	18,31	18,36	18,41	18,44	18,47	18,49	18,50	18,50
80	17,86	18,24	18,33	18,39	18,43	18,46	18,48	18,49	18,49
79	17,86	18,23	18,32	18,38	18,42	18,45	18,47	18,48	18,49
64	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
63	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
62	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,60
61	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59
60	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58
59	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
58	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
57	18,54	18,54	18,54	18,54	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
56	18,52	18,52	18,53	18,53	18,53	18,53	18,54	18,54	18,54
55	18,50	18,50	18,50	18,51	18,51	18,52	18,52	18,52	18,52
54	18,47	18,48	18,48	18,49	18,49	18,50	18,50	18,51	18,51
53	18,44	18,45	18,46	18,46	18,47	18,48	18,49	18,49	18,49
52	18,41	18,41	18,42	18,44	18,45	18,46	18,47	18,48	18,48
51	18,36	18,37	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45	18,46	18,46
50	18,30	18,32	18,35	18,38	18,41	18,43	18,44	18,45	18,45
49	18,21	18,26	18,31	18,36	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45
48	17,85	18,20	18,28	18,34	18,38	18,40	18,42	18,44	18,44

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
47	17,85	18,20	18,28	18,34	18,38	18,40	18,42	18,44	18,44
46	18,21	18,26	18,31	18,36	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45
45	18,30	18,32	18,35	18,38	18,41	18,43	18,44	18,45	18,45
44	18,36	18,37	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45	18,46	18,46
43	18,41	18,41	18,42	18,44	18,45	18,46	18,47	18,48	18,48
42	18,44	18,45	18,46	18,46	18,47	18,48	18,49	18,49	18,49
41	18,47	18,48	18,48	18,49	18,49	18,50	18,50	18,51	18,51
40	18,50	18,50	18,50	18,51	18,51	18,52	18,52	18,52	18,52
39	18,52	18,52	18,53	18,53	18,53	18,53	18,54	18,54	18,54
38	18,54	18,54	18,54	18,54	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
37	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
36	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
35	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58	18,58
34	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59
33	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,59	18,60
32	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
31	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
18	18,33	18,35	18,38	18,42	18,44	18,46	18,48	18,49	18,49
17	18,23	18,29	18,35	18,39	18,43	18,45	18,47	18,48	18,49
16	17,86	18,23	18,32	18,38	18,42	18,45	18,47	18,48	18,49
15	17,86	18,24	18,33	18,39	18,43	18,46	18,48	18,49	18,49
14	18,25	18,31	18,36	18,41	18,44	18,47	18,49	18,50	18,50
13	18,35	18,38	18,41	18,44	18,47	18,49	18,50	18,51	18,52
2	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74	18,74
1	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75	18,75
0	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,76	18,77	18,77

Symmetrieachse des mittleren Rohres

Symmetrieachse des mittleren Rohres

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene  $k = 0$  zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	18,66	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,87	18,88	18,90
94	18,67	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,82	18,83	18,84	18,85	18,87	18,92
93	18,66	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,90
92	18,64	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,73	18,75	18,76	18,77	18,79	18,80	18,81	18,82	18,84	18,89
91	18,62	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,73	18,74	18,75	18,77	18,78	18,79	18,81	18,82	18,87
90	18,60	18,57	18,58	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,73	18,75	18,76	18,77	18,79	18,80	18,85
89	18,57	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,82
88	18,54	18,52	18,53	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,80
87	18,51	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,72	18,77
86	18,48	18,46	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,73
85	18,43	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,69
84	18,38	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,44	18,45	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,61	18,65
83	18,32	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,59
82	18,25	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,52
81	18,14	18,13	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,42
80	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
79	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
64	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
63	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
62	18,51	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,76
61	18,41	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,76
60	18,50	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,75
59	18,49	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,67	18,69	18,74
58	18,47	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,73
57	18,46	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,71
56	18,44	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,69
55	18,41	18,39	18,40	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,67
54	18,39	18,36	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,64
53	18,35	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,61
52	18,31	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,57
51	18,26	18,25	18,26	18,28	18,29	18,30	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,52
50	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
49	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
48	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
47	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
46	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
45	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
44	18,26	18,25	18,26	18,28	18,29	18,30	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,52
43	18,31	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,57
42	18,35	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,61
41	18,39	18,36	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,64
40	18,41	18,39	18,40	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,67
39	18,44	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,69
38	18,46	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,71
37	18,47	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,73
36	18,49	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,67	18,69	18,74
35	18,50	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,75
34	18,51	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,76
33	18,51	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,76
32	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
31	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
18	18,22	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,36	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,46	18,49
17	18,12	18,11	18,13	18,14	18,16	18,17	18,19	18,20	18,22	18,23	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,40
16	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
15	17,71	17,73	17,74	17,76	17,78	17,79	17,81	17,82	17,84	17,86	17,87	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,99	18,00	18,02
14	18,14	18,13	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,42
13	18,25	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41</						

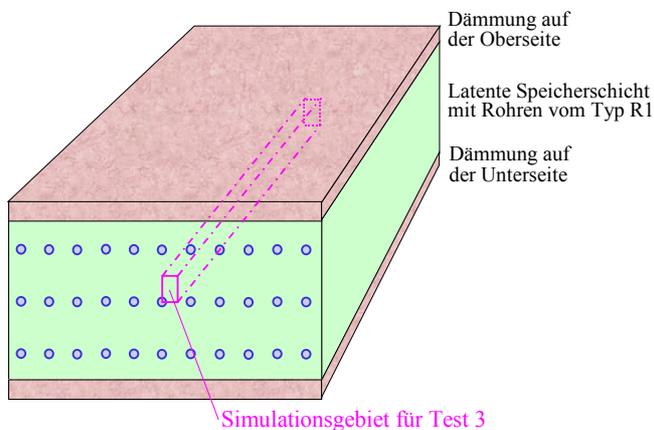
### 5.4 Beispiel: Test 3 (Zweifache Symmetrie)

Die extreme Vereinfachung des Simulationsgebietes bezieht sich auf die im Bild 3.16 gezeigte Prinzipdarstellung, wobei nur ein Viertelrohr mit dem zugehörigen Speicherbereich nachgebildet wird.

Damit können die Randbedingungen – Wärmeströme zur unteren und oberen Umgebung – nicht mehr beachtet werden, sodass selbstverständlich Ergebnisveränderungen folgen müssen. Bei einem Speicher mit großer Höhe und/oder sehr wirksamer Dämmung wird der Einfluss untergeordnet sein. Interessant ist es, den Einfluss unter den vorliegenden Bedingungen zu ermitteln.

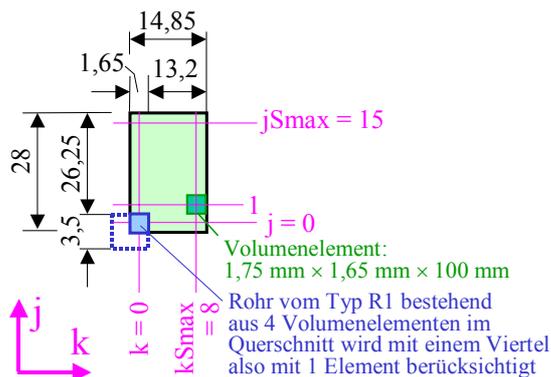
Da der Speicherkörper in seiner gesamten Länge (i-Richtung) betrachtet werden muss, um den Wasserdurchfluss realistisch zu verfolgen, wird selbstverständlich auch die vordere und hintere Dämmung und der Wärmestrom an die Umgebung wirklichkeitsnah erfasst. Dieser ist jedoch sehr klein.

Den Ausschnitt aus dem Speicher zeigt das Bild 5.17. Das zugehörige Gitter ist im Bild 5.18 dargestellt.



**Bild 5.17** Wärmespeicher nach Bild 5.1 mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes für Test 3

Es wird nur ein Viertel des Kapillarrohres und ein zugehöriger Symmetriebereich des Speichermaterials einbezogen. Die Dämmschichten an der Ober- und Unterseite bleiben unbeachtet.



**Bild 5.18** Geometrie des Simulationsgebietes für Test 3 mit Angaben in mm (nicht maßstäblich)

In i-Richtung – in die Tafelenebene hinein – gelten die Unterteilungen  $i = 0$  bis  $iS_{max} = 19$ , sodass die Länge des Speicherkörpers 2000 mm beträgt.

- Alle zu Test 1 gültigen Aussagen zum Speichermaterial und bezüglich der Rohre gelten auch für Test 3. Somit besteht völlige Identität der Beispiele Test 1 bis Test 3.
- Ebenfalls werden die bisherigen Gitterteilungen beibehalten:  
i-Richtung:  $\Delta x = 100$  mm; j-Richtung:  $\Delta y(s = 1) = 1,75$  mm; k-Richtung:  $\Delta z = 1,65$  mm.
- Die Rohre sind im Querschnitt als Rechtecke dargestellt, die wiederum aus 4 Elementen bestehen, wobei wegen der zweifachen Symmetrienutzung nur noch ein Viertel – also ein Volumen-

element – im Simulationsgebiet liegt.

- Die Wassereintrittstemperatur nach Bild 5.7 gilt unverändert wie für Test 1 und Test 2.
- Die Rohranzahl wird auf 1 Stück reduziert, sodass der zugehörige Wasservolumenstrom 10/3 l/h beträgt. Daraus folgt selbstverständlich die bisher verwendete Wassergeschwindigkeit von ca. 0,16 m/s. Es gelten somit prinzipiell die gleichen Bezugsgrößen wie im Test 1.
- Als Umgebungstemperaturen werden weiterhin auf der vorderen und hinteren Oberfläche des Speicherkörpers 22 °C verwendet. Für die Unter- und Oberseite ist die Eingabe auf -273 °C gesetzt. Dadurch erfolgt gemäß der programminternen Festlegung (siehe auch Bilder 3.15, 3.16 sowie Beschreibung zur Umgebungstemperatureingabe auf Seite 45) kein Wärmestrom zur Umgebung.
- Die Simulation beginnt um 18<sup>00</sup> Uhr und wird über 72 Stunden geführt, wobei zunächst nur die ersten vier Stunden ausgewertet werden. Die Starttemperatur beträgt 20 °C.

Der Ergebnisausdruck für den gesamten Simulationszeitraum ist nachfolgend wiedergegeben.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST3\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

#### 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	1,75	1380,0	0,500	0,600	2500,0	2000,0	120,0	22,0	24,0	15

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\_Ende(s) Ende des Phasenwandels (Oberwert)  
jSSmax(s) maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1: 0,0280 m  
Höhe der Schicht 2: 0,0000 m  
Höhe der Schicht 3: 0,0000 m  
Breite des Speicherkörpers (Simulationausschnitt): 0,0149 m  
Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 2,0000 m

Delta_x mm	Delta_z mm	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
				R_oben m <sup>2</sup> K/W	R_unten m <sup>2</sup> K/W	R_vorn m <sup>2</sup> K/W	R_unten m <sup>2</sup> K/W
100,00	1,65	19	8	1,13000	1,13000	1,13000	1,13000

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  
Die Wärmeleitwiderstände schließen Dämmschichten und Wärmeübergang ein!

Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	0	0	0	0	R1

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

Typ	da mm	ba mm	ha mm	D_W mm	Rho_W kg/m³	Lambda_W W/(m K)	c_W J/(kg K)	Zahl -	V_S l/h	SR -	T_Typ -	Medium -
R1	4,3			0,80	897,0	0,21	2000,0	1	3,33333	1	1	Wasser

Legende: Typ Rohr- bzw. Kanaltyp  
 da(Typ) Rohraussendurchmesser  
 ba(Typ) Kanalausnenbreite  
 ha(Typ) Kanalausnenhöhe  
 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)

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1:

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

tUo Temperaturverlauf der oberen Speicherumgebung in °C	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tUu Temperaturverlauf der unteren Speicherumgebung in °C	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tUv Temperaturverlauf der vorderen Speicherumgebung in °C	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
tUh Temperaturverlauf der hinteren Speicherumgebung in °C	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

Füllung in Maske 2 mit -273

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
tUo	Temperaturverlauf der oberen Speicherumgebung
tUu	Temperaturverlauf der unteren Speicherumgebung
tUv	Temperaturverlauf der vorderen Speicherumgebung
tUh	Temperaturverlauf der hinteren Speicherumgebung

**Allgemeine Simulationsdaten:**

Entwurfstag: 1

Startzeit: 18 Uhr Starttemperatur: 20,0 °C

Zeitschritt: 3 s Anzahl der Zeitschritte: 86400 Simulationszeit: 72 Stunden

Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 0,0 °C

**Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:**

Stunden	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
0	18	-	-	-	-	15,83	0,00	0,0
1	19	-0,00	0,34	-	-	15,49	0,00	-0,0
2	20	-0,00	0,30	-	-	15,19	0,00	-0,0
3	21	-0,00	0,28	-	-	14,91	0,00	-0,0
4	22	-0,00	0,28	-	-	14,64	0,00	0,0
5	23	-0,00	0,28	-	-	14,36	0,00	-0,0
6	0	-0,00	0,26	-	-	14,10	0,00	-0,0
7	1	-0,00	0,40	-	-	13,70	0,00	0,0
8	2	-0,00	0,46	-	-	13,25	0,00	-0,0
9	3	-0,00	0,41	-	-	12,84	0,00	-0,0
10	4	-0,00	0,37	-	-	12,47	0,00	-0,0
11	5	-0,00	0,29	-	-	12,18	0,00	-0,0
12	6	-0,00	0,14	-	-	12,05	0,00	-0,0
13	7	-0,00	0,04	-	-	12,01	0,07	-0,1
14	8	-0,00	0,00	-	-	12,02	0,07	0,0
15	9	-0,00	0,00	-	-	12,03	0,00	0,1
16	10	-0,00	-2,08	-	-	14,10	0,00	0,0
17	11	-0,00	-1,43	-	-	15,54	0,00	0,0
18	12	-0,00	-1,01	-	-	16,55	0,00	0,0
19	13	-0,00	-0,76	-	-	17,31	0,00	0,0
20	14	-0,00	-0,77	-	-	18,08	0,00	-0,0
21	15	0,00	-0,91	-	-	18,99	0,00	-0,0
22	16	0,00	-0,95	-	-	19,95	0,00	0,0
23	17	0,00	-0,91	-	-	20,85	0,00	0,0
24	18	0,00	0,39	-	-	20,46	0,00	0,0
25	19	0,00	1,34	-	-	19,12	0,00	-0,0
26	20	-0,00	1,25	-	-	17,88	0,00	-0,0
27	21	-0,00	1,12	-	-	16,76	0,00	-0,0
28	22	-0,00	0,94	-	-	15,82	0,00	-0,0
29	23	-0,00	0,71	-	-	15,11	0,00	-0,0
30	0	-0,00	0,54	-	-	14,57	0,00	-0,0
31	1	-0,00	0,57	-	-	14,00	0,00	0,0
32	2	-0,00	0,57	-	-	13,44	0,00	-0,0
33	3	-0,00	0,48	-	-	12,96	0,00	-0,0
34	4	-0,00	0,42	-	-	12,54	0,00	-0,0
35	5	-0,00	0,32	-	-	12,23	0,00	-0,0
36	6	-0,00	0,15	-	-	12,08	0,00	-0,0
37	7	-0,00	0,05	-	-	12,03	0,07	-0,1





Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	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
61	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	9	22,0	16,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	10	22,5	20,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	11	23,0	21,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	12	23,2	22,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	13	23,5	22,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	14	24,0	23,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	15	24,5	23,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	16	24,5	23,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	17	24,5	23,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	18	19,0	20,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende:

BS Betriebsstunden des Speichers (= 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: -

- **Ergebnisgegenüberstellung zum Test 1 während der ersten vier Betriebsstunden**
- Der Wärmestrom an die Umgebung beschränkt sich nur noch auf die kleinen Stirnflächen (Rohrein- und -austrittsseiten) des Speichers. Die aufsummierten Stundenwerte liegen unter |0,005| Wh und sind deshalb im Ergebnisdruck nicht darstellbar.
- Beim Vergleich der Wärmeaufnahme an das Rohr 1 muss die Größe des Simulationsgebietes beachtet werden. Es erfolgt eine tabellarische Auswertung:

	Test 1		Test 2		Test 3	
Bezugsgröße	3 Rohre	1 Rohr	1,5 Rohre	1 Rohr	0,25 Rohre	1 Rohr
Stunde 1	4,13 Wh	1,38 Wh	2,06 Wh	1,37 Wh	0,34 Wh	1,36 Wh
Stunde 2	3,70 Wh	1,23 Wh	1,85 Wh	1,23 Wh	0,30 Wh	1,20 Wh
Stunde 3	3,50 Wh	1,17 Wh	1,75 Wh	1,17 Wh	0,28 Wh	1,12 Wh
Stunde 4	3,58 Wh	1,19 Wh	1,79 Wh	1,19 Wh	0,28 Wh	1,12 Wh

Während die von einem Rohr aufgenommene Wärmemenge in den Testfällen 1 und 2 quasi identisch ist, liegt sie im Testfall 3 mit zunehmender Zeit darunter. Dieser Tatbestand wird durch die fehlenden Wärmeströme von der unteren und oberen Umgebung bewirkt. **Der maximale Unterschied beträgt beispielsweise zur Stunde 4: 6 %.**

- Vergleicht man analogerweise die gespeicherte Energie, so ergeben sich in den ersten vier Simulationsstunden:

	Test 1		Test 2		Test 3	
Elementzahl	34560		17280		2880	Abweichung in %
Verhältnis	1	1/12	1/2	1/12	1/12	
Stunde 1	186,05 Wh	15,50 Wh	93,02 Wh	15,50 Wh	15,49 Wh	0,1
Stunde 2	182,63 Wh	15,22 Wh	91,31 Wh	15,22 Wh	15,19 Wh	0,2
Stunde 3	179,44 Wh	14,95 Wh	89,72 Wh	14,95 Wh	14,91 Wh	0,3
Stunde 4	176,21 Wh	14,68 Wh	88,10 Wh	14,68 Wh	14,64 Wh	0,3

Es zeigt sich, dass die Abweichung der gespeicherten Energie bei der gewählten Bezugsbasis von 0 °C nur maximal 0,3 % beträgt.

• Auswertung der Temperaturfelder

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 9 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
14	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
13	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
12	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56	18,56
11	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55	18,55
10	18,53	18,53	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54	18,54
9	18,52	18,52	18,52	18,52	18,53	18,53	18,53	18,53	18,53
8	18,50	18,50	18,51	18,51	18,51	18,51	18,52	18,52	18,52
7	18,48	18,48	18,49	18,49	18,49	18,50	18,50	18,50	18,50
6	18,46	18,46	18,46	18,47	18,48	18,48	18,49	18,49	18,49
5	18,43	18,43	18,44	18,45	18,46	18,46	18,47	18,47	18,48
4	18,39	18,40	18,41	18,42	18,43	18,44	18,45	18,46	18,46
3	18,35	18,36	18,38	18,39	18,41	18,43	18,44	18,45	18,45
2	18,29	18,31	18,34	18,37	18,39	18,41	18,42	18,43	18,44
1	18,20	18,25	18,30	18,34	18,37	18,40	18,41	18,42	18,43
0	17,84	18,19	18,27	18,33	18,36	18,39	18,41	18,42	18,43

← In dieser Elementreihe steht bei Test 1 (vgl. Seite 64) überall 18,60 °C!

← An dieser Stelle steht bei Test 1 (vgl. Seite 64) 18,44 °C!

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	18,49	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,74
14	18,49	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,73
13	18,49	18,46	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,66	18,68	18,73
12	18,48	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,72
11	18,47	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,71
10	18,46	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,70
9	18,44	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,69
8	18,42	18,40	18,41	18,42	18,44	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,67
7	18,40	18,38	18,39	18,40	18,41	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,65
6	18,37	18,35	18,36	18,38	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,62
5	18,34	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,53	18,55	18,59
4	18,30	18,28	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,36	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,48	18,50	18,51	18,55
3	18,25	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,51
2	18,19	18,17	18,19	18,20	18,22	18,23	18,24	18,26	18,27	18,29	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,45
1	18,09	18,08	18,10	18,11	18,13	18,14	18,15	18,17	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,25	18,27	18,28	18,29	18,31	18,32	18,35
0	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,78	17,80	17,81	17,83	17,84	17,86	17,87	17,89	17,90	17,92	17,93	17,95	17,96	17,98	17,99

←Vergleichswerte bei Test 1 (Seite 65)

←Vergleichswerte bei Test 1 (Seite 65)

←Vergleichswerte bei Test 1 (Seite 65)

Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 1: 18,00 °C

- Die betrachteten, vergleichbaren Elementtemperaturen weichen maximal um 0,03 K ab.
- Die Wasseraustrittstemperatur bei Test 3 stimmt mit der des mittleren Rohres Test 1 sogar überein, da dort der Randeinfluss weitestgehend abgeschirmt ist.

- **Fazit**

- Die Nutzung der zweifachen Symmetrie bewirkt wegen der Negierung des oberen und unteren Randeinflusses eine Ergebnisveränderung. Sie ist von der Gesamtgröße des Speicherkörpers, der Wirksamkeit der Dämmung und den Umgebungstemperaturen abhängig.
- Im praktischen Fall wird der Fehler kleiner 5 % sein, sodass die Verkleinerung des Simulationsgebietes in Anbetracht der Rechenzeitreduzierung vollkommen gerechtfertigt ist.

- **Betrachtungen zum Einschwingverhalten**

Die Simulationszeit beträgt im Beispiel (Test 3) 72 Stunden, d. h., es werden drei Tagesgänge wirksam. Anhand der Ergebnisse kann man das Einschwingverhalten beurteilen.

Die Ergebniswerte der Simulation zeigen jeweils zur Tageszeit um 18<sup>00</sup> Uhr folgenden Sachstand:

Stunden		QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
0	18	-	-	-	-	-	15,83	0,00	0,0
24	18	0,00	0,39	-	-	-	20,46	0,00	0,0
48	18	0,00	0,39	-	-	-	20,46	0,00	0,0
72	18	0,00	0,39	-	-	-	20,46	0,00	0,0

Legende:

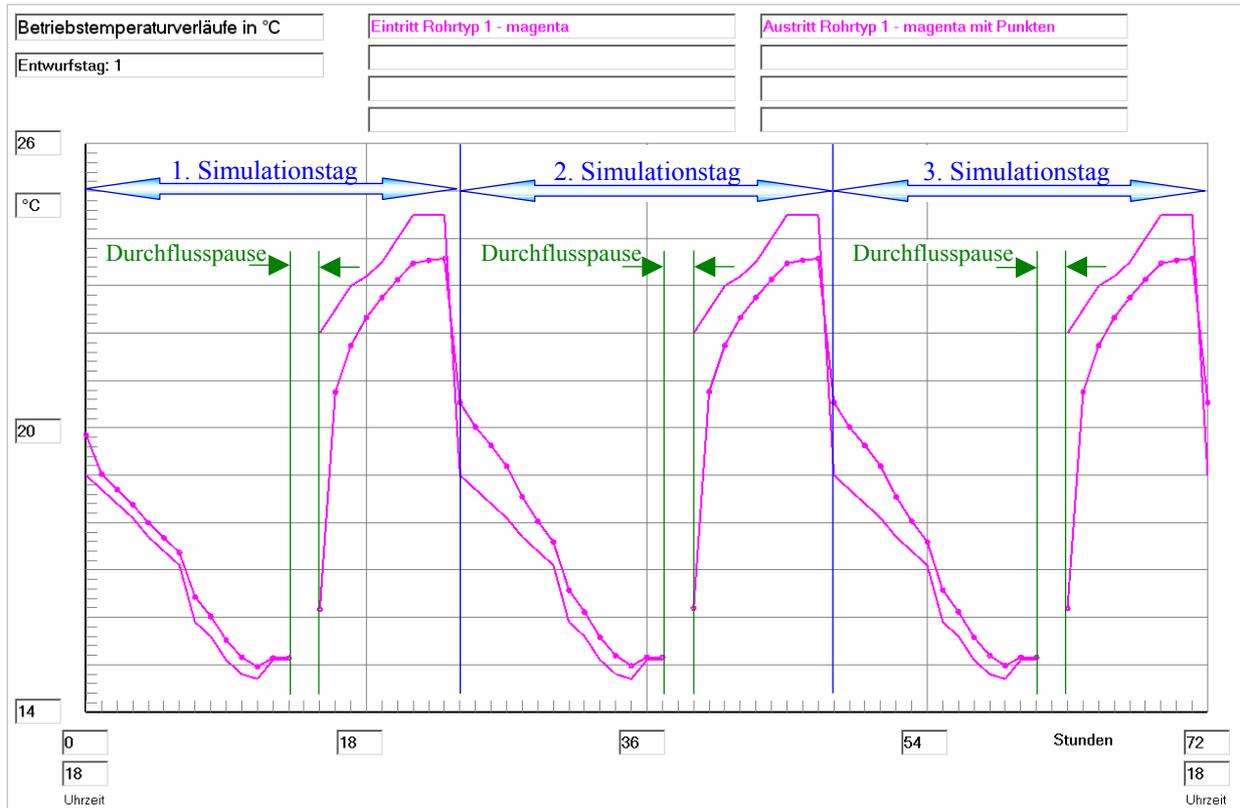
BS	Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
QU	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die Umgebung
QR1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R1
QR2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R2
QK1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K1
QK2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K2
QSpeicher	Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand
DQ	Differenz in der Wärmebilanz der letzten Stunde

Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	Ein	Aus	Kond	Ein	Aus	Kond	Ein	Aus	Kond	Ein	Aus	Kond
		°C	°C	gW/h	°C	°C	gW/h	°C	°C	gW/h	°C	°C	gW/h
24	18	19,0	20,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	18	19,0	20,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	18	19,0	20,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

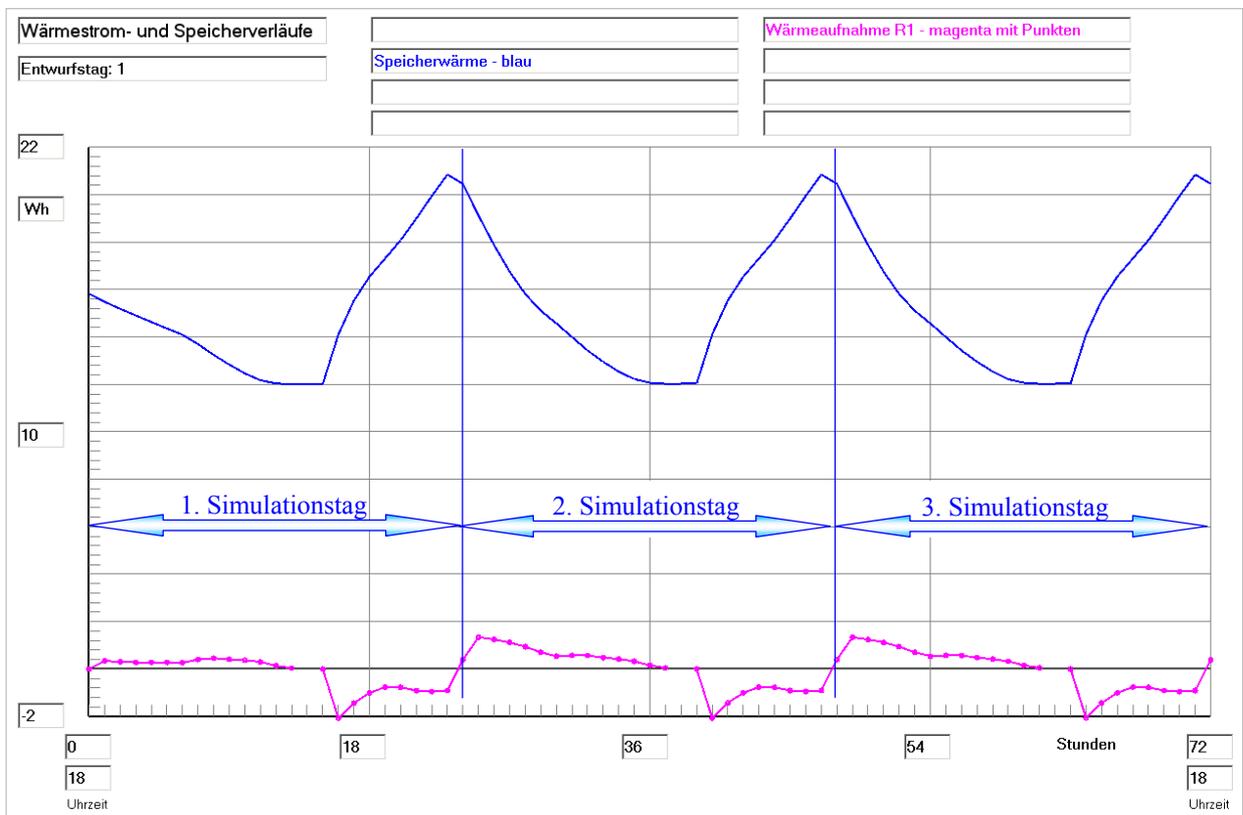
Legende:

BS	Betriebsstunden des Speichers (= 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: -	

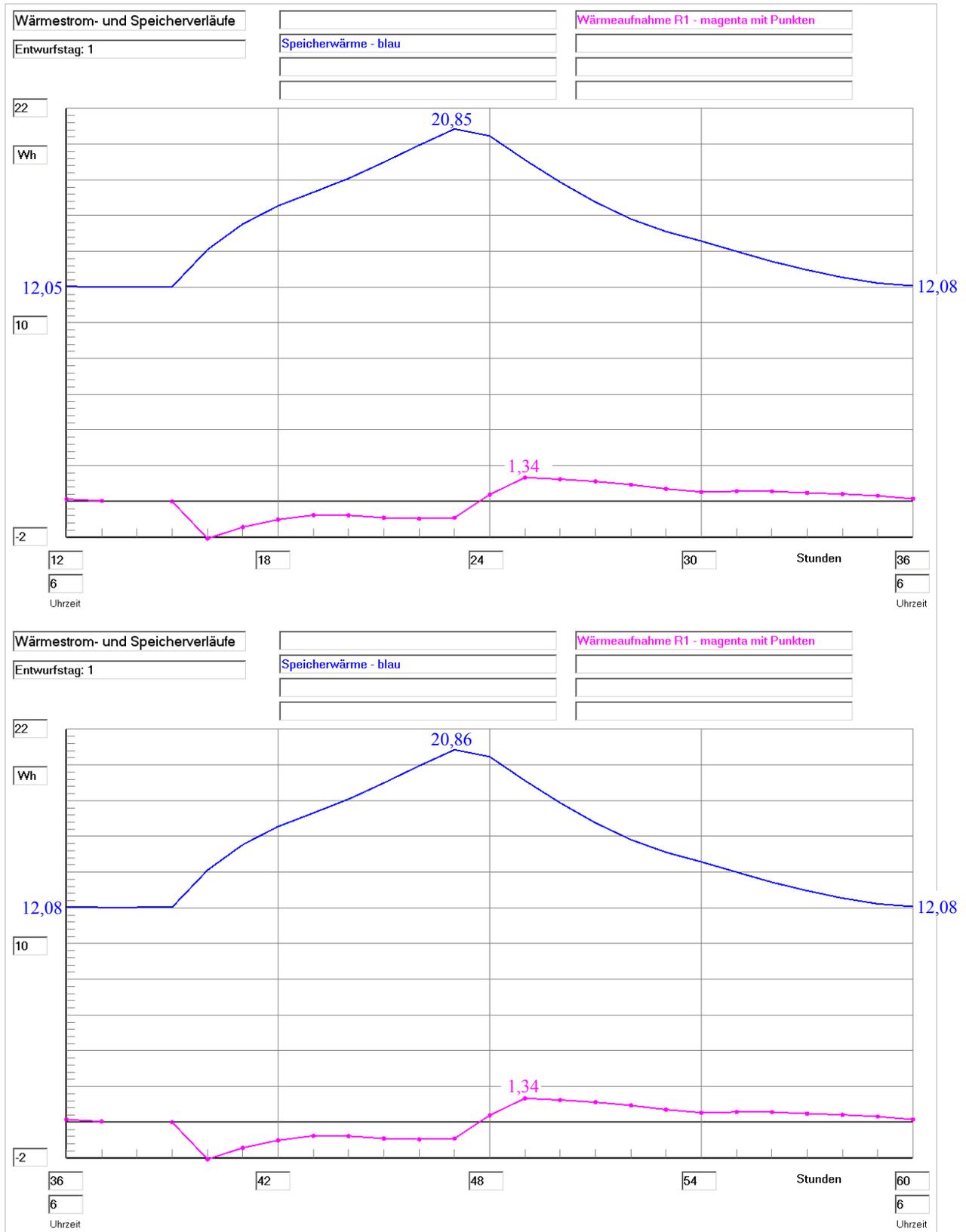
Zur visuellen Veranschaulichung dienen die Bilder 5.19 bis 5.21.



**Bild 5.19** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im gesamten Simulationszeitraum



**Bild 5.20** Speicherenthalpie ("Wärmeinhalt" im Speichermaterial) am Ende der jeweiligen Stunde und Wärmeaufnahme des Viertelrohres im Simulationsgebiet während der vorhergehenden Stunde im gesamten Simulationszeitraum

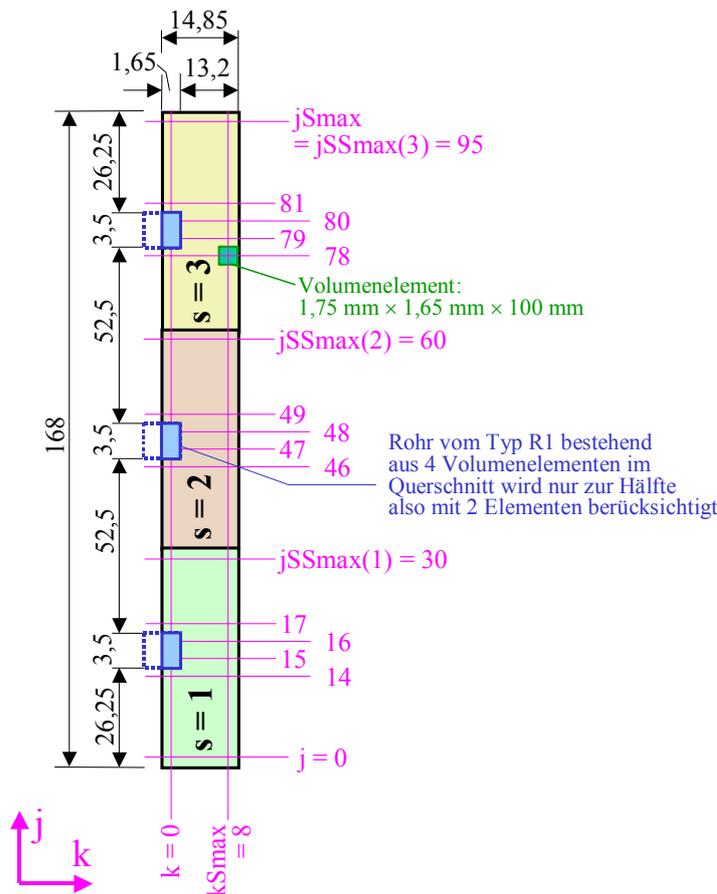


**Bild 5.21** Speicherenenthalpie ("Wärmeinhalt" im Speichermaterial) am Ende der jeweiligen Stunde und Wärmeaufnahme des Viertelrohres im Simulationsgebiet während der vorhergehenden Stunde für die Simulationszeiträume 12. bis 36. und 36. bis 60. Betriebsstunde (Tageszeit jeweils von 6<sup>00</sup> Uhr bis 6<sup>00</sup> Uhr)

Alle vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass nach 12 Stunden Betriebszeit bei der gewählten geometrischen und wärmetechnischen Konstellation des Speicherkörpers rhythmisch wiederholende Tagesverläufe auftreten, die unter praktischen Betriebsbedingungen deckungsgleich sind.

### 5.5 Beispiel: Test 4 (Mehrschichtiger Speicherkörper)

Um den Algorithmus für einen mehrschichtigen Aufbau zu überprüfen, wird das Testbeispiel 2 (abschnitt 5.3) als Grundlage verwendet. Jedes der drei gleichen Rohre bzw. Rohrhälften liegt in einer anderen Schicht ( $s = 1, s = 2, s = 3$ ). Dies ist möglich, da die Gitterteilung  $\Delta y(s)$  für alle Schichten gleich gewählt wird. Es kommt lediglich eine Teilung des Speicherkörpers an den Stellen  $jSSmax(1) = 30$  und  $jSSmax(2) = 60$  zum Tragen (Bild 5.22). Alle schichtenspezifischen Stoffwerte sind identisch, sodass in praxi wieder ein homogener Speicherkörper wie im Testbeispiel 2 vorliegt.



**Bild 5.22** Geometrie des Simulationsgebietes für Test 4 mit Angaben in mm (nicht maßstäblich)

In  $i$ -Richtung – in die Tafelebene hinein – gelten die Unterteilungen  $i = 0$  bis  $iSmax = 19$ , sodass die Länge des Speicherkörpers 2000 mm beträgt.

Alle weiteren Angaben entsprechen Test 2 bzw. können dem Rechnerausdruck entnommen werden.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNGO6\TEST4\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

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	fest J/(kg K)	flüssig		Beginn °C	Ende °C	
3	1,75	1380,0	0,500	0,600	2500,0	2000,0	120,0	22,0	24,0	95
2	1,75	1380,0	0,500	0,600	2500,0	2000,0	120,0	22,0	24,0	60
1	1,75	1380,0	0,500	0,600	2500,0	2000,0	120,0	22,0	24,0	30

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 (Untervert)
t_Wandel_Ende(s)	Ende des Phasenwandels (Oberwert)
jSSmax(s)	maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1:	0,0543 m
Höhe der Schicht 2:	0,0525 m
Höhe der Schicht 3:	0,0613 m
Breite des Speicherkörpers (Simulationsausschnitt):	0,0149 m
Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge):	2,0000 m

Delta_x	Delta_z	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
				R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
mm	mm			m <sup>2</sup> K/W			
100,00	1,65	19	8	1,13000	1,13000	1,13000	1,13000

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  
Die Wärmeleitwiderstände schließen Dämmschichten und Wärmeübergang ein!

### Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	15	16	0	0	R1
2	47	48	0	0	R1
3	79	80	0	0	R1

Rohr-, Kanal- und Mediendaten in Abhängigkeit des Rohr- bzw. Kanaltyps } wie Test 1  
Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1 } Seite 56

Allgemeine Simulationsdaten wie Test 2 Seite 73

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
0	18	-	-	-	-	94,95	0,00	0,0
1	19	-0,12	2,06	-	-	93,02	0,00	-0,0
2	20	-0,14	1,85	-	-	91,31	0,00	-0,0
3	21	-0,16	1,75	-	-	89,72	0,00	-0,0
4	22	-0,17	1,79	-	-	88,10	0,00	0,0

Legende:

BS	Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
QU	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die 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
QSpeicher	Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand
DQ	Differenz in der Wärmebilanz der letzten Stunde

Detaillierte 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	19	18,7	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	20	18,4	18,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	21	18,1	18,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	22	17,7	18,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende:

- BS Betriebsstunden des Speichers (= 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: -

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 22<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
95	18,68	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,87	18,88	18,93
94	18,67	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,82	18,83	18,84	18,85	18,87	18,92
93	18,66	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,90
62	18,51	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,69	18,70	18,71	18,76
61	18,51	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,55	18,56	18,57	18,59	18,60	18,61	18,63	18,64	18,65	18,67	18,68	18,69	18,71	18,76
60	18,50	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,75
60	18,50	18,47	18,48	18,50	18,51	18,52	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,75
59	18,49	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,67	18,69	18,74
58	18,47	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,73
57	18,46	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,63	18,65	18,66	18,71
56	18,44	18,41	18,43	18,44	18,45	18,47	18,48	18,49	18,51	18,52	18,54	18,55	18,56	18,58	18,59	18,60	18,62	18,63	18,64	18,69
55	18,41	18,39	18,40	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,58	18,59	18,61	18,62	18,67
54	18,39	18,36	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,47	18,49	18,50	18,52	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,64
53	18,35	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,61
52	18,31	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,57
51	18,26	18,25	18,26	18,28	18,29	18,30	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,52
50	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
49	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
48	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
47	17,71	17,72	17,74	17,75	17,77	17,79	17,80	17,82	17,83	17,85	17,86	17,88	17,89	17,91	17,92	17,94	17,95	17,97	17,98	18,00
46	18,10	18,09	18,11	18,12	18,14	18,15	18,16	18,18	18,19	18,21	18,22	18,24	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,37
45	18,20	18,18	18,20	18,21	18,23	18,24	18,26	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,35	18,37	18,38	18,40	18,41	18,42	18,46
44	18,26	18,25	18,26	18,28	18,29	18,30	18,32	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,48	18,52
43	18,31	18,30	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,38	18,39	18,41	18,42	18,43	18,45	18,46	18,48	18,49	18,50	18,52	18,53	18,57
42	18,35	18,33	18,35	18,36	18,37	18,39	18,40	18,42	18,43	18,44	18,46	18,47	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,55	18,57	18,61
32	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
31	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
31	18,52	18,49	18,50	18,51	18,53	18,54	18,56	18,57	18,58	18,60	18,61	18,62	18,64	18,65	18,66	18,68	18,69	18,70	18,72	18,77
18	18,22	18,21	18,22	18,24	18,25	18,27	18,28	18,30	18,31	18,33	18,34	18,36	18,37	18,38	18,40	18,41	18,43	18,44	18,46	18,49
17	18,12	18,11	18,13	18,14	18,16	18,17	18,19	18,20	18,22	18,23	18,25	18,26	18,28	18,29	18,31	18,32	18,34	18,35	18,37	18,40
2	18,66	18,63	18,64	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,90
1	18,67	18,65	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,82	18,83	18,84	18,85	18,87	18,92
0	18,68	18,66	18,67	18,68	18,70	18,71	18,72	18,74	18,75	18,76	18,78	18,79	18,80	18,81	18,83	18,84	18,85	18,87	18,88	18,93

Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 1: 18,03 °C  
 Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 2: 18,00 °C  
 Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 3: 18,03 °C

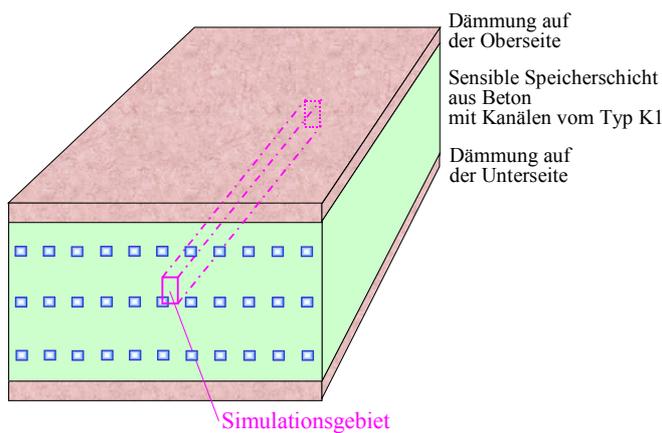
● Fazit

- Es besteht völlige Übereinstimmung der Stundenwerte mit den Ergebnissen für Test 2 auf den Seiten 73 und 74.
- Ebenfalls sind die detaillierten Temperaturen im Längsschnitt identisch mit Test 2 auf Seite 75.
- Damit ist davon auszugehen, dass der Algorithmus für den Mehrschichtspeicher ordnungsgemäß abgearbeitet wird.

## 6 Testbeispiele für einen Betonspeicher mit eingeformtem Luftkanal

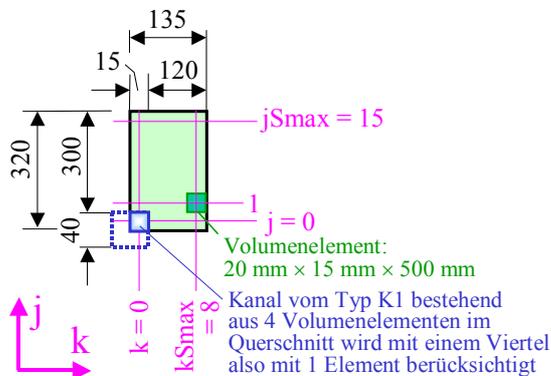
In diesem Beispiel sollen die Besonderheiten von luftdurchströmten Rohren bzw. Kanälen untersucht werden, wobei im Speichermaterial – Beton – nur eine sensible Wärmespeicherung erfolgt. Besonderes Augenmerk gilt der Wirkungsweise des im Abschnitt 3.5 entwickelten Stabilitätskriteriums für die numerische Berechnung im Rohr- bzw. Kanalbereich.

Es wird die zweifache Symmetrie zur Verkleinerung des Simulationsgebietes herangezogen, sodass aus dem Originalspeicher nur ein Minimalausschnitt nach Bild 6.1 folgt. Er ist bezüglich des Gitteraufbaues im Bild 6.2 detailliert.



**Bild 6.1** Wärmespeicher aus Beton mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes für die nachfolgenden Testbeispiele

Es wird nur ein Viertel des Luftkanals und ein zugehöriger Symmetriebereich des Speichermaterials einbezogen. Die Dämmschichten an der Ober- und Unterseite bleiben unbeachtet.



**Bild 6.2** Geometrie des Simulationsgebietes für nachfolgende Testbeispiele mit Angaben in mm (nicht maßstäblich)

In i-Richtung – in die Tafelebene hinein – gelten die Unterteilungen  $i = 0$  bis  $i_{Smax} = 19$ , sodass die Länge des Speicherkörpers 10 m beträgt.

Als Besonderheiten gelten:

- Der Speicher besteht nur aus einer Schicht. Als Gitterteilung wurde gewählt:  
i-Richtung:  $\Delta x = 500$  mm; j-Richtung:  $\Delta y (s = 1) = 20$  mm; k-Richtung:  $\Delta z = 15$  mm.
- Das Speichermaterial ist Beton der Dichte  $2200$  kg/m<sup>3</sup>. Die weiteren Materialdaten sind dem Rechnerausdruck zu entnehmen.
- Die Kanäle haben Rechteckquerschnitte mit den Außenabmessungen Höhe 40 mm und Breite 30 mm. Die Wandungen bestehen aus Kunststoff der Dicke 4 mm (Materialdaten gemäß Rechnerausdruck).
- Im Simulationsgebiet liegt zwar nur ein Viertelkanal. Als Anzahl ist aber **ein** Kanal mit dem zugehörigen Luftvolumenstrom 15000 l/h eingegeben (Luftgeschwindigkeit ca. 5,9 m/s).

- Die Luft Eintrittstemperatur ändert sich zeitabhängig nach Bild 6.5. Es werden dabei zwei einfache Sprungfunktionen zugrunde gelegt.

So ist bei Beginn der Simulation mit  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  die Temperatur um 10 K niedriger als die einheitliche Temperatur des Speichermaterials. Nach 12 Stunden Betriebszeit ändert sich die Temperatur innerhalb einer Stunde um 20 K.

- Die Wärmeströme zur Umgebung finden keine Beachtung. Alle Umgebungstemperaturen werden deshalb mit  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingegeben.
- Die Simulation beginnt um  $1^{00}$  Uhr.
- Die Starttemperatur beträgt  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 6.1 Basisbeispiel: Test 5

Das Basisbeispiel verwendet als Besonderheit den sehr großen Zeitschritt von 100 s, um die Wirksamkeit des Stabilitätskriteriums nach Abschnitt 3.5 zu überprüfen.

Die Eingabeoberflächen sind aus den Bildern 6.3 und 6.4 ersichtlich.

Der Ergebnisausdruck für den ersten Simulationstag ist im Anschluss daran wiedergegeben.

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück (VI/2006) Entwurfstag: 1

**Daten der Speicherschichten und ihrer Begrenzungen**

Schicht	Dy mm	Rho kg/m <sup>3</sup>	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	r kJ/kg	t <sub>Wandel</sub> °C	max. Gitterzahl jSSmax
Schicht s = 3	0	0	0	0	0	-273 < Unterwert	0
Flüssigwerte >>						-273 < Oberwert	
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273 < Unterwert	0
Flüssigwerte >>						-273 < Oberwert	
Schicht s = 1	20	2200	1,4	1050	0	-273 < Unterwert	15
Flüssigwerte >>						-273 < Oberwert	

^ Bei Phasenwandelmaterial Lambda- sowie c-Flüssigzustand, r und t-Wandel (Ober- und Unterwert) angeben!

**Geometrie der Rohre und Kanäle**

Rohr Kanal n	jmin	jmax	kmin	kmax	Rohr / Kanal Typ
1	0	0	0	0	K1
2	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	
5	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	
14	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	

**Rohr-, Kanal- und Mediendaten**

Typ	da in mm	Wanddicke mm	Rho kg/m <sup>3</sup>	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Rohr-/Kanalzahl	Art des Mediums	Medienstrom l/h	Strömungsrichtung	Temp. Typ
R1	0	0	0	0	0	0	Tyfoocor L	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0	Wasser	0	0	0
K1	30	40	4	900	0,2	2000	Luft	15000	1	3
K2	0	0	0	0	0	0		0	0	0

**Abläufe:**

1. STARTEN drücken und Pfad bestätigen bzw. neu eingeben!
2. Daten aus Datei laden oder Neueingabe
3. Bei Eingabe oder Korrektur der Werte bitte nur Zahlen, Komma, Minuszeichen oder "Blank" verwenden!
4. DATENSPEICHERUNG drücken!
5. ZEITVERLAUF, BERECHNUNG, DRUCK EINGABEWERTE bzw. ERGEBNISSE oder DIAGRAMM drücken!

STARTEN | DATEI LADEN | ZEITVERLAUF | DATENSPEICHERUNG | BERECHNUNG | DRUCK EINGABEWERTE | DIAGRAMM | DRUCK ERGEBNISSE | BEENDEN

Bild 6.3 Benutzeroberfläche 1 nach dem Eintragen der Speicherdaten für Test 5

Zeitverläufe der Randbedingungen

Zielstellung  
 Kontrolle bzw. Datenergänzung  
 Neueingabe der Daten (Datei noch nicht vorhanden)

Entwurfstag:  Entwurfstag

Pfad und vorhandener bzw. zukünftiger Dateiname: F:\SD\Stiftung06\TEST5\ZVERLAUF.dat

Hinweis: Stundenfelder für nicht existierende Temperaturverläufe und für reale Temperaturverläufe während des Durchflussstillstandes mit -273 füllen!

T_Typ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
tF1 Temperaturverlauf des Flüssigkeitstromes 1 in °C	1	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tF2 Temperaturverlauf des Flüssigkeitstromes 2 in °C	2	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tL1 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 1 in °C	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
xL1 Absolute Luftfeuchte des Luftvolumenstromes 1 in g_Wasser / kg_trockene Luft		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
tL2 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 2 in °C	4	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
xL2 Absolute Luftfeuchte des Luftvolumenstromes 2 in g_Wasser / kg_trockene Luft		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tUo Temperaturverlauf der oberen Speicherumgebung in °C		-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tUu Temperaturverlauf der unteren Speicherumgebung in °C		-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tUv Temperaturverlauf der vorderen Speicherumgebung in °C		-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
tUh Temperaturverlauf der hinteren Speicherumgebung in °C		-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273

Zeiten / Zeitschritte  
 Simulationsbeginn:  Uhrbeginn  
 Zeitschritt:  Dtau in s  
 max. Schrittzahl:  Zeitmax

Starttemperatur:  tStart in °C  
 Speichertemperatur

ANZEIGEN DATENSPEICHERUNG  
 KONTROLLGRAFIK KONTROLLDRUCK BEENDEN

ANZEIGEN drücken! Daten überschreiben (nur Zahlen, Komma, Minuszeichen)  
 DATENSPEICHERUNG drücken!  
 Evtl. KONTROLLDRUCK und/oder KONTROLLGRAFIK erzeugt!

Bild 6.4 Benutzeroberfläche 2 nach dem Eintragen der Speicherdaten für Test 5

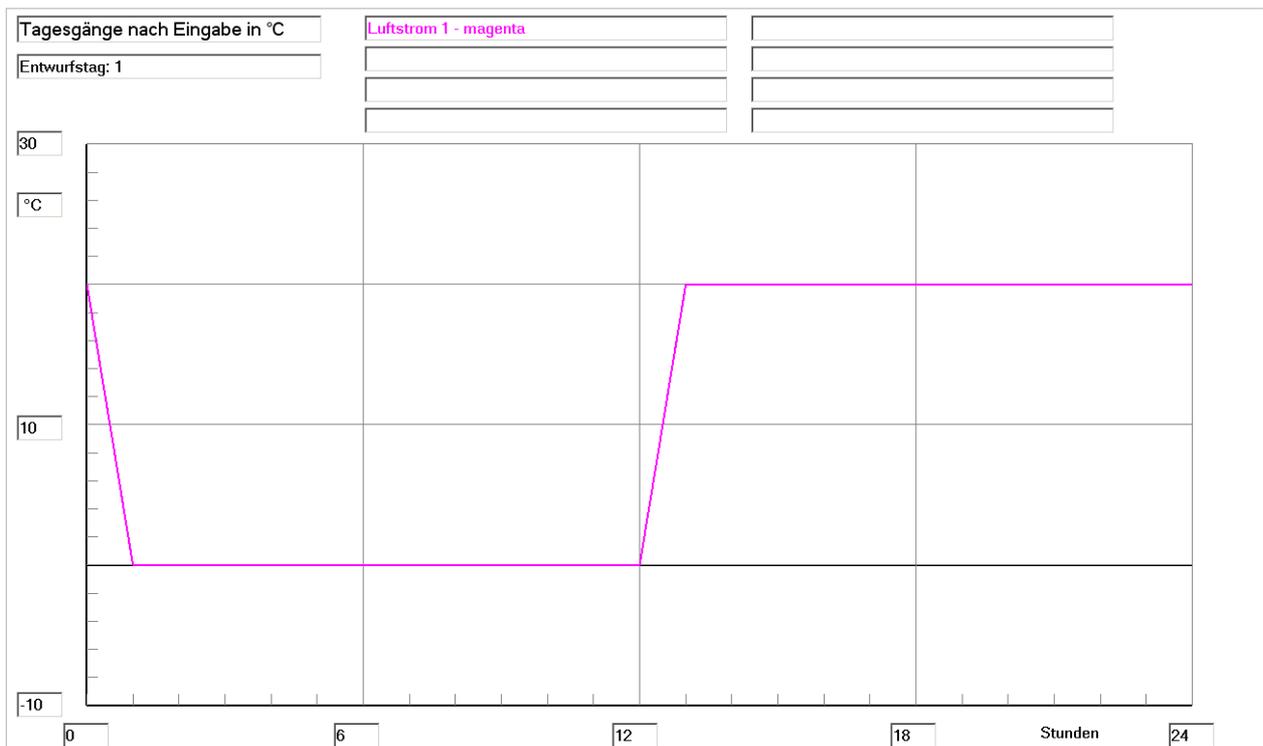


Bild 6.5 Lufteintrittstemperatur in den Kanal K1 im Tagesgang für Test 5

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST5\

## Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

### 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	20,00	2200,0	1,400	0,000	1050,0	0,0	0,0			15

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 (Unterver)
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:	0,3200 m
Höhe der Schicht 2:	0,0000 m
Höhe der Schicht 3:	0,0000 m
Breite des Speicherkörpers (Simulationsausschnitt):	0,1350 m
Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge):	10,0000 m

Delta_x mm	Delta_z mm	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
				R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
500,00	15,00	19	8	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000

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  
Die Wärmeleitwiderstände schließen Dämmschichten und Wärmeübergang ein!

### Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	0	0	0	0	K1

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

Typ	da mm	ba mm	ha mm	D_W mm	Rho_W kg/m <sup>3</sup>	Lambda_W W/(m K)	c_W J/(kg K)	Zahl	V_S l/h	SR	T_Typ	Medium
K1		30,0	40,0	4,00	900,0	0,20	2000,0	1	15000,0	1	3	Luft

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)

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

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

#### 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
tUo	Temperaturverlauf der oberen Speicherumgebung
tUu	Temperaturverlauf der unteren Speicherumgebung
tUv	Temperaturverlauf der vorderen Speicherumgebung
tUh	Temperaturverlauf der hinteren Speicherumgebung

### Allgemeine Simulationsdaten:

Entwurfstag: 1  
 Startzeit: 1 Uhr Starttemperatur: 10,0 °C  
 Zeitschritt: 100 s Anzahl der Zeitschritte: 864 Simulationszeit: 24 Stunden  
 Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 0,0 °C

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden BS	TZ	QU Wh	QR1 Wh	QR2 Wh	QK1 Wh	QK2 Wh	QSpeicher Wh	QRK Wh	DQ Wh
0	1	-	-	-	-	-	2751,33	0,00	0,0
1	2	0,00	-	-	13,57	-	2738,82	0,00	-1,1
2	3	0,00	-	-	12,64	-	2726,19	0,00	-0,0
3	4	0,00	-	-	12,56	-	2713,64	0,00	-0,0
4	5	0,00	-	-	12,49	-	2701,14	0,00	0,0
5	6	0,00	-	-	12,44	-	2688,70	0,00	0,0
6	7	0,00	-	-	12,38	-	2676,33	0,00	-0,0
7	8	0,00	-	-	12,33	-	2663,99	0,00	0,0

Stunden		QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
8	9	0,00	-	-	12,29	-	2651,71	0,00	-0,0
9	10	0,00	-	-	12,24	-	2639,46	0,00	-0,0
10	11	0,00	-	-	12,20	-	2627,27	0,00	-0,0
11	12	0,00	-	-	12,16	-	2615,10	0,00	0,0
12	13	0,00	-	-	0,00	-	2615,79	0,00	-0,7
13	14	0,00	-	-	-12,53	-	2628,32	0,00	0,0
14	15	0,00	-	-	-12,39	-	2640,70	0,00	0,0
15	16	0,00	-	-	-12,29	-	2653,00	0,00	-0,0
16	17	0,00	-	-	-12,22	-	2665,21	0,00	0,0
17	18	0,00	-	-	-12,15	-	2677,36	0,00	0,0
18	19	0,00	-	-	-12,09	-	2689,46	0,00	0,0
19	20	0,00	-	-	-12,04	-	2701,50	0,00	-0,0
20	21	0,00	-	-	-12,00	-	2713,49	0,00	0,0
21	22	0,00	-	-	-11,95	-	2725,45	0,00	-0,0
22	23	0,00	-	-	-11,91	-	2737,35	0,00	0,0
23	0	0,00	-	-	-11,87	-	2749,23	0,00	-0,0
24	1	0,00	-	-	-0,34	-	2748,87	0,00	0,7

## Legende:

BS	Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
QU	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die 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
QSpeicher	Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand
DQ	Differenz in der Wärmebilanz der letzten Stunde

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

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

Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	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
23	0	-	-	-	-	-	-	20,0	10,5	17,7	-	-	-
24	1	-	-	-	-	-	-	0,0	9,7	0,0	-	-	-

Legende:

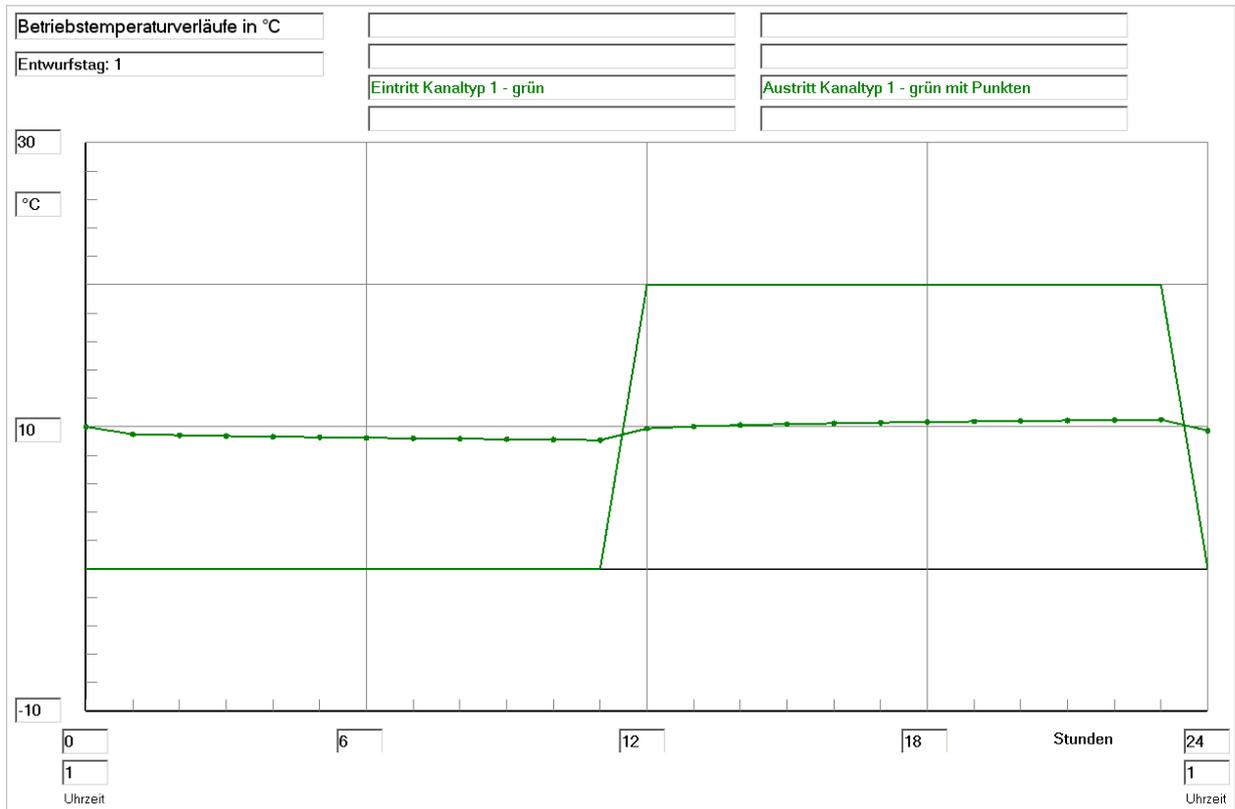
BS Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)  
 TZ Tageszeit (= Uhrzeit)  
 Ein Eintrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde  
 Aus mittlere Austrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde  
 Kond Kondensatstrom am Ende der Stunde bezogen auf den Volumenstrom  $V_S$   
 Füllung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

### • Ergebnisbewertung

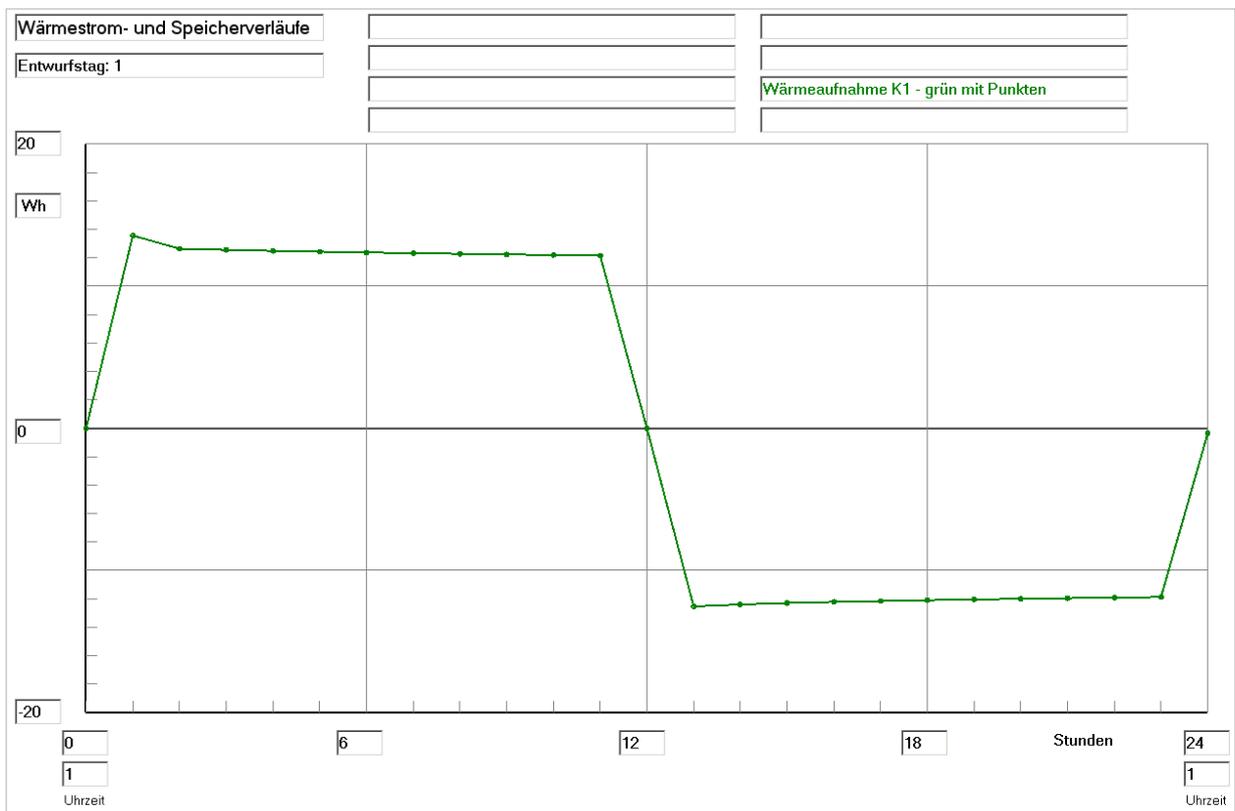
- Der zeitliche Verlauf zeigt eine stabile Lösungsentwicklung. Die Änderungen der Luft Eintrittstemperatur werden vom Algorithmus innerhalb einer Simulationsstunde bewältigt.
- Die Ergebnisse sind plausibel. Die Wärmebilanzen passen sehr gut, lediglich bei den großen Temperaturänderungen treten kleine Abweichungen auf.
- Die Wärmeströme an die Umgebung sind wegen der zweifachen Symmetrie und infolge der Wahl der Umgebungstemperaturen von  $-273\text{ °C}$  gleich null.
- Der Wärmekapazitätsstrom (Massestrom  $\times$  spezifische Wärmekapazität) der Luft ist relativ klein und die Wärmeübertragerfläche zwischen Kanal und Speichermaterial im Verhältnis groß, wodurch sich die Luftaustrittstemperatur der Temperatur des Speichermaterials bei allen Betriebszuständen weitgehend annähert. Dadurch ergibt sich eine geringe, mittlere Temperaturdifferenz zwischen dem Luftstrom und dem Speicherkörper.
- Diese kleine Temperaturdifferenz und der ebenfalls kleine Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luft und Speichermaterial bedingen schließlich die relativ geringe Wärmespeicherung im Betonkörper.

Die getroffenen Aussagen werden durch die [Simulationsergebnisse anhand der Grafikausgabe](#) in den nachfolgenden Bildern 6.6 bis 6.8 bestätigt. Die Bilder sind gegenüber den Bildschirmanzeigen "beschnitten" worden.

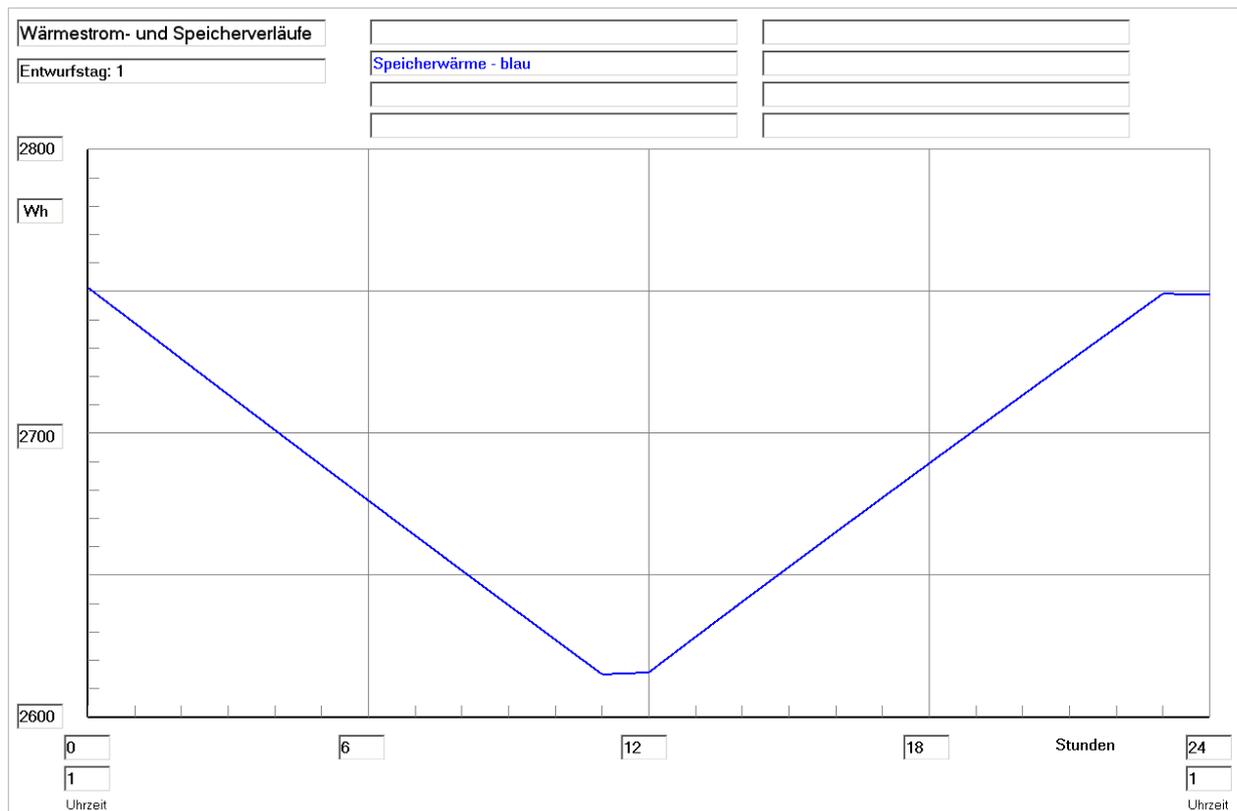
Man beachte bei der Abszisse den Unterschied zwischen der Simulationsstunde und der Tageszeit (Uhrzeit).



**Bild 6.6** Gegenüberstellung der Lufteintrittstemperatur und der Luftaustrittstemperatur während der Simulationszeit von 24 Stunden für Test 5



**Bild 6.7** Wärmeaufnahme durch den Luftkanal (Viertelkanal) summiert über die jeweils vorhergehende Simulationsstunde während der Simulationszeit von 24 Stunden für Test 5



**Bild 6.8** Enthalpie ("Wärmeinhalt") des Speichermaterials am Ende einer jeden Simulationsstunde summiert über die jeweils vorhergehende Simulationsstunde während der Simulationszeit von 24 Stunden für Test 5

- Spezielle Betrachtung während der Einschwingphase zum Simulationsbeginn

Um das thermische Verhalten der Volumenelemente, die sich sowohl im Speichermaterial als auch im Rohrbereich befinden, zu betrachten, werden einige Momentaufnahmen der Temperaturverteilung vorgestellt.

Startfüllung (zu Beginn des Zeitschrittes 0):

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt i = 0 ... 19

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
14	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
.									
5	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
4	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
3	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
2	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
1	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
0	0,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt k = 0

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
14	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
.																				
5	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
4	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
3	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
2	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
1	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Für alle Rohrvolumenelemente gelten die Grenztemperaturen der Umgebung:  $t_{Rmax} = 10\text{ °C}$ ;  $t_{Rmin} = 10\text{ °C}$





Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt k = 0 nach Zeitschritt 10 (1 s)

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19	
15	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
14	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
13	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
12	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
11	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
10	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
9	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
8	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
7	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
6	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
5	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
4	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
3	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
2	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
1	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
0	0,85	2,41	3,71	4,78	5,67	6,41	7,02	7,53	7,95	8,30	8,59	8,83	9,03	9,20	9,33	9,45	9,55	9,63	9,70	9,77	

Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 1: 9,80 °C

- Es ist festzustellen, dass nach einer Sekunde Betriebszeit (≡ Simulationszeit) die Rohrtemperatur mit zunehmenden i-Abschnitten kontinuierlich ansteigt, ohne dass eine Korrektur zur Stabilisierung erforderlich wird.
- Die Temperaturen der angrenzenden Speichermaterial-Volumenelemente entsprechen unter Beachten von zwei Nachkommastellen noch dem Startwert von 10,00 °C.

Das Gesamtergebnis nach vier Simulationsstunden ist dem nachfolgenden Ergebnisausdruck zu entnehmen.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST5A\

**Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern**

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen

Geometrie der Rohre und Kanäle

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

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1

Werte wie für Test 5 (Abschnitt 6.1)

Allgemeine Simulationsdaten:

Entwurfstag: 1  
 Startzeit: 1 Uhr Starttemperatur: 10,0 °C  
 Zeitschritt: 0,1 s Anzahl der Zeitschritte: 144000 Simulationszeit: 4 Stunden  
 Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 0,0 °C

Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden BS	TZ	QU Wh	QR1 Wh	QR2 Wh	QK1 Wh	QK2 Wh	QSpeicher Wh	QRK Wh	DQ Wh
0	1	-	-	-	-	-	2752,71	0,00	0,0
1	2	0,00	-	-	12,84	-	2739,85	0,00	0,0
2	3	0,00	-	-	12,65	-	2727,30	0,00	-0,1
3	4	0,00	-	-	12,58	-	2715,02	0,00	-0,3
4	5	0,00	-	-	12,54	-	2702,72	0,00	-0,2

Ergebnisse für Test 5 (Zeitschritt: 100 s) zum Vergleich:

0	1	-	-	-	-	-	2751,33	0,00	0,0
1	2	0,00	-	-	13,57	-	2738,82	0,00	-1,1
2	3	0,00	-	-	12,64	-	2726,19	0,00	-0,0
3	4	0,00	-	-	12,56	-	2713,64	0,00	-0,0
4	5	0,00	-	-	12,49	-	2701,14	0,00	0,0

Legende:

BS Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)

TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
QU	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die 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
QSpeicher	Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand
DQ	Differenz in der Wärmebilanz der letzten Stunde

### Detaillierte 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	2	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,5	0,0	-	-	-
2	3	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,4	0,0	-	-	-
3	4	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,4	0,0	-	-	-
4	5	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,3	0,0	-	-	-

### Ergebnisse für Test 5 (Zeitschritt: 100 s) zum Vergleich:

1	2	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,5	0,0	-	-	-
2	3	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,4	0,0	-	-	-
3	4	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,4	0,0	-	-	-
4	5	-	-	-	-	-	-	-	0,0	9,3	0,0	-	-	-

#### Legende:

BS	Betriebsstunden des Speichers (= 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:	-
Füllung im Rohrtyp R2:	-
Füllung im Kanaltyp K1:	Luft
Füllung im Kanaltyp K2:	-

- Der Vergleich von QK1 – die Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K1 – führt zu prozentualen Unterschieden von -0,4 % bis 5,7 %. Der hohe Wert tritt nur in der ersten Simulationsstunde auf.
- Die bedeutungsvolle Größe QSpeicher – die Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial – zeigt mit maximal 0,1 % praktisch keine Unterschiede.
- Die Luftaustrittstemperaturen sind in beiden Fällen einschließlich der ersten Nachkommastelle identisch.

#### ● Fazit

Die Auswertung der Ergebnisse der beiden Beispiele Test 5 und Test 5a verdeutlicht, dass

- das Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung im Rohr- bzw. Kanalbereich wirkungsvoll arbeitet und keine nennenswerten Fehler bewirkt und
- große Zeitschrittweiten zur Verkürzung der Rechenzeit anwendbar sind.

## 7 Meteorologische Daten

Zur [wärmetechnischen Bewertung](#) der Speichervorgänge sowie zur [Optimierung des Speichers](#) bezüglich des Speichermaterials und seiner Geometrie sind die thermischen Einsatzbedingungen bedeutungsvoll. In den meisten Fällen unterliegen die Betriebsbedingungen in direkter oder indirekter Form den Wetter- bzw. den Klimabedingungen des Einsatzortes. Die Ankopplung an die meteorologischen Daten ist bei Anlagensystemen oftmals in mehrfacher Weise gegeben. Es seien dafür einige Beispiele genannt:

- Eine Wärmepumpe verwendet als "Wärmequelle" die atmosphärische Luft. Zur Effizienzsteigerung werde ein Kurzzeitspeicher eingesetzt, der mit Umweltenergie, die aus der Atmosphäre stammt, zu Zeiten relativ hoher Lufttemperatur beladen wird. Bei niedrigen Außentemperaturen dient dann der Wärmespeicher als "Wärmequelle" für die Wärmepumpe.
- In der Übergangszeit wird Kaltwasser über einen Kühlturm bereitgestellt, das zur Raumkühlung Einsatz findet. Um diese umweltgerechte Nutzung auch auf einen Teil der Sommermonate zu erstrecken, werde ein Wärmespeicher dazwischen geschaltet. Seine Entladung erfolgt nachts mit Wasser aus dem Kühlturm, da die Wassertemperatur dann besonders niedrig ist. Tags wird dem Speicher durch warmes Rücklaufwasser aus der Raumkühlleinrichtung Wärme zugeführt.
- Das vorgenannte Verfahren kann in abgewandelter Form Anwendung finden, wenn die Raumkühlleinrichtung und der Speicher eine Einheit bilden. So werden beispielsweise Massivdecken und/oder Massivwände über eingeformte Rohrregister nachts entspeichert, um dann am Tage Wärme aus den Räumen aufnehmen zu können. Derartige Anlagenkombinationen werden unter dem Begriff "Thermische Bauteilaktivierung" subsummiert.
- Eine vielfältige Aufnahme von Umweltenergie über Fassaden, die mit Rohr- bzw. Kanalsystemen bestückt sind und in Verbindung mit Wärmespeichern stehen, ist möglich. Stellvertretend für diese Varianten sind die Solarabsorber genannt.

Selbstverständlich können auch die Fassaden selbst eine steuerbare Wärmespeicherung übernehmen, wenn entsprechende Systeme integriert sind.

Die älteste und zugleich einfachste Form stellt natürlich die rein passive Solarenergienutzung über die Außenwand dar.

- Erdkollektoren, die als "Wärmequelle" für eine Wärmepumpe und/oder als "Wärmesenke" für eine Kältemaschine dienen, sind als Langzeitspeicher zu verstehen und unterliegen selbstverständlich auch den meteorologischen Bedingungen.

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass im realen Einsatzfall mehrere Aggregate mit dem Speicher verbunden sind. Somit gestalten sich die Eintrittstemperaturen in den Speicher beispielsweise lastabhängig von den "Energieverbrauchern" und/oder witterungsabhängig von den "Energielieferern". Die Komplexität wird in den meisten Fällen – z. B. bei der Raumheizung oder Raumkühlung – dadurch erhöht, weil die Lastabhängigkeit zum großen Teil wiederum auf den meteorologischen Gegebenheiten basiert.

Die exakte wärmetechnische Verknüpfung der Aggregate – beispielsweise der Kühltürme, der

Absorber usw. – mit dem Speicher erfordert eine aufwändige Detaillierung. Um diese zu umgehen, werden vielfach **Leistungsapproximationen** für deren Verhalten **in Abhängigkeit der meteorologischen Daten** getroffen.

Es bieten sich als **charakteristische Parameter** an:

- **Lufttemperatur**
- **Feuchtkugeltemperatur**
- **Solarstrahlung**
- **Bodentemperatur.**

Zur Ermittlung des **jährlichen Energiebedarfs** können wichtige Daten, die speziell auch für die Heizungs- und Lüftungstechnik aufbereitet sind, der **DIN 4710:2003-01** entnommen werden. Repräsentativ für Deutschland sei der **Standort Kassel** empfohlen. Generell sind zwei Grundarten von Daten zu unterscheiden:

- **Statistische meteorologische Einzeldaten oder Datenkomplexe lassen sich sehr gut für Untersuchungen zum Energiebedarf und für Untersuchungen von Extrembelastungen verwenden. Sie sind in der Regel in Verbindung mit der Häufigkeit ihres Auftretens im statistischen Jahresmittel gegeben.**
  - So findet man beispielsweise die **Temperatur-Feuchte-Korrelationen (t,x-Korrelationen)** für den Zeitraum 1961 bis 1990 in Zehntelstunden ihres Auftretens für die Mitteleuropäische Zeitzone (MEZ) für die Zeitbereiche:
    - **Gesamttag mit 24 stündlichen Messungen**
    - **Tag zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr mit 12 stündlichen Messwerten.**

In der Norm werden sowohl Jahres- als auch Monatsstatistiken vorgestellt. Die Sommerzeit findet dabei keine Beachtung.

- Umfangreiches Datenmaterial wird zur **solaren Strahlung** bereitgestellt. Besonders berücksichtigt ist hierbei der Strahlungsempfang auf **typische Gebäudeflächen** (Ostwand, Südwand usw.). Dabei erfolgt eine Detaillierung in **direkte** und **diffuse Strahlung**. Zum Komplex Solarstrahlung gehören auch Angaben zur **Trübung der Atmosphäre**, zur **Sonnenscheindauer** und zur **Bewölkung**.

- Interessant sind auch Angaben zu den **Bodentemperaturen** für den Zeitraum 1961 bis 1990, die als Monats- und Jahresmittel angegeben sind.

Theoretisch könnte man versuchen, die Bodentemperaturen mit Hilfe entsprechender Modellierungen aus dem Gang der Lufttemperatur und der Strahlungsdaten zu bestimmen. Aber es ist natürlich genauer, Messwerte zu verwenden und somit die "Natur selbst integrieren zu lassen", wie Bošnjakovič in ähnlich gearteten Fällen empfahl.

- **Zur wärmetechnischen Beurteilung des Speicher- und Apparateinsatzes in Verbindung mit der Prozessdynamik sind die Testreferenzjahre (TRY) prädestiniert.**

Sie bestehen aus **ausgewählten meteorologischen Elementen** – wie beispielsweise **Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlungsdaten, Windgeschwindigkeit, Wolkenbedeckungsgrad** usw. – für alle Jahresstunden in zeitlicher Folge. Sie stellen **synthetische Jahre** dar, die jedoch cha-

rakteristische Witterungsperioden der jeweiligen Region beinhalten. Die Sequenzen werden so ausgewählt, dass die Jahreszeitenmittelwerte mit den realen Mittelwerten gut übereinstimmen. Zudem gibt es neuerdings noch Zeitfolgen für die extremen Witterungsabschnitte "Winter" und "Sommer".

### 7.1 t,x-Korrelation und Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur

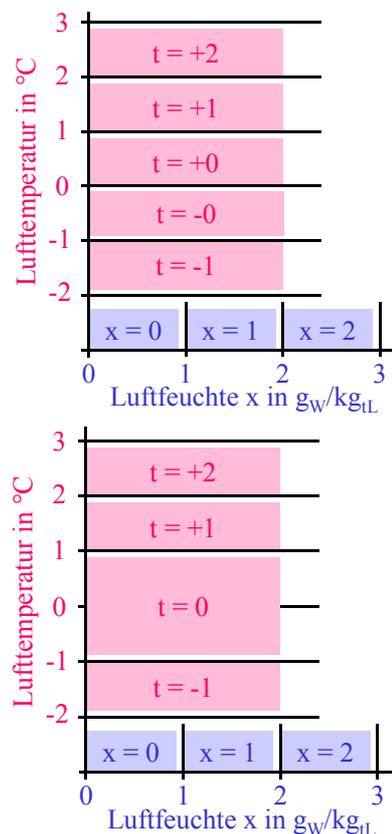
Diese komprimierte Datenangabe ist für die Leistungsuntersuchung und energetische Bewertung von wärmetechnischen Vorgängen in Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung außerordentlich hilfreich. Aus ihr sind sowohl die Außenluftzustände (Temperatur / Feuchte) als auch die Einzeldaten Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte zu entnehmen.

Bei den Angaben nach DIN 4710 und bei der weiteren Verwendung der Daten sind nachfolgende **Besonderheiten** zu beachten:

- Es ist jeweils die mittlere jährliche Anzahl der Fälle vermerkt. D. h., wenn in 20 Beobachtungsjahren 1 Stunde des Zustandes auftrat, ist diese in der Tabelle angegeben ( $1 \text{ h}/20 = 0,050 \text{ h} \Rightarrow 0,5 \text{ Zehntelstunden} \Rightarrow$  gerundet 1 Zehntelstunde).

Tritt der Zustand einmal in 30 Jahren auf ( $1 \text{ h}/30 = 0,033 \text{ h} \Rightarrow 0,33 \text{ Zehntelstunden} \Rightarrow$  gerundet 0 Zehntelstunde), dann erscheint in der DIN 4710 der Wert 0. Im Unterschied dazu erfolgt kein Eintrag, wenn kein Luftzustand für t,x beobachtet wurde. In den nachfolgenden Auswertungen wird kein Unterschied zwischen diesen beiden Angaben vorgenommen.

- Aufgrund der Rundungsfehler ergibt sich in den Tabellen ein Gesamtzeitraum für das Jahr, der von 8760 h abweicht. Für jede Tabelle wird in der vorliegenden Ausarbeitung deshalb ein **Korrekturfaktor** gebildet, der zur Umrechnung auf die exakte Jahresstundenzahl dient.
- Die Zuordnung der realen Wertebereiche zu den t- und x-Klassen nach DIN 4710 geht aus der nebenstehenden Skizze hervor.



In der weiteren Auswertung weicht der Bereich  $t = 0 \text{ °C}$  von der Darstellung gemäß DIN 4710 ab. Es werden +0 und -0 zu einem Wert  $t = 0 \text{ °C}$  zusammengefasst, wie die rechte Grafik verdeutlicht. Die grafischen Darstellungen – z. B. die Häufigkeitsverteilungen (Bilder 7.1 bis 7.4) – weisen dadurch Signifikanzen an der Stelle  $t = 0 \text{ °C}$  auf.

- Bei der Datenweiterverarbeitung empfiehlt es sich, mit den Mittelwerten der jeweiligen Klasse zu arbeiten. Dies sind beispielsweise:

$$t = 1,5 \text{ °C}; \quad t = 0 \text{ °C}; \quad t = -1,5 \text{ °C}$$

$$x = 0,5 \text{ g}_w/\text{kg}_{tL}; \quad x = 1,5 \text{ g}_w/\text{kg}_{tL}.$$

- Aus den in der DIN 4710 vermerkten Zusammenstellungen für den 24 h-Tag und für den 12 h-Tag zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr lassen sich die t,x-Korrelationen für die Nacht zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr ermitteln.
- Der Vorteil der Darstellung der t,x-Korrelation besteht für den Heizungs- und Lüftungsfachmann vor allem darin, dass die Tabellengestaltung dem bekannten h,x-Diagramm angelehnt ist.

Es zeigt sich jedoch bei der Datenweiterverarbeitung, dass an der Sättigungslinie (relative Feuchte  $\varphi = 100 \%$ ) unter Beachten der oben vorgeschlagenen Klassenmitten und bei Annahme eines Luftdruckes von 100 kPa  $\equiv$  1 bar mitunter Luftzustände auftreten, die theoretisch im "Nebelgebiet" bzw. "Eisnebelgebiet" ( $\varphi > 100 \%$ ) liegen. Um Komplikationen beim späteren Einsatz von Rechenprogrammen mit h,x-Bezug zu vermeiden, werden die t,x-Korrelationen so verändert, dass bei relativen Feuchten von  $\varphi > 99 \%$  der zugehörige Wert um eine x-Klasse nach links verschoben bzw. dem dortigen Zehntelstundenwert zuaddiert wird.

- Für verschiedene Simulationen spielt der Feuchtegehalt x eine untergeordnete Rolle, so z. B. bei der reinen Wärmerückgewinnung ohne Feuchteübertragung. Es ist dann ausreichend und somit sehr zeitsparend, wenn jeder t-Klasse nur ein mittlerer x-Wert mit der Gesamthäufigkeit der t-Klasse zugeordnet wird. Sinnvollerweise legt man diesen in den "Schwerpunkt" der x-Werte. Bei niedrigen Temperaturen kann wiederum der Wert  $\varphi > 99 \%$  überschritten werden. Deshalb erfolgt gleichzeitig eine analoge Korrektur wie vorstehend erläutert, indem gegebenenfalls der x-Schwerpunkt um eine x-Klasse nach links verschoben wird.

Die beschriebenen **t,x-Korrelationen** finden sich in den Tabellen 7.1 bis 7.9.

Bedeutungsvoll für spezielle energetische und wirtschaftliche Betrachtungen sind weiterhin die **Häufigkeitsverteilungen der Lufttemperatur**. Sie werden ebenfalls für den gesamten Tag sowie für die Zeiträume 6<sup>00</sup> Uhr bis 18<sup>00</sup> Uhr (Tag) und 18<sup>00</sup> Uhr bis 6<sup>00</sup> Uhr (Nacht) ermittelt. Sie sind in den Tabellen 7.10 bis 7.12 entwickelt und dokumentiert sowie in den Bildern 7.1 und 7.2 visualisiert.

Die nachfolgend in den Tabellen aufgeführten Werte der t,x-Korrelationen und die zugehörigen Korrekturen sind mit einem speziellen Rechenprogramm, indem auch das Unterprogramm ZUSTAND (Tabelle 3.4) integriert ist, bearbeitet worden.

Die Tabellen sind auch in Dateien abgelegt, die sich zusammen mit dem Rechenprogramm "Speicher" auf der CD-ROM befinden. Die Namen der Dateien sind bei den entsprechenden Tabellen mit vermerkt. Die erforderlichen Einleseprogramme können Abschnitt 7.3 entnommen werden.

**Tabelle 7.1** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  zwischen  $0^{00}$  Uhr und  $24^{00}$  Uhr (MEZ) nach DIN 4710 für Kassel

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
g <sub>w</sub> /kg <sub>tL</sub>																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34							2										6
33							1	1									10
32							2	3	4	3	3	4	2				21
31							2	6	9	10	5	3	2	3	1		41
30						2	2	11	18	18	13	8	9	3	1	1	86
29					1	1	10	18	19	29	24	12	9	5	1	2	131
28					1	2	6	21	33	45	34	21	16	7	1	1	188
27					2	4	10	26	41	59	42	32	16	11	3	2	248
26					2	9	20	52	77	76	63	35	25	14	5	1	379
25					2	15	29	73	100	107	93	51	39	15	5	2	531
24				1	6	23	49	90	117	114	91	64	42	15	6	2	620
23				1	7	34	60	107	140	147	115	92	51	22	6	1	783
22				1	12	50	86	157	159	161	146	105	65	27	7	1	977
21				5	23	71	124	182	209	201	170	125	72	31	6	1	1220
20				6	31	106	145	225	253	251	198	144	92	41	7		1499
19				15	53	113	199	286	292	295	223	162	118	30			1786
18			2	17	72	156	277	314	354	359	281	258	130	8			2228
17			3	29	82	186	312	375	434	419	415	355	45				2655
16			4	42	108	235	338	484	535	530	593	225	1				3095
15			3	48	128	246	406	567	671	786	530	21					3406
14			11	54	144	315	461	711	911	966	132						3705
13			13	74	189	352	580	891	1319	555	1						3974
12			15	87	223	398	714	1202	1288	53							3980
11		2	23	107	238	516	885	1642	489								3902
10		1	32	110	294	620	1340	1556	33								3986
9		2	43	157	364	835	1786	565									3752
8		5	55	200	527	1280	1606	23									3696
7		4	77	246	760	1853	820										3760
6		7	91	378	1207	2098	108										3889
5		10	99	498	1840	1482											3929
4		12	129	724	2576	508											3949
3		20	145	1060	2755	9											3989
2		15	189	1682	2020												3906
1		28	281	2559	879												3747
0		69	984	4361	33												5447
-1		53	945	873													1871
-2		64	1108	247													1419
-3	2	96	1050	9													1157
-4	1	126	737														864
-5	1	181	476														658
-6	1	252	256														509
-7	2	337	87														426
-8	1	337	2														340
-9	4	261															265
-10	1	177															178
-11	2	141															143
-12	2	96															98
-13	4	59															63
-14	11	46															57
-15	18	16															34
-16	17	1															18
-17	16																16
-18	9																9
-19	5																5
-20																	0
Summe	97	2418	6860	13591	14579	11519	10380	9588	7508	5188	3174	1720	734	232	49	14	87651

Korrekturfaktor:  $8760 \times 10 / 87651 = 0,99942$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter.dat](#)

**Tabelle 7.2** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  zwischen  $0^{00}$  Uhr und  $24^{00}$  Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel mit Korrektur der  $x$ -Werte, sodass bei  $p = 100$  kPa für alle Luftzustände bezogen auf die Klassenmitten stets  $\varphi \leq 99\%$  gilt

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
g <sub>w</sub> /kg <sub>tL</sub>																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34							2		1	1	1	1					6
33							1	1	2	3	1	2					10
32							2	3	4	3	3	4	2				21
31							2	6	9	10	5	3	2	3	1		41
30						2	2	11	18	18	13	8	9	3	1	1	86
29					1	1	10	18	19	29	24	12	9	5	1	2	131
28					1	2	6	21	33	45	34	21	16	7	1	1	188
27					2	4	10	26	41	59	42	32	16	11	3	2	248
26					2	9	20	52	77	76	63	35	25	14	5	1	379
25					2	15	29	73	100	107	93	51	39	15	5	2	531
24				1	6	23	49	90	117	114	91	64	42	15	6	2	620
23				1	7	34	60	107	140	147	115	92	51	22	6	1	783
22				1	12	50	86	157	159	161	146	105	65	27	7	1	977
21				5	23	71	124	182	209	201	170	125	72	31	6	1	1220
20				6	31	106	145	225	253	251	198	144	92	41	7		1499
19				15	53	113	199	286	292	295	223	162	118	30			1786
18			2	17	72	156	277	314	354	359	281	258	138				2228
17			3	29	82	186	312	375	434	419	415	355	45				2655
16			4	42	108	235	338	484	535	530	593	226					3095
15			3	48	128	246	406	567	671	786	551						3406
14			11	54	144	315	461	711	911	1098							3705
13			13	74	189	352	580	891	1319	556							3974
12			15	87	223	398	714	1202	1341								3980
11		2	23	107	238	516	885	2131									3902
10		1	32	110	294	620	1340	1589									3986
9		2	43	157	364	835	2351										3752
8		5	55	200	527	1280	1629										3696
7		4	77	246	760	2673											3760
6		7	91	378	1207	2206											3889
5		10	99	498	1840	1482											3929
4		12	129	724	3084												3949
3		20	145	1060	2764												3989
2		15	189	1682	2020												3906
1		28	281	3438													3747
0		69	984	4394													5447
-1		53	1818														1871
-2		64	1355														1419
-3	2	96	1059														1157
-4	1	126	737														864
-5	1	657															658
-6	1	508															509
-7	2	424															426
-8	1	339															340
-9	4	261															265
-10	1	177															178
-11	143																143
-12	98																98
-13	63																63
-14	57																57
-15	34																34
-16	18																18
-17	16																16
-18	9																9
-19	5																5
-20																	0
Summe	456	2880	7168	13374	14184	11930	10040	9522	7039	5268	3062	1700	741	224	49	14	87651

Korrekturfaktor:  $8760 \times 10 / 87651 = 0,99942$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Korr.dat](#)

**Tabelle 7.3** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) nach DIN 4710 für Kassel

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
g <sub>w</sub> /kg <sub>tL</sub>																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34							2										6
33							1	1									10
32							2	3	4	3	3	4	2				21
31							2	5	8	9	5	3	2	3	1		38
30						2	2	10	17	17	12	8	7	3	1	1	80
29					1	1	9	16	16	25	21	11	8	4	1	2	115
28					1	1	5	19	28	36	32	19	14	6	1	1	163
27					2	3	7	22	35	43	36	28	13	8	2	2	201
26					2	8	18	45	67	62	52	29	19	13	4		319
25					2	13	25	59	84	88	73	42	30	11	4	1	432
24					5	21	43	73	88	89	66	47	31	11	3	1	478
23				1	6	28	49	86	104	107	83	63	37	13	3	1	581
22				1	11	41	71	124	118	115	101	71	45	14	3	1	716
21				5	20	57	97	139	153	141	109	79	39	12	2		853
20				5	26	84	115	165	178	167	116	77	43	17	2		995
19				13	46	91	151	204	197	176	119	72	50	10			1129
18			2	14	58	121	210	227	232	209	137	97	50	2			1359
17			2	27	65	137	228	253	259	215	179	127	16				1508
16			4	34	85	173	241	318	304	247	218	78					1702
15			3	35	92	179	272	331	318	309	175	8					1722
14			10	42	108	219	286	381	369	335	49						1799
13			11	51	143	237	345	426	497	183							1893
12			11	65	155	257	389	499	431	23							1830
11		2	18	76	153	307	422	588	175								1741
10		1	26	77	197	334	568	520	17								1740
9		2	37	109	242	419	657	194									1660
8		5	44	145	325	615	581	10									1725
7		3	60	173	441	802	317										1796
6		5	65	248	641	838	58										1855
5		9	67	300	854	580											1810
4		11	87	389	1154	214											1855
3		16	95	545	1216	5											1877
2		13	118	800	893												1824
1		25	165	1121	407												1718
0		48	526	1948	18												2540
-1		31	457	391													879
-2		41	500	117													658
-3		54	465	3													524
-4	1	73	333														407
-5		98	203														301
-6		122	107														229
-7		143	37														180
-8		143	2														145
-9	3	123															126
-10	1	79															80
-11	1	64															65
-12	2	45															47
-13	2	23															25
-14	5	18															23
-15	11	7															18
-16	7																7
-17	8																8
-18	6																6
-19	2																2
-20																	0
Summe	51	1204	3455	6735	7369	5787	5173	4718	3702	2603	1588	866	406	127	27	10	43821

Korrekturfaktor:  $8760 / 2 \times 10 / 43821 = 0,99952$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Tag.dat](#)

**Tabelle 7.4** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) nach DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel mit Korrektur der  $x$ -Werte, sodass bei  $p = 100$  kPa für alle Luftzustände bezogen auf die Klassenmitten stets  $\varphi \leq 99\%$  gilt

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
$g_w / kg_{tL}$																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34							2		1	1	1	1					6
33							1	1	2	3	1	2					10
32							2	3	4	3	3	4	2				21
31							2	5	8	9	5	3	2	3	1		38
30						2	2	10	17	17	12	8	7	3	1	1	80
29					1	1	9	16	16	25	21	11	8	4	1	2	115
28					1	1	5	19	28	36	32	19	14	6	1	1	163
27					2	3	7	22	35	43	36	28	13	8	2	2	201
26					2	8	18	45	67	62	52	29	19	13	4		319
25					2	13	25	59	84	88	73	42	30	11	4	1	432
24					5	21	43	73	88	89	66	47	31	11	3	1	478
23				1	6	28	49	86	104	107	83	63	37	13	3	1	581
22				1	11	41	71	124	118	115	101	71	45	14	3	1	716
21				5	20	57	97	139	153	141	109	79	39	12	2		853
20				5	26	84	115	165	178	167	116	77	43	17	2		995
19				13	46	91	151	204	197	176	119	72	50	10			1129
18			2	14	58	121	210	227	232	209	137	97	52				1359
17			2	27	65	137	228	253	259	215	179	127	16				1508
16			4	34	85	173	241	318	304	247	218	78					1702
15			3	35	92	179	272	331	318	309	183						1722
14			10	42	108	219	286	381	369	384							1799
13			11	51	143	237	345	426	497	183							1893
12			11	65	155	257	389	499	454								1830
11		2	18	76	153	307	422	763									1741
10		1	26	77	197	334	568	537									1740
9		2	37	109	242	419	851										1660
8		5	44	145	325	615	591										1725
7		3	60	173	441	1119											1796
6		5	65	248	641	896											1855
5		9	67	300	854	580											1810
4		11	87	389	1368												1855
3		16	95	545	1221												1877
2		13	118	800	893												1824
1		25	165	1528													1718
0		48	526	1966													2540
-1		31	848														879
-2		41	617														658
-3	2	54	468														524
-4	1	73	333														407
-5		301															301
-6		229															229
-7		180															180
-8		145															145
-9	3	123															126
-10	1	79															80
-11	65																65
-12	47																47
-13	25																25
-14	23																23
-15	18																18
-16	7																7
-17	8																8
-18	6																6
-19	2																2
-20																	0
Summe	208	1396	3617	6649	7163	5943	5002	4706	3533	2629	1547	858	408	125	27	10	43821

Korrekturfaktor:  $8760 / 2 \times 10 / 43821 = 0,99952$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Tag\\_Korr.dat](#)

**Tabelle 7.5** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3) für Kassel

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
g <sub>w</sub> /kg <sub>tL</sub>																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34																	0
33																	0
32																	0
31								1	1	1							3
30								1	1	1	1		2				6
29							1	2	3	4	3	1	1	1			16
28						1	1	2	5	9	2	2	2	1			25
27						1	3	4	6	16	6	4	3	3	1		47
26						1	2	7	10	14	11	6	6	1	1	1	60
25						2	4	14	16	19	20	9	9	4	1	1	99
24			1		1	2	6	17	29	25	25	17	11	4	3	1	142
23				1	1	6	11	21	36	40	32	29	14	9	3		202
22					1	9	15	33	41	46	45	34	20	13	4		261
21					3	14	27	43	56	60	61	46	33	19	4	1	367
20			1		5	22	30	60	75	84	82	67	49	24	5		504
19			2		7	22	48	82	95	119	104	90	68	20			657
18			3		14	35	67	87	122	150	144	161	80	6			869
17		1	2		17	49	84	122	175	204	236	228	29				1147
16			8		23	62	97	166	231	283	375	147	1				1393
15				13	36	67	134	236	353	477	355	13					1684
14			1	12	36	96	175	330	542	631	83						1906
13			2	23	46	115	235	465	822	372	1						2081
12			4	22	68	141	325	703	857	30							2150
11			5	31	85	209	463	1054	314								2161
10			6	33	97	286	772	1036	16								2246
9			6	48	122	416	1129	371									2092
8			11	55	202	665	1025	13									1971
7		1	17	73	319	1051	503										1964
6		2	26	130	566	1260	50										2034
5		1	32	198	986	902											2119
4		1	42	335	1422	294											2094
3		4	50	515	1539	4											2112
2		2	71	882	1127												2082
1		3	116	1438	472												2029
0		21	458	2413	15												2907
-1		22	488	482													992
-2		23	608	130													761
-3		42	585	6													633
-4		53	404														457
-5	1	83	273														357
-6	1	130	149														280
-7	2	194	50														246
-8	1	194															195
-9	1	138															139
-10		98															98
-11	1	77															78
-12		51															51
-13	2	36															38
-14	6	28															34
-15	7	9															16
-16	10	1															11
-17	8																8
-18	3																3
-19	3																3
-20																	0
Summe	46	1214	3405	6856	7210	5732	5207	4870	3806	2585	1586	854	328	105	22	4	43830

Korrekturfaktor:  $8760 / 2 \times 10 / 43830 = 0,99932$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Nacht.dat](#)

**Tabelle 7.6** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel mit Korrektur der  $x$ -Werte, sodass bei  $p = 100$  kPa für alle Luftzustände bezogen auf die Klassenmitten stets  $\phi \leq 99\%$  gilt

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
g <sub>w</sub> /kg <sub>tL</sub>																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34																	0
33																	0
32																	0
31								1	1	1							3
30								1	1	1	1		2				6
29							1	2	3	4	3	1	1	1			16
28						1	1	2	5	9	2	2	2	1			25
27						1	3	4	6	16	6	4	3	3	1		47
26						1	2	7	10	14	11	6	6	1	1	1	60
25						2	4	14	16	19	20	9	9	4	1	1	99
24				1	1	2	6	17	29	25	25	17	11	4	3	1	142
23					1	6	11	21	36	40	32	29	14	9	3		202
22					1	9	15	33	41	46	45	34	20	13	4		261
21					3	14	27	43	56	60	61	46	33	19	4	1	367
20				1	5	22	30	60	75	84	82	67	49	24	5		504
19				2	7	22	48	82	95	119	104	90	68	20			657
18				3	14	35	67	87	122	150	144	161	86				869
17			1	2	17	49	84	122	175	204	236	228	29				1147
16				8	23	62	97	166	231	283	375	148					1393
15				13	36	67	134	236	353	477	368						1684
14				1	12	36	96	175	330	542	714						1906
13				2	23	46	115	235	465	822	373						2081
12				4	22	68	141	325	703	887							2150
11				5	31	85	209	463	1368								2161
10				6	33	97	286	772	1052								2246
9				6	48	122	416	1500									2092
8				11	55	202	665	1038									1971
7				1	17	73	319	1554									1964
6				2	26	130	566	1310									2034
5				1	32	198	986	902									2119
4				1	42	335	1716										2094
3				4	50	515	1543										2112
2				2	71	882	1127										2082
1				3	116	1910											2029
0				21	458	2428											2907
-1				22	970												992
-2				23	738												761
-3				42	591												633
-4				53	404												457
-5		1	356														357
-6		1	279														280
-7		2	244														246
-8		1	194														195
-9		1	138														139
-10			98														98
-11		78															78
-12		51															51
-13		38															38
-14		34															34
-15		16															16
-16		11															11
-17		8															8
-18		3															3
-19		3															3
-20																	0
Summe	248	1484	3551	6725	7021	5987	5038	4816	3506	2639	1515	842	333	99	22	4	43830

Korrekturfaktor:  $8760 / 2 \times 10 / 43830 = 0,99932$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Nacht\\_Korr.dat](#)

**Tabelle 7.7** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  in Form des gewichteten Mittelwertes zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel mit Korrektur des gemittelten  $x$ -Wertes, sodass bei  $p = 100$  kPa für alle Luftzustände bezogen auf die Klassenmitten stets  $\varphi \leq 99$  % gilt

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
	gW/kgTL																
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
35																	0
34									6								6
33										10							10
32										21							21
31										41							41
30										86							86
29										131							131
28										188							188
27										248							248
26										379							379
25										531							531
24										620							620
23										783							783
22										977							977
21										1220							1220
20									1499								1499
19									1786								1786
18									2228								2228
17									2655								2655
16									3095								3095
15									3406								3406
14								3705									3705
13								3974									3974
12								3980									3980
11							3902										3902
10							3986										3986
9							3752										3752
8							3696										3696
7							3760										3760
6						3889											3889
5						3929											3929
4						3949											3949
3						3989											3989
2				3906													3906
1				3747													3747
0				5447													5447
-1			1871														1871
-2			1419														1419
-3			1157														1157
-4			864														864
-5			658														658
-6			509														509
-7			426														426
-8			340														340
-9			265														265
-10			178														178
-11	143																143
-12	98																98
-13	63																63
-14	57																57
-15	34																34
-16	18																18
-17	16																16
-18	9																9
-19	5																5
-20																	0
Summe	443	2376	5311	13100	15756	7456	11640	11659	14675	5235	0	0	0	0	0	0	87651

Korrekturfaktor:  $8760 \times 10 / 87651 = 0,99942$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_xS\\_Korr.dat](#)

**Tabelle 7.8** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  in Form des gewichteten Mittelwertes zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel mit Korrektur des gemittelten  $x$ -Wertes, sodass bei  $p = 100$  kPa für alle Luftzustände bezogen auf die Klassenmitten stets  $\varphi \leq 99$  % gilt

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
gW/kgTL																	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																	0
34									6								6
33										10							10
32										21							21
31										38							38
30										80							80
29										115							115
28										163							163
27										201							201
26										319							319
25										432							432
24										478							478
23										581							581
22										716							716
21									853								853
20									995								995
19									1129								1129
18									1359								1359
17									1508								1508
16								1702									1702
15								1722									1722
14								1799									1799
13								1893									1893
12							1830										1830
11							1741										1741
10							1740										1740
9						1660											1660
8						1725											1725
7						1796											1796
6					1855												1855
5					1810												1810
4					1855												1855
3					1877												1877
2				1824													1824
1				1718													1718
0				2540													2540
-1			879														879
-2			658														658
-3			524														524
-4			407														407
-5		301															301
-6		229															229
-7		180															180
-8		145															145
-9		126															126
-10		80															80
-11	65																65
-12	47																47
-13	25																25
-14	23																23
-15	18																18
-16	7																7
-17	8																8
-18	6																6
-19	2																2
-20																	0
Summe	201	1061	2468	6082	7397	5181	5311	7116	5850	3154	0	0	0	0	0	0	43821

Korrekturfaktor:  $8760 / 2 \times 10 / 43821 = 0,99952$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Tag\\_xS\\_Korr.dat](#)

**Tabelle 7.9** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der absoluten Luftfeuchte  $x$  in Form des gewichteten Mittelwertes zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel mit Korrektur des gemittelten  $x$ -Wertes, sodass bei  $p = 100$  kPa für alle Luftzustände bezogen auf die Klassenmitten stets  $\phi \leq 99$  % gilt

$t$ °C	$x = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Summe
	gW/kgTL																
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
35																	0
34																	0
33																	0
32																	0
31									3								3
30											6						6
29										16							16
28										25							25
27										47							47
26										60							60
25										99							99
24										142							142
23										202							202
22										261							261
21										367							367
20										504							504
19										657							657
18										869							869
17										1147							1147
16										1393							1393
15									1684								1684
14									1906								1906
13								2081									2081
12								2150									2150
11								2161									2161
10							2246										2246
9							2092										2092
8						1971											1971
7						1964											1964
6						2034											2034
5					2119												2119
4					2094												2094
3					2112												2112
2					2082												2082
1				2029													2029
0				2907													2907
-1			992														992
-2			761														761
-3			633														633
-4			457														457
-5		357															357
-6		280															280
-7		246															246
-8		195															195
-9		139															139
-10		98															98
-11	78																78
-12	51																51
-13	38																38
-14	34																34
-15	16																16
-16	11																11
-17	8																8
-18	3																3
-19	3																3
-20																	0
Summe	242	1315	2843	4936	8407	5969	4338	6392	3593	5789	6	0	0	0	0	0	43830

Korrekturfaktor:  $8760 / 2 \times 10 / 43830 = 0,99932$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetter\\_Nacht\\_xS\\_Korr.dat](#)

**Tabelle 7.10** Statistische Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für ein Jahr zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

t °C	Werte nach DIN 4710		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden 0,1 h	Summe Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t		Temperatur < t	
			Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %	Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %
35	0	0	0,00	0,00	8760,00	100,00
34	6	6	0,60	0,01	8759,40	99,99
33	10	16	1,60	0,02	8758,40	99,98
32	21	37	3,70	0,04	8756,30	99,96
31	41	78	7,80	0,09	8752,20	99,91
30	86	164	16,39	0,19	8743,61	99,81
29	131	295	29,48	0,34	8730,52	99,66
28	188	483	48,27	0,55	8711,73	99,45
27	248	731	73,06	0,83	8686,94	99,17
26	379	1110	110,94	1,27	8649,06	98,73
25	531	1641	164,00	1,87	8596,00	98,13
24	620	2261	225,97	2,58	8534,03	97,42
23	783	3044	304,22	3,47	8455,78	96,53
22	977	4021	401,87	4,59	8358,13	95,41
21	1220	5241	523,80	5,98	8236,20	94,02
20	1499	6740	673,61	7,69	8086,39	92,31
19	1786	8526	852,10	9,73	7907,90	90,27
18	2228	10754	1074,77	12,27	7685,23	87,73
17	2655	13409	1340,12	15,30	7419,88	84,70
16	3095	16504	1649,44	18,83	7110,56	81,17
15	3406	19910	1989,84	22,72	6770,16	77,28
14	3705	23615	2360,13	26,94	6399,87	73,06
13	3974	27589	2757,29	31,48	6002,71	68,52
12	3980	31569	3155,06	36,02	5604,94	63,98
11	3902	35471	3545,04	40,47	5214,96	59,53
10	3986	39457	3943,40	45,02	4816,60	54,98
9	3752	43209	4318,39	49,30	4441,61	50,70
8	3696	46905	4687,77	53,51	4072,23	46,49
7	3760	50665	5063,55	57,80	3696,45	42,20
6	3889	54554	5452,23	62,24	3307,77	37,76
5	3929	58483	5844,90	66,72	2915,10	33,28
4	3949	62432	6239,57	71,23	2520,43	28,77
3	3989	66421	6638,24	75,78	2121,76	24,22
2	3906	70327	7028,61	80,24	1731,39	19,76
1	3747	74074	7403,09	84,51	1356,91	15,49
0	5447	79521	7947,47	90,72	812,53	9,28
-1	1871	81392	8134,46	92,86	625,54	7,14
-2	1419	82811	8276,28	94,48	483,72	5,52
-3	1157	83968	8391,91	95,80	368,09	4,20
-4	864	84832	8478,26	96,78	281,74	3,22
-5	658	85490	8544,03	97,53	215,97	2,47

**Tabelle 7.10 (Fortsetzung)** Statistische Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für ein Jahr zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

t °C	Werte nach DIN 4710		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t		Temperatur < t	
			h	%	h	%
-6	509	85999	8594,90	98,12	165,10	1,88
-7	426	86425	8637,47	98,60	122,53	1,40
-8	340	86765	8671,45	98,99	88,55	1,01
-9	265	87030	8697,94	99,29	62,06	0,71
-10	178	87208	8715,73	99,49	44,27	0,51
-11	143	87351	8730,02	99,66	29,98	0,34
-12	98	87449	8739,81	99,77	20,19	0,23
-13	63	87512	8746,11	99,84	13,89	0,16
-14	57	87569	8751,80	99,91	8,20	0,09
-15	34	87603	8755,20	99,95	4,80	0,05
-16	18	87621	8757,00	99,97	3,00	0,03
-17	16	87637	8758,60	99,98	1,40	0,02
-18	9	87646	8759,50	99,99	0,50	0,01
-19	5	87651	8760,00	100,00	0,00	0,00
-20	0	87651	8760,00	100,00	0,00	0,00

**Tabelle 7.11** Statistische Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für ein Jahr zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

t °C	Werte nach DIN 4710		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden 0,1 h	Summe Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t		Temperatur < t	
			Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %	Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %
35	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
34	6	6	0,60	0,01	4379,40	99,99
33	10	16	1,60	0,04	4378,40	99,96
32	21	37	3,70	0,08	4376,30	99,92
31	38	75	7,50	0,17	4372,50	99,83
30	80	155	15,49	0,35	4364,51	99,65
29	115	270	26,99	0,62	4353,01	99,38
28	163	433	43,28	0,99	4336,72	99,01
27	201	634	63,37	1,45	4316,63	98,55
26	319	953	95,25	2,17	4284,75	97,83
25	432	1385	138,43	3,16	4241,57	96,84
24	478	1863	186,21	4,25	4193,79	95,75
23	581	2444	244,28	5,58	4135,72	94,42
22	716	3160	315,85	7,21	4064,15	92,79
21	853	4013	401,11	9,16	3978,89	90,84
20	995	5008	500,56	11,43	3879,44	88,57
19	1129	6137	613,41	14,00	3766,59	86,00
18	1359	7496	749,24	17,11	3630,76	82,89
17	1508	9004	899,97	20,55	3480,03	79,45
16	1702	10706	1070,09	24,43	3309,91	75,57
15	1722	12428	1242,20	28,36	3137,80	71,64
14	1799	14227	1422,02	32,47	2957,98	67,53
13	1893	16120	1611,23	36,79	2768,77	63,21
12	1830	17950	1794,14	40,96	2585,86	59,04
11	1741	19691	1968,16	44,94	2411,84	55,06
10	1740	21431	2142,07	48,91	2237,93	51,09
9	1660	23091	2307,99	52,69	2072,01	47,31
8	1725	24816	2480,41	56,63	1899,59	43,37
7	1796	26612	2659,92	60,73	1720,08	39,27
6	1855	28467	2845,34	64,96	1534,66	35,04
5	1810	30277	3026,25	69,09	1353,75	30,91
4	1855	32132	3211,66	73,33	1168,34	26,67
3	1877	34009	3399,27	77,61	980,73	22,39
2	1824	35833	3581,58	81,77	798,42	18,23
1	1718	37551	3753,30	85,69	626,70	14,31
0	2540	40091	4007,18	91,49	372,82	8,51
-1	879	40970	4095,04	93,49	284,96	6,51
-2	658	41628	4160,81	95,00	219,19	5,00
-3	524	42152	4213,18	96,19	166,82	3,81
-4	407	42559	4253,86	97,12	126,14	2,88
-5	301	42860	4283,95	97,81	96,05	2,19

**Tabelle 7.11 (Fortsetzung)** Statistische Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für ein Jahr zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

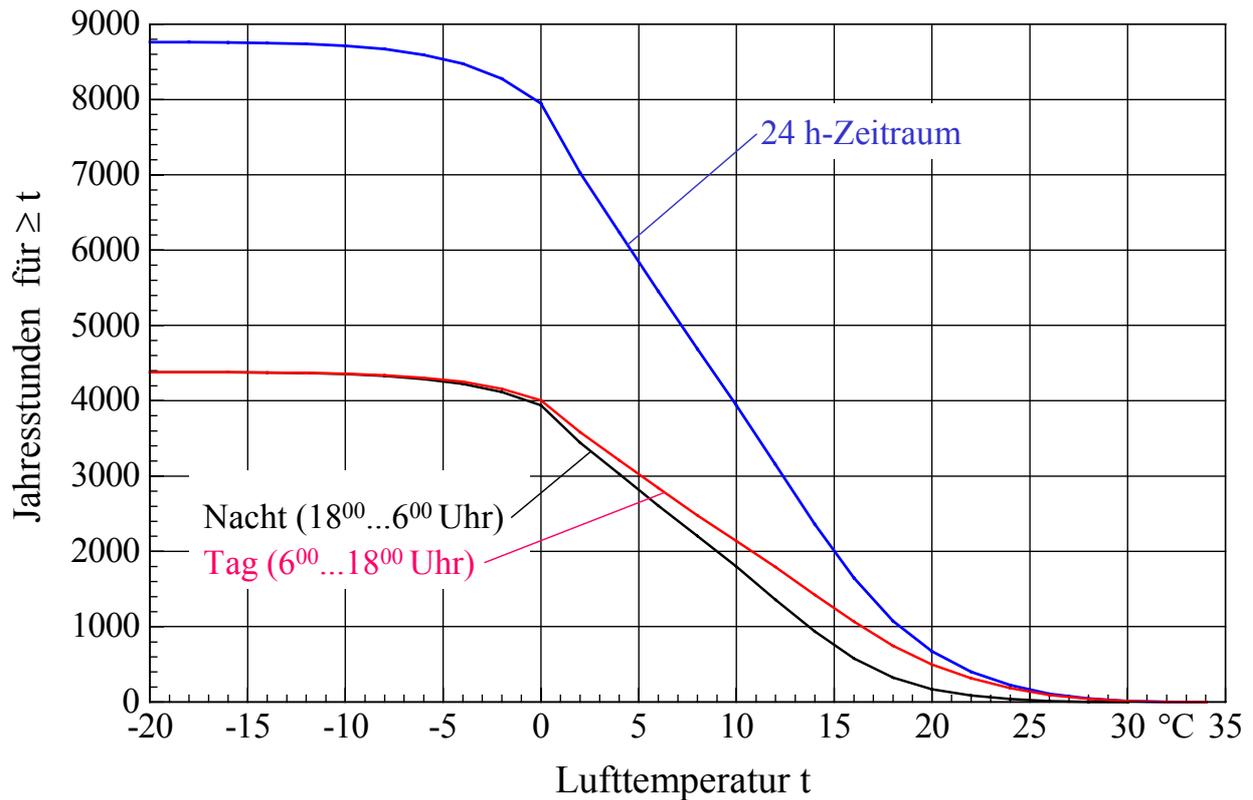
t °C	Werte nach DIN 4710		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe Zehntelstunden	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	0,1 h	h	Temperatur ≥ t %	h	Temperatur < t %
-6	229	43089	4306,84	98,33	73,16	1,67
-7	180	43269	4324,83	98,74	55,17	1,26
-8	145	43414	4339,32	99,07	40,68	0,93
-9	126	43540	4351,91	99,36	28,09	0,64
-10	80	43620	4359,91	99,54	20,09	0,46
-11	65	43685	4366,41	99,69	13,59	0,31
-12	47	43732	4371,10	99,80	8,90	0,20
-13	25	43757	4373,60	99,85	6,40	0,15
-14	23	43780	4375,90	99,91	4,10	0,09
-15	18	43798	4377,70	99,95	2,30	0,05
-16	7	43805	4378,40	99,96	1,60	0,04
-17	8	43813	4379,20	99,98	0,80	0,02
-18	6	43819	4379,80	100,00	0,20	0,00
-19	2	43821	4380,00	100,00	0,00	0,00
-20	0	43821	4380,00	100,00	0,00	0,00

**Tabelle 7.12** Statistische Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für ein Jahr zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

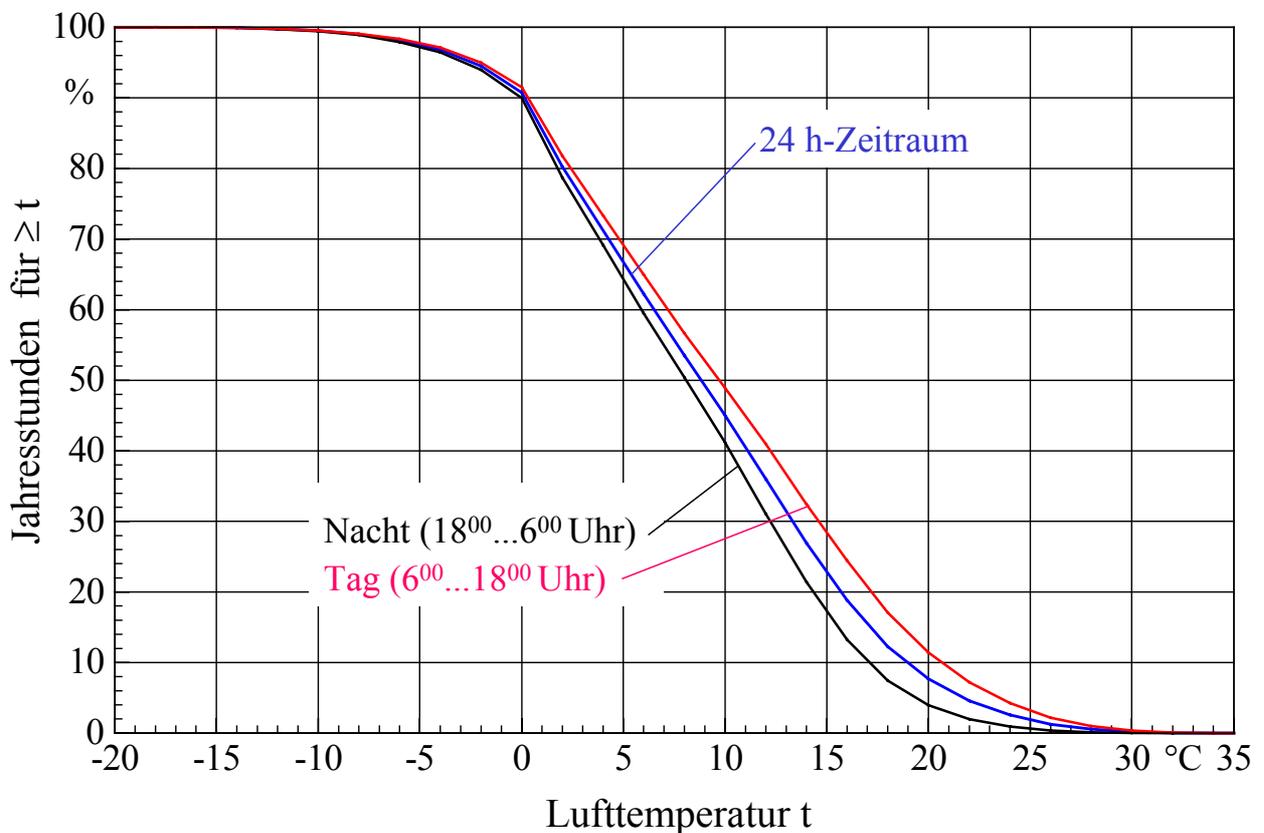
t °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden 0,1 h	Summe Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t		Temperatur < t	
			Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %	Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %
35	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
34	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
33	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
32	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
31	3	3	0,30	0,01	4379,70	99,99
30	6	9	0,90	0,02	4379,10	99,98
29	16	25	2,50	0,06	4377,50	99,94
28	25	50	5,00	0,11	4375,00	99,89
27	47	97	9,69	0,22	4370,31	99,78
26	60	157	15,69	0,36	4364,31	99,64
25	99	256	25,58	0,58	4354,42	99,42
24	142	398	39,77	0,91	4340,23	99,09
23	202	600	59,96	1,37	4320,04	98,63
22	261	861	86,04	1,96	4293,96	98,04
21	367	1228	122,72	2,80	4257,28	97,20
20	504	1732	173,08	3,95	4206,92	96,05
19	657	2389	238,74	5,45	4141,26	94,55
18	869	3258	325,58	7,43	4054,42	92,57
17	1147	4405	440,20	10,05	3939,80	89,95
16	1393	5798	579,40	13,23	3800,60	86,77
15	1684	7482	747,69	17,07	3632,31	82,93
14	1906	9388	938,16	21,42	3441,84	78,58
13	2081	11469	1146,11	26,17	3233,89	73,83
12	2150	13619	1360,97	31,07	3019,03	68,93
11	2161	15780	1576,92	36,00	2803,08	64,00
10	2246	18026	1801,37	41,13	2578,63	58,87
9	2092	20118	2010,42	45,90	2369,58	54,10
8	1971	22089	2207,39	50,40	2172,61	49,60
7	1964	24053	2403,65	54,88	1976,35	45,12
6	2034	26087	2606,91	59,52	1773,09	40,48
5	2119	28206	2818,67	64,35	1561,33	35,65
4	2094	30300	3027,93	69,13	1352,07	30,87
3	2112	32412	3238,98	73,95	1141,02	26,05
2	2082	34494	3447,04	78,70	932,96	21,30
1	2029	36523	3649,80	83,33	730,20	16,67
0	2907	39430	3940,30	89,96	439,70	10,04
-1	992	40422	4039,43	92,22	340,57	7,78
-2	761	41183	4115,48	93,96	264,52	6,04
-3	633	41816	4178,74	95,40	201,26	4,60
-4	457	42273	4224,41	96,45	155,59	3,55
-5	357	42630	4260,08	97,26	119,92	2,74

**Tabelle 7.12 (Fortsetzung)** Statistische Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für ein Jahr zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

t °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden 0,1 h	Summe Zehntelstunden 0,1 h	Stunden pro Jahr Temperatur ≥ t h	Häufigkeit Temperatur ≥ t %	Stunden pro Jahr Temperatur < t h	Häufigkeit Temperatur < t %
-6	280	42910	4288,06	97,90	91,94	2,10
-7	246	43156	4312,65	98,46	67,35	1,54
-8	195	43351	4332,13	98,91	47,87	1,09
-9	139	43490	4346,02	99,22	33,98	0,78
-10	98	43588	4355,82	99,45	24,18	0,55
-11	78	43666	4363,61	99,63	16,39	0,37
-12	51	43717	4368,71	99,74	11,29	0,26
-13	38	43755	4372,51	99,83	7,49	0,17
-14	34	43789	4375,90	99,91	4,10	0,09
-15	16	43805	4377,50	99,94	2,50	0,06
-16	11	43816	4378,60	99,97	1,40	0,03
-17	8	43824	4379,40	99,99	0,60	0,01
-18	3	43827	4379,70	99,99	0,30	0,01
-19	3	43830	4380,00	100,00	0,00	0,00
-20	0	43830	4380,00	100,00	0,00	0,00



**Bild 7.1** Summe der Jahresstunden einer Lufttemperatur  $\geq t$  für drei verschiedene Tageszeiträume entwickelt aus den Daten der DIN 4710 für den Standort Kassel



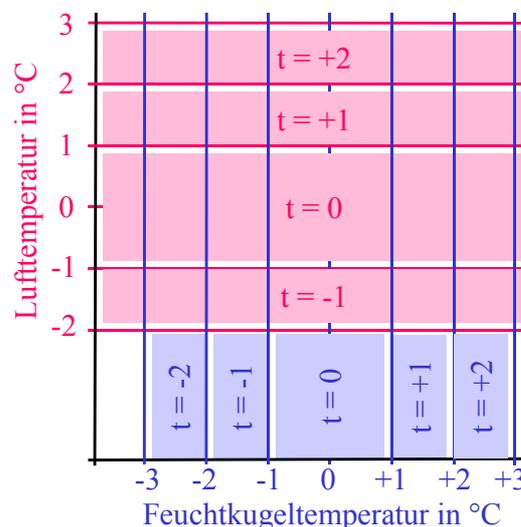
**Bild 7.2** Geordnete, prozentuale Summenhäufigkeit der Jahresstunden einer Lufttemperatur  $\geq t$  für drei verschiedene Tageszeiträume entwickelt aus den Daten der DIN 4710 für den Standort Kassel

## 7.2 $t_f$ -Korrelation und Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur

Für einige Untersuchungen zur Umweltenergienutzung ist es von Interesse, die Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur im Jahr zu kennen. Die Feuchtkugeltemperatur korreliert beispielsweise eng mit der Leistung eines offenen Wasserrückkühlers, wie die sogenannten Kühlturm-kennlinien demonstrieren. Die Korrelation der Leistung mit der Feuchtkugeltemperatur besteht auch für verschiedene Schaltungen mit Hybridkühlern.

Aus den bekannten  $t_x$ -Korrelationen können nach entsprechender Umrechnung z. B.  $t_f$ -Korrelationen gewonnen werden, wobei eine Einordnung nach nebenstehender Skizze erfolgt.

Der Algorithmus zur Ermittlung der Feuchtkugeltemperatur kann beim Verfasser eingesehen werden.



Es gelten die nachfolgenden Besonderheiten:

- Die zu den  $t_x$ -Korrelationen gehörigen Zeiträume in Zehntelstunden werden additiv den entsprechenden  $t_f$ -Korrelationen zugeordnet.
- Aufgrund der Rundungsfehler in den Originaltabellen der DIN 4710 folgt auch bei der Übertragung in den  $t_f$ -Bereich eine Abweichung von 8760 h, dem Gesamtzeitraum für das Jahr, sodass bei weiteren Berechnungen eine Korrektur erforderlich ist.
- Bei der Datenweiterverarbeitung sollte wiederum mit den Mittelwerten der jeweiligen Klasse gearbeitet werden, beispielsweise:
 

$t = -1,5 \text{ °C};$	$t = 0 \text{ °C};$	$t = 2,5 \text{ °C}$
$t_f = -2,5 \text{ °C};$	$t_f = 0 \text{ °C};$	$t_f = 11,5 \text{ °C}.$
- Die Ermittlungen für den  $t_f$ -Bereich erfolgen für die in der DIN 4710 vermerkten Zusammenstellungen für den 24 h-Tag und für den 12 h-Tag zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr sowie für die vorgenommene Differenzenbildung für die Nacht zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr.
- Eine zusätzliche Korrektur der ermittelten Werte ist nicht notwendig, da bei Nutzung der jeweiligen Klassenmitten für  $t$  und  $t_f$  die Sättigungslinie (relative Feuchte  $\varphi = 100 \%$ ) nicht überschritten wird. Die  $t_f$ -Klassenwerte sind stets  $\leq t$ .
- Für verschiedene Simulationen – kann wie bereits ausgeführt – die Feuchtkugeltemperatur der Luft  $t_f$  von relevanter Bedeutung sein. Zur Verringerung der Simulationsrechnungen werden gesonderte Tabellen erstellt, wobei jedem Wert der Feuchtkugeltemperatur eine mittlere Lufttemperatur  $t$  zugeordnet wird. Sinnvollerweise werde der "Schwerpunkt" der  $t$ -Werte unter Beachtung der Häufigkeiten gebildet.

Es folgen die beschriebenen  $t_f$ -Korrelationen in den Tabellen 7.13 bis 7.18.

Die **Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur** für die Zeitbereiche gesamter Tag, 12 h-Tag und für die Nacht sind in den Tabellen 7.19 bis 7.21 abgeleitet und dokumentiert sowie in den Bildern 7.3 und 7.4 veranschaulicht.

Die nachfolgend in den Tabellen aufgeführten Werte der  $t_f$ -Korrelationen sind mit einem speziellen Rechenprogramm ermittelt worden. In diesem sind auch die Unterprogramme ZUSTAND und ZUSTANDH (Tabelle 3.4) inhaltlich enthalten.

Die Tabellen können auch Dateien entnommen werden, die sich zusammen mit dem Rechenprogramm "Speicher" auf der CD-ROM befinden. Die Namen der Dateien sind am Ende der entsprechenden Tabellen vermerkt. Die erforderlichen Einleseprogramme können Abschnitt 7.3 entnommen werden.

**Tabelle 7.13** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der Feuchtkugeltemperatur  $t_f$  zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den  $t_f$ -Korrelationen der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

$t$ °C	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
0																	0
-1																	0
-2																	0
-3														2		96	98
-4													1		126		127
-5													1	181		476	658
-6												1		252	256		509
-7											2		337	87			426
-8											1	337	2				340
-9										4		261					265
-10									1		177						178
-11								2		141							143
-12								2	96								98
-13								4	59								63
-14									11	46							57
-15									18	16							34
-16										17	1						18
-17											16						16
-18												9					9
-19													5				5
-20																	0
Summe	5	0	25	17	19	27	52	61	97	145	180	599	341	522	382	572	3044

**Tabelle 7.13 (Fortsetzung)** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur t und der Feuchtkugeltemperatur t<sub>f</sub> zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den t<sub>x</sub>-Korrelationen der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

t °C	t <sub>f</sub> °C																Summe
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
25																	0
24																1	1
23																1	1
22															1	12	13
21															5	23	28
20															6	31	37
19														15	53	113	181
18													2	17	72	156	247
17												3	29	82	186	312	612
16												4	42	108	235	338	727
15											3	48	128		246	406	831
14											11	54	144	315	461	711	1696
13										13	74		189	352	580	891	2099
12										15	87	223	398	714	1202	1288	3927
11							2	23	107			238	516	885	1642	489	3902
10							1	32	110	294	620	1340	1556	33			3986
9							2	43	157		364	835	1786	565			3752
8						5	55		200	527	1280	1606	23				3696
7						4	77	246		760	1853	820					3760
6					7	91		378	1207	2098	108						3889
5					10	99	498		1840	1482							3929
4					141		724	2576	508								3949
3				20	145	1060	2755	9									3989
2				15	1871		2020										3906
1			28	281	2559	879											3747
0		69		984	4394												5447
-1	53		945	873													1871
-2	64	1108	247														1419
-3	1050	9															1059
-4	737																737
-5																	0
Summe	1904	1186	1220	2173	9127	2138	6132	3254	3967	5112	4074	4451	4597	4609	4722	4772	63438

t °C	t <sub>f</sub> °C																Summe
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
35																	0
34							2	1	1	2							6
33						1	1	2	4	2							10
32						2	3	7	3	4	2						21
31						2	15	10	5	5	3	1					41
30				2	2	11	18	18	21	9	4	1					86
29			1	1	10	18	48	24	12	14	1	2					131
28			1	2	27	33	45	34	37	7	2						188
27		2	4	10	26	41	59	74	16	14	2						248
26		2	9	20	52	153	63	35	39	5	1						379
25		2	15	102	100	107	93	90	15	5	2						531
24	6	23	49	90	117	114	155	42	15	8							619
23	7	34	60	107	287	115	92	51	28	1							782
22	50	86	157	159	161	146	105	92	7	1							964
21	71	124	182	209	201	295	72	31	7								1192
20	106	145	225	504	198	144	92	48									1462
19	199	286	292	295	223	162	148										1605
18	277	314	354	359	539	130	8										1981
17	375	434	419	415	355	45											2043
16	484	535	530	593	226												2368
15	567	671	1316	21													2575
14	911	966	132														2009
13	1319	556															1875
12	53																53
11																	0
Summe	4425	4180	3746	2889	2524	1519	1019	559	210	77	17	4	0	0	0	0	21169

Gesamtzeitraum: 87651 Zehntelstunden  
 Korrekturfaktor:  
 $8760 \times 10 / 87651 = 0,99942$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetterf.dat](#)

**Tabelle 7.14** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der Feuchtkugeltemperatur  $t_f$  zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den  $t_x$ -Korrelationen der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

$t$ °C	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	$t_f$ °C	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
0																		0
-1																		0
-2																		0
-3															2		54	56
-4													1		73			74
-5														98		203		301
-6														122	107			229
-7														143	37			180
-8														2				145
-9													143					126
-10										1		79						80
-11											3							65
-12								2		45								47
-13								2		23								25
-14								5		18								23
-15						11		7										18
-16					7													7
-17																		8
-18																		6
-19																		2
-20																		0
Summe	2	0	14	7	11	12	22	24	46	67	79	266	146	259	180	257		1392

$t$ °C	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	$t_f$ °C	4	5	6	7	8	9	10	11	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
25																		0
24																		0
23																	1	1
22																1	11	12
21																5	20	25
20																5	26	31
19															13	46	91	150
18														2	14	58	121	195
17													2	27	65	137	228	459
16													4	34	85	173	241	537
15												3	35	92	179	272		581
14												10	42	108	219	286	381	1046
13											11	51		143	237	345	426	1213
12											11	65	155	257	389	499	431	1807
11								2	18	76		153	307	422	588	175		1741
10							1		26	77	197	334	568	520	17			1740
9							2	37	109		242	419	657	194				1660
8						5	44		145	325	615	581	10					1725
7						3	60	173		441	802	317						1796
6					5	65		248	641	838	58							1855
5					9	67	300		854	580								1810
4					98		389	1154	214									1855
3				16	95	545	1216	5										1877
2				13	918		893											1824
1				25	165	1121	407											1718
0				48	526	1966												2540
-1		31		457	391													879
-2		41	500	117														658
-3		465	3															468
-4		333																333
-5																		0
Summe	870	551	599	1111	4212	1092	2905	1619	2007	2359	2043	2042	2205	2158	2339	2424		30536

**Tabelle 7.14 (Fortsetzung)** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der Feuchtkugeltemperatur  $t_f$  zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den  $t_x$ -Korrelationen der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

$t$ °C	$t_f$ °C																	Summe
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
35																		0
34							2	1	1	2								6
33						1	1	2	4	2								10
32						2	3	7	3	4	2							21
31						2	13	9	5	5	3	1						38
30				2	2	10	17	17	20	7	4	1						80
29			1	1	9	16	41	21	11	12	1	2						115
28			1	1	24	28	36	32	33	6	2							163
27		2	3	7	22	35	43	64	13	10	2							201
26		2	8	18	45	129	52	29	32	4								319
25		2	13	84	84	88	73	72	11	4	1							432
24	5	21	43	73	88	89	113	31	11	4								478
23	6	28	49	86	211	83	63	37	16	1								580
22	41	71	124	118	115	101	71	59	3	1								704
21	57	97	139	153	141	188	39	12	2									828
20	84	115	165	345	116	77	43	19										964
19	151	204	197	176	119	72	60											979
18	210	227	232	209	234	50	2											1164
17	253	259	215	179	127	16												1049
16	318	304	247	218	78													1165
15	331	318	484	8														1141
14	369	335	49															753
13	497	183																680
12	23																	23
11																		0
Summe	2345	2168	1970	1678	1415	987	672	412	165	62	15	4	0	0	0	0	0	11893

Gesamtzeitraum: 43821 Zehntelstunden  
 Korrekturfaktor:  
 $8760 / 2 \times 10 / 43821 = 0,99952$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetterf\\_Tag.dat](#)

**Tabelle 7.15** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der Feuchtkugeltemperatur  $t_f$  zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den  $t_x$ -Korrelationen der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

$t$ °C	$t_f$ °C															Summe	
	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
0																	0
-1																	0
-2																	0
-3																42	42
-4															53		53
-5												1	83		273		357
-6											2	1	130	149			280
-7											1	194	50				246
-8											1	194					195
-9											1	138					139
-10											98						98
-11								1		77							78
-12									51								51
-13							2	36									38
-14						6	28										34
-15					7	9											16
-16				10	1												11
-17			8														8
-18			3														3
-19	3																3
-20																	0
Summe	3	0	11	10	8	15	30	37	51	78	101	333	195	263	202	315	1652

**Tabelle 7.15 (Fortsetzung)** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $t$  und der Feuchtkugeltemperatur  $t_f$  zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den  $t_f$ -Korrelationen der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

$t$ °C	$t_f$ °C																Summe
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
25																	0
24																1	1
23																	0
22																1	1
21																3	3
20															1	5	6
19														2	7	22	31
18														3	14	35	52
17												1	2	17	49	84	153
16													8	23	62	97	190
15													13	36	67	134	250
14											1	12	36	96	175	330	650
13										2	23		46	115	235	465	886
12										4	22	68	141	325	703	857	2120
11									5	31		85	209	463	1054	314	2161
10									6	33	97	286	772	1036	16		2246
9								6	48		122	416	1129	371			2092
8									55	202	665	1025	13				1971
7						1	17	73		319	1051	503					1964
6					2	26		130	566	1260	50						2034
5					1	32	198		986	902							2119
4					43		335	1422	294								2094
3				4	50	515	1539	4									2112
2				2	953		1127										2082
1			3	116	1438	472											2029
0			21	458	2428												2907
-1	22		488	482													992
-2	23	608	130														761
-3	585	6															591
-4	404																404
-5																	0
Summe	1034	635	621	1062	4915	1046	3227	1635	1960	2753	2031	2409	2392	2451	2383	2348	32902

$t$ °C	$t_f$ °C																Summe
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																	
34																	0
33																	0
32																	0
31							2	1									3
30						1	1	1	1	2							6
29					1	2	7	3	1	2							16
28				1	3	5	9	2	4	1							25
27			1	3	4	6	16	10	3	4							47
26			1	2	7	24	11	6	7	1	1						60
25			2	18	16	19	20	18	4	1	1						99
24	1	2	6	17	29	25	42	11	4	4							141
23	1	6	11	21	76	32	29	14	12								202
22	9	15	33	41	46	45	34	33	4								260
21	14	27	43	56	60	107	33	19	5								364
20	22	30	60	159	82	67	49	29									498
19	48	82	95	119	104	90	88										626
18	67	87	122	150	305	80	6										817
17	122	175	204	236	228	29											994
16	166	231	283	375	148												1203
15	236	353	832	13													1434
14	542	631	83														1256
13	822	373															1195
12	30																30
11																	0
Summe	2080	2012	1776	1211	1109	532	347	147	45	15	2	0	0	0	0	0	9276

Gesamtzeitraum: 43830 Zehntelstunden  
 Korrekturfaktor:  
 $8760 / 2 \times 10 / 43830 = 0,99932$

**Tabelle 7.16** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Feuchtkugeltemperatur  $t_f$  und der Lufttemperatur  $t$  in Form des gewichteten Mittelwertes zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

$t$ °C	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
30												4					4
29											17						17
28										77							77
27																	0
26									210								210
25								559									559
24																	0
23							1019										1019
22						1519											1519
21																	0
20					2524												2524
19				2889													2889
18																	0
17			3746														3746
16		4180															4180
15	4425																4425
Summe	4425	4180	3746	2889	2524	1519	1019	559	210	77	17	4	0	0	0	0	21169

$t$ °C	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
15																	0
14																4772	4772
13															4722		4722
12																	0
11														4609			4609
10												4597					4597
9											4451						4451
8										4074							4074
7																	0
6									3967	5112							9079
5								3254									3254
4																	0
3									6132								6132
2							2138										2138
1						9127											9127
0				2173													2173
-1			1220														1220
-2		1186															1186
-3	1904																1904
Summe	1904	1186	1220	2173	9127	2138	6132	3254	3967	5112	4074	4451	4597	4609	4722	4772	63438

$t$ °C	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
-4																	0
-5																954	954
-6															522		522
-7														341			341
-8												599					599
-9																	0
-10											180						180
-11										145							145
-12									97								97
-13								61									61
-14							52										52
-15						19	27										46
-16					17												17
-17			25														25
-18																	0
-19	5																5
Summe	5	0	25	17	19	27	52	61	97	145	180	599	341	522	382	954	3044

Korrekturfaktor:  
 $8760 \times 10 / 87651 = 0,99942$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetterf\\_xS.dat](#)

**Tabelle 7.17** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Feuchtkugltemperatur  $t_f$  und der Lufttemperatur  $t$  in Form des gewichteten Mittelwertes zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

$t$ °C	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
30												4					4
29											15						15
28										62							62
27									165								165
26																	0
25								412									412
24							672										672
23						987											987
22																	0
21						1415											1415
20					1678												1678
19																	0
18						1970											1970
17						2168											2168
16		2345															2345
15																	0
Summe	2345	2168	1970	1678	1415	987	672	412	165	62	15	4	0	0	0	0	11893

$t$ °C	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
15																	0
14																2424	2424
13																2339	2339
12															2158	2158	
11														2205		2205	
10																	0
9																2042	2042
8																2043	2043
7																2359	2359
6																2007	2007
5																1619	1619
4																	0
3																1092 2905	3997
2																	0
1																4212	4212
0																1111	1111
-1																599	599
-2																551	551
-3																870	870
Summe	870	551	599	1111	4212	1092	2905	1619	2007	2359	2043	2042	2205	2158	2339	2424	30536

$t$ °C	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
-4																	0
-5																	437
-6																180 257	259
-7																259	146
-8																266	266
-9																	0
-10																	79
-11																	67
-12																	46
-13																	24
-14																	22
-15																	23
-16																	7
-17																	14
-18																	0
-19																	2
Summe	2	0	14	7	11	12	22	24	46	67	79	266	146	259	180	257	1392

Korrekturfaktor:  
 $4380 \times 10 / 43821 = 0,99952$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetterf\\_Tag\\_xS.dat](#)

**Tabelle 7.18** Zeiträume (Zehntelstunden) des Auftretens der Luftzustände in Abhängigkeit der Feuchtkugltemperatur  $t_f$  und der Lufttemperatur  $t$  in Form des gewichteten Mittelwertes zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

$t$ °C	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
30																	0
29																	0
28																	0
27										15							15
26											2						2
25																	0
24									45								45
23								147									147
22							347										347
21						532											532
20																	0
19					1109												1109
18				1211													1211
17																	0
16			1776														1776
15		2012															2012
14	2080																2080
Summe	2080	2012	1776	1211	1109	532	347	147	45	15	2	0	0	0	0	0	9276

$t$ °C	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
14																	0
13																2348	2348
12															2383		2383
11														2451			2451
10													2392				2392
9																	0
8										2031	2409						4440
7																	0
6										2753							2753
5									1960								1960
4								1635									1635
3							3227										3227
2						1046											1046
1					4915												4915
0				1062													1062
-1			621														621
-2		635															635
-3	1034																1034
Summe	1034	635	621	1062	4915	1046	3227	1635	1960	2753	2031	2409	2392	2451	2383	2348	32902

$t$ °C	-20	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	Summe
	Werte in der Tabelle sind Zehntelstunden pro Jahr																
-4																	0
-5															202	315	517
-6														263			263
-7													195				195
-8												333					333
-9																	0
-10											101						101
-11										78							78
-12									51								51
-13								37									37
-14							30										30
-15					8	15											23
-16				10													10
-17			11														11
-18																	0
-19	3																3
Summe	3	0	11	10	8	15	30	37	51	78	101	333	195	263	202	315	1652

Korrekturfaktor:  
 $4380 \times 10 / 43830 = 0,99932$

Dateinamen für die Tabellenwerte: [Wetterf\\_Nacht\\_xS.dat](#)

**Tabelle 7.19** Statistische Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur für ein Jahr zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

t <sub>f</sub> °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden 0,1 h	Summe Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub>		Temperatur < t <sub>f</sub>	
			Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %	Stunden pro Jahr h	Häufigkeit %
24	0	0	0,00	0,00	8760,00	100,00
23	4	4	0,40	0,00	8759,60	100,00
22	17	21	2,10	0,02	8757,90	99,98
21	77	98	9,79	0,11	8750,21	99,89
20	210	308	30,78	0,35	8729,22	99,65
19	559	867	86,65	0,99	8673,35	99,01
18	1019	1886	188,49	2,15	8571,51	97,85
17	1519	3405	340,30	3,88	8419,70	96,12
16	2524	5929	592,56	6,76	8167,44	93,24
15	2889	8818	881,29	10,06	7878,71	89,94
14	3746	12564	1255,67	14,33	7504,33	85,67
13	4180	16744	1673,43	19,10	7086,57	80,90
12	4425	21169	2115,67	24,15	6644,33	75,85
11	4772	25941	2592,59	29,60	6167,41	70,40
10	4722	30663	3064,52	34,98	5695,48	65,02
9	4609	35272	3525,15	40,24	5234,85	59,76
8	4597	39869	3984,58	45,49	4775,42	54,51
7	4451	44320	4429,42	50,56	4330,58	49,44
6	4074	48394	4836,58	55,21	3923,42	44,79
5	5112	53506	5347,49	61,04	3412,51	38,96
4	3967	57473	5743,96	65,57	3016,04	34,43
3	3254	60727	6069,17	69,28	2690,83	30,72
2	6132	66859	6682,01	76,28	2077,99	23,72
1	2138	68997	6895,69	78,72	1864,31	21,28
0	9127	78124	7807,85	89,13	952,15	10,87
-1	2173	80297	8025,03	91,61	734,97	8,39
-2	1220	81517	8146,96	93,00	613,04	7,00
-3	1186	82703	8265,49	94,35	494,51	5,65
-4	1904	84607	8455,78	96,53	304,22	3,47
-5	572	85179	8512,94	97,18	247,06	2,82
-6	382	85561	8551,12	97,62	208,88	2,38
-7	522	86083	8603,29	98,21	156,71	1,79
-8	341	86424	8637,37	98,60	122,63	1,40
-9	599	87023	8697,24	99,28	62,76	0,72
-10	180	87203	8715,23	99,49	44,77	0,51
-11	145	87348	8729,72	99,65	30,28	0,35
-12	97	87445	8739,41	99,76	20,59	0,24
-13	61	87506	8745,51	99,83	14,49	0,17
-14	52	87558	8750,71	99,89	9,29	0,11
-15	27	87585	8753,40	99,92	6,60	0,08
-16	19	87604	8755,30	99,95	4,70	0,05

**Tabelle 7.19 (Fortsetzung)** Statistische Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur für ein Jahr zwischen 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.1) für Kassel

t <sub>f</sub> °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub>		Temperatur < t <sub>f</sub>	
			h	%	h	%
-17	17	87621	8757,00	99,97	3,00	0,03
-18	25	87646	8759,50	99,99	0,50	0,01
-19	0	87646	8759,50	99,99	0,50	0,01
-20	5	87651	8760,00	100,00	0,00	0,00

**Tabelle 7.20** Statistische Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur für ein Jahr zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

t <sub>f</sub> °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub>		Temperatur < t <sub>f</sub>	
			h	%	h	%
24	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
23	4	4	0,40	0,01	4379,60	99,99
22	15	19	1,90	0,04	4378,10	99,96
21	62	81	8,10	0,18	4371,90	99,82
20	165	246	24,59	0,56	4355,41	99,44
19	412	658	65,77	1,50	4314,23	98,50
18	672	1330	132,94	3,04	4247,06	96,96
17	987	2317	231,59	5,29	4148,41	94,71
16	1415	3732	373,02	8,52	4006,98	91,48
15	1678	5410	540,74	12,35	3839,26	87,65
14	1970	7380	737,65	16,84	3642,35	83,16
13	2168	9548	954,34	21,79	3425,66	78,21
12	2345	11893	1188,73	27,14	3191,27	72,86
11	2424	14317	1431,01	32,67	2948,99	67,33
10	2339	16656	1664,80	38,01	2715,20	61,99
9	2158	18814	1880,50	42,93	2499,50	57,07
8	2205	21019	2100,89	47,97	2279,11	52,03
7	2042	23061	2304,99	52,63	2075,01	47,37
6	2043	25104	2509,20	57,29	1870,80	42,71
5	2359	27463	2744,98	62,67	1635,02	37,33
4	2007	29470	2945,59	67,25	1434,41	32,75
3	1619	31089	3107,41	70,95	1272,59	29,05
2	2905	33994	3397,77	77,57	982,23	22,43
1	1092	35086	3506,92	80,07	873,08	19,93
0	4212	39298	3927,92	89,68	452,08	10,32
-1	1111	40409	4038,96	92,21	341,04	7,79
-2	599	41008	4098,83	93,58	281,17	6,42
-3	551	41559	4153,91	94,84	226,09	5,16
-4	870	42429	4240,87	96,82	139,13	3,18

**Tabelle 7.20 (Fortsetzung)** Statistische Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur für ein Jahr zwischen 6<sup>00</sup> Uhr und 18<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabelle 7.3) für Kassel

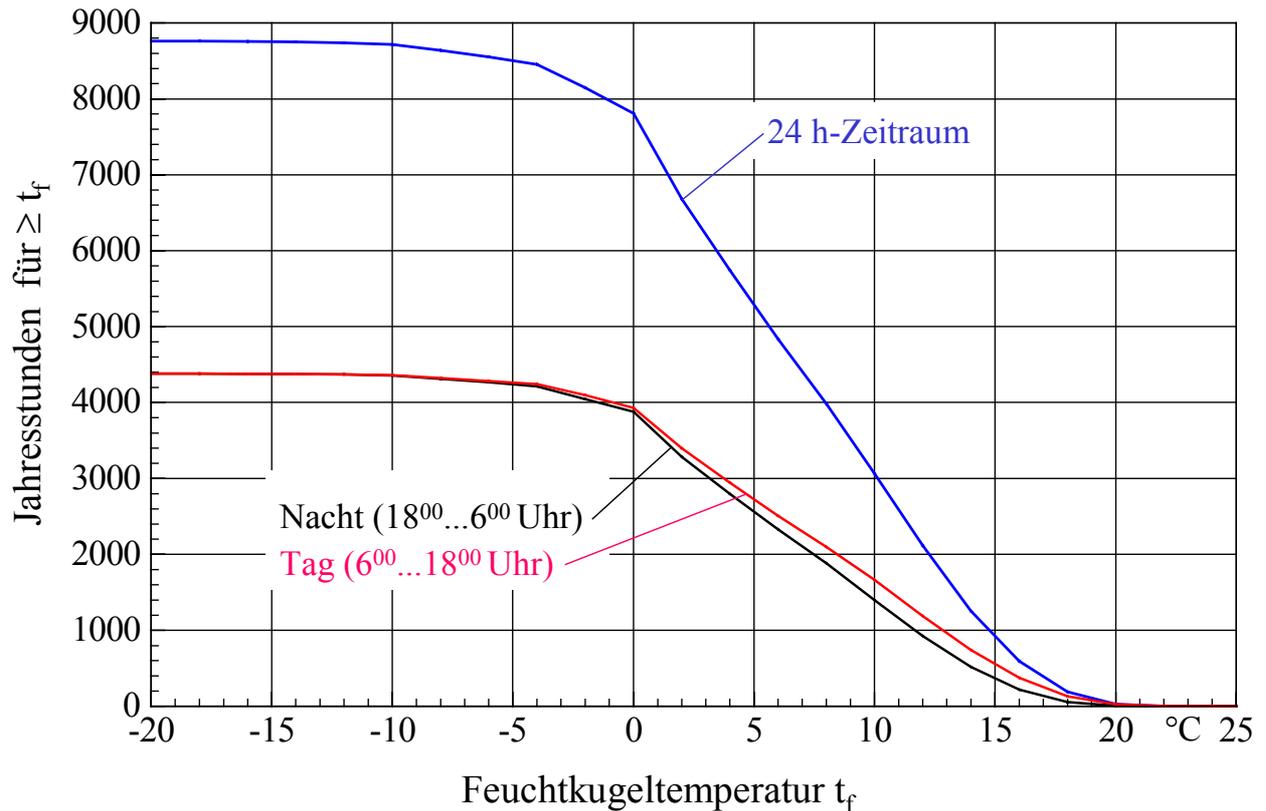
t <sub>f</sub> °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub>		Temperatur < t <sub>f</sub>	
			h	%	h	%
-5	257	42686	4266,55	97,41	113,45	2,59
-6	180	42866	4284,55	97,82	95,45	2,18
-7	259	43125	4310,43	98,41	69,57	1,59
-8	146	43271	4325,03	98,74	54,97	1,26
-9	266	43537	4351,61	99,35	28,39	0,65
-10	79	43616	4359,51	99,53	20,49	0,47
-11	67	43683	4366,21	99,69	13,79	0,31
-12	46	43729	4370,80	99,79	9,20	0,21
-13	24	43753	4373,20	99,84	6,80	0,16
-14	22	43775	4375,40	99,90	4,60	0,10
-15	12	43787	4376,60	99,92	3,40	0,08
-16	11	43798	4377,70	99,95	2,30	0,05
-17	7	43805	4378,40	99,96	1,60	0,04
-18	14	43819	4379,80	100,00	0,20	0,00
-19	0	43819	4379,80	100,00	0,20	0,00
-20	2	43821	4380,00	100,00	0,00	0,00

**Tabelle 7.21** Statistische Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur für ein Jahr zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

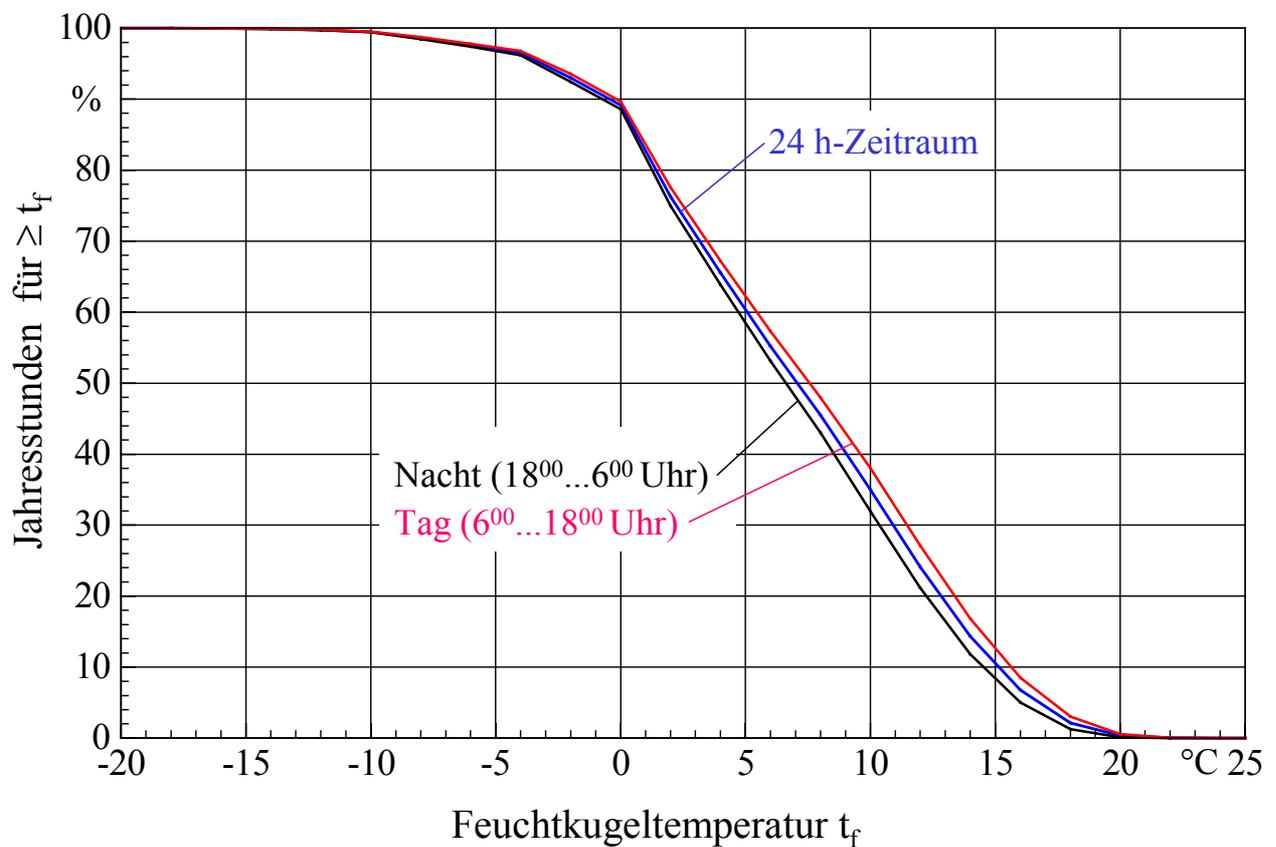
t <sub>f</sub> °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub>		Temperatur < t <sub>f</sub>	
			h	%	h	%
24	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
23	0	0	0,00	0,00	4380,00	100,00
22	2	2	0,20	0,00	4379,80	100,00
21	15	17	1,70	0,04	4378,30	99,96
20	45	62	6,20	0,14	4373,80	99,86
19	147	209	20,89	0,48	4359,11	99,52
18	347	556	55,56	1,27	4324,44	98,73
17	532	1088	108,73	2,48	4271,27	97,52
16	1109	2197	219,55	5,01	4160,45	94,99
15	1211	3408	340,57	7,78	4039,43	92,22
14	1776	5184	518,05	11,83	3861,95	88,17
13	2012	7196	719,11	16,42	3660,89	83,58
12	2080	9276	926,97	21,16	3453,03	78,84
11	2348	11624	1161,60	26,52	3218,40	73,48
10	2383	14007	1399,74	31,96	2980,26	68,04
9	2451	16458	1644,67	37,55	2735,33	62,45

**Tabelle 7.21 (Fortsetzung)** Statistische Häufigkeitsverteilung der Feuchtkugeltemperatur für ein Jahr zwischen 18<sup>00</sup> Uhr und 6<sup>00</sup> Uhr (MEZ) ermittelt aus den Werten der DIN 4710 (Tabellen 7.1 und 7.3 bzw. Tabelle 7.5) für Kassel

t <sub>f</sub> °C	Werte aus DIN 4710 berechnet		Korrigierte Werte			
	Zehntelstunden	Summe	Stunden pro Jahr	Häufigkeit	Stunden pro Jahr	Häufigkeit
	0,1 h	Zehntelstunden 0,1 h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub> h	Temperatur ≥ t <sub>f</sub> %	Temperatur < t <sub>f</sub> h	Temperatur < t <sub>f</sub> %
8	2392	18850	1883,71	43,01	2496,29	56,99
7	2409	21259	2124,44	48,50	2255,56	51,50
6	2031	23290	2327,41	53,14	2052,59	46,86
5	2753	26043	2602,52	59,42	1777,48	40,58
4	1960	28003	2798,38	63,89	1581,62	36,11
3	1635	29638	2961,77	67,62	1418,23	32,38
2	3227	32865	3284,25	74,98	1095,75	25,02
1	1046	33911	3388,78	77,37	991,22	22,63
0	4915	38826	3879,94	88,58	500,06	11,42
-1	1062	39888	3986,07	91,01	393,93	8,99
-2	621	40509	4048,13	92,42	331,87	7,58
-3	635	41144	4111,58	93,87	268,42	6,13
-4	1034	42178	4214,91	96,23	165,09	3,77
-5	315	42493	4246,39	96,95	133,61	3,05
-6	202	42695	4266,58	97,41	113,42	2,59
-7	263	42958	4292,86	98,01	87,14	1,99
-8	195	43153	4312,35	98,46	67,65	1,54
-9	333	43486	4345,62	99,22	34,38	0,78
-10	101	43587	4355,72	99,45	24,28	0,55
-11	78	43665	4363,51	99,62	16,49	0,38
-12	51	43716	4368,61	99,74	11,39	0,26
-13	37	43753	4372,31	99,82	7,69	0,18
-14	30	43783	4375,30	99,89	4,70	0,11
-15	15	43798	4376,80	99,93	3,20	0,07



**Bild 7.3** Summe der Jahresstunden einer Feuchtkugeltemperatur  $\geq t_f$  für drei verschiedene Tageszeiträume entwickelt aus den Daten der DIN 4710 für den Standort Kassel



**Bild 7.4** Geordnete, prozentuale Summenhäufigkeit der Jahresstunden einer Feuchtkugeltemperatur  $\geq t_f$  für drei verschiedene Tageszeiträume entwickelt aus den Daten der DIN 4710 für den Standort Kassel

### 7.3 Dateien zu den $t,x$ - und $t,t_f$ -Korrelationen

Die in den Tabellen 7.1 bis 7.9 und 7.13 bis 7.18 angegebenen Daten sind in Dateien, deren Namen am jeweiligen Tabellenende vermerkt ist, abgespeichert. Um das Dateiformat richtig einzulesen, sind die nachfolgenden Unterprogramme zu verwenden.

- Einlesen der Dateien für die  $t,x$ -Korrelation

```
FileOpen(1, Datei, OpenMode.Input)
For tWetter = -20 To 35
  For xWetter = 0 To 20
    Input(1, ZehntelStunden(tWetter + 20, xWetter))
  Next xWetter
Next tWetter
FileClose(1)
```

Die Zeitdauern des Auftretens von  $t, x$  pro Jahr in 0,1 h stehen dann im zweidimensionalen Feld

`ZehntelStunden(tWetter + 20, xWetter)`

mit den Laufvariablen  $tWetter$  von  $-20\text{ °C}$  bis  $35\text{ °C}$  und  $xWetter$  von 0 bis  $20\text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$ .

- Einlesen der Dateien für die  $t,t_f$ -Korrelation

```
FileOpen(1, Datei, OpenMode.Input)
For tWetter = -20 To 35
  For tfWetter = -30 To 30
    Input(1, ZehntelStundenf(tWetter + 20, tfWetter + 30))
  Next tfWetter
Next tWetter
FileClose(1)
```

Die Zeitdauern des Auftretens von  $t,t_f$  pro Jahr in 0,1 h stehen dann im zweidimensionalen Feld

`ZehntelStundenf(tWetter + 20, tfWetter + 30)`

mit den Laufvariablen  $tWetter$  von  $-20\text{ °C}$  bis  $35\text{ °C}$  und  $tfWetter$  von  $-30\text{ °C}$  bis  $30\text{ °C}$ .

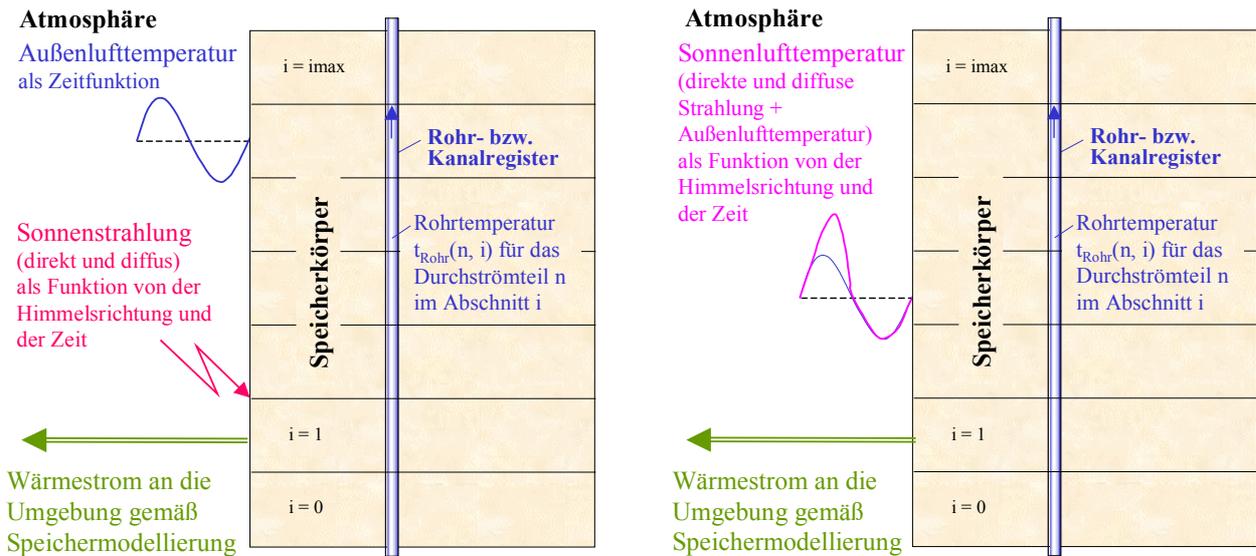
### 7.4 Außenlufttemperatur, Solarstrahlung und Sonnenlufttemperatur als Tagesgänge

Vielfach grenzen feste **Speicheroberflächen** an die **Atmosphäre**. Dazu gehören beispielsweise **Massivplattenabsorber**, aber auch **Wände und Dächer von Bauwerken** oder sogar die **Erdoberfläche**. Diese Speicheroberflächen sind der **Außenlufttemperatur** und gleichzeitig auch der **Sonnenstrahlung** ausgesetzt, wobei die genannten meteorologischen Elemente nach ganz speziellen wärmetechnischen Gesetzmäßigkeiten wirken.

Es ist rechentechnisch rationell, wenn es gelingt, die meteorologischen Elemente zu einer **resultierenden Größe** zusammenzufassen, die die gleiche wärmetechnische Wirkung erzielt, wie das Wirken der Einzelgrößen. Man spricht dann von **Superposition**. Bild 7.5 zeigt eine Prinzipdarstellung der Zusammenfassung. In [8] wurde dieser Fall speziell für äußere Raumumfassungen modelliert und ausführlich beschrieben.

Um die Superposition durchführen zu können, sind verschiedene Vereinfachungen zu treffen.

- So wird an der Speicheroberfläche (Außenfläche) ein **Gesamtwärmeübergangskoeffizient**  $\alpha_a$ , der die langwellige Umgebungsstrahlung und Konvektion zusammenfasst, angesetzt.



**Bild 7.5** Prinzipdarstellung der Speicheroberfläche mit direktem Kontakt zur Atmosphäre, sodass die Lufttemperatur und die Gesamtsonnenstrahlung als Zeitfunktionen wirken  
 Im Speicherkörper ist im dargestellten Beispiel ein Rohr- bzw. Kanalregister integriert.  
 Links: Reale Einzelwirkungen von Außentemperatur und Solarstrahlung.  
 Rechts: Superposition der Einzelwirkungen zur Sonnenlufttemperatur.

- Des Weiteren behält man das Modell der konvektiven Wärmeübertragung an den Außenbauteilen als gedankliche Grundlage bei, sodass letztlich die **absorbierte Sonnenstrahlung** als **erhöhte Lufttemperatur** nachgebildet wird.

Dieses Vorgehen hat bereits eine lange Tradition. Es wurde und wird bei den verschiedenen Verfahren der Kühllastberechnungen – beispielsweise nach VDI 2078 und auch nach ASHRAE Handbook "Fundamentals" – verwendet.

Zur Ermittlung der neuen Außenlufttemperatur muss die Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung und der langwellige Strahlungsaustausch mit dem Himmelsgewölbe sowie der terrestrischen Umgebung ergänzt werden.

In der ersten Form berücksichtigte man nur die Absorption der kurzwelligen Strahlung – z. B. in RECKNAGEL/SPRENGER: Taschenbuch für Heizung · Lüftung · Klimatechnik; 1964 auf der Grundlage von MACKAY/WRIGHT – und bildete die **Sonnenlufttemperatur**

$$t_{\text{aussen}}(\tau) = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} \quad (7.1)$$

mit

$t_{\text{aussen}}(\tau)$  °C      Außentemperaturverlauf als Sonnenlufttemperatur

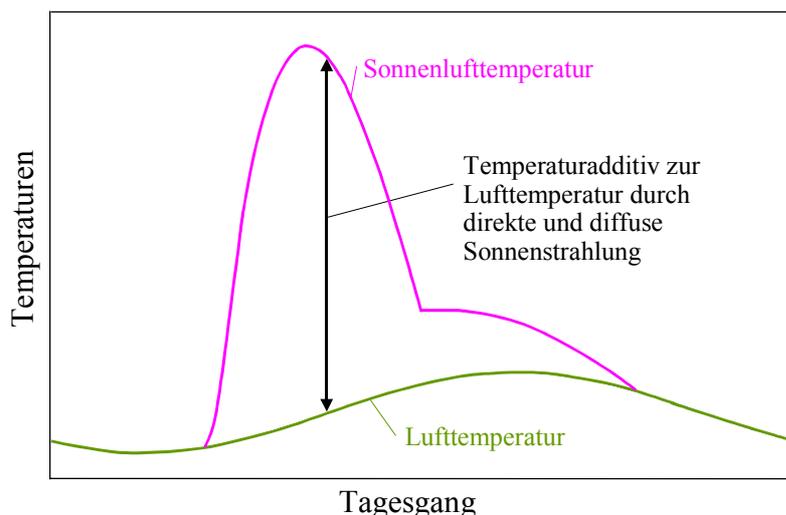
$t_L(\tau)$  °C      Lufttemperaturverlauf

$a$  -      Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung

$\dot{I}_{\text{gesamt}}$  W/m<sup>2</sup>      Gesamtstrahlung auf das Bauteil

$\alpha_a$  W/(m<sup>2</sup>K)      äußerer Wärmeübergangskoeffizient (gesamt) an der Bauteiloberfläche.

In Bild 7.6 sind die Zusammenhänge zwischen Luft- und Sonnenlufttemperatur qualitativ veranschaulicht.



**Bild 7.6** Lufttemperatur und Sonnenlufttemperatur als Tagesgänge

In den neueren Darstellungen – ASHRAE Handbook "Fundamentals"; 1993 – berücksichtigt man bei der Sonnenlufttemperatur die "langwellige Strahlung" mit einem Zusatzglied X:

$$t_{\text{aussen}}(\tau) = t_L(\tau) + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}(\tau)}{\alpha_a} + X, \quad (7.2)$$

wobei  $X = -3,9 \text{ K}$  für Dächer und  $X = 0 \text{ K}$  für vertikale Wände empfohlen werden.

Eine bedeutend genauere Darstellung – die sogenannte **kombinierte Außentemperatur** – geht auf NEHRING zurück. Sie bildet eine Berechnungsgrundlage für die Kühllastermittlung nach VDI 2078. Es gilt:

$$t_{K,\text{aussen}} = t_L + \frac{a \dot{I}_{\text{gesamt}}}{\alpha_a} - \frac{\varepsilon C_S}{\alpha_a} \left\{ \left[ \left( \frac{T_{Lm}}{100} \right)^4 + \beta (t_L - t_{Lm}) \right] [-e_G \varepsilon_G - e_U \varepsilon_U] \right\} \quad (7.3)$$

mit

$t_{K,\text{aussen}}$	$^{\circ} \text{C}$	kombinierte Außentemperatur
$t_L$	$^{\circ} \text{C}$	Lufttemperatur
$a$	-	Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung
$\dot{I}_{\text{gesamt}}$	$\text{W}/\text{m}^2$	Gesamtstrahlung auf das Bauteil
$\alpha_a$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	äußerer Wärmeübergangskoeffizient an der Bauteiloberfläche
$\varepsilon$	-	Emissionskoeffizient der Bauteiloberfläche für langwellige Strahlung
$C_S$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$	Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers ( $C_S = 5,67 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ )
$t_{Lm}$	$^{\circ} \text{C}$	Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur
$T_{Lm}$	$\text{K}$	Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur (Absolutwert)
$\beta$	-	Temperaturfaktor zur Linearisierung des Strahlungsaustausches ( $\beta \approx 1,05$ )
$e_G$	-	Einstrahlzahl Bauteiloberfläche – Himmelsgewölbe
$\varepsilon_G$	-	Emissionsgrad für langwellige atmosphärische Gegenstrahlung
$e_U$	-	Einstrahlzahl Bauteiloberfläche – terrestrische Umgebung
$\varepsilon_U$	-	Emissionsgrad für terrestrische Umgebung.

NADLER übt in [9] an Gl. (7.3) Kritik, da diese nicht die langwelligen Reflexionen der Umgebung beinhaltet. Dadurch wird die kombinierte Außentemperatur zu niedrig berechnet. Für die **kombinierte Außentemperatur mit langwelliger Reflexion** gilt unter Verwenden der vorgenannten Bezeichnungen nach [9]:

$$t_{K,aussen}^* = t_L + \frac{a \dot{I}_{gesamt}}{\alpha_a} - \frac{\varepsilon C_s}{\alpha_a} [(1 - e_U \varepsilon_U)(1 - e_G)] \left( \frac{T_L}{100} \right)^4 + \frac{e_U \varepsilon_U C_s \beta}{\alpha_a} (t_U - t_L) \quad (7.4)$$

mit

$t_U$  °C Umgebungstemperatur

$T_L$  °C Lufttemperatur (Absolutwert).

In [9] werden die Ergebnisse – Temperaturabsenkung der Außentemperatur durch Beachten der langwelligen Strahlung – anhand von Fallbeispielen bei den unterschiedlichen Berechnungsmethoden dargestellt (Tabelle 7.22). Dabei wurde Gl. (7.3) in eine zu Gl. (7.4) analoge Darstellung gebracht und die Verwendung der Tagesmitteltemperatur umgangen.

**Tabelle 7.22** Temperaturabsenkung infolge langwelliger Wärmeabstrahlung in K

	Gl. (7.3) ohne Reflexion aus der Umgebung		Gl. (7.4) mit Reflexion aus der Umgebung	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
vertikale Wände	-2,9	-2,0	-1,4	-1,7
Horizontalf Flächen	-2,6	-3,1	-2,6	-3,1

Aus der Tabelle geht hervor, dass für Wände die Temperaturkorrektur gegenüber Gl. (7.1) nur -1,4 ... 1,7 K beträgt. Dies ist bezogen auf die Annahmen der meteorologischen Basisdaten Außentemperatur und solare Gesamtstrahlung sehr gering.

Bei der Auswertung der Gln. (7.1) bis (7.4) ist der **Koeffizient  $a/\alpha_a$**  von großem Einfluss. Er ist nur in grober Näherung erfassbar. Für die Einzelwerte gelten relativ große Bereiche, wie nachfolgend gezeigt wird.

#### Absorptionsgrad $a$ für Sonnenstrahlung:

In der VDI 2078 werden für Wände und Dächer  $a = 0,5$  (weiß);  $0,7$  (hell);  $0,9$  (dunkel) angesetzt.

Andere Veröffentlichungen berufen sich auf Messungen an Wänden:  $a \approx 0,3$  (weiße Oberputze);  $0,65$  (rote Vormauerziegel);  $0,78$  (dunkelbrauner Anstrich).

#### Äußerer Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_a$ :

In [9] wird empfohlen, für den Winter  $\alpha_a = 25$  W/(m<sup>2</sup>K) und für den Sommer  $\alpha_a = 13,5$  W/(m<sup>2</sup>K) zu verwenden.

#### Koeffizient $a/\alpha_a$ :

Die extremen Kombinationen der Größen ergeben somit einen Bereich von  $a/\alpha_a = 0,012$  m<sup>2</sup>K/W bis  $a/\alpha_a = 0,067$  m<sup>2</sup>K/W.

Die amerikanische Literatur nennt in Abhängigkeit der Farbgebung den Bereich  $a/\alpha_a = (0,026 \dots 0,052) \text{ m}^2\text{K/W}$ .

### Schlussfolgerung:

Die **Genauigkeit der Berechnungen** kann durch **Beachten der physikalischen Teileffekte** – langwellige Abstrahlung, Reflexionen der terrestrischen Umgebung und/oder der nahen Bebauung – gegenüber der reinen Absorption der Sonnenstrahlung generell verbessert werden.

Die **Annahme der entsprechenden Randbedingungen** (Eingaben) kann aber in sehr weiten Grenzen variieren. Ihre Größen sind nur als Momentanwerte exakt erfassbar. Dies gilt für den Wärmeübergangskoeffizienten (Gesamtwert für Konvektion und Strahlung), der eine Funktion des Temperaturregimes ist, und auch für den Absorptionsgrad, der unter Versuchsbedingungen in der Regel ohne Verschmutzung gemessen wurde.

**Zusammenfassend ist festzustellen, dass man stets nur Näherungsberechnungen durchführen kann.**

In Anbetracht der zahlreichen Imponderabilien, die beispielsweise mit den Idealisierungen sowie Annahmen bezüglich der Bewölkung, Verschattung, Luftgeschwindigkeit usw. zusammenhängen, wird als Näherung die Anwendung der Gl. (7.1) mit dem Mittelwert

$$a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (7.5)$$

empfohlen. Selbstverständlich können beide Annahmen jederzeit verändert werden.

**Hinweis:** Die Definition und Anwendung der Sonnenlufttemperatur nimmt prinzipiell keinen Einfluss auf die Phasenverschiebung, die Amplitudendämpfung und den "Speichereffekt". Durch die instationäre Betrachtung der Wärmeleitung werden die Vorgänge im Speicherkörper unabhängig von der Wärmeübergabe am Rand automatisch richtig bewertet.

DIN 4710 gibt monats- und stundenweise die Sonnenstrahlung an wolkenlosen Tagen auf Wände in den acht Haupthimmelsrichtungen und für Horizontalflächen an. Variiert werden dabei die Trübungsfaktoren der Atmosphäre und die geografische Breite. Die Verbindung mit der Lufttemperatur nach Gl. (7.1) führt zu einer Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten, da die Lufttemperatur auch monats- und stundenweise sowie für unterschiedliche Bewölkungen benannt wird.

Für die Bewertung von Wohnbauten wurden in [2, 8] **Entwurfstage** definiert, die sich zur überschlüssigen Beurteilung der im Jahresgang vorkommenden Raumzustände und der zugehörigen Energiebedarfswerte gut bewährten. Auf diese Entwurfstage soll auch hier beispielhaft zurückgegriffen werden. Es gelten die Definitionen:

**Entwurfstag 1** (Wintertag bei statistisch tiefster, konstanter Außenlufttemperatur ohne Besonnung)

Grundlage bildet die Außentemperatur zur Heizlastberechnung nach EN 12831: 2004, Beiblatt 1 für den Standort Kassel.

**Entwurfstag 2** (Heiterer Wintertag im Februar)

Grundlage bilden die Verläufe der mittleren Außenlufttemperatur an heiteren Tagen im Februar am Standort Kassel und der Gesamtsonnenstrahlung am 20. Februar bei 50° nördlicher Breite für

einen Trübungsfaktor  $T_L = 4,1$ , der dem Monatsmittelwert entspricht. Beide meteorologischen Verläufe beziehen sich auf DIN 4710:2003-01.

### Entwurfstag 3 (Heiterer Sommertag im Juli)

Grundlage bilden die Verläufe der mittleren Außenlufttemperatur an heiteren Tagen im Juli am Standort Kassel und der Gesamtsonnenstrahlung am 23. Juli bei  $50^\circ$  nördlicher Breite für einen Trübungsfaktor  $T_L = 4,3$ , der dem Monatsmittelwert **minus** Standardabweichung (höchste Einstrahlung) entspricht. Beide meteorologischen Verläufe beziehen sich auf DIN 4710:2003-01.

### Entwurfstag 4 (Extremer Sommertag)

Grundlage bilden die Verläufe der extrem hohen Außenlufttemperatur im Juli am Standort Kassel und der Gesamtsonnenstrahlung am 23. Juli bei  $50^\circ$  nördlicher Breite für einen Trübungsfaktor  $T_L = 4,3$ , der dem Monatsmittelwert minus Standardabweichung entspricht. Der Lufttemperaturverlauf ist synthetisch erstellt, wobei dieser sich am stündlichen Spitzenwert nach DIN 4710:2003-01 orientiert. Der Strahlungsgang bezieht sich direkt auf DIN 4710:2003-01.

Die Auswertungen für die Entwurfstage sind wiederum mit einem **separaten Rechenprogramm** erzeugt worden und finden sich in den Tabellen 7.23 bis 7.26 sowie in den Bildern 7.7 bis 7.25.

**Tabelle 7.23** Außentemperatur, Wärmestromdichte der Sonnenstrahlung und resultierende Sonnenlufttemperatur auf Wände und Horizontaldächer im Tagesgang für Entwurfstag 1: Wintertag ohne Strahlung (Standort: Kassel)

Uhrzeit	ta °C	Solare Wärmestromdichte auf senkrechte Wände und Flachdach in W/m <sup>2</sup>									
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach	
0	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
22	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	-12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legende:

ta Außentemperatur

Uhrzeit	ta °C	Sonnenlufttemperatur in °C									
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach	
0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
1	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
2	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
3	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
4	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
22	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
23	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0
24	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0	-12,0

Legende:

ta Außentemperatur

Sonnenlufttemperatur nach Gl. (7.1) und Absorptionsgrad/alpha\_außen = 0,04 m<sup>2</sup>K/W

**Tabelle 7.24** Außentemperatur, Wärmestromdichte der Sonnenstrahlung und resultierende Sonnenlufttemperatur auf Wände und Horizontaldächer im Tagesgang für Entwurfstag 2: Winter-Sonntag (Standort: Kassel)

Uhrzeit	ta °C	Solare Wärmestromdichte auf senkrechte Wände und Flachdach in W/m <sup>2</sup>								
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach
0	-3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-3,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-4,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-4,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-5,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-5,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-5,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-5,9	4	24	45	43	18	4	4	4	7
8	-5,4	40	126	325	361	209	43	39	40	104
9	-4,3	62	89	448	593	427	75	62	62	225
10	-2,5	77	85	415	689	607	223	79	77	334
11	-0,8	86	89	283	672	724	407	93	86	407
12	0,8	89	90	107	567	764	567	107	90	431
13	2,0	86	86	93	407	724	672	283	89	407
14	2,8	77	77	79	223	607	689	415	85	334
15	3,1	62	62	62	75	427	593	448	89	225
16	2,5	40	40	39	43	209	361	325	126	104
17	1,3	4	4	4	4	18	43	45	24	7
18	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	-0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-1,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	-1,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	-2,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	-3,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	-3,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legende:

ta Außentemperatur

Uhrzeit	ta °C	Sonnenlufttemperatur in °C								
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach
0	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5
1	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8
2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2	-4,2
3	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7	-4,7
4	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1
5	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4	-5,4
6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6	-5,6
7	-5,9	-5,7	-4,9	-4,1	-4,2	-5,2	-5,7	-5,7	-5,7	-5,6
8	-5,4	-3,8	-0,4	7,6	9,0	3,0	-3,7	-3,8	-3,8	-1,2
9	-4,3	-1,8	-0,7	13,6	19,4	12,8	-1,3	-1,8	-1,8	4,7
10	-2,5	0,6	0,9	14,1	25,1	21,8	6,4	0,7	0,6	10,9
11	-0,8	2,6	2,8	10,5	26,1	28,2	15,5	2,9	2,6	15,5
12	0,8	4,4	4,4	5,1	23,5	31,4	23,5	5,1	4,4	18,0
13	2,0	5,4	5,4	5,7	18,3	31,0	28,9	13,3	5,6	18,3
14	2,8	5,9	5,9	6,0	11,7	27,1	30,4	19,4	6,2	16,2
15	3,1	5,6	5,6	5,6	6,1	20,2	26,8	21,0	6,7	12,1
16	2,5	4,1	4,1	4,1	4,2	10,9	16,9	15,5	7,5	6,7
17	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	3,0	3,1	2,3	1,6
18	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
19	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6
20	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
21	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9
22	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
23	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1	-3,1
24	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5

Legende:

ta Außentemperatur

Sonnenlufttemperatur nach Gl. (7.1) und Absorptionsgrad/alpha\_außen = 0,04 m<sup>2</sup>K/W

**Tabelle 7.25** Außentemperatur, Wärmestromdichte der Sonnenstrahlung und resultierende Sonnenlufttemperatur auf Wände und Horizontaldächer im Tagesgang für Entwurfstag 3: Sommer-Sonntag (Standort: Kassel)

Uhrzeit	ta °C	Solare Wärmestromdichte auf senkrechte Wände und Flachdach in W/m <sup>2</sup>								
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach
0	18,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	16,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	15,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	14,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	14,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	14,1	107	208	203	97	27	26	26	27	56
6	14,8	163	432	486	289	60	54	54	56	178
7	16,4	116	512	669	480	92	78	77	78	335
8	18,9	109	472	729	620	217	100	97	97	498
9	21,3	121	349	681	688	366	121	113	113	646
10	23,4	130	188	553	682	492	144	129	127	761
11	24,9	137	145	368	605	575	297	142	136	835
12	25,9	139	142	156	471	604	471	156	142	861
13	26,7	137	136	142	297	575	605	368	145	835
14	27,1	130	127	129	144	492	682	553	188	761
15	27,4	121	113	113	121	366	688	681	349	646
16	27,4	109	97	97	100	217	620	729	472	498
17	26,8	116	78	77	78	92	480	669	512	335
18	26,0	163	56	54	54	60	289	486	432	178
19	24,7	107	27	26	26	27	97	203	208	56
20	23,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	21,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	20,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	19,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	18,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legende:

ta Außentemperatur

Uhrzeit	ta °C	Sonnenlufttemperatur in °C								
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach
0	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
2	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
3	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
4	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1
5	14,1	18,4	22,4	22,2	18,0	15,2	15,1	15,1	15,2	16,3
6	14,8	21,3	32,1	34,2	26,4	17,2	17,0	17,0	17,0	21,9
7	16,4	21,0	36,9	43,2	35,6	20,1	19,5	19,5	19,5	29,8
8	18,9	23,3	37,8	48,1	43,7	27,6	22,9	22,8	22,8	38,8
9	21,3	26,1	35,3	48,5	48,8	35,9	26,1	25,8	25,8	47,1
10	23,4	28,6	30,9	45,5	50,7	43,1	29,2	28,6	28,5	53,8
11	24,9	30,4	30,7	39,6	49,1	47,9	36,8	30,6	30,3	58,3
12	25,9	31,5	31,6	32,1	44,7	50,1	44,7	32,1	31,6	60,3
13	26,7	32,2	32,1	32,4	38,6	49,7	50,9	41,4	32,5	60,1
14	27,1	32,3	32,2	32,3	32,9	46,8	54,4	49,2	34,6	57,5
15	27,4	32,2	31,9	31,9	32,2	42,0	54,9	54,6	41,4	53,2
16	27,4	31,8	31,3	31,3	31,4	36,1	52,2	56,6	46,3	47,3
17	26,8	31,4	29,9	29,9	29,9	30,5	46,0	53,6	47,3	40,2
18	26,0	32,5	28,2	28,2	28,2	28,4	37,6	45,4	43,3	33,1
19	24,7	29,0	25,8	25,7	25,7	25,8	28,6	32,8	33,0	26,9
20	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
21	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9	21,9
22	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
23	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
24	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5

Legende:

ta Außentemperatur

Sonnenlufttemperatur nach Gl. (7.1) und Absorptionsgrad/alpha\_außen = 0,04 m<sup>2</sup>K/W

**Tabelle 7.26** Außentemperatur, Wärmestromdichte der Sonnenstrahlung und resultierende Sonnenlufttemperatur auf Wände und Horizontaldächer im Tagesgang für Entwurfstag 4: Sommer-Extremtag (Standort: Kassel)

Uhrzeit	ta °C	Solare Wärmestromdichte auf									in W/m <sup>2</sup> Dach
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Flachdach	
0	22,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	21,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	20,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	20,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	20,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20,2	107	208	203	97	27	26	26	27	27	56
6	20,5	163	432	486	289	60	54	54	56	56	178
7	22,0	116	512	669	480	92	78	77	78	78	335
8	24,5	109	472	729	620	217	100	97	97	97	498
9	27,0	121	349	681	688	366	121	113	113	113	646
10	29,0	130	188	553	682	492	144	129	127	127	761
11	31,0	137	145	368	605	575	297	142	136	136	835
12	32,0	139	142	156	471	604	471	156	142	142	861
13	32,7	137	136	142	297	575	605	368	145	145	835
14	33,4	130	127	129	144	492	682	553	188	188	761
15	33,8	121	113	113	121	366	688	681	349	349	646
16	34,0	109	97	97	100	217	620	729	472	472	498
17	33,5	116	78	77	78	92	480	669	512	512	335
18	32,0	163	56	54	54	60	289	486	432	432	178
19	30,0	107	27	26	26	27	97	203	208	208	56
20	27,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	26,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	24,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	23,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	22,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Legende:

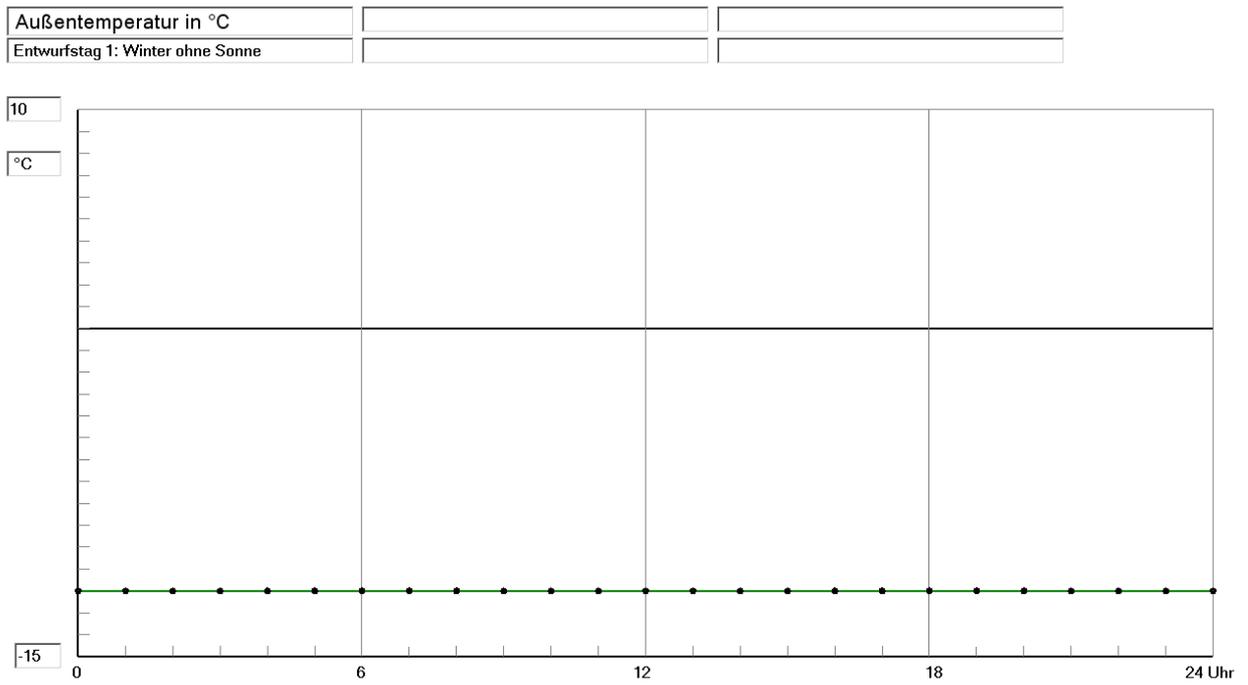
ta Außentemperatur

Uhrzeit	ta °C	Sonnenlufttemperatur in °C								
		N	NO	O	SO	S	SW	W	NW	Dach
0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
1	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
2	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8
3	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
4	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
5	20,2	24,5	28,5	28,3	24,1	21,3	21,2	21,2	21,3	22,4
6	20,5	27,0	37,8	39,9	32,1	22,9	22,7	22,7	22,7	27,6
7	22,0	26,6	42,5	48,8	41,2	25,7	25,1	25,1	25,1	35,4
8	24,5	28,9	43,4	53,7	49,3	33,2	28,5	28,4	28,4	44,4
9	27,0	31,8	41,0	54,2	54,5	41,6	31,8	31,5	31,5	52,8
10	29,0	34,2	36,5	51,1	56,3	48,7	34,8	34,2	34,1	59,4
11	31,0	36,5	36,8	45,7	55,2	54,0	42,9	36,7	36,4	64,4
12	32,0	37,6	37,7	38,2	50,8	56,2	50,8	38,2	37,7	66,4
13	32,7	38,2	38,1	38,4	44,6	55,7	56,9	47,4	38,5	66,1
14	33,4	38,6	38,5	38,6	39,2	53,1	60,7	55,5	40,9	63,8
15	33,8	38,6	38,3	38,3	38,6	48,4	61,3	61,0	47,8	59,6
16	34,0	38,4	37,9	37,9	38,0	42,7	58,8	63,2	52,9	53,9
17	33,5	38,1	36,6	36,6	36,6	37,2	52,7	60,3	54,0	46,9
18	32,0	38,5	34,2	34,2	34,2	34,4	43,6	51,4	49,3	39,1
19	30,0	34,3	31,1	31,0	31,0	31,1	33,9	38,1	38,3	32,2
20	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9	27,9
21	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0
22	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7	24,7
23	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
24	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0

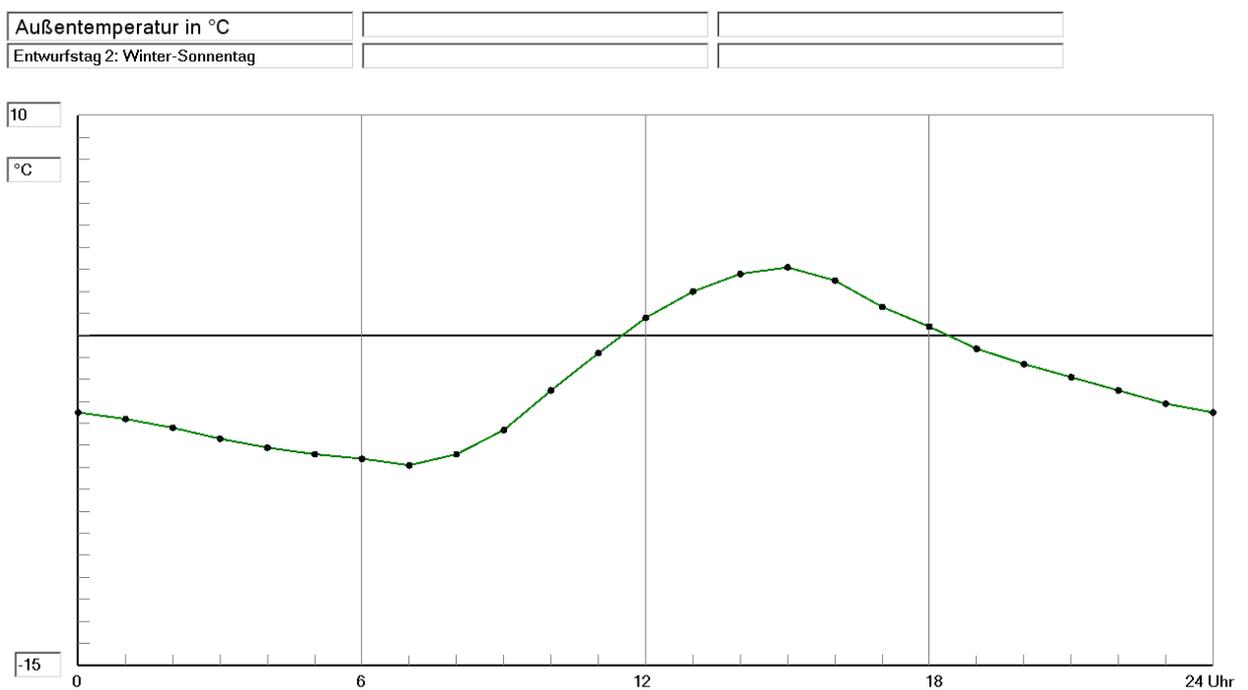
Legende:

ta Außentemperatur

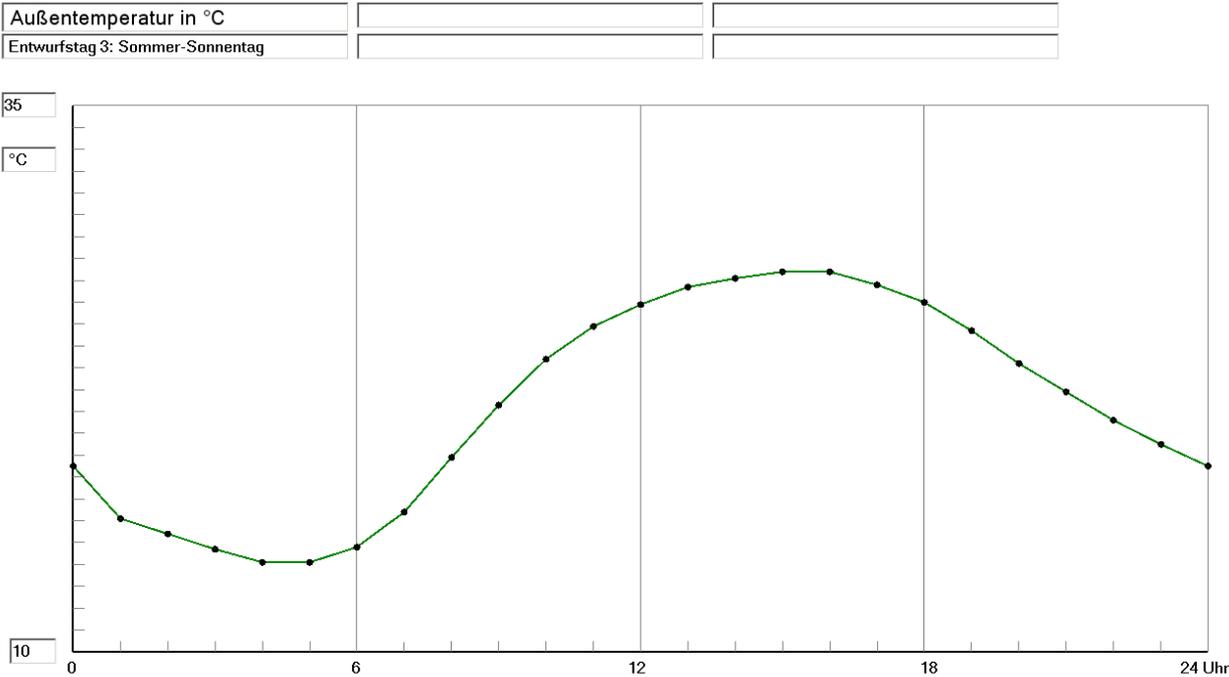
Sonnenlufttemperatur nach Gl. (7.1) und Absorptionsgrad/alpha\_außen = 0,04 m<sup>2</sup>K/W



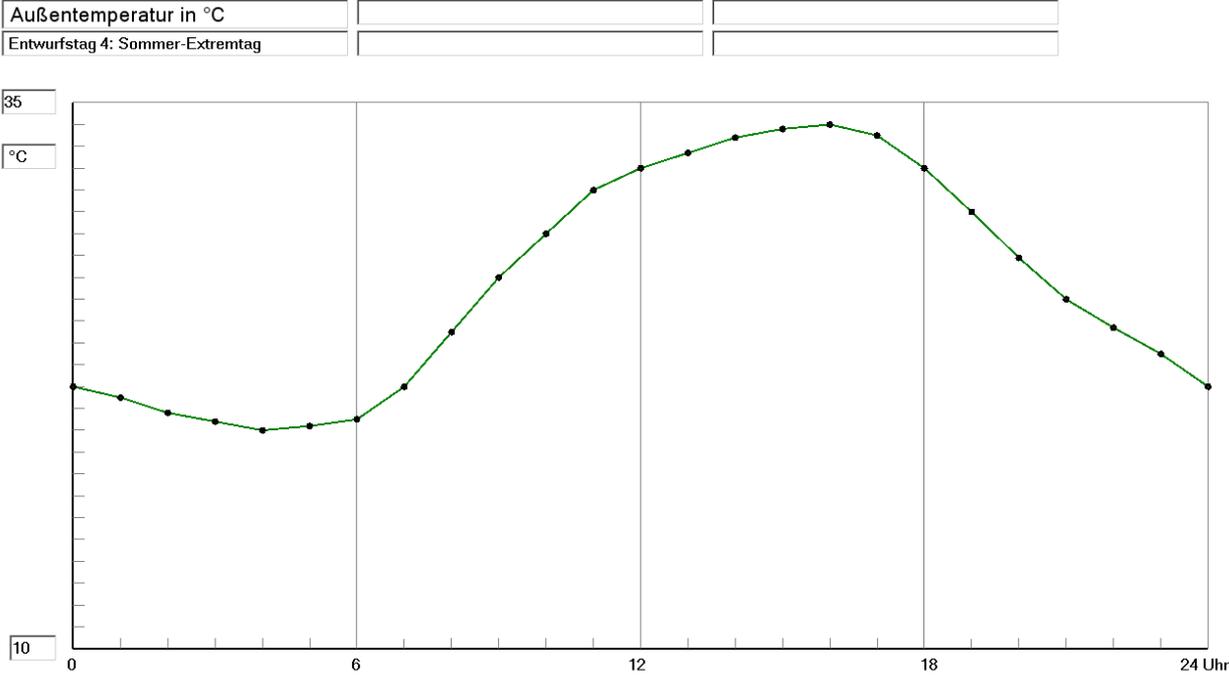
**Bild 7.7** Außentemperatur-Tagesgang für Entwurfstag 1: Winter ohne Strahlung (Standort: Kassel)



**Bild 7.8** Außentemperatur-Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)

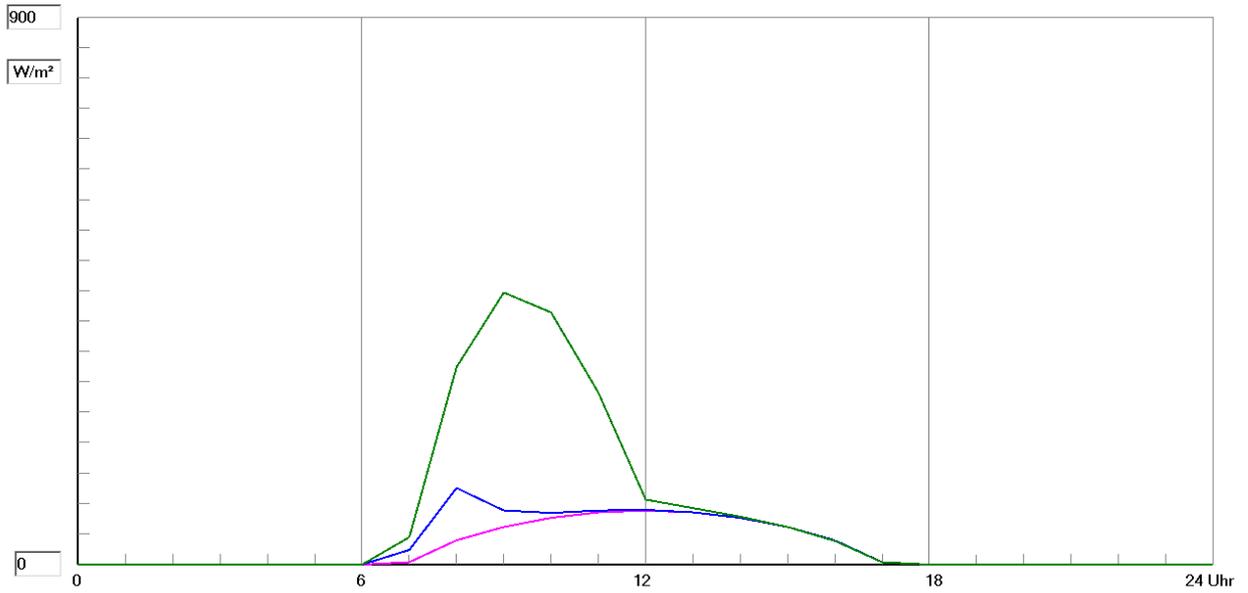


**Bild 7.9** Außentemperatur-Tagesgang für Entwurfstag 3: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



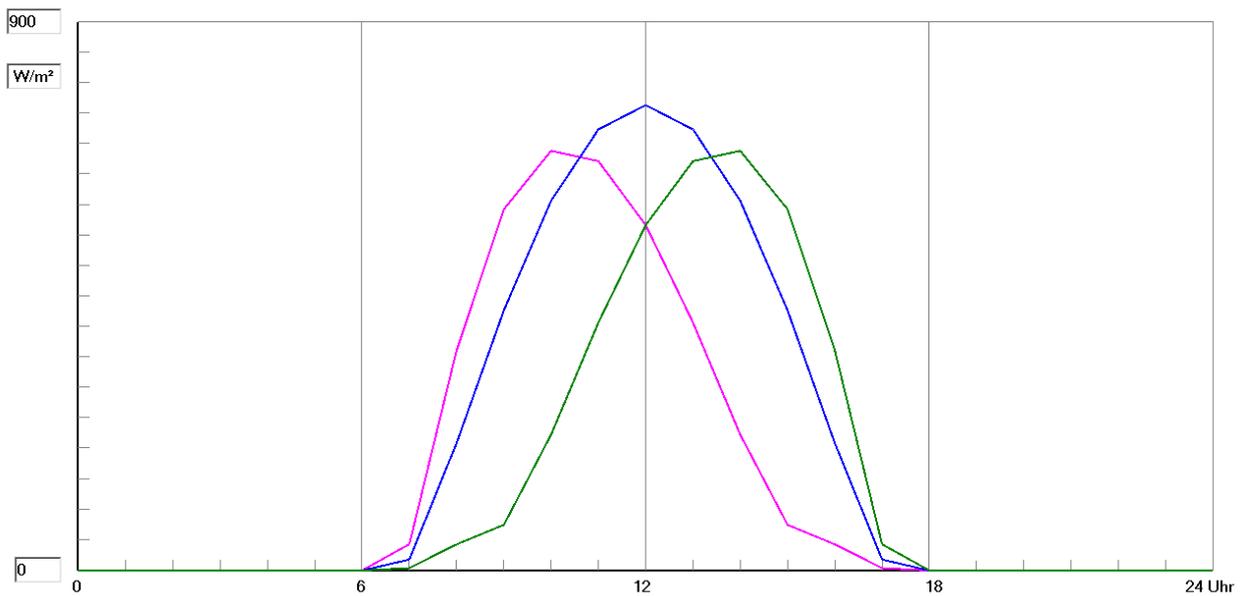
**Bild 7.10** Außentemperatur-Tagesgang für Entwurfstag 4: Extremer Sommertag (Standort: Kassel)

Solare Wärmestromdichte in $W/m^2$	Nordwand - magenta	Ostwand - grün
Entwurfstag 2: Winter-Sonnentag	Nordostwand - blau	



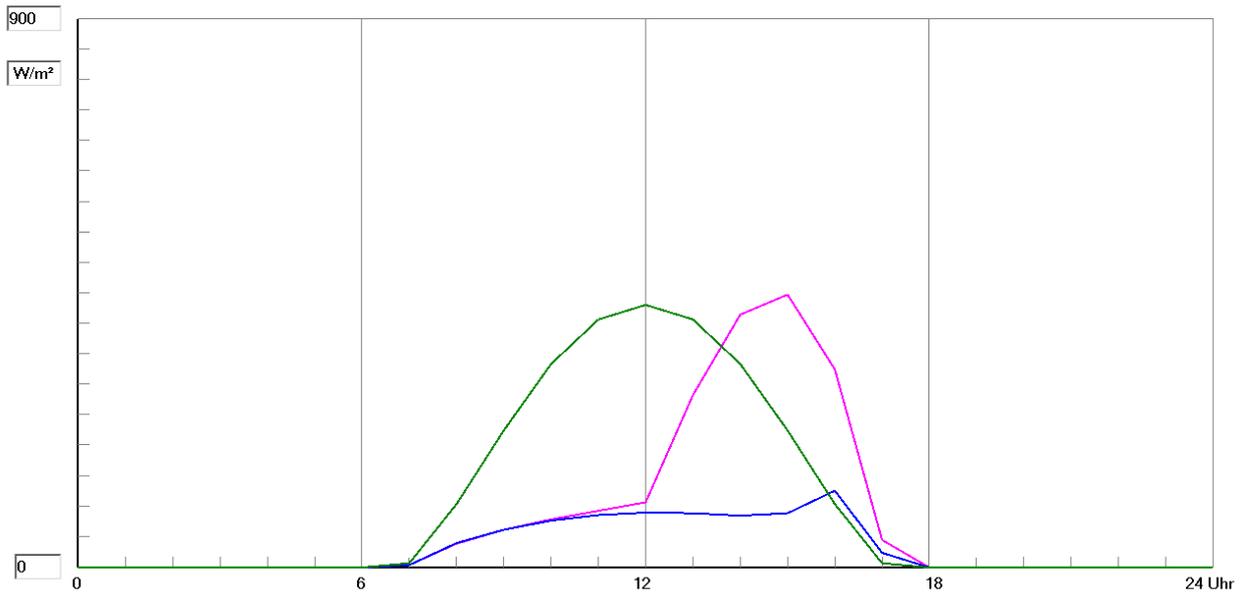
**Bild 7.11** Globale Wärmestromdichte durch Sonnenstrahlung auf Nord-, Nordost- und Ostwände als Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)

Solare Wärmestromdichte in $W/m^2$	Südostwand - magenta	Südwestwand - grün
Entwurfstag 2: Winter-Sonnentag	Südwand - blau	



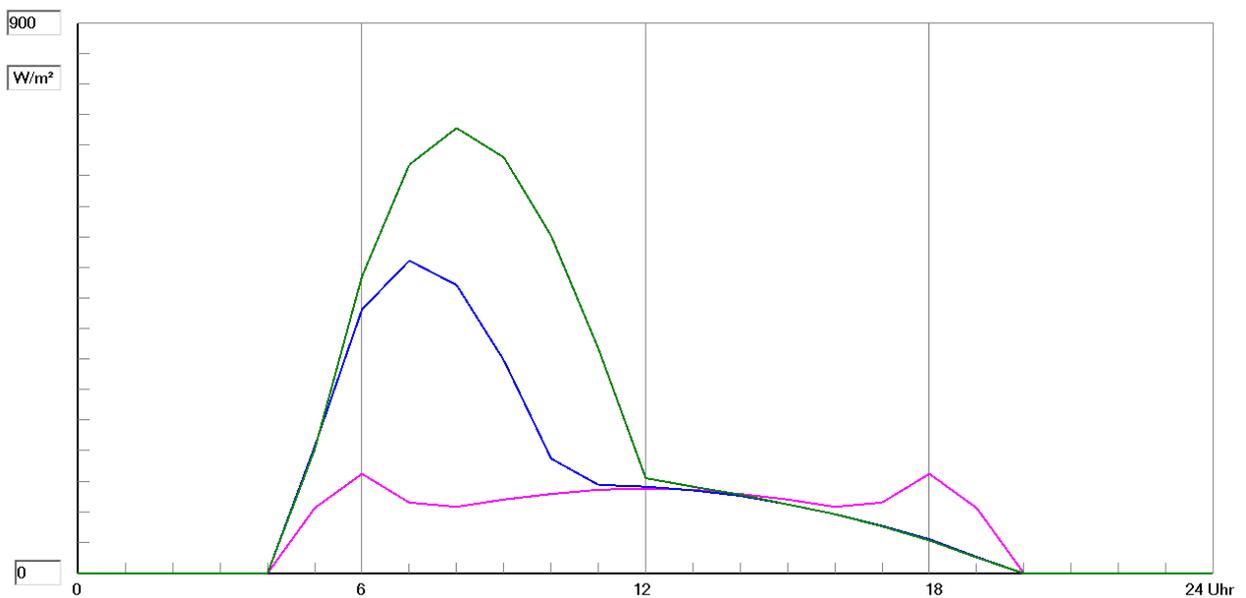
**Bild 7.12** Globale Wärmestromdichte durch Sonnenstrahlung auf Südost-, Süd- und Südwestwände als Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)

Solare Wärmestromdichte in $W/m^2$	Westwand - magenta	Horizontaldach - grün
Entwurfstag 2: Winter-Sonnentag	Nordwestwand - blau	

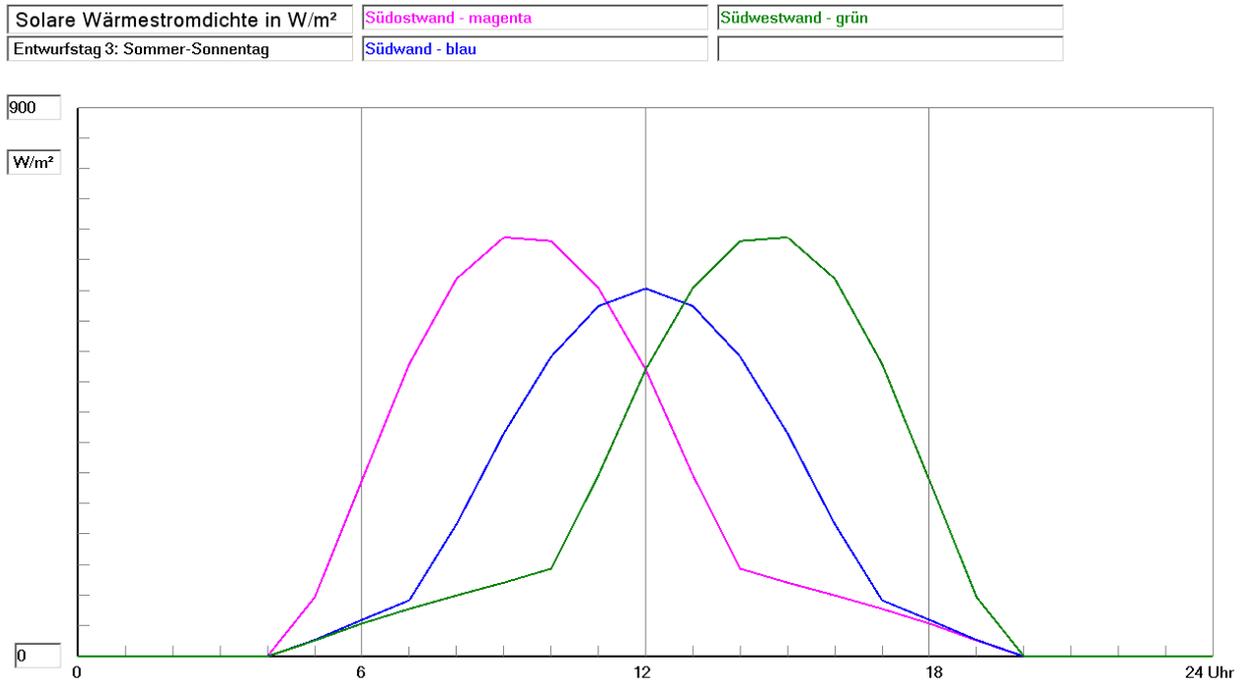


**Bild 7.13** Globale Wärmestromdichte durch Sonnenstrahlung auf West- und Nordwestwände sowie auf Horizontaldächer als Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)

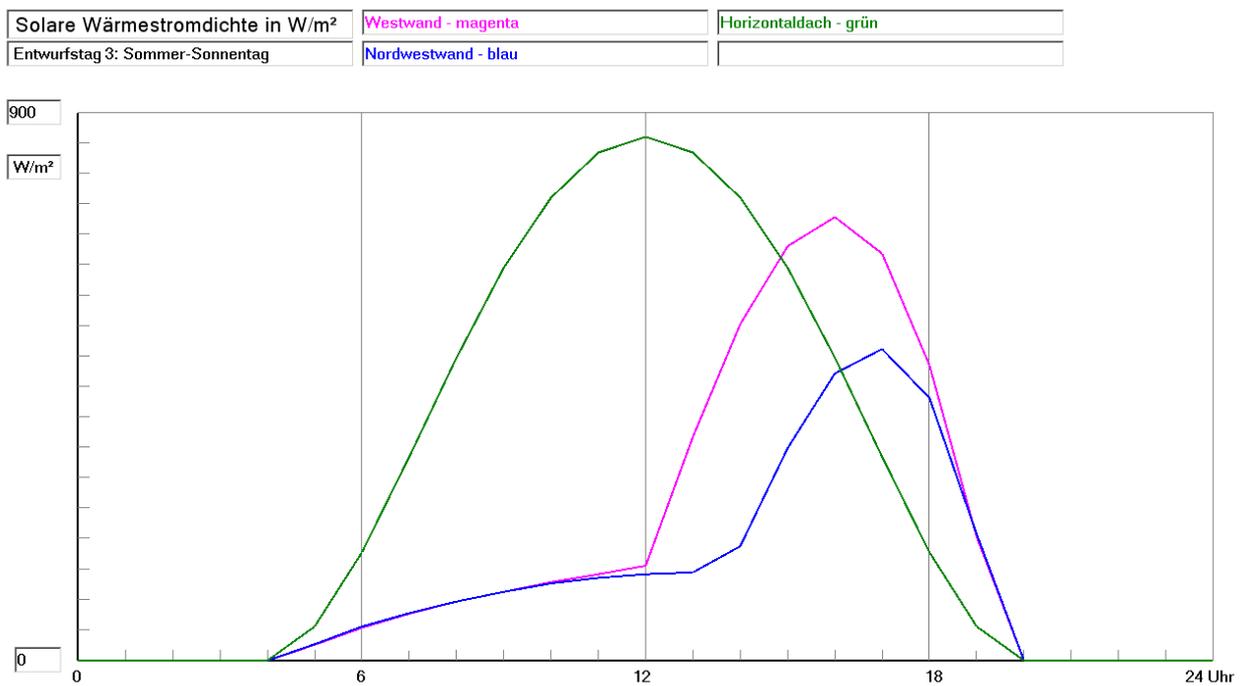
Solare Wärmestromdichte in $W/m^2$	Nordwand - magenta	Ostwand - grün
Entwurfstag 3: Sommer-Sonnentag	Nordostwand - blau	



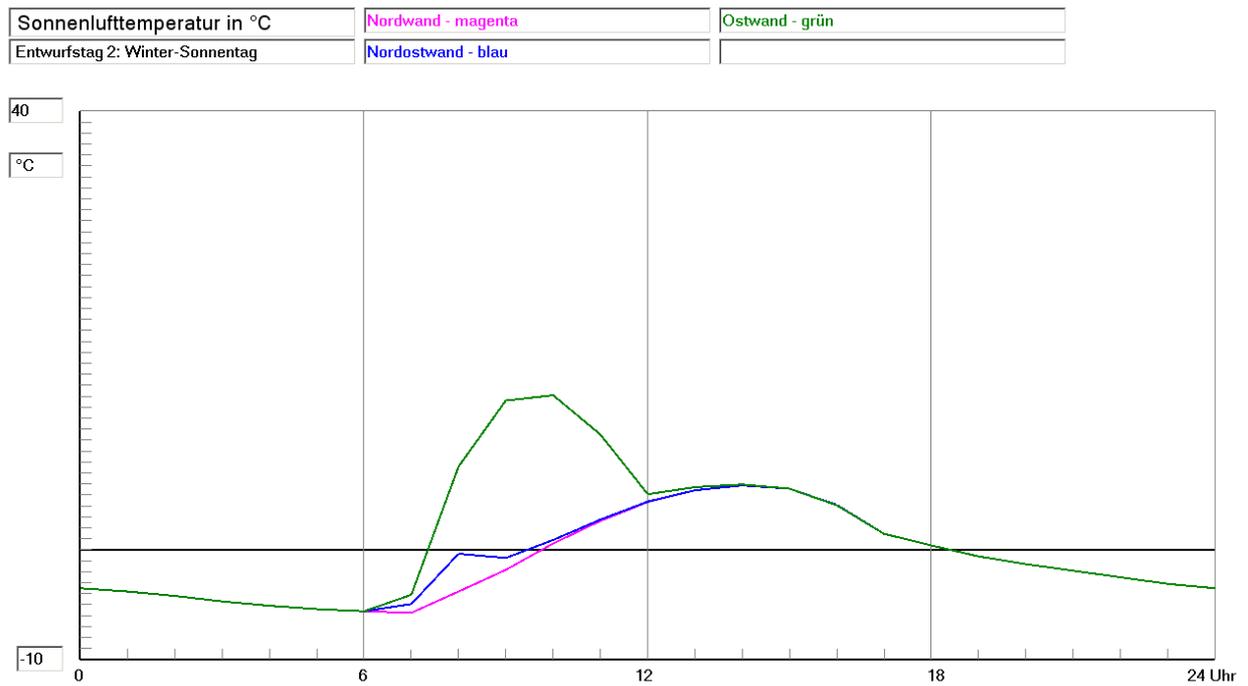
**Bild 7.14** Globale Wärmestromdichte durch Sonnenstrahlung auf Nord-, Nordost- und Ostwände als Tagesgang für die Entwurfstage 3 und 4: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



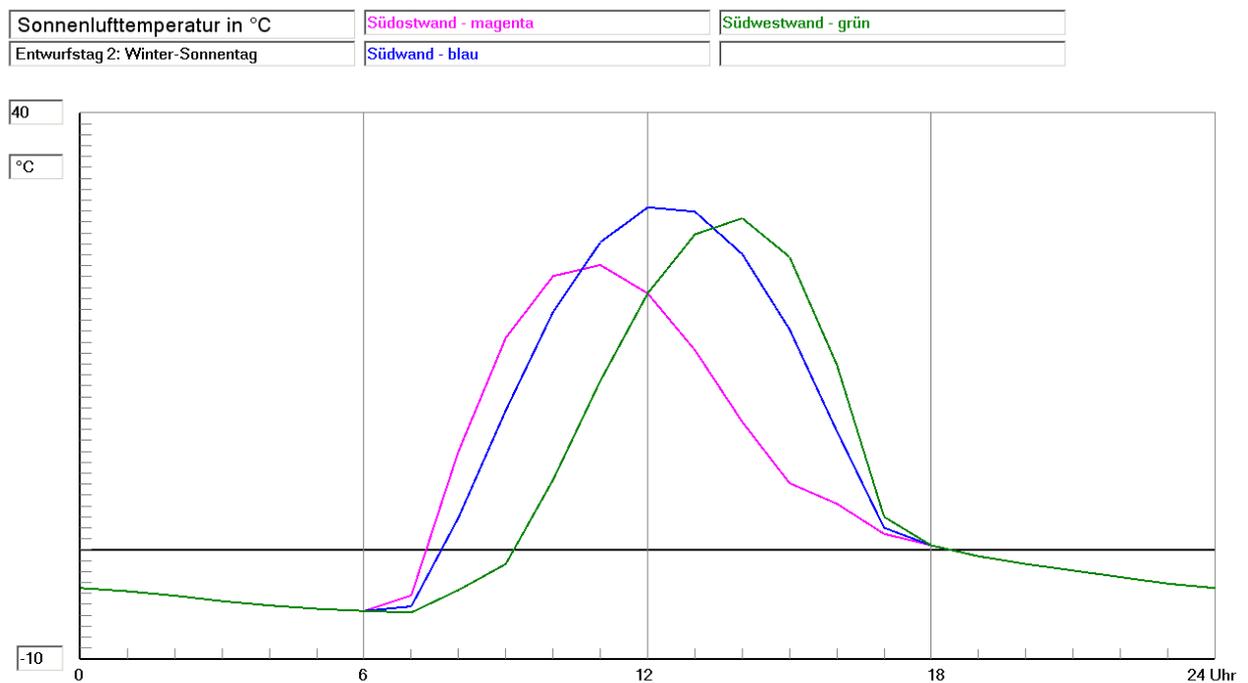
**Bild 7.15** Globale Wärmestromdichte durch Sonnenstrahlung auf Südost-, Süd- und Südwestwände als Tagesgang für die Entwurfstage 3 und 4: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



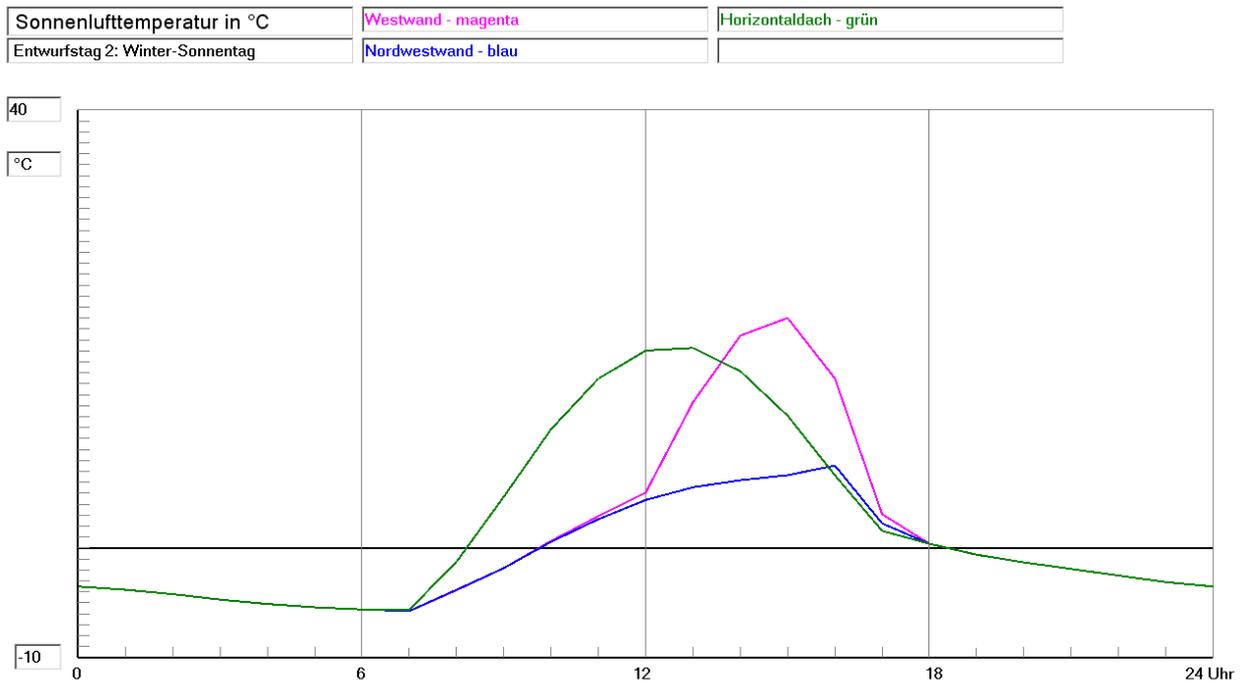
**Bild 7.16** Globale Wärmestromdichte durch Sonnenstrahlung auf West- und Nordwestwände sowie auf Horizontaldächern als Tagesgang für die Entwurfstage 3 und 4: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



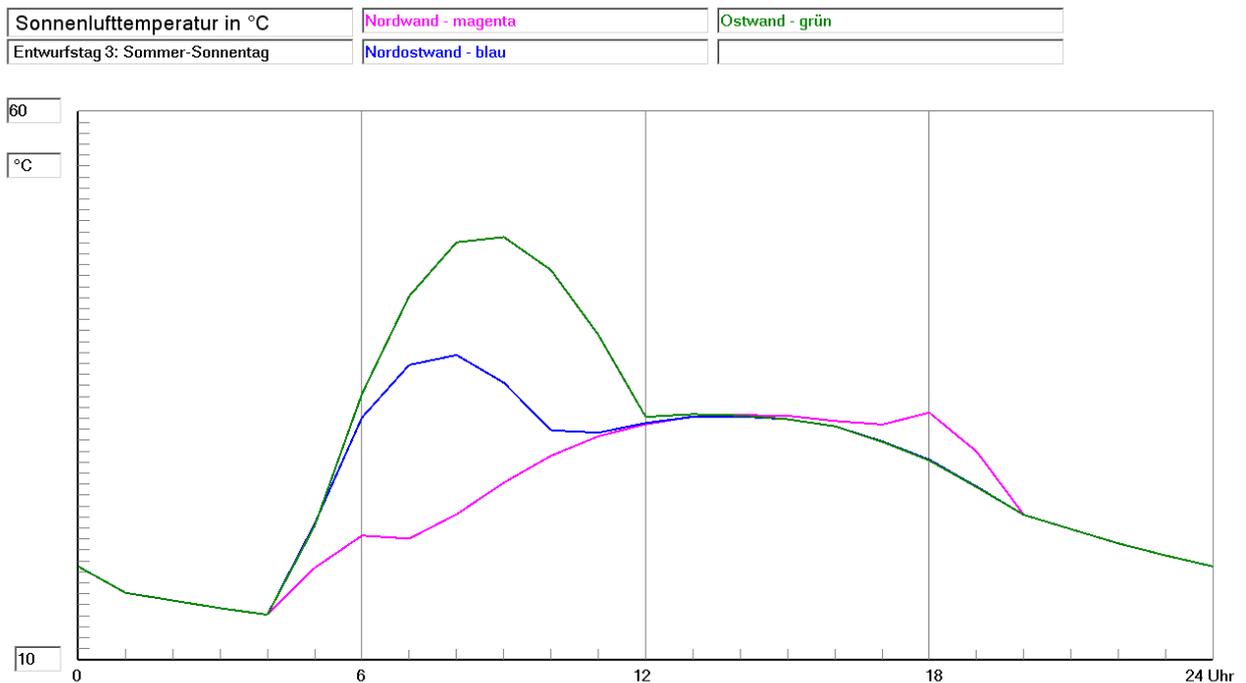
**Bild 7.17** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  bezogen auf Nord-, Nordost- und Ostwände als Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)



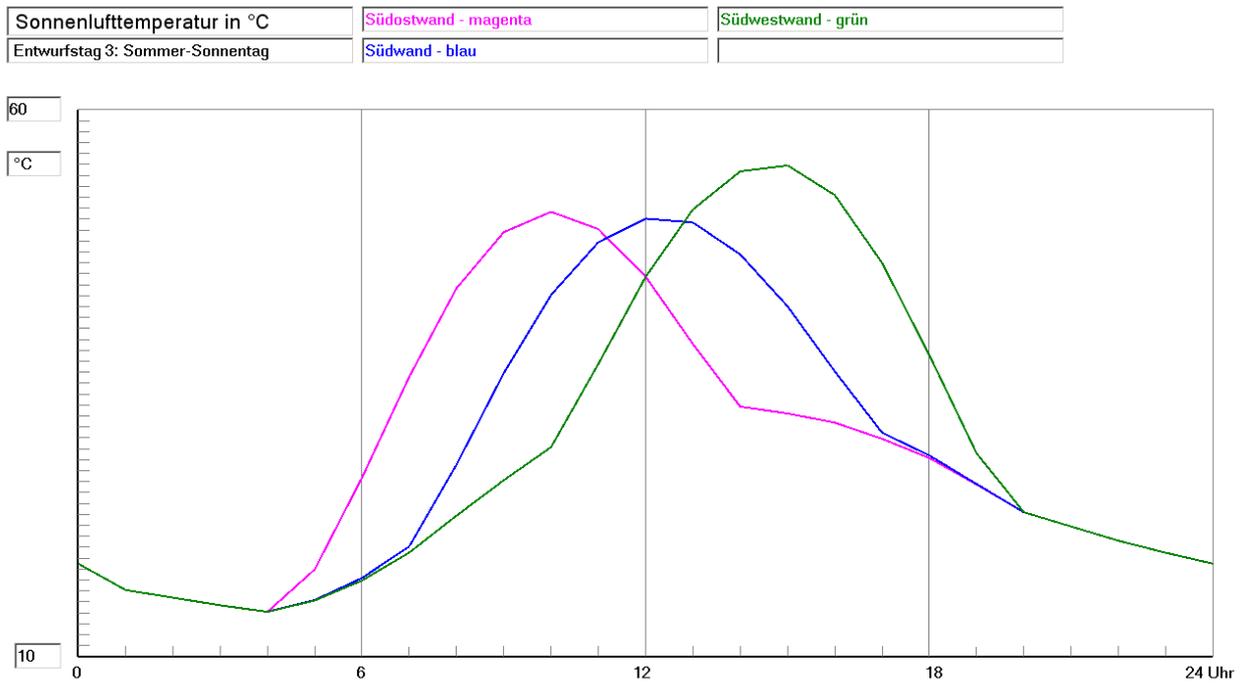
**Bild 7.18** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  bezogen auf Südost-, Süd- und Südwestwände als Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)



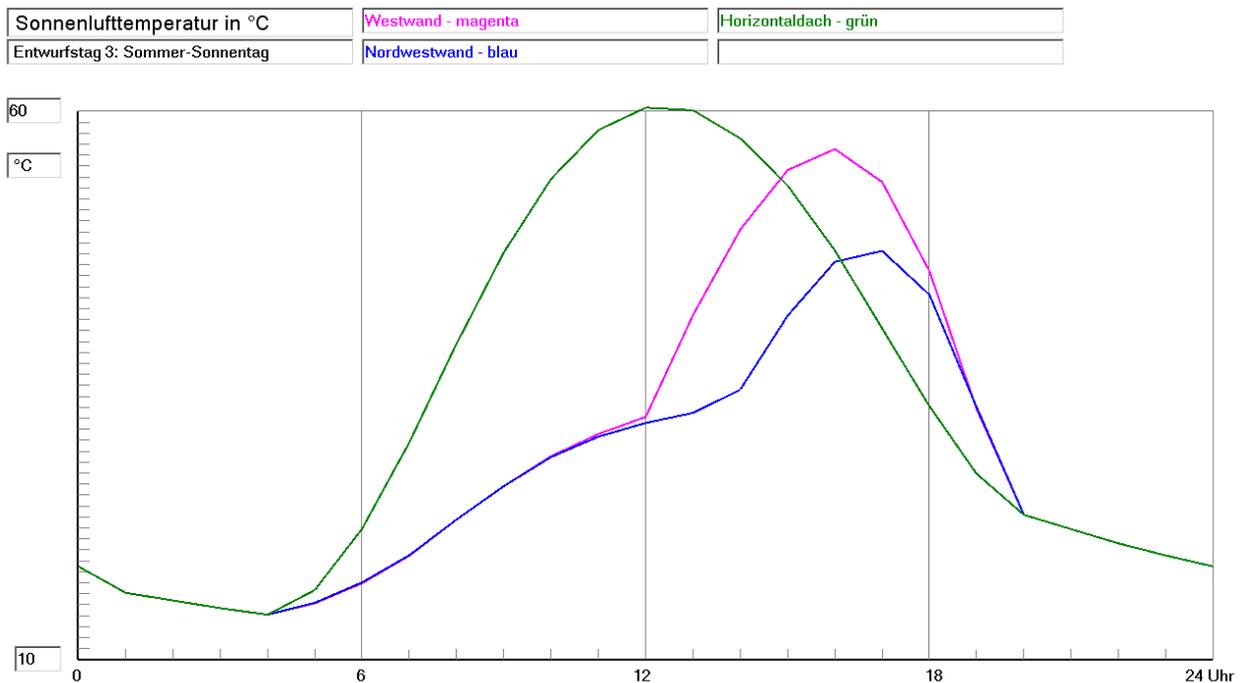
**Bild 7.19** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  bezogen auf West- und Nordwestwände sowie auf Horizontaldächer als Tagesgang für Entwurfstag 2: Heiterer Wintertag (Standort: Kassel)



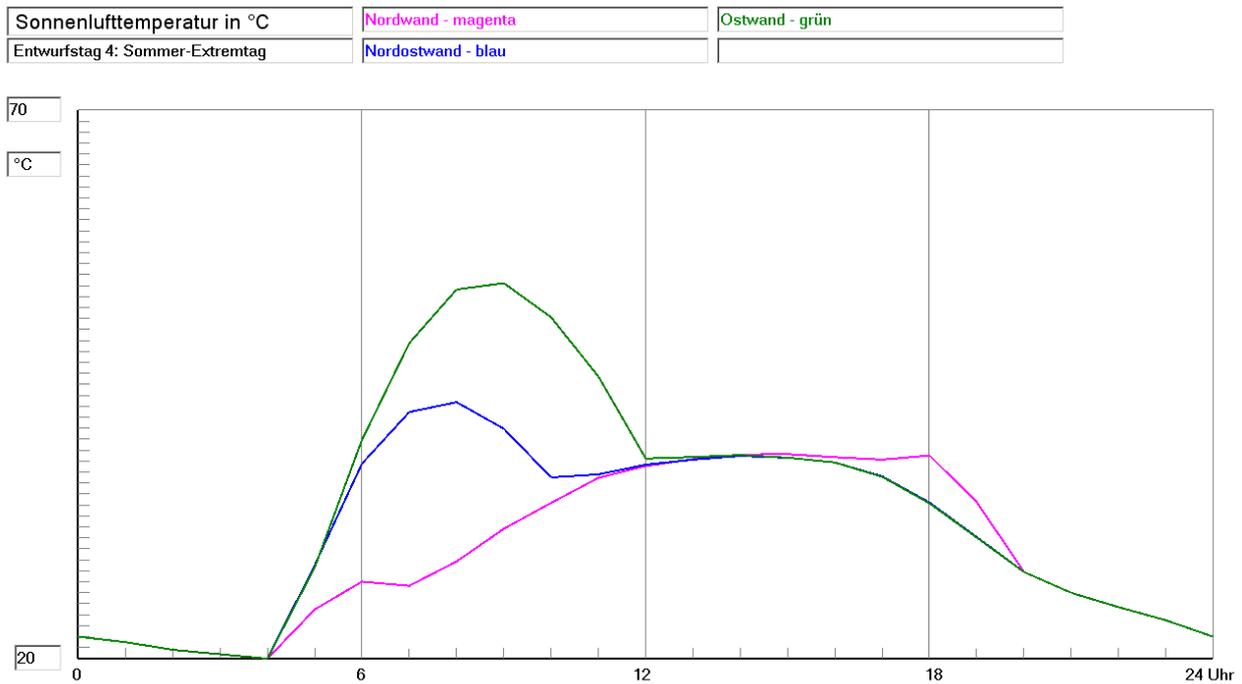
**Bild 7.20** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  bezogen auf Nord-, Nordost- und Ostwände als Tagesgang für Entwurfstag 3: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



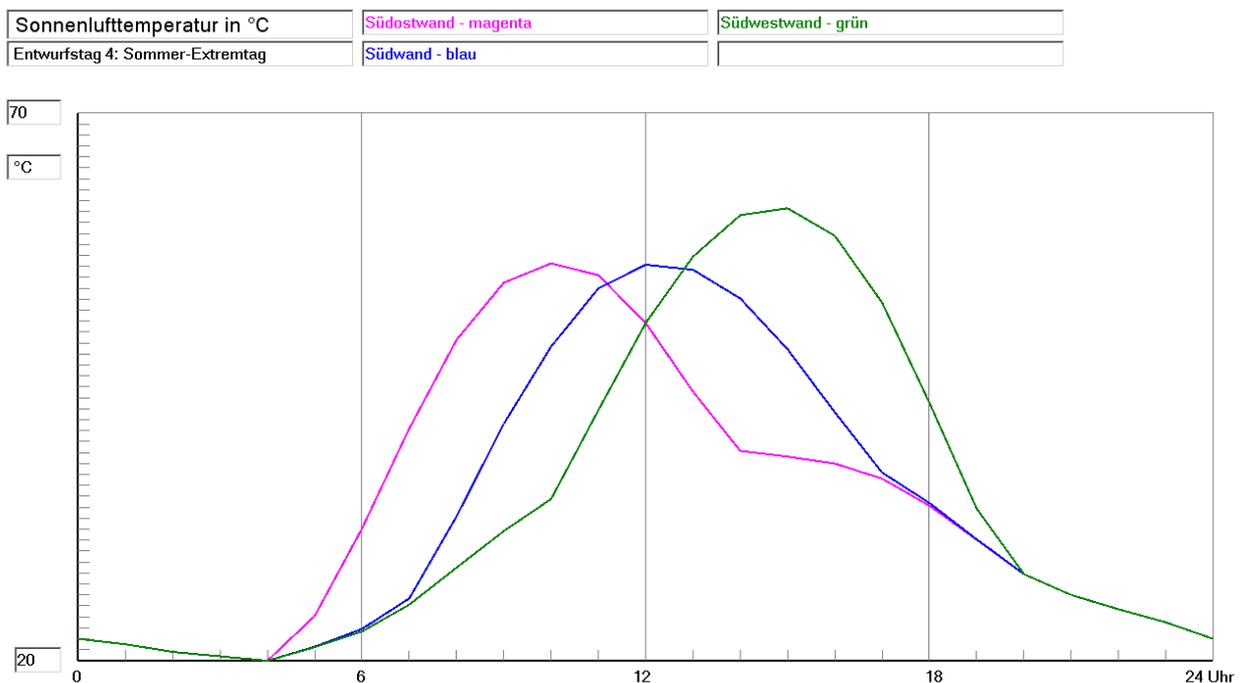
**Bild 7.21** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  bezogen auf Südost-, Süd- und Südwestwände als Tagesgang für Entwurfstag 3: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



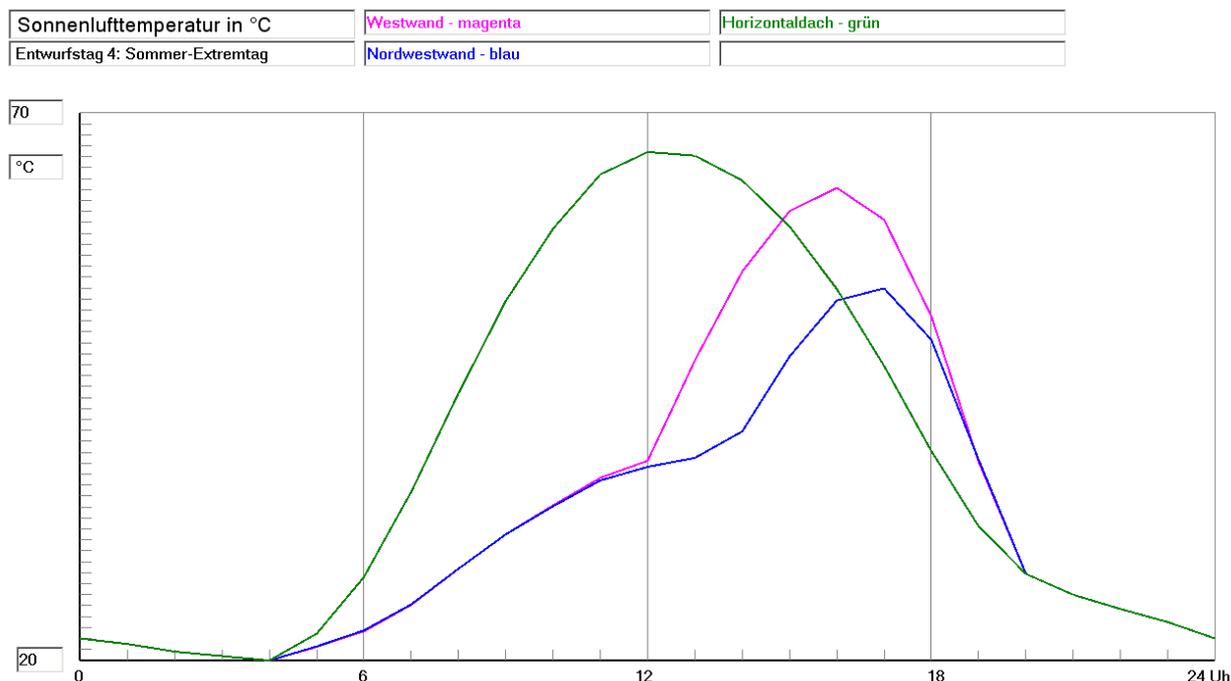
**Bild 7.22** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  bezogen auf West- und Nordwestwände sowie auf Horizontaldächer als Tagesgang für Entwurfstag 3: Heiterer Sommertag (Standort: Kassel)



**Bild 7.23** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  bezogen auf Nord-, Nordost- und Ostwände als Tagesgang für Entwurfstag 4: Extremer Sommertag (Standort: Kassel)



**Bild 7.24** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  bezogen auf Südost-, Süd- und Südwestwände als Tagesgang für Entwurfstag 4: Extremer Sommertag (Standort: Kassel)



**Bild 7.25** Sonnenlufttemperatur durch Überlagerung der Außentemperatur und der Solarstrahlung nach Gl. (7.1) mit dem Koeffizienten  $a/\alpha_a = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  bezogen auf West- und Nordwestwände sowie auf Horizontaldächer als Tagesgang für Entwurfstag 4: Extremer Sommertag (Standort: Kassel)

### 7.5 Dateien zur Außentemperatur, Solarstrahlung und Sonnenlufttemperatur

Die in den Tabellen 7.23 bis 7.26 und in den Bildern 7.7 bis 7.25 angegebenen Daten sind in der Datei **ZVerlauf.dat** abgespeichert. Sie befindet sich auch auf der CD-ROM, auf der auch das Programm "Speicher" steht. Um das Dateiformat richtig einzulesen, ist das nachfolgende Unterprogramm zu verwenden.

- Einlesen der Dateien für die Außentemperatur und die Solarstrahlungsdichte sowie Berechnung der Sonnenlufttemperatur

```

FileOpen(1, Datei, OpenMode.Input)
For ETag = 1 To 4
  For Stunde = 0 To 24
    Input(1, ta(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrN(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrNO(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrO(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrSO(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrS(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrSW(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrW(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrNW(ETag, Stunde))
    Input(1, SolStrDACH(ETag, Stunde))
  Next Stunde
Next ETag
FileClose(1)
'Berechnung der Sonnenlufttemperaturen
x = 0.04 'Absorptionskoeffizient/alpha_außen
For ETag = 1 To 4
  For Stunde = 0 To 24
    Sol_T_N(ETag, Stunde) = ta(ETag, Stunde) + x * SolStrN(ETag, Stunde)
  
```

$$\begin{aligned} \text{Sol\_T\_NO}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrNO}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_O}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrO}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_SO}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrSO}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_S}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrS}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_SW}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrSW}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_W}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrW}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_NW}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) + x * \text{SolStrNW}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ \text{Sol\_T\_DACH}(\text{ETag}, \text{Stunde}) &= \text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \\ &\quad + x * \text{SolStrDACH}(\text{ETag}, \text{Stunde}) \end{aligned}$$

Next Stunde

Next ETag

Die Daten stehen dann in den zweidimensionalen Feldern:

Außentemperatur in °C	$\text{ta}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	
Solarstrahlungsdichte in W/m <sup>2</sup>	$\text{SolStrN}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Nordwand
	$\text{SolStrNO}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Nordostwand
	$\text{SolStrO}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Ostwand
	$\text{SolStrSO}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Südostwand
	$\text{SolStrS}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Südwand
	$\text{SolStrSW}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Südwestwand
	$\text{SolStrW}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Westwand
	$\text{SolStrNW}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Nordwestwand
	$\text{SolStrDACH}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Horizontaldach
Sonnenlufttemperatur in °C	$\text{Sol T N}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Nordwand
	$\text{Sol T NO}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Nordostwand
	$\text{Sol T O}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Ostwand
	$\text{Sol T SO}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Südostwand
	$\text{Sol T S}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Südwand
	$\text{Sol T SW}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Südwestwand
	$\text{Sol T W}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Westwand
	$\text{Sol T NW}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Nordwestwand
	$\text{Sol T DACH}(\text{ETag}, \text{Stunde})$	Horizontaldach

Es gelten die Laufvariablen ETag (Entwurfstag: 1 bis 4) und Stunde (Tageszeit: 0<sup>00</sup> bis 24<sup>00</sup> Uhr). Die Werte für 0<sup>00</sup> Uhr und 24<sup>00</sup> Uhr sind identisch.

## 7.6 Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte als Tagesgang

Im Abschnitt 7.4 wurden die Tagesgänge der Außentemperatur für unterschiedliche Entwurfstage vorgestellt.

Für verschiedene Speichernutzungen kann es auch von Interesse sein, den zugehörigen [Verlauf der Luftfeuchte](#) zu kennen. Einige Angaben dazu finden sich wiederum in der DIN 4710:2003-01. So beispielsweise die mittleren Stundenwerte für den heiteren Februartag und den heiteren Julitag. Sie entsprechen den Entwurfstagen 2 bzw. 3 nach Abschnitt 7.4. Der extreme Sommertag ( $\equiv$  Entwurfstag 4) ist eigenständig kreiert worden, wobei sich an die maximal vorkommenden Lufttemperaturen gemäß Tabelle 7.1 angelehnt wurde. Die mittleren Luftfeuchten werden ohne exakte Wissensbasis aber in Kenntnis, dass auch höhere Luftfeuchten nach Tabelle 7.1 auftreten, gegenüber den mittleren Juliwerten um  $\Delta x = 1 \text{ g}_w/\text{kg}_{tL}$  erhöht.

**Tabelle 7.27** Mittlere stündliche Außenlufttemperatur  $t_a$  und Außenluftfeuchte  $x_a$  für ausgewählte Tage des Jahres am Standort Kassel (Entwurfstage 1 und 2 entsprechen den Werten nach DIN 4710, Entwurfstag 4 ist ein synthetischer Extremtag in Anlehnung an Tabelle 7.1)

Tagesstunde	Heiterer Februartag ≡ Entwurfstag 2		Heiterer Julitag ≡ Entwurfstag 3		Extremer Sommertag ≡ Entwurfstag 4	
	$t_a$ °C	$x_a$ g <sub>W</sub> /kg <sub>tL</sub>	$t_a$ °C	$x_a$ g <sub>W</sub> /kg <sub>tL</sub>	$t_a$ °C	$x_a$ g <sub>W</sub> /kg <sub>tL</sub>
1	-3,8	2,4	16,1	9,2	21,5	10,2
2	-4,2	2,4	15,4	9,1	20,8	10,1
3	-4,7	2,4	14,7	8,9	20,4	9,9
4	-5,1	2,3	14,1	8,8	20,0	9,8
5	-5,4	2,3	14,1	8,7	20,2	9,7
6	-5,6	2,3	14,8	8,9	20,5	9,9
7	-5,9	2,3	16,4	9,2	22,0	10,2
8	-5,4	2,3	18,9	9,4	24,5	10,4
9	-4,3	2,4	21,3	9,5	27,0	10,5
10	-2,5	2,5	23,4	9,4	29,0	10,4
11	-0,8	2,4	24,9	9,0	31,0	10,0
12	0,8	2,4	25,9	8,7	32,0	9,7
13	2,0	2,4	26,7	8,6	32,7	9,6
14	2,8	2,3	27,1	8,5	33,4	9,5
15	3,1	2,3	27,4	8,5	33,8	9,5
16	2,5	2,3	27,4	8,4	34,0	9,4
17	1,3	2,3	26,8	8,5	33,5	9,5
18	0,4	2,3	26,0	8,6	32,0	9,6
19	-0,6	2,4	24,7	8,8	30,0	9,8
20	-1,3	2,4	23,2	9,0	27,9	10,0
21	-1,9	2,4	21,9	9,2	26,0	10,2
22	-2,5	2,4	20,6	9,3	24,7	10,3
23	-3,1	2,4	19,5	9,4	23,5	10,4
24	-3,5	2,4	18,5	9,5	22,0	10,5

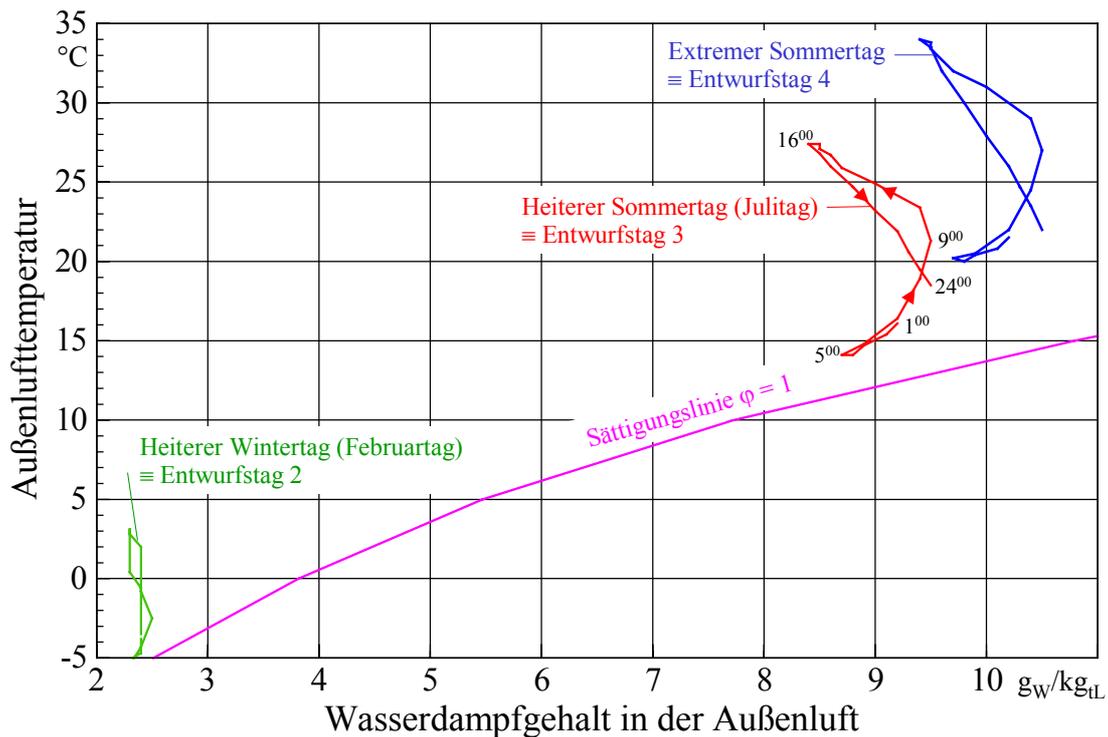
Interessant sind auch die Tagesverläufe des Außenluftzustandes in der  $t,x$ -Darstellung, die das Bild 7.26 zeigt. Für den Entwurfstag 3 – "Heiterer Sommertag im Juli" – sind an den Eckpunkten des Zustandsverlaufes zusätzlich die Tageszeiten vermerkt.

Es ist festzustellen, dass man für genauere Speicheruntersuchungen mit den Werten der Tabelle 7.27 arbeiten sollte. In vielen Anwendungsfällen wird aber auch die Annahme einer mittleren Feuchte ausreichend genaue Werte liefern. Als mittlere Tageswerte gelten nach DIN 4710 für den

Entwurfstag 2 "Heiterer Februartag":  $x_{a,Mittel,Februar} = 2,4 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$

Entwurfstag 3 "Heiterer Julitag":  $x_{a,Mittel,Juli} = 9,0 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ .

Analog gilt ohne Normbezug: Entwurfstag 4 "Extremer Sommertag":  $x_{a,Mittel,Extremtag} = 10,0 \text{ g}_W/\text{kg}_{tL}$ .



**Bild 7.26** Außenluftzustandsverläufe (Lufttemperatur und Luftfeuchte) für drei ausgewählte Entwurfstage im Tagesgang

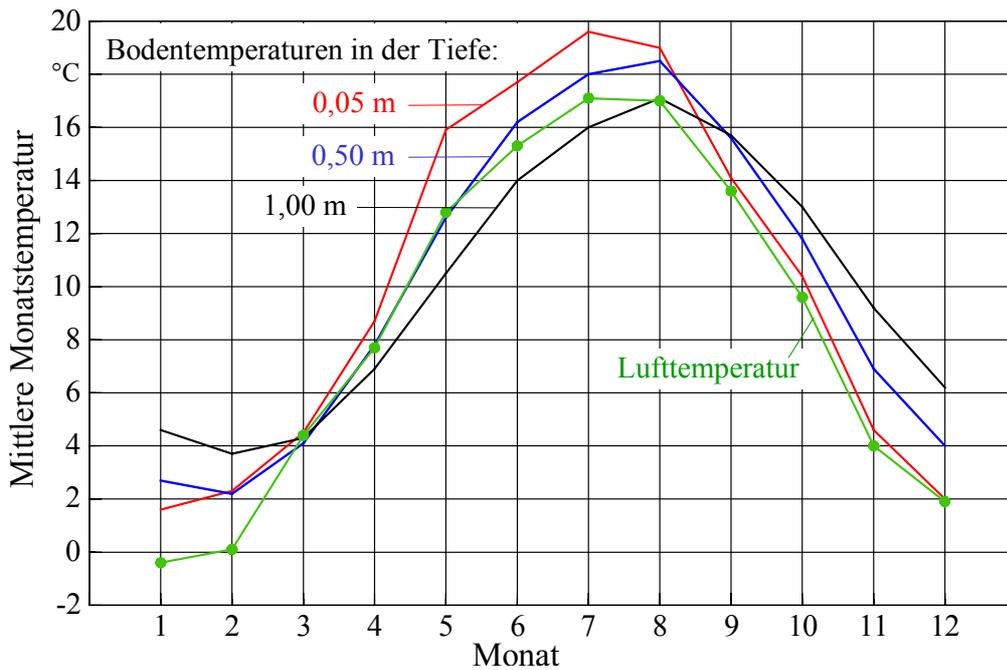
## 7.7 Erdbodentemperaturen

Messungen von Erdbodentemperaturen werden in der DIN 4710:2003-01 als Monats- und Jahresmittel für die Tiefen 0,1 m, 0,2 m, 0,5 m und 1 m angegeben. Für den Standort Potsdam erfolgen außerdem Messungen bis 12 m Tiefe. Für Kassel existieren Messungen von 1977 bis 1990, die in Tabelle 7.28 und im Bild 7.27 wiedergegeben sind. Zusätzlich ist die Lufttemperatur vermerkt.

Ohne Beachtung der Strahlung wird deutlich, dass der Lufttemperaturverlauf sehr gut mit der Bodentemperatur in geringen Tiefen korreliert. Mit zunehmender Tiefe wird die Phasenverschiebung und die Amplitudendämpfung offensichtlich. Die im Januar und Februar deutlich niedrigere Lufttemperatur als die Bodentemperatur in 0,05 m Tiefe ist wahrscheinlich auf eine vorhandene Schneedecke zurückzuführen, denn die Messstellen werden normalerweise nicht vom Schnee befreit.

**Tabelle 7.28** Mittlere Monats- und Jahresmittel der Erdbodentemperaturen am Standort Kassel für die Bodenart "sandiger Lehm" und zum Vergleich die zugehörigen Lufttemperaturen (alle Angaben in °C)

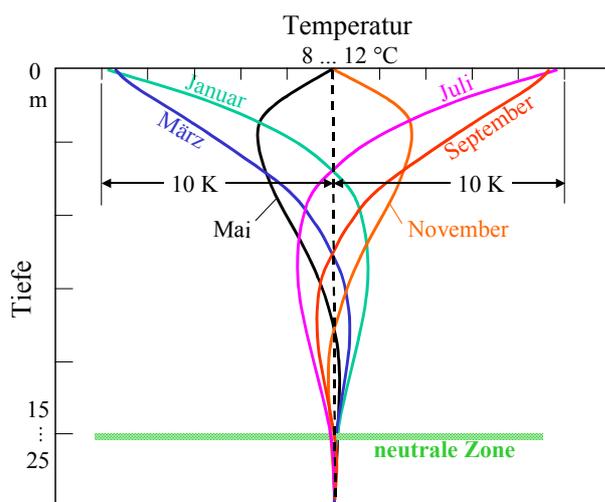
	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
0,05 m	1,6	2,3	4,5	8,7	15,9	17,7	19,6	19,0	14,1	10,4	4,6	2,0	10,1
0,50 m	2,7	2,2	4,1	7,8	12,6	16,2	18,0	18,5	15,6	11,8	6,9	4,0	10,0
1,00 m	4,6	3,7	4,3	6,9	10,5	14,0	16,0	17,1	15,7	13,0	9,2	6,2	10,1
Luft	-0,4	0,1	4,4	7,7	12,8	15,3	17,1	17,0	13,6	9,6	4,0	1,9	8,6



**Bild 7.27** Mittlere Monatswerte der Erdbodentemperaturen für den Standort Kassel in unterschiedlichen Tiefen und Gegenüberstellung des Lufttemperaturverlaufs

Die Messungen am Standort Potsdam zeigten in einer Tiefe von 6 m noch eine deutliche Temperaturschwung, dagegen liegt in der Tiefe von 12 m eine nahezu konstante Temperatur zwischen 9,3 °C und 9,9 °C vor. Die höchsten Werte treten von Januar bis März auf.

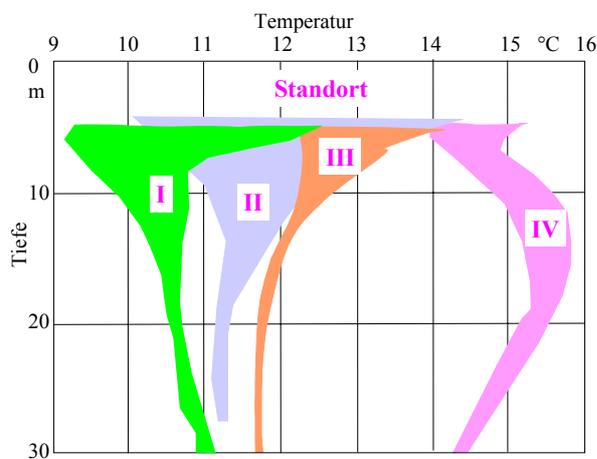
Die **theoretische Erdreichtemperatur** schwankt im unbeeinflussten Boden in allen Tiefen um die mittlere Oberflächentemperatur (Jahresmittel) von ca. 9 °C. Je nach Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Erdreichs sind die Tagesschwankungen in 1 bis 1,5 m Tiefe abgeklungen. Die Jahresschwankung wird bis in eine Tiefe von 15 bis 25 m bemerkt. Man bezeichnet diesen Bereich als **neutrale Zone**. Einen idealisierten Temperaturverlauf zeigt das Bild 7.28.



**Bild 7.28** Idealisierter Temperaturverlauf im Erdreich

Bei vorhandenem **Grundwasser** können sich infolge der Wasserströmung erhebliche Abweichungen von der unbeeinflussten Bodentemperatur ergeben. Die niedrigsten Grundwassertemperaturen treten in der Regel im März und April auf, die höchsten Werte liegen im September und Ok-

tober vor. Bei einer Grundwassernutzung sind mitunter große Anomalien vorhanden. Bild 7.29 zeigt dies beispielhaft an Messungen der Grundwassertemperaturen für unterschiedliche Standorte Berlins.



**Bild 7.29** Bereiche von Grundwassertemperaturen im Zeitraum Januar bis Oktober 1991 für ausgewählte Standorte im Raum Berlin:

- I Randgebiet
- II geringe Siedlungsdichte
- III hohe Siedlungsdichte
- IV Industriegebiet

Während die Temperaturbereiche der Standorte I bis III mit der zunehmenden Siedlungsdichte erklärbar sind, deutet die enorm große Unregelmäßigkeit der Temperaturen des Standortes IV auf eine intensive Kühlwassernutzung hin. Besonders bemerkenswert ist an diesem Standort, dass in den tiefen Regionen zwischen 10 und 20 m höhere Temperaturen auftreten als in den Bereichen darüber, d. h., es werden beispielsweise ein Wasserstrom und/oder ein Wärmestrom von einem erwärmten Vorfluter zum Grundwasser fließen.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass die Erdbodentemperaturen von zahlreichen Besonderheiten – Stoffeigenschaften der Erdschichten, Standortspezifika, Grundwasserhöhe, Baukörpernähe, eventuell vorhandener thermisch-energetischer Nutzung – abhängig sein können, die gesondert abzuklären sind.

## 7.8 Fazit und Beispielanwendungen für die meteorologischen Daten

Die Zusammenstellung der meteorologischen Daten erfolgte im Hinblick auf die vielfältigen Anwendungen bei der Speichersimulation.

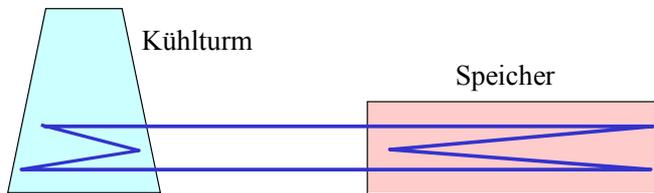
- Die vorgestellten Angaben können beispielsweise die **thermischen Randbedingungen** als Umgebungstemperaturen (Lufttemperatur, Sonnenlufttemperatur usw.) von Speicherkörpern, Flächenabsorbieren usw. beschreiben.
- Die Außenluftzustände (Lufttemperatur, Luftfeuchte) sind als **Eintrittszustände** von speicherbeaufschlagenden **Luftvolumenströmen** direkt verwendbar.
- Aus den meteorologischen Angaben können für bestimmte Aggregate, die beispielsweise mit dem Rohrregister im Speicher hydraulisch gekoppelt sind, **Approximationen für ihr wärmetechnisches Verhalten** ermittelt werden.

Während die beiden erstgenannten Varianten sofort einleuchten, soll die letztgenannte Variante anhand eines Beispiels ausführlicher erläutert werden.

Gemäß Bild 7.30 wird einem Speicherkörper nachts mittels eines Hybridkühlturmes Wärme ent-

zogen, wobei ein direkter Verbund des Flüssigkeitskreislaufes (Wasser, wässrige Tyfocorlösung) besteht. Damit gelten für den Flüssigkeitsstrom:

- Eintrittstemperatur in den Kühlturm ( $\equiv$  Austrittstemperatur aus dem Speicher) und
- Austrittstemperatur aus dem Kühlturm ( $\equiv$  Eintrittstemperatur in den Speicher).



**Bild 7.30** Hydraulische Verknüpfung zwischen einem Kühlturm und einem Speicher

Als Hybridkühlturm kommt eine spezielle Entwicklung mit spiralförmig gewickelten Kunststoff-Kapillarrohmatten zum Einsatz, deren Oberfläche (ca. 24 m<sup>2</sup>) mit Umlaufwasser besprüht wird. Er ist in zahlreichen Versuchsreihen leistungsmäßig vermessen worden (Bild 7.31).



**Bild 7.31** Hybridkühlturm mit spiralförmig gewickelten Kapillarrohmatten und radialem Luftdurchtritt von innen nach außen und Besprühlung mit Wasser zur Nutzung des Verdunstungseffektes auf dem Versuchstand

Mit einer umfangreichen Software, die anhand der Experimente verifiziert wurde, erfolgten zahlreiche Berechnungen. Es galten:

- Luftvolumenstrom 3000 m<sup>3</sup>/h und Wasservolumenstrom 0,9 m<sup>3</sup>/h.
- Die Wassereintrittstemperatur wurde variiert: 18 °C, 22 °C und 26 °C.
- Als Luftzustände der Atmosphäre ist die Datenbasis zwischen 18<sup>00</sup> und 6<sup>00</sup> Uhr gemäß Tabelle 7.6 für den Außenlufttemperaturbereich  $\geq 10$  °C zugrunde gelegt worden.

Die Ergebnisauswertung brachte eine relativ gute Übereinstimmung für die Korrelation zwischen den beiden Größen:

{Wasseraustrittstemperatur – Feuchtkugeltemperatur der Außenluft} und

{Wassereintrittstemperatur – Feuchtkugeltemperatur der Außenluft}.

Wie Bild 7.32 zeigt, ist dann der Einfluss der unterschiedlichen Wassereintrittstemperaturen in erster Näherung vernachlässigbar.

Damit kann für den vorgestellten Hybridkühlturm die Approximation

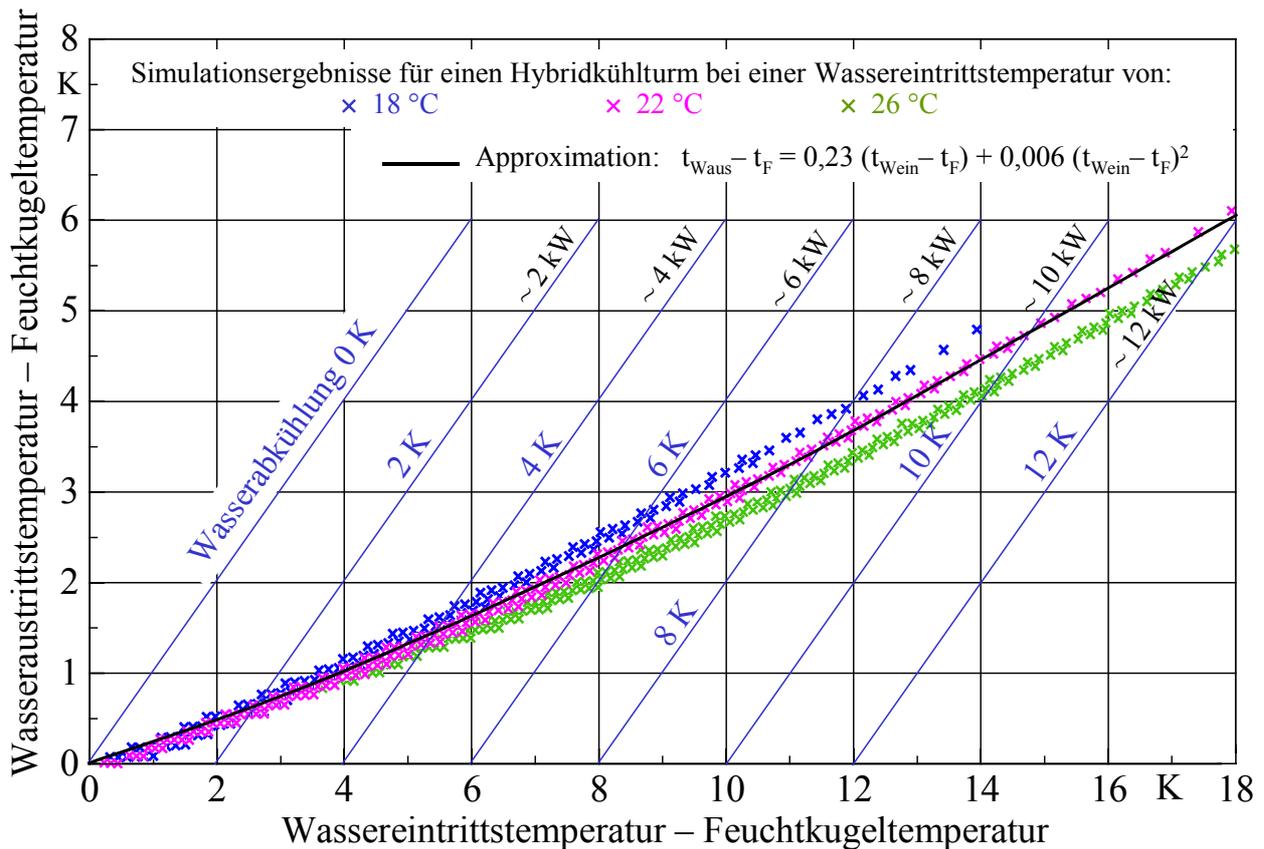
$$t_{\text{Waus}} - t_{\text{F}} = 0,23 (t_{\text{Wein}} - t_{\text{F}}) + 0,006 (t_{\text{Wein}} - t_{\text{F}})^2 \quad (7.6)$$

während des nächtlichen Betriebes Verwendung finden, wobei die Variablen bedeuten:

$t_{\text{Waus}}$  Wasseraustrittstemperatur

$t_{\text{Wein}}$  Wassereintrittstemperatur

$t_{\text{F}}$  Feuchtkugeltemperatur der Außenluft, die den Kühlturm beaufschlagt.



**Bild 7.32** Leistungsdaten für den im Bild 7.31 gezeigten Hybridkühlturm nach umfangreichen Simulationen für drei unterschiedliche Wassereintrittstemperaturen und den in Tabelle 7.6 gegebenen Außenluftzuständen für Lufttemperaturen  $\geq 10^\circ\text{C}$

Damit kann bei der dynamischen Speicheruntersuchung im nächtlichen Abkühlfall des Speichers auf die detaillierte Nachbildung der wärmetechnischen Verbindung zwischen Kühlturm und Speicherkörper nach Bild 7.30 verzichtet werden, indem der Kühlturm bei der Simulation lediglich durch die Gl. (7.6) "modelliert" wird.

Ein analoges Vorgehen wäre auch auf der "Verbraucherseite" – beispielsweise für eine Luftkühl- einrichtung im Raum oder für eine thermisch aktive Raumbegrenzungsfläche zu empfehlen. Somit könnte die Simulation des Speicherbe- und -entladens sehr rationell erfolgen.

Am Beispiel Kühlturm konnte gezeigt werden, in welcher vielfältiger Weise die meteorologischen Daten verwendbar sind.

## 8 Speicheroptimierung – Grundüberlegungen und beispielhaftes Vorgehen

Die wärmetechnische Optimierung eines Speichers bezieht sich in erster Linie auf die **speicherbare Wärme im Speichervolumen während eines Belade-Entlade-Zyklus**. Zunächst werden die Einflüsse auf die Speicherladung und die Bewertungsmöglichkeiten der Speichereffizienz untersucht. Es schließt sich dann ein umfangreiches, mehrteiliges Beispiel an, wobei ein Speicher aus Paraffin-Salz-Hydrat mit integrierten, wasserdurchströmten Kapillarrohrmatten in gut nachvollziehbaren Schritten unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet wird.

### 8.1 Einflüsse auf die wärmetechnische Effizienz eines Festkörperspeichers

Es gibt zahlreiche Faktoren, die die speicherbare Wärme während eines Belade-Entlade-Zyklus beeinflussen. Ohne Wertigkeit und ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien nachfolgend einige Gesichtspunkte genannt.

- Bezüglich der **Speichergeometrie** sind sowohl die Abstände zwischen den Rohren als auch zwischen den Registererebenen bedeutungsvoll.
- Die **Stoffdaten** des Speichermaterials stellen sehr wichtige Größen dar, wobei logischerweise die **spezifische Wärmekapazität** dominierend ist. Die **Wärmeleitfähigkeit** nimmt ebenfalls sehr großen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Speicherkörper, sodass diese in Kombination mit der Geometrie zu bewerten ist.
- Die **Art des Phasenwandels** (siehe Abschnitt 3.2) ist von grundsätzlicher Bedeutung, wobei die **Phasenwandelenthalpie**, die **Phasenwandeltemperatur** – bzw. der Bereich in dem der Phasenwandel vollzogen wird – und die Art einer eventuellen **Hysterese** zwischen Schmelzen und Erstarren entscheidend sind.
- Als sehr einflussreich erweist sich auch das **Temperaturregime**. So ist die Einordnung der **Phasenwandeltemperatur** zwischen den **Fluidtemperaturen** bei der Be- und Entladung bedeutungsvoll. Aber auch die Ausgangstemperatur des Speicherkörpers (Starttemperatur) kann langwährenden Einfluss auf das wärmetechnische Verhalten nehmen. – Strömen Fluide durch Rohre bzw. Kanäle im Speicherkörper, sind möglichst **große Wärmekapazitätsströme** anzustreben, damit längs der Wärmeübertragerfläche nur kleine Temperaturänderungen auftreten.
- Auch die **Intensität der Wärmeübertragung** vom Fluidstrom im Rohr- bzw. Kanalsystem bis zum Speichermaterial beeinflusst die Effizienz der Wärmespeicherung. Bei rohrlosen Speichern, die nur mit der Wärmeübertragung an den Oberflächen (z. B. Massivdeckenspeicher) arbeiten, ist es wichtig, **hohe Wärmeübergangskoeffizienten** bei kleinen Grädigkeiten zu realisieren.
- Schließlich ist für die Wirksamkeit des Speichers auch die **Zyklusform**, d. h. der **zeitliche Verlauf der Temperaturfunktionen beim Be- und Entladen**, bedeutungsvoll. Diese Zeitverläufe werden sich in vielen Fällen nicht in gleicher Weise periodisch wiederholen, sondern beispielsweise lastabhängig, witterungsabhängig und/oder jahreszeitabhängig gelten.

Im praktischen Fall der Speicheroptimierung sind die jeweiligen Einflüsse möglichst realistisch zu berücksichtigen. In der Regel wird man sich jedoch auf die Extrembelastungen konzentrieren.

Bei den späteren Beispielbetrachtungen sollen schrittweise nur **einzelne Einflussgrößen variiert** wer-

den, um eventuelle Basisaussagen gewinnen zu können.

## 8.2 Bewertung der wärmetechnischen Effizienz eines Festkörperspeichers

Es gilt festzustellen, inwieweit der gesamte Speicherkörper in den Belade-Entlade-Zyklus einbezogen wird. Hierzu sind hauptsächlich die zwei nachfolgenden Betrachtungsmethoden sinnvoll.

- Die **quantitative Aussage** bezieht sich auf **das Verhältnis der praktisch nutzbaren Speicherwärme zur theoretisch möglichen innerhalb eines Zyklus**. Die Veranschaulichung geht aus Bild 8.1 hervor. Der **Nutzungsgrad** des Speichers kann dann als

$$\varepsilon = \frac{Q_{SZ,max} - Q_{SZ,min}}{Q_{S,max} - Q_{S,min}} \quad (8.1)$$

geschrieben werden, wobei gelten:

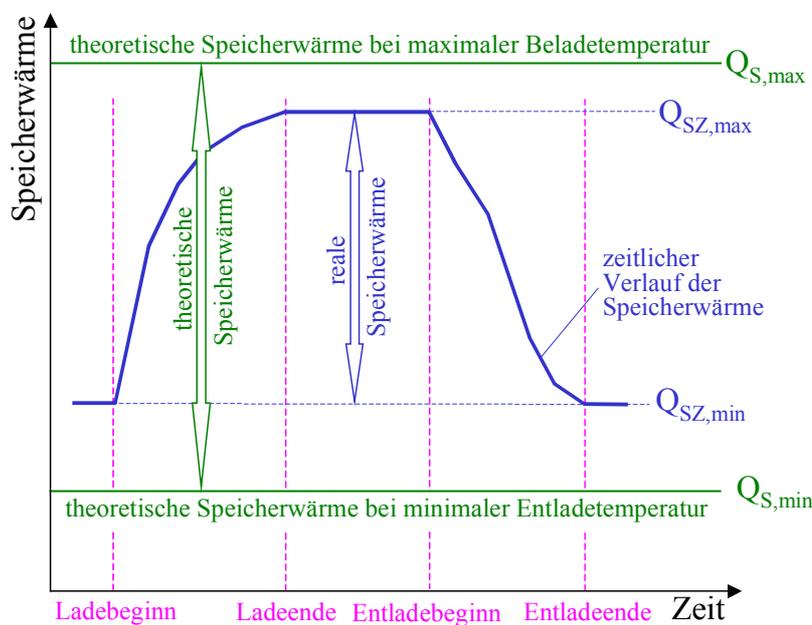
$Q_{S,max}$  theoretische Enthalpie des Speicherkörpers bei maximaler Ladetemperatur

$Q_{S,min}$  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.

Die Enthalpie ("Wärme im Speicher") 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.



**Bild 8.1** Schematische Darstellung der Grenzwerte zur Definition der Gl. (8.1).

- Die **qualitative Beurteilung des Speicherzustandes** während des Zyklus kann durch die Anzeige der **Temperaturen** und **Phasenzustände** aller oder exponierter Elemente erfolgen.

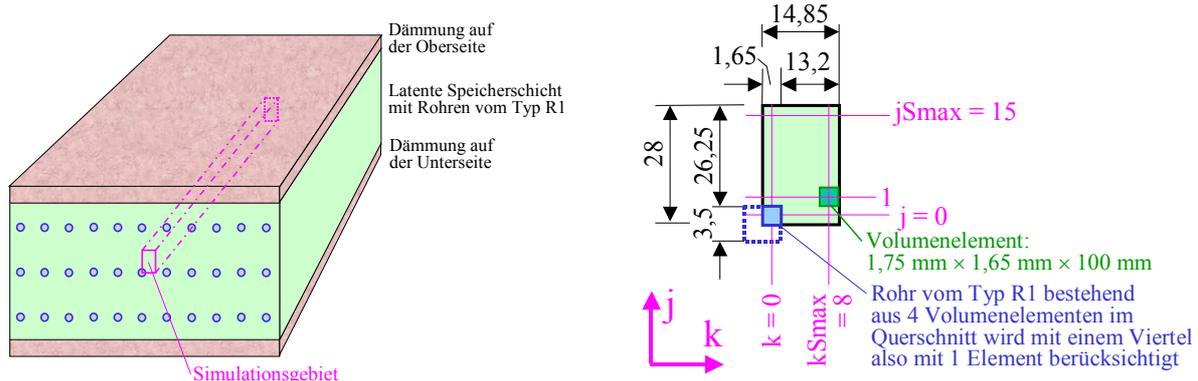
Die Möglichkeiten verschiedener Darstellungen gehen aus den später folgenden Beispielen hervor.

Während im ersten Fall nur eine generelle Feststellung des Tatbestandes möglich ist, lassen sich im

zweiten Fall dezidierte Hinweise für die möglichen Verbesserungen des Speicherkonzeptes ableiten. Beispielsweise können Bereiche des Speicherkörpers, die an der Phasenwandlung überhaupt nicht teilnehmen, visualisiert werden.

### 8.3 Basisvariante des wasserdurchströmten Festkörperspeichers

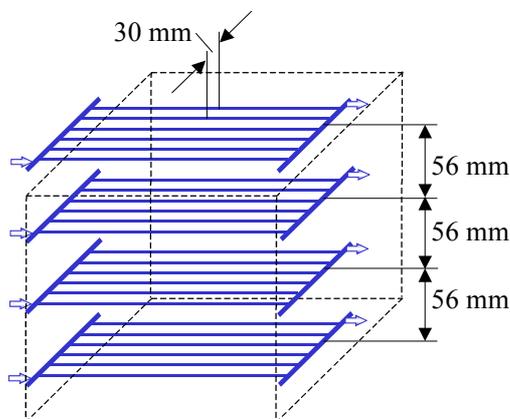
Detailliert betrachtet wird der im Bild 8.2 dargestellte Speicherausschnitt. Er ist bezüglich seiner Geometrie mit dem Testbeispiel 3 (Abschnitt 5.4) identisch. Die Stoffwerte des Paraffin-Salz-Hydrates sind den Herstellerangaben für SP 22 A4 der Fa. Rubitherm angepasst. Sie werden später gezielt verändert.



**Bild 8.2** Links: Wärmespeicher mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes für die weiteren Untersuchungen. Es wird nur ein Viertel des Kapillarrohres und ein zugehöriger Symmetriebereich des Speichermaterials einbezogen, somit bleiben die Dämmschichten an der Ober- und Unterseite unbeachtet. Rechts: Geometrie des Simulationsgebietes mit Angaben in mm (nicht maßstäblich). In  $i$ -Richtung – in die Tafelenebene hinein – gelten die Unterteilungen  $i = 0$  bis  $i_{Smax} = 19$ , sodass die Länge des Speicherkörpers und des Rohrregisters 2000 mm beträgt. Vereinfachend erfolgt kein Wärmeaustausch mit der Umgebung.

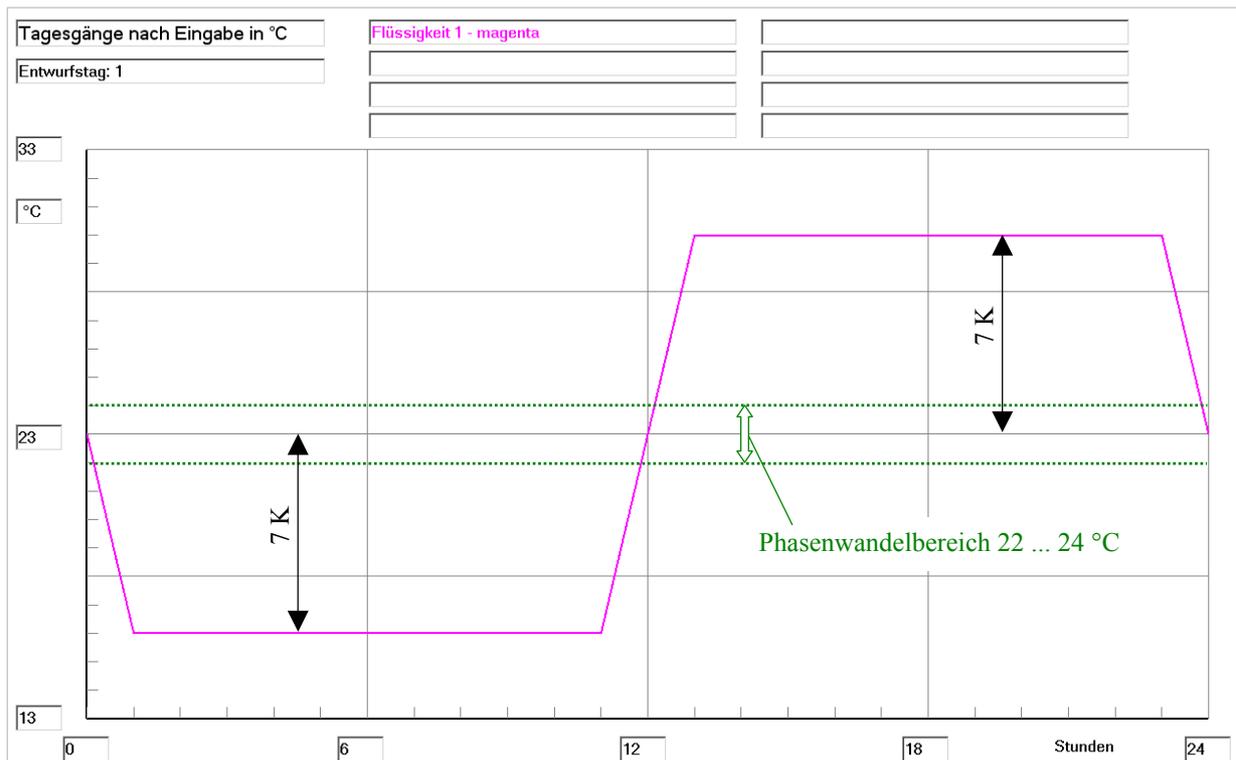
#### Hauptdaten

- Die Ebenen der Kunststoff-Kapillarrohrmatten haben einen Abstand von 56 mm (Bild 8.3).
- Der Röhrchenabstand beträgt ca. 30 mm (Bild 8.3).



**Bild 8.3** Hauptabmessungen für das Rohrregister im Speicherkörper

- Die Wassereintrittstemperatur entspricht je 10 Stunden lang 16 °C bzw. 30 °C (Bild 8.4).
- Die Phasenwechseltemperatur liegt im Bereich von 22 ... 24 °C, sodass die beiden unterschiedlichen Wassereintrittstemperaturen zur mittleren Temperatur von 23 °C jeweils einen Abstand von 7 K aufweisen.



**Bild 8.4** Zeitlicher Verlauf der Wassereintrittstemperatur in das Rohrregister des Speichers im Tagesgang für die Basisvariante (spätere Verwendung auch für die Optimierungsvarianten I und II)

- Die Simulation wird über 72 Stunden geführt, wobei die spezielle Auswertung für die letzten 24 Stunden (3. Simulationstag) erfolgt, da dann ein nahezu eingeschwungener Zustandsverlauf angenommen werden kann.

Für die Grundvariante erfolgt anschließend die **komplette Wiedergabe aller Eingabe- und Ergebnisdaten**, sodass die Geometrie, die Stoffwerte und die Simulationsannahmen nachvollziehbar bekannt sind. Grundsätzliche Erläuterungen dazu können auch den Beispielen des Abschnittes 5 entnommen werden.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\OPT1\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

Daten der Speicherschichten und ihre Begrenzungen:

Schicht	Delta_y	Rho	Lambda		c		r	t_Wandel		jSSmax
			fest	flüssig	fest	flüssig		Beginn	Ende	
	mm	kg/m <sup>3</sup>	W/(m K)		J/(kg K)		kJ/kg	°C		
1	1,75	1380,0	0,600	0,600	2500,0	2500,0	120,0	22,0	24,0	15

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 (Untervert)  
t\_Wandel\_Ende(s) Ende des Phasenwandels (Oberwert)  
jSSmax(s) maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung



Tages- stunde	tF1 °C	tF2 °C	tL1 °C	xL1 g/kg	tL2 °C	xL2 g/kg	tUo °C	tUu °C	tUv °C	tUh °C
15	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	23,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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
tUo	Temperaturverlauf der oberen Speicherumgebung
tUu	Temperaturverlauf der unteren Speicherumgebung
tUv	Temperaturverlauf der vorderen Speicherumgebung
tUh	Temperaturverlauf der hinteren Speicherumgebung

### Allgemeine Simulationsdaten:

Entwurfstag: 1  
 Startzeit: 0 Uhr Starttemperatur: 20,0 °C  
 Zeitschritt: 4 s Anzahl der Zeitschritte: 64800 Simulationszeit: 72 Stunden  
 Zur Ermittlung der Speicherenenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 0,0 °C

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden BS	TZ	QU Wh	QR1 Wh	QR2 Wh	QK1 Wh	QK2 Wh	QSpeicher Wh	QRK Wh	DQ Wh
0	0	-	-	-	-	-	15,83	0,00	0,0
1	1	0,00	0,26	-	-	-	15,57	0,00	0,0
2	2	0,00	1,13	-	-	-	14,44	0,00	-0,0
3	3	0,00	0,69	-	-	-	13,75	0,00	-0,0
4	4	0,00	0,43	-	-	-	13,32	0,00	-0,0
5	5	0,00	0,26	-	-	-	13,06	0,00	-0,0
6	6	0,00	0,16	-	-	-	12,90	0,00	-0,0
7	7	0,00	0,10	-	-	-	12,81	0,00	-0,0
8	8	0,00	0,06	-	-	-	12,75	0,00	-0,0
9	9	0,00	0,04	-	-	-	12,72	0,00	-0,0
10	10	0,00	0,02	-	-	-	12,69	0,00	-0,0
11	11	0,00	0,01	-	-	-	12,68	0,00	-0,0
12	12	0,00	-1,18	-	-	-	13,87	0,00	-0,0
13	13	0,00	-3,00	-	-	-	16,87	0,00	-0,0
14	14	0,00	-3,62	-	-	-	20,49	0,00	0,0
15	15	0,00	-3,24	-	-	-	23,73	0,00	0,0
16	16	0,00	-3,06	-	-	-	26,79	0,00	0,0
17	17	0,00	-2,94	-	-	-	29,73	0,00	0,0
18	18	0,00	-2,84	-	-	-	32,57	0,00	0,0
19	19	0,00	-2,75	-	-	-	35,33	0,00	0,0
20	20	0,00	-2,67	-	-	-	38,00	0,00	0,0
21	21	0,00	-2,59	-	-	-	40,59	0,00	0,0
22	22	0,00	-2,51	-	-	-	43,09	0,00	0,0
23	23	0,00	-2,42	-	-	-	45,52	0,00	0,0
24	0	0,00	-0,97	-	-	-	46,48	0,00	0,0
25	1	0,00	2,06	-	-	-	44,42	0,00	0,0

Stunden		QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
26	2	0,00	3,23	-	-	-	41,19	0,00	-0,0
27	3	0,00	2,96	-	-	-	38,23	0,00	-0,0
28	4	0,00	2,80	-	-	-	35,43	0,00	-0,0
29	5	0,00	2,68	-	-	-	32,75	0,00	-0,0
30	6	0,00	2,58	-	-	-	30,17	0,00	-0,0
31	7	0,00	2,48	-	-	-	27,69	0,00	-0,0
32	8	0,00	2,38	-	-	-	25,31	0,00	-0,0
33	9	0,00	2,27	-	-	-	23,04	0,00	-0,0
34	10	0,00	2,16	-	-	-	20,88	0,00	-0,0
35	11	0,00	2,05	-	-	-	18,84	0,00	-0,0
36	12	0,00	0,69	-	-	-	18,15	0,00	-0,0
37	13	0,00	-2,12	-	-	-	20,27	0,00	-0,0
38	14	0,00	-3,35	-	-	-	23,61	0,00	0,0
39	15	0,00	-3,10	-	-	-	26,71	0,00	0,0
40	16	0,00	-2,96	-	-	-	29,67	0,00	0,0
41	17	0,00	-2,85	-	-	-	32,53	0,00	0,0
42	18	0,00	-2,76	-	-	-	35,29	0,00	0,0
43	19	0,00	-2,68	-	-	-	37,97	0,00	0,0
44	20	0,00	-2,60	-	-	-	40,56	0,00	0,0
45	21	0,00	-2,51	-	-	-	43,08	0,00	0,0
46	22	0,00	-2,43	-	-	-	45,50	0,00	0,0
47	23	0,00	-2,34	-	-	-	47,84	0,00	0,0
48	0	0,00	-0,91	-	-	-	48,75	0,00	0,0
49	1	0,00	2,08	-	-	-	46,67	0,00	0,0
50	2	0,00	3,27	-	-	-	43,40	0,00	-0,0
51	3	0,00	3,00	-	-	-	40,40	0,00	-0,0
52	4	0,00	2,85	-	-	-	37,55	0,00	-0,0
53	5	0,00	2,73	-	-	-	34,82	0,00	-0,0
54	6	0,00	2,63	-	-	-	32,19	0,00	-0,0
55	7	0,00	2,54	-	-	-	29,65	0,00	-0,0
56	8	0,00	2,45	-	-	-	27,20	0,00	-0,0
57	9	0,00	2,35	-	-	-	24,85	0,00	-0,0
58	10	0,00	2,24	-	-	-	22,61	0,00	-0,0
59	11	0,00	2,14	-	-	-	20,47	0,00	-0,0
60	12	0,00	0,77	-	-	-	19,70	0,00	-0,0
61	13	0,00	-2,11	-	-	-	21,81	0,00	-0,0
62	14	0,00	-3,34	-	-	-	25,15	0,00	0,0
63	15	0,00	-3,08	-	-	-	28,23	0,00	0,0
64	16	0,00	-2,94	-	-	-	31,17	0,00	0,0
65	17	0,00	-2,83	-	-	-	34,00	0,00	0,0
66	18	0,00	-2,73	-	-	-	36,73	0,00	0,0
67	19	0,00	-2,64	-	-	-	39,37	0,00	0,0
68	20	0,00	-2,56	-	-	-	41,93	0,00	0,0
69	21	0,00	-2,47	-	-	-	44,41	0,00	0,0
70	22	0,00	-2,39	-	-	-	46,79	0,00	0,0
71	23	0,00	-2,29	-	-	-	49,08	0,00	0,0
72	0	0,00	-0,88	-	-	-	49,96	0,00	0,0

## Legende:

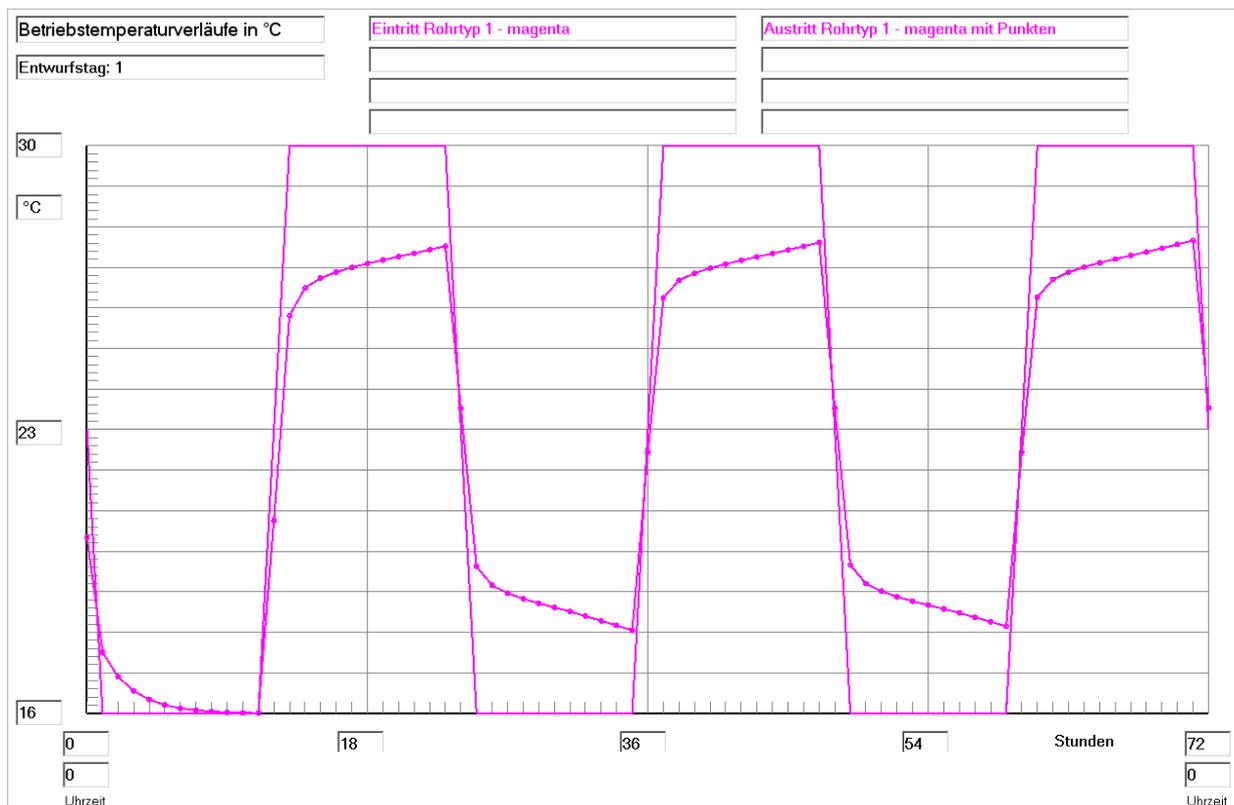
BS	Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)
TZ	Tageszeit (= Uhrzeit)
QU	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an die Umgebung
QR1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R1
QR2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Rohrtyp R2
QK1	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K1
QK2	Wärme innerhalb der vorherigen Stunde an den Kanaltyp K2
QSpeicher	Wärme (Enthalpie) im Speichermaterial am Ende der Stunde
QRK	Wärme (Enthalpie) in Rohren und Kanälen bei Stillstand



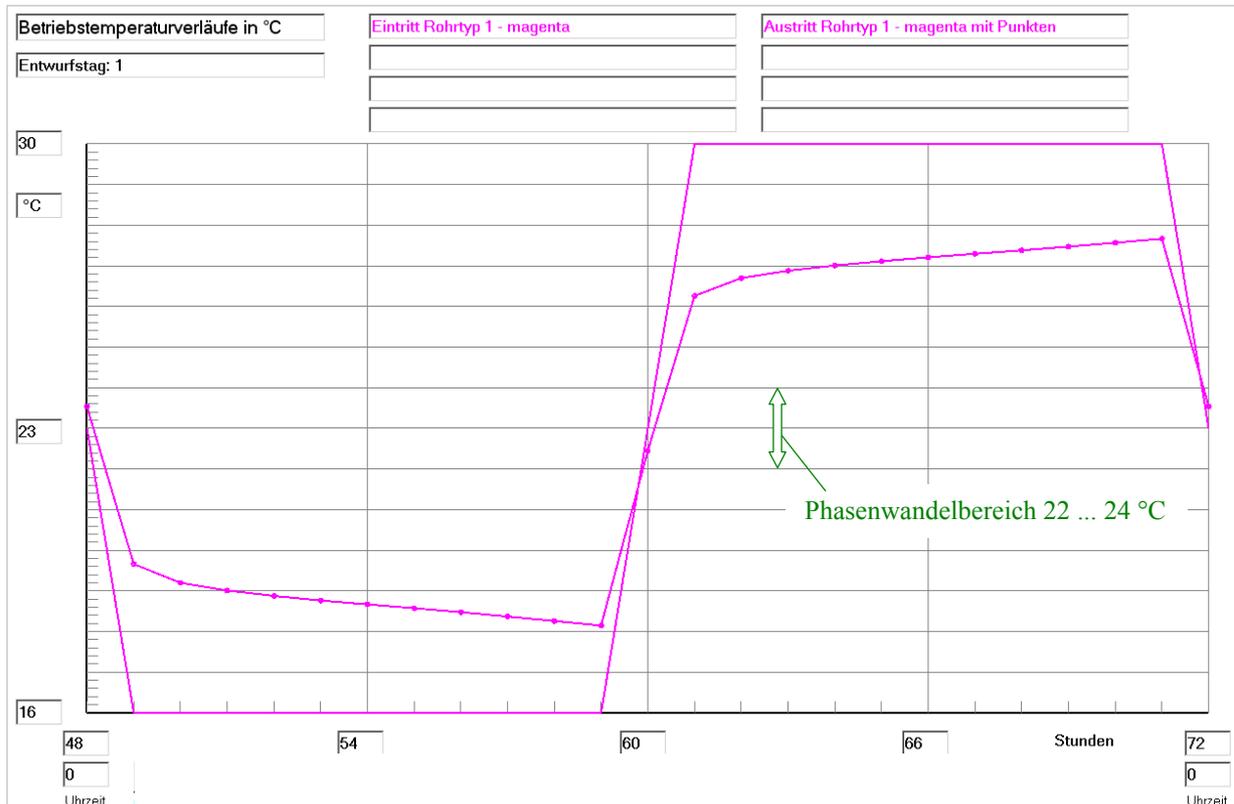
Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h
53	5	16,0	18,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	6	16,0	18,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	7	16,0	18,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	8	16,0	18,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	9	16,0	18,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	10	16,0	18,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	11	16,0	18,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	12	23,0	22,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	13	30,0	26,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	14	30,0	26,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	15	30,0	26,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	16	30,0	27,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17	30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18	30,0	27,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19	30,0	27,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20	30,0	27,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21	30,0	27,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22	30,0	27,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23	30,0	27,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0	23,0	23,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende:

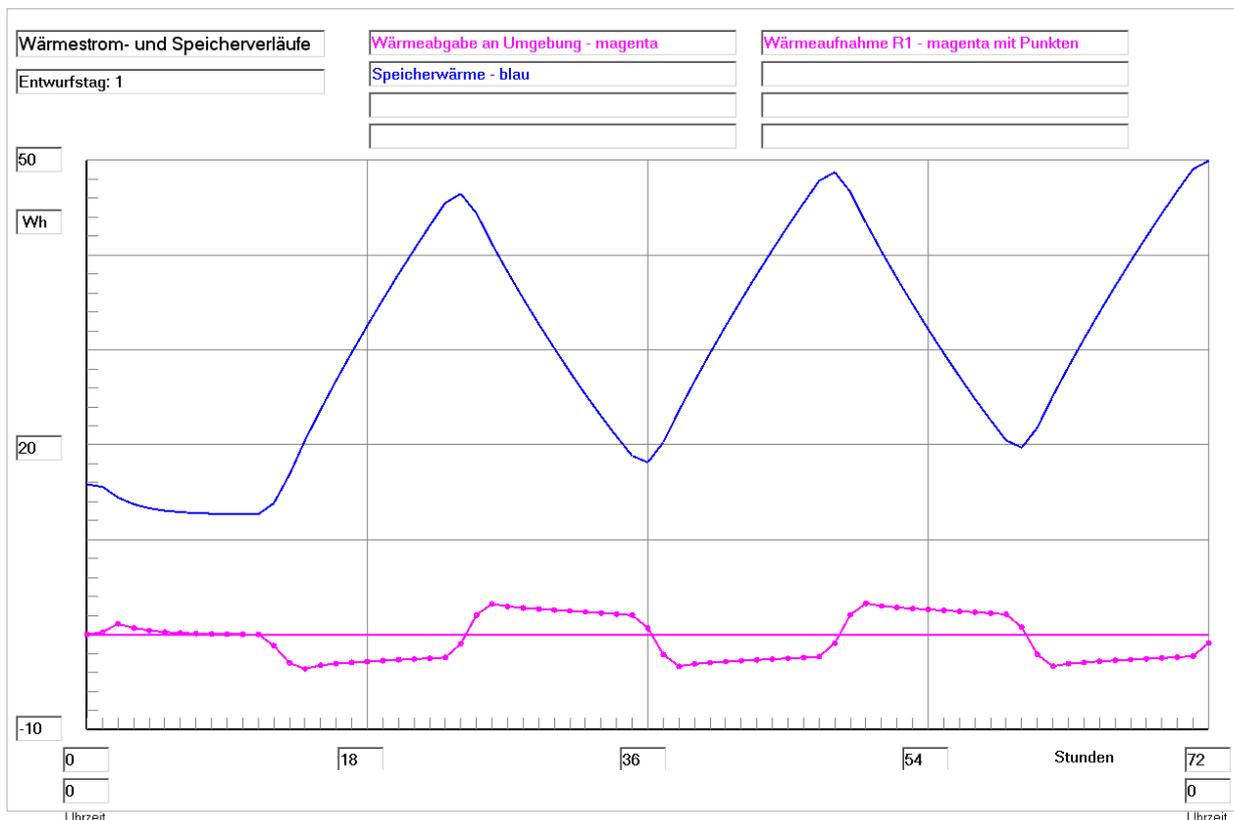
- BS Betriebsstunden des Speichers (= Simulationsstunden)
- TZ Tageszeit (= Uhrzeit)
- Ein Eintrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde
- Aus mittlere Austrittstemperaturen der Fluide am Ende der Stunde
- Kond Kondensatstrom am Ende der Stunde bezogen auf den Volumenstrom V\_S
- Füllung im Rohrtyp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



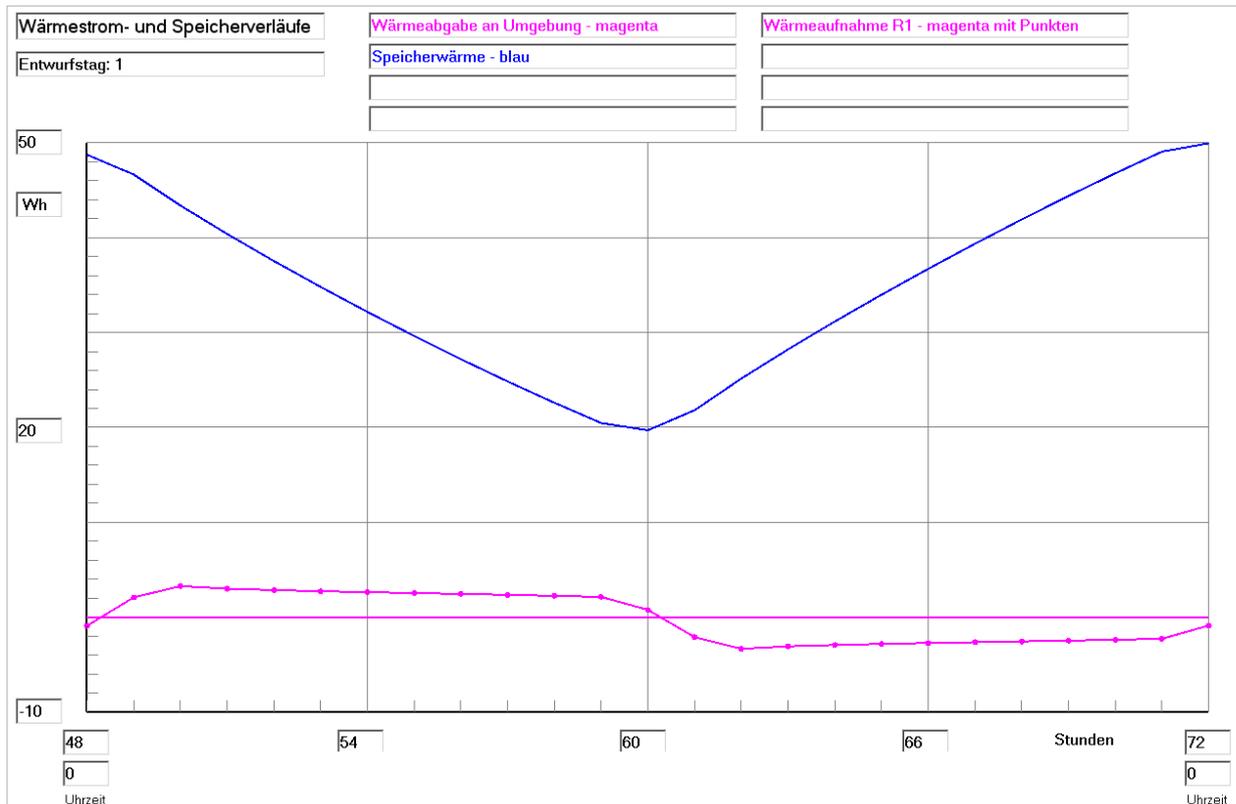
**Bild 8.5** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe der gesamten Simulationszeit gültig für die Basisvariante



**Bild 8.6** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Basisvariante



**Bild 8.7** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe der gesamten Simulationszeit gültig für die Basisvariante



**Bild 8.8** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Basisvariante

### Feststellungen I

- Die Änderungen zwischen dem 2. und 3. Simulationstag sind sehr gering, sodass man den 3. Simulationstag als **quasi eingeschwungenen Zustand** betrachten kann.

So ändert sich die Wasseraustrittstemperatur um 23<sup>00</sup> Uhr nur um 0,1 K. Die vom Rohr abgegebene Wärme reduziert sich zu diesem Zeitpunkt von 2,34 Wh auf 2,29 Wh, dies sind lediglich 2,1 %.

Die Enthalpie des Speicherkörpers steigt beim Vergleich der 48. zur 72. Stunde noch geringfügig (+2,6 %) an, wie die Bilder 8.7 und 8.8 zeigen.

- Um den **Nutzungsgrad des Speichers** nach Gl. (8.1) bestimmen zu können, sind zunächst die Einzelgrößen zu ermitteln, wobei das Rohrvolumen unbeachtet bleibt:

$Q_{S,max} = 60,15 \text{ Wh}$  (theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von 30 °C)

$Q_{S,min} = 12,66 \text{ Wh}$  (theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von 16 °C)

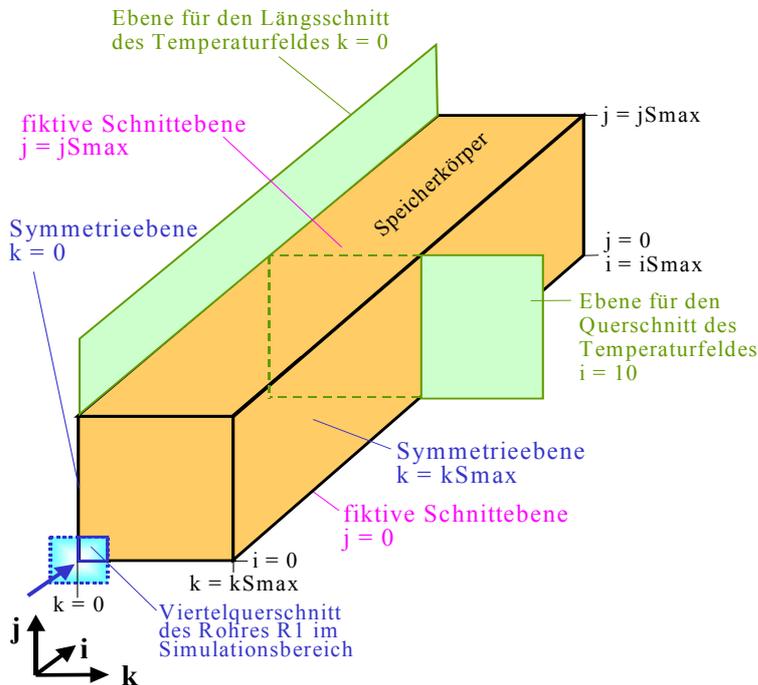
$Q_{SZ,max} = 49,96 \text{ Wh}$  (realer Wert zur Betriebsstunde 72 (0<sup>00</sup> Uhr))

$Q_{SZ,min} = 19,70 \text{ Wh}$  (realer Wert zur Betriebsstunde 60 (12<sup>00</sup> Uhr))

$$\varepsilon = \frac{49,96 - 19,70}{60,15 - 12,66} = 0,637.$$

- Die Tatsache, dass der Speicherkörper wärmetechnisch nur zu etwa 2/3 genutzt wird, bedarf der weiteren Nachforschung.

Weiteren Aufschluss sollen die **Temperatur- und Phasenzustandsverteilungen** geben, die am dritten Simulationstag um 11<sup>00</sup> Uhr und um 23<sup>00</sup> Uhr aufgenommen wurden. Dazu werden zwei Ebenen im Simulationsgebiet betrachtet (Bild 8.9).



**Bild 8.9** Speicherkörper mit Angaben zur Lage der Längs- und Querschnitte in denen die beiden Temperaturfelder betrachtet werden

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	22,61	22,61	22,61	22,61	22,62	22,62	22,62	22,62	22,63
14	22,59	22,59	22,59	22,59	22,60	22,60	22,60	22,60	22,61
13	22,54	22,54	22,54	22,55	22,55	22,56	22,56	22,56	22,56
12	22,47	22,47	22,48	22,48	22,48	22,49	22,50	22,50	22,50
11	22,37	22,37	22,38	22,38	22,39	22,40	22,41	22,41	22,42
10	22,24	22,24	22,25	22,26	22,27	22,29	22,30	22,30	22,31
9	22,08	22,08	22,09	22,11	22,12	22,14	22,16	22,17	22,17
8	21,88	21,88	21,90	21,92	21,94	21,96	21,98	22,01	22,02
7	21,67	21,68	21,70	21,72	21,75	21,78	21,80	21,82	21,83
6	21,44	21,46	21,49	21,52	21,56	21,60	21,63	21,65	21,66
5	21,20	21,22	21,27	21,32	21,37	21,42	21,46	21,49	21,50
4	20,93	20,97	21,03	21,11	21,18	21,25	21,30	21,34	21,36
3	20,61	20,68	20,79	20,90	21,01	21,10	21,16	21,21	21,23
2	20,22	20,35	20,53	20,70	20,85	20,96	21,05	21,10	21,13
1	19,67	19,98	20,28	20,53	20,72	20,86	20,96	21,03	21,06
0	17,21	19,60	20,09	20,42	20,65	20,81	20,92	20,99	21,02

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
14	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
13	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
12	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
11	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21
10	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
9	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr

teilweiser Phasenwandel

feste Phase

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	22,47	22,49	22,51	22,53	22,55	22,56	22,57	22,59	22,59	22,60	22,61	22,61	22,62	22,62	22,62	22,63	22,63	22,63	22,63	22,63
14	22,43	22,46	22,48	22,50	22,52	22,53	22,55	22,56	22,57	22,58	22,59	22,59	22,60	22,60	22,60	22,61	22,61	22,61	22,61	22,61
13	22,36	22,39	22,41	22,44	22,46	22,48	22,49	22,51	22,52	22,53	22,54	22,55	22,55	22,56	22,56	22,57	22,57	22,57	22,58	22,58
12	22,24	22,28	22,31	22,34	22,36	22,39	22,41	22,43	22,44	22,46	22,47	22,48	22,49	22,50	22,50	22,51	22,52	22,52	22,52	22,53
11	22,07	22,12	22,17	22,20	22,23	22,26	22,29	22,31	22,33	22,35	22,37	22,39	22,40	22,41	22,42	22,43	22,44	22,45	22,45	22,46
10	21,86	21,91	21,97	22,03	22,06	22,10	22,13	22,17	22,20	22,22	22,24	22,26	22,28	22,30	22,31	22,33	22,34	22,35	22,36	22,37
9	21,63	21,69	21,75	21,81	21,85	21,89	21,93	21,98	22,02	22,05	22,08	22,10	22,13	22,16	22,18	22,20	22,21	22,23	22,24	22,26
8	21,40	21,46	21,53	21,58	21,63	21,67	21,72	21,77	21,81	21,84	21,88	21,91	21,94	21,97	22,01	22,03	22,06	22,08	22,10	22,12
7	21,16	21,23	21,29	21,35	21,40	21,45	21,50	21,55	21,59	21,63	21,67	21,70	21,74	21,78	21,81	21,84	21,87	21,89	21,92	21,94
6	20,90	20,97	21,04	21,10	21,15	21,21	21,26	21,31	21,36	21,40	21,44	21,48	21,52	21,56	21,60	21,63	21,66	21,69	21,72	21,75
5	20,63	20,70	20,77	20,83	20,89	20,95	21,00	21,06	21,11	21,15	21,20	21,24	21,29	21,33	21,37	21,41	21,44	21,48	21,51	21,55
4	20,32	20,39	20,46	20,53	20,59	20,65	20,71	20,77	20,83	20,88	20,93	20,98	21,03	21,07	21,12	21,16	21,20	21,24	21,28	21,32
3	19,95	20,03	20,11	20,18	20,25	20,31	20,38	20,44	20,50	20,56	20,61	20,67	20,72	20,77	20,82	20,87	20,91	20,96	21,00	21,04
2	19,50	19,59	19,67	19,74	19,82	19,89	19,96	20,03	20,09	20,16	20,22	20,28	20,34	20,39	20,45	20,50	20,55	20,60	20,65	20,70
1	18,87	18,97	19,05	19,13	19,22	19,30	19,38	19,45	19,53	19,60	19,67	19,74	19,80	19,87	19,93	19,99	20,05	20,11	20,17	20,23
0	16,06	16,18	16,30	16,42	16,54	16,65	16,77	16,88	16,99	17,10	17,21	17,31	17,42	17,52	17,62	17,72	17,82	17,91	18,01	18,10

Rohr im Längsschnitt

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	0,23	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
14	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
13	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29
12	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
11	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
10	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

teilweiser Phasenwandel

feste Phase

Rohr im Längsschnitt

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	23,12	23,12	23,12	23,12	23,11	23,11	23,11	23,11	23,11
14	23,14	23,14	23,14	23,14	23,13	23,13	23,13	23,12	23,12
13	23,18	23,18	23,18	23,17	23,17	23,17	23,16	23,16	23,16
12	23,24	23,24	23,24	23,23	23,23	23,22	23,22	23,21	23,21
11	23,33	23,32	23,32	23,31	23,30	23,29	23,29	23,28	23,28
10	23,43	23,43	23,42	23,41	23,40	23,39	23,38	23,37	23,37
9	23,57	23,56	23,55	23,53	23,52	23,50	23,49	23,48	23,47
8	23,73	23,72	23,71	23,68	23,66	23,64	23,62	23,60	23,60
7	23,93	23,92	23,89	23,86	23,83	23,80	23,77	23,75	23,74
6	24,17	24,15	24,12	24,08	24,03	23,98	23,94	23,92	23,90
5	24,43	24,40	24,35	24,30	24,23	24,18	24,13	24,10	24,08
4	24,72	24,68	24,60	24,52	24,44	24,36	24,30	24,26	24,24
3	25,06	24,99	24,87	24,75	24,63	24,53	24,46	24,40	24,38
2	25,49	25,34	25,15	24,96	24,80	24,68	24,58	24,52	24,49
1	26,08	25,75	25,42	25,15	24,94	24,78	24,67	24,60	24,57
0	28,72	26,16	25,62	25,27	25,02	24,84	24,72	24,65	24,61

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55
14	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56
13	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58
12	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,60
11	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64
10	0,72	0,71	0,71	0,71	0,70	0,69	0,69	0,69	0,68
9	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,74	0,74
8	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,80
7	0,96	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,88	0,87
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

teilweiser Phasenwandel

flüssige Phase

Rohr

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	23,45	23,41	23,37	23,33	23,29	23,26	23,23	23,20	23,17	23,15	23,12	23,10	23,08	23,06	23,04	23,02	23,00	22,99	22,97	22,95
14	23,49	23,44	23,40	23,36	23,32	23,29	23,25	23,22	23,19	23,17	23,14	23,12	23,10	23,08	23,06	23,04	23,02	23,00	22,98	22,97
13	23,56	23,51	23,46	23,42	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21	23,18	23,16	23,13	23,11	23,09	23,07	23,05	23,03	23,01	23,00
12	23,67	23,61	23,55	23,50	23,46	23,42	23,38	23,34	23,31	23,27	23,24	23,22	23,19	23,16	23,14	23,12	23,10	23,08	23,06	23,04
11	23,81	23,75	23,68	23,63	23,57	23,52	23,48	23,44	23,40	23,36	23,33	23,29	23,26	23,24	23,21	23,19	23,16	23,14	23,12	23,10
10	24,01	23,93	23,86	23,78	23,72	23,66	23,61	23,56	23,51	23,47	23,43	23,40	23,36	23,33	23,30	23,27	23,25	23,22	23,20	23,18
9	24,24	24,16	24,08	23,98	23,91	23,84	23,77	23,72	23,66	23,61	23,57	23,52	23,48	23,45	23,41	23,38	23,35	23,32	23,29	23,27
8	24,48	24,40	24,31	24,21	24,14	24,06	23,97	23,91	23,85	23,78	23,73	23,68	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,41	23,38
7	24,73	24,64	24,55	24,46	24,38	24,30	24,21	24,14	24,07	23,99	23,93	23,87	23,81	23,76	23,71	23,67	23,62	23,59	23,55	23,52
6	24,99	24,91	24,81	24,72	24,64	24,55	24,47	24,39	24,32	24,23	24,17	24,10	24,03	23,96	23,91	23,86	23,81	23,76	23,72	23,68
5	25,28	25,19	25,09	25,00	24,91	24,83	24,74	24,66	24,58	24,50	24,43	24,36	24,28	24,21	24,15	24,09	24,03	23,97	23,93	23,88
4	25,60	25,51	25,41	25,31	25,22	25,13	25,04	24,96	24,88	24,79	24,72	24,64	24,57	24,49	24,43	24,36	24,29	24,23	24,18	24,13
3	25,97	25,87	25,77	25,68	25,58	25,49	25,40	25,31	25,23	25,14	25,06	24,98	24,90	24,82	24,75	24,68	24,60	24,54	24,48	24,42
2	26,44	26,33	26,23	26,13	26,03	25,94	25,84	25,75	25,66	25,57	25,49	25,40	25,32	25,23	25,16	25,08	25,00	24,93	24,86	24,80
1	27,08	26,97	26,86	26,76	26,66	26,56	26,46	26,36	26,27	26,17	26,08	25,99	25,90	25,81	25,72	25,64	25,55	25,47	25,40	25,33
0	29,94	29,81	29,69	29,56	29,44	29,32	29,20	29,08	28,96	28,84	28,72	28,61	28,49	28,38	28,27	28,16	28,05	27,94	27,83	27,72

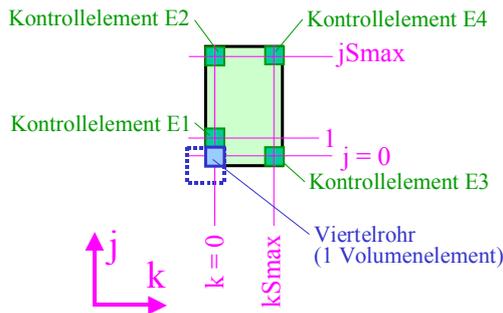
Rohr im Längsschnitt

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

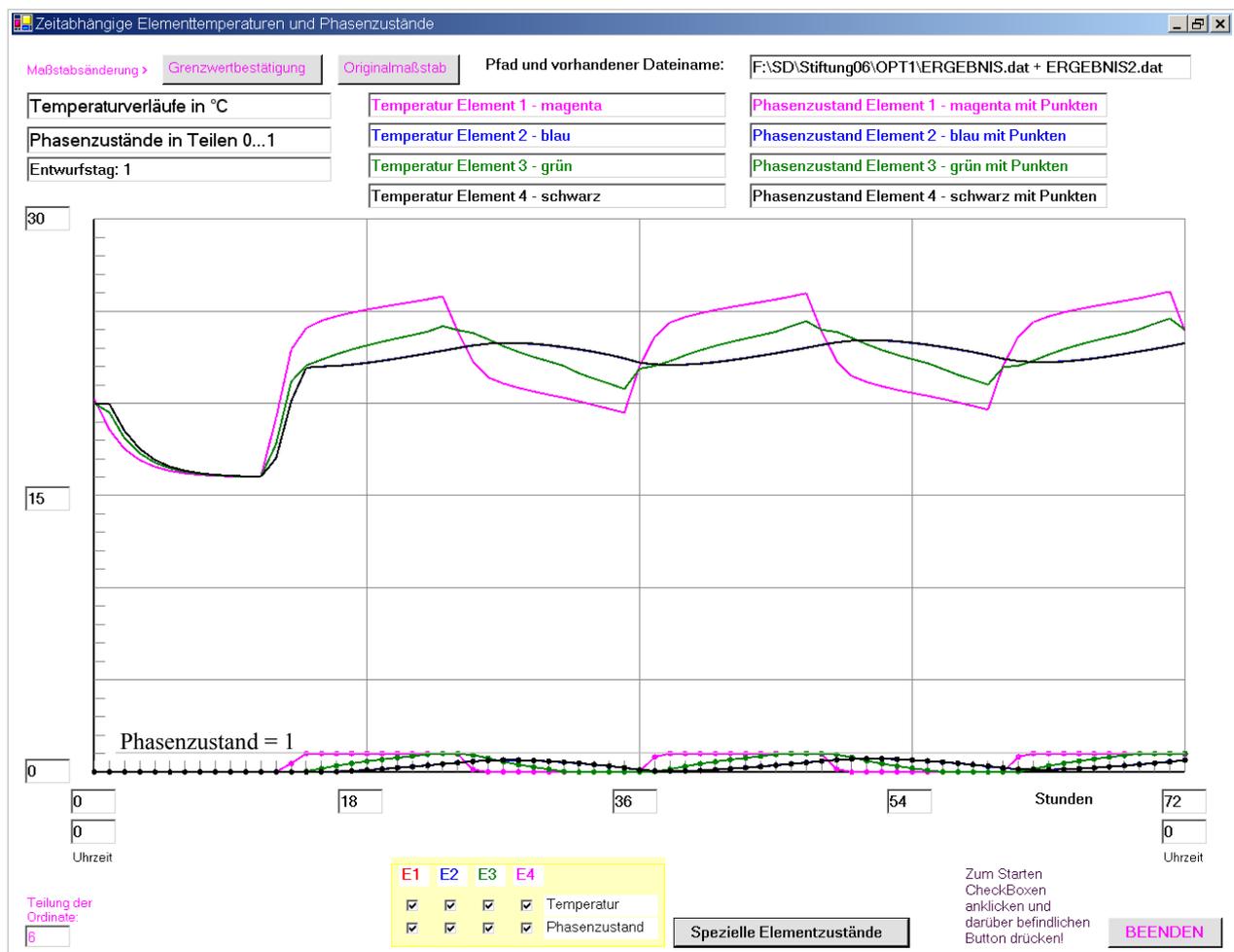
j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	0,73	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,61	0,60	0,59	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48
14	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63	0,61	0,60	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
13	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,53	0,53	0,52	0,51	0,50
12	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,64	0,62	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52
11	0,91	0,87	0,84	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,62	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55
10	1,00	0,97	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,65	0,64	0,62	0,61	0,60	0,59

Eine weitere Darstellungsform des zeitlichen Verlaufs der Temperatur und des Phasenzustandes im Simulationsgebiet wurde in einem speziellen Ergänzungsteil des Programms gestaltet. Es erfolgt die stündliche Beobachtung von maximal vier exponiert gelegenen Volumenelementen, für die die Temperatur und der Phasenzustand für spätere Auswertungen gespeichert werden. Die Lage der Volumenelemente ist aus Bild 8.10 ersichtlich.

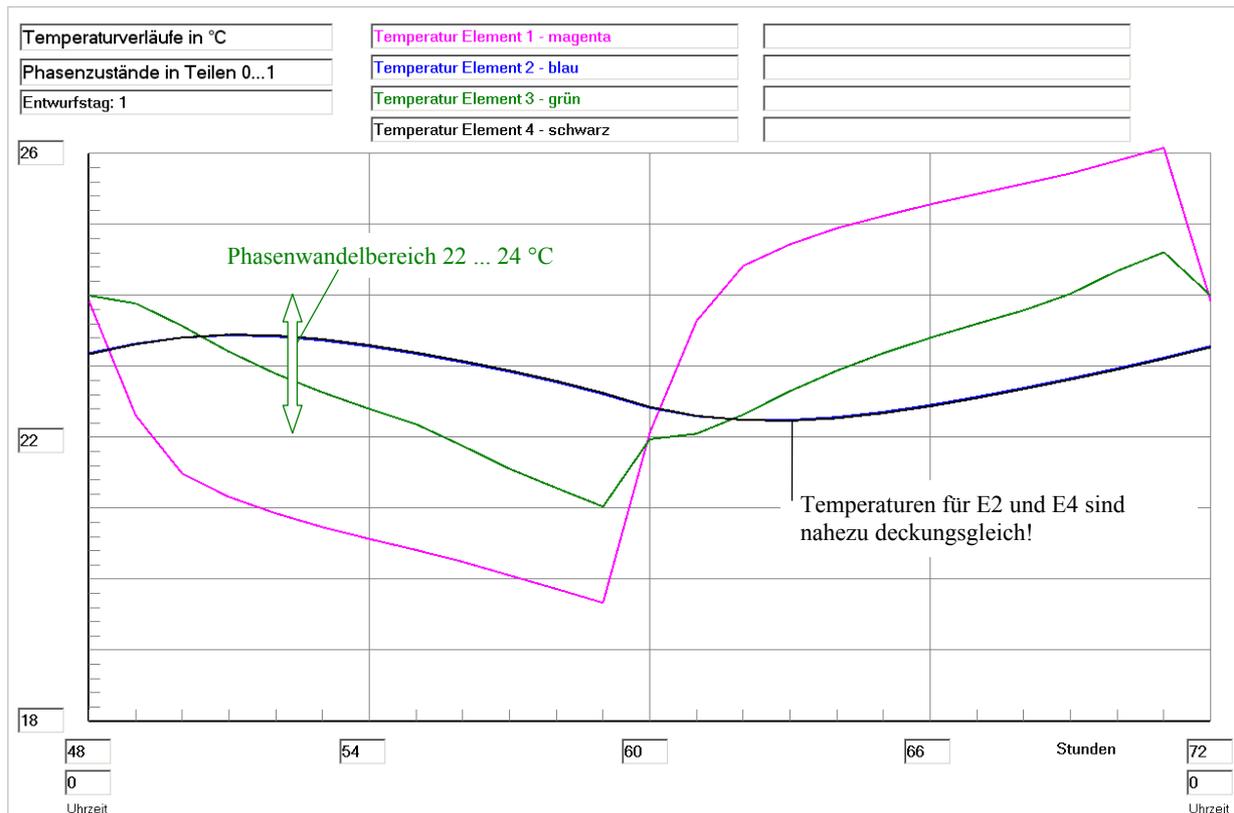
Die Zeitverläufe werden zunächst für die gesamte Simulationszeit im Bild 8.11 und für den jeweils dritten Simulationstag getrennt für die Temperatur und den Phasenzustand mit optimalem Maßstab in den Bildern 8.12 und 8.13 gezeigt.



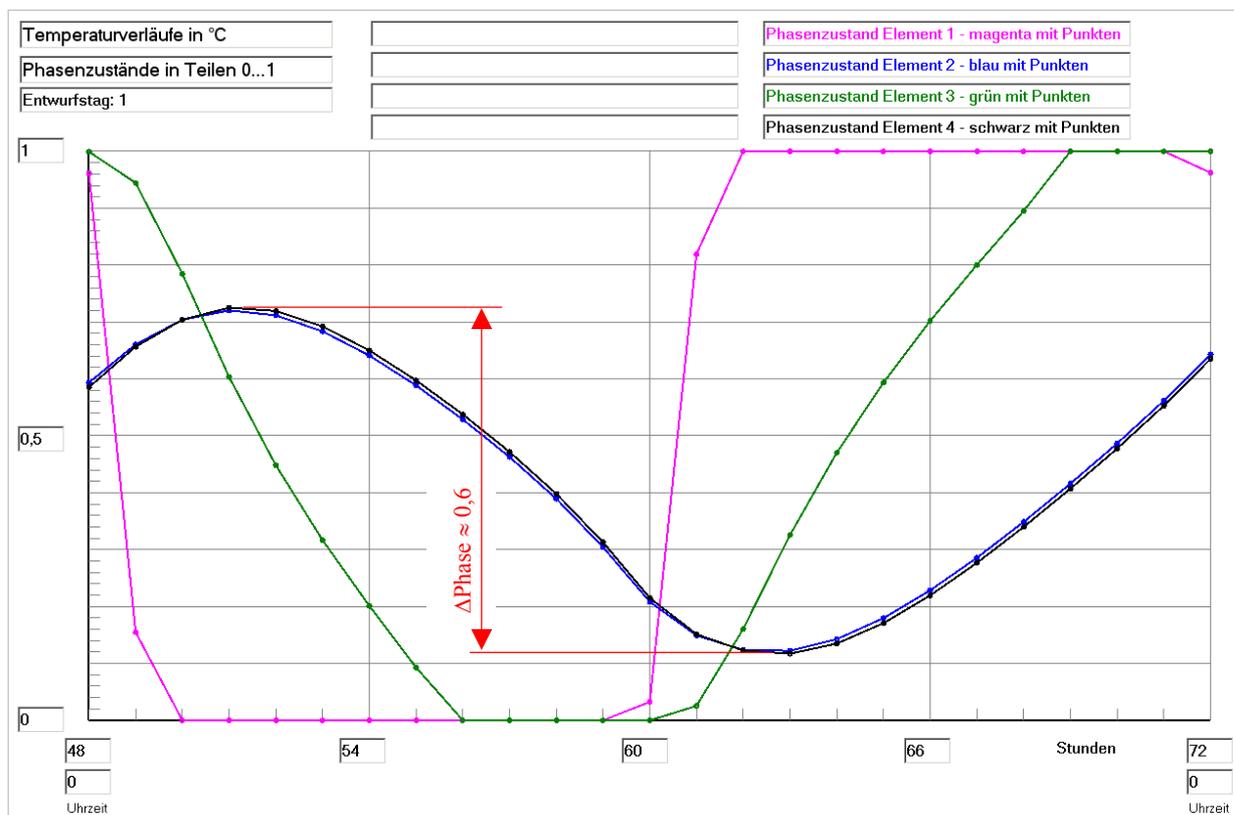
**Bild 8.10** Lage der vier exponierten Kontrollelemente E1 ... E4 deren Temperatur und Phasenzustand stündlich gespeichert werden und für spätere Auswertungen verfügbar sind  
Die j- und k-Koordinaten der Elemente sind aus der Skizze ablesbar, außerdem gilt  $i = 10$ . Die i-Richtung geht in die Tafelenebene hinein.



**Bild 8.11** Temperatur- und Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 gemäß Bild 8.10 über die gesamte Simulationszeit gültig für die Basisvariante  
Es ist die komplette Bildschirmoberfläche des speziell ergänzten Programmteiles dargestellt.



**Bild 8.12** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 gemäß Bild 8.10 über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Basisvariante



**Bild 8.13** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 gemäß Bild 8.10 über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Basisvariante

## Feststellungen II

- Um 11<sup>00</sup> Uhr endet die **zehnstündige Kaltwasserbeaufschlagung** (16 °C). Dennoch zeigen die Temperaturfelder im Querschnitt  $i = 10$  und im Längsschnitt  $k = 0$  (Seite 174), dass im oberen Simulationsgebiet das Speichermaterial noch eine Temperatur von über 22 °C aufweist. Dies bedeutet, dass das Material **nicht vollkommen in fester (ungeschmolzener) Phase** vorliegt.

Diese Aussage wird durch die Ausdrücke zum Phasenzustand (Seiten 174 und 175) direkt bestätigt, denn in den betrachteten Schnitten beträgt der Kennwert bis  $\text{Phase}_{i,j,k} = 0,31$ . D. h., trotz der langen Kühlphase sind noch maximal 31 % des Latentspeichermaterials flüssig (geschmolzen) und nur 69 % fest (ungeschmolzen).

- Um 23<sup>00</sup> Uhr endet die **zehnstündige Warmwasserbeaufschlagung** (30 °C). Auch hier zeigt sich (Seite 175), dass der Bereich im oberen Simulationsgebiet **keinen kompletten Phasenwandel** erfährt, denn die Temperatur liegt unter 24 °C. Die angegebenen Phasenzustände verdeutlichen dies auch, der minimale Wert im Längsschnitt ist mit  $\text{Phase}_{i,j,k} = 0,48$  angegeben.

Trotz der sehr langen Aufheizdauer gibt es noch Materialbereiche, die nur etwa zur Hälfte geschmolzen sind.

- Der Verlauf über die gesamte Simulationszeit (Bild 8.11) zeigt, dass sich sehr rasch der **periodische Gang** einstellt.
- Die detaillierten Temperaturverläufe (Bild 8.12) veranschaulichen, dass nur die in der Rohrregisterebene gelegenen Elemente E1 und E3 die Phasenwandelgrenztemperaturen von 22 °C bzw. 24 °C unter- oder überschreiten.

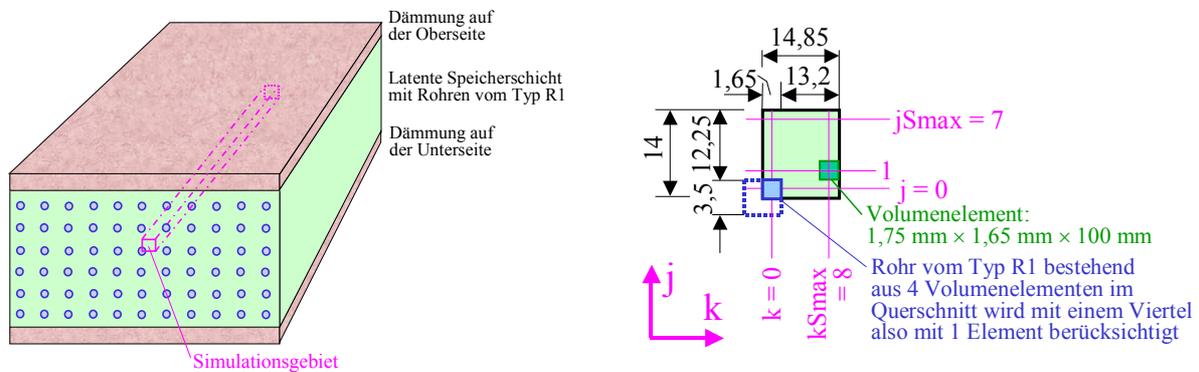
Die Phasenzustandsverläufe nach Bild 8.13 demonstrieren das Speicherverhalten besonders deutlich. Die im Simulationsgebiet **oben liegenden Elemente E2 und E4** – sie befinden sich in Realität symmetrisch zwischen zwei Rohrregistern – erreichen beispielsweise nie einen kompletten Phasenwandel. Der geschmolzene Anteil schwankt etwa zwischen 10 % und 70 %. Dies bedeutet, dass die **Latentspeicherung nur zu ca. 60 % genutzt** wird.

- **Damit ist die schlechte Speicherausnutzung – als Nutzungsgrad wurde  $\varepsilon = 0,637$  festgestellt – eindeutig durch die großen Abstände der Rohrregister von 56 mm (Bild 8.3) verursacht.**
- **Zur wärmetechnischen Verbesserung sollte der Registerabstand verringert oder die Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials erhöht werden.**

Die genannten Vorschläge zur Erhöhung des Speichernutzungsgrades werden bei den nachfolgenden Optimierungsvarianten I (siehe Abschnitt 8.4) und II (siehe Abschnitt 8.5) berücksichtigt.

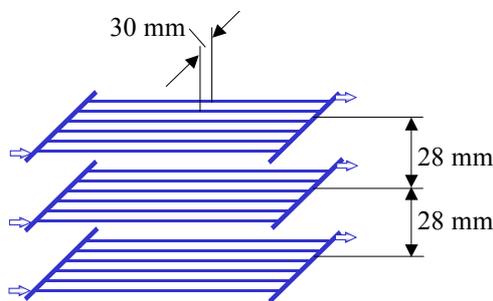
### 8.4 Optimierungsvariante I: Kleinerer Abstand der Rohrregister

Es wird grundsätzlich der Speicher nach Bild 8.2 verwendet, lediglich die Anzahl der eingebetteten Kapillarrohrmatten ist verdoppelt worden. Bild 8.14 zeigt sowohl den neuen Speicherkörper als auch das veränderte Simulationsgebiet. Alle Gitterabstände, Stoffwerte, Randbedingungen und Zeitgrößen gelten unverändert wie im Basisbeispiel. Die neuen Rohrregisterabstände sind im Bild 8.15 skizziert.



**Bild 8.14**

Links: Wärmespeicher mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes für die weiteren Untersuchungen  
 Es wird nur ein Viertel des Kapillarrohres und ein zugehöriger Symmetriebereich des Speichermaterials einbezogen, somit bleiben die Dämmschichten an der Ober- und Unterseite unbeachtet.  
 Rechts: Geometrie des Simulationsgebietes mit Angaben in mm (nicht maßstäblich)  
 In i-Richtung – in die Tafelenebene hinein – gelten die Unterteilungen  $i = 0$  bis  $i_{Smax} = 19$ , sodass die Länge des Speicherkörpers und des Rohrregisters 2000 mm beträgt. Vereinfachend erfolgt kein Wärmeaustausch mit der Umgebung.



**Bild 8.15** Hauptabmessungen für das Rohrregister im Speicherkörper

Die Ergebnisse werden nur auszugsweise wiedergegeben.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\OPT1\_I\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

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	flüssig	fest	flüssig		Beginn	Ende	
			W/(m K)	W/(m K)	J/(kg K)	J/(kg K)		°C		
1	1,75	1380,0	0,600	0,600	2500,0	2500,0	120,0	22,0 24,0	7	

Legende: wie Seite 166

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1: 0,0140 m  
 Höhe der Schicht 2: 0,0000 m  
 Höhe der Schicht 3: 0,0000 m  
 Breite des Speicherkörpers (Simulationausschnitt): 0,0149 m  
 Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 2,0000 m

Delta_x	Delta_z	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
mm	mm			R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
m <sup>2</sup> K/W							
100,00	1,65	19	8	1,13000	1,13000	1,13000	1,13000

Legende: wie Seite 167

### Geometrie der Rohre und Kanäle:

Rohr-/ Kanal- Nummer	Gitterbegrenzungen				Rohr-/ Kanal- Typ
	jmin	jmax	kmin	kmax	
1	0	0	0	0	R1

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

### Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1

### Allgemeine Simulationsdaten

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

} wie Basisvariante  
Seiten 167/168

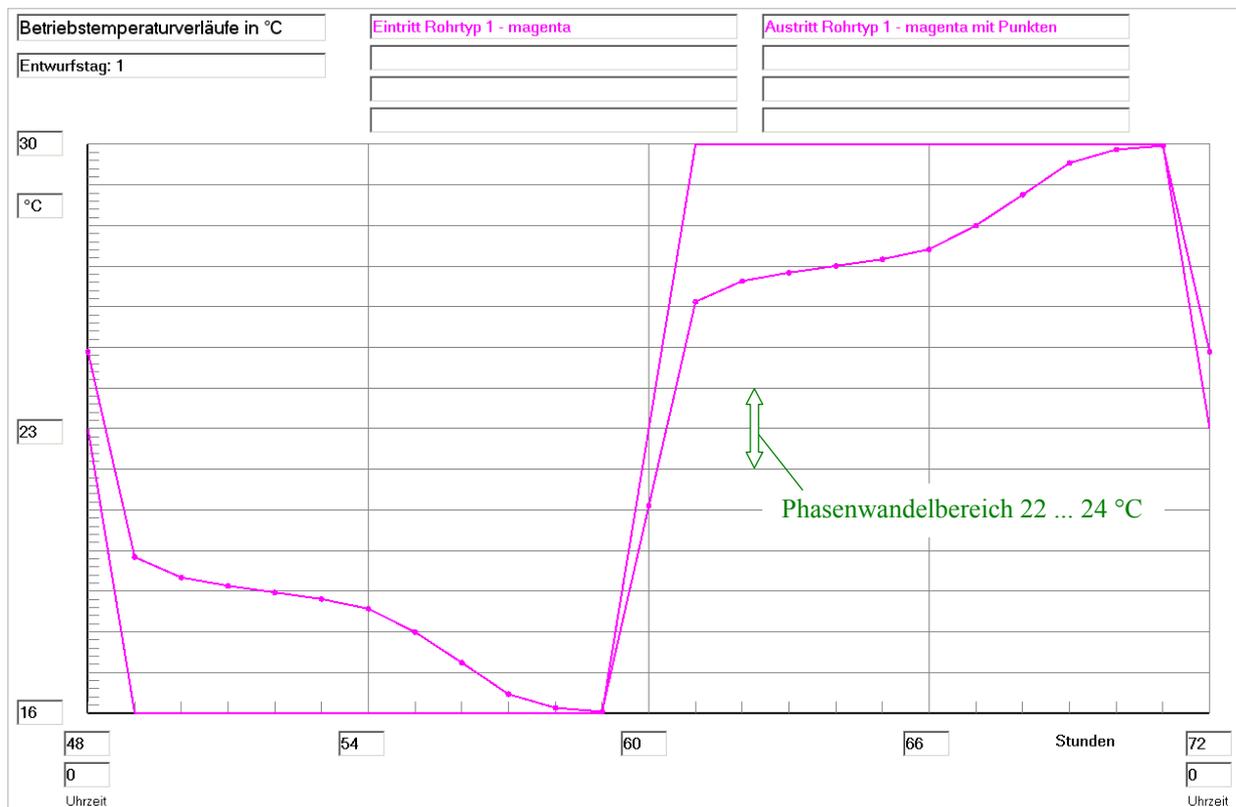
Stunden	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
48	0	0,00	1,07	-	-	28,77	0,00	0,0
49	1	0,00	2,58	-	-	26,19	0,00	0,0
50	2	0,00	3,41	-	-	22,77	0,00	-0,0
51	3	0,00	3,13	-	-	19,65	0,00	-0,0
52	4	0,00	2,96	-	-	16,69	0,00	-0,0
53	5	0,00	2,80	-	-	13,89	0,00	-0,0
54	6	0,00	2,62	-	-	11,27	0,00	-0,0
55	7	0,00	2,23	-	-	9,04	0,00	-0,0
56	8	0,00	1,58	-	-	7,46	0,00	-0,0
57	9	0,00	0,82	-	-	6,65	0,00	-0,0
58	10	0,00	0,26	-	-	6,39	0,00	-0,0
59	11	0,00	0,07	-	-	6,32	0,00	-0,0
60	12	0,00	-1,06	-	-	7,38	0,00	-0,0
61	13	0,00	-2,58	-	-	09,97	0,00	-0,0
62	14	0,00	-3,42	-	-	13,39	0,00	0,0
63	15	0,00	-3,13	-	-	16,52	0,00	0,0
64	16	0,00	-2,96	-	-	19,48	0,00	0,0
65	17	0,00	-2,80	-	-	22,29	0,00	0,0
66	18	0,00	-2,62	-	-	24,91	0,00	0,0
67	19	0,00	-2,23	-	-	27,14	0,00	0,0
68	20	0,00	-1,57	-	-	28,71	0,00	0,0
69	21	0,00	-0,81	-	-	29,51	0,00	0,0
70	22	0,00	-0,25	-	-	29,76	0,00	0,0
71	23	0,00	-0,07	-	-	29,84	0,00	0,0
72	0	0,00	1,07	-	-	28,77	0,00	0,0

Legende: wie Seite 169

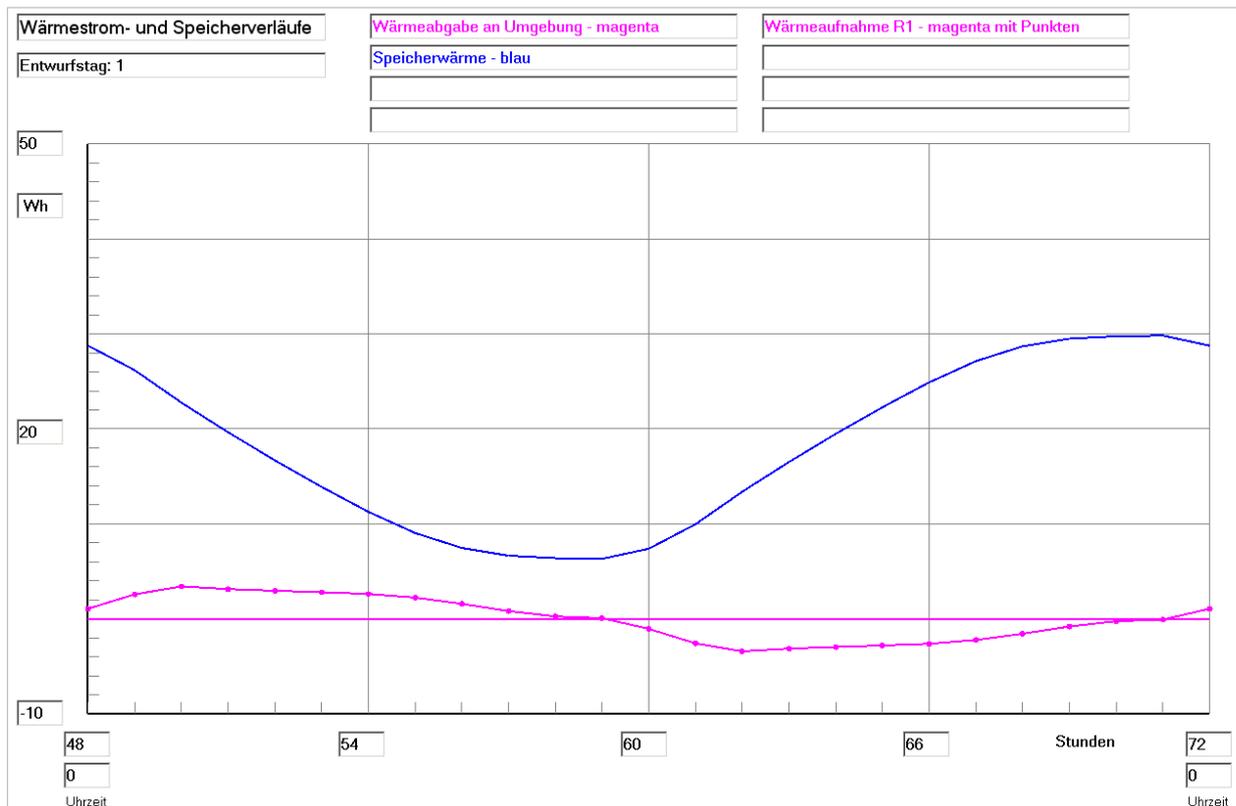
Detaillierte Simulationsergebnisse für die Fluide (Werte am Ende der Stunde):

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
48	0	23,0	24,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	1	16,0	19,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	2	16,0	19,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	3	16,0	19,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	4	16,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	5	16,0	18,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	6	16,0	18,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	7	16,0	18,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	8	16,0	17,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	9	16,0	16,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	10	16,0	16,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	11	16,0	16,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	12	23,0	21,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	13	30,0	26,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	14	30,0	26,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	15	30,0	26,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	16	30,0	27,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17	30,0	27,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18	30,0	27,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19	30,0	28,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20	30,0	28,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21	30,0	29,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22	30,0	29,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23	30,0	30,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0	23,0	24,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende: wie Seite 171



**Bild 8.16** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages gültig für die Optimierungsvariante I



**Bild 8.17** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante I

### Feststellungen I

- Um 11<sup>00</sup> Uhr endet die **Kaltwasserbeaufschlagung** (16 °C). Es wird zu dieser Zeit praktisch keine Wärme mehr vom Rohr aufgenommen, denn es gelten: Wasseraustrittstemperatur = Wassereintrittstemperatur und  $Q_{R1} = 0,07$  Wh.

Analoge Verhältnisse liegen um 23<sup>00</sup> Uhr am Ende der **Warmwasserbeaufschlagung** (30 °C) vor.

- Der **Nutzungsgrad des Speichers** nach Gl. (8.1) errechnet sich mit den nachfolgenden Größen zu:

$$Q_{S,max} = 29,86 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 30 \text{ °C})$$

$$Q_{S,min} = 6,29 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 16 \text{ °C})$$

*Hinweis:* Die theoretischen Extremwerte sind etwas kleiner als die Hälfte der Basisvariante (Seite 173), obwohl die Höhe des Simulationsgebietes genau halbiert wurde. Dies ist dennoch richtig, da das im Simulationsgebiet liegende Viertelrohr stets die gleichen Abmessungen besitzt und somit nicht anteilig verringert wurde. Das Rohrvolumen bleibt bei der Ermittlung der Speicherenthalpie unbeachtet.

$$Q_{SZ,max} = 29,84 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 71 \text{ (} 23^{00} \text{ Uhr)})$$

$$Q_{SZ,min} = 6,32 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 59 \text{ (} 11^{00} \text{ Uhr)})$$

$$\varepsilon = \frac{29,84 - 6,32}{29,86 - 6,29} = 0,998.$$

- Der Speicher bedarf wärmetechnisch keiner weiteren Verbesserung (ideales Ergebnis)!

Die folgenden **Temperatur- und Phasenzustandsverteilungen** für den dritten Simulationstag sind wiederum in den im Bild 8.9 gezeigten Schnittebenen aufgenommen und somit direkt vergleichbar. Der Höhenaufbau in j-Richtung ist bei Optimierungsvariante I gegenüber der Basisvariante verringert.

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
6	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
5	16,04	16,04	16,04	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
4	16,04	16,04	16,04	16,04	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
3	16,04	16,04	16,04	16,04	16,04	16,05	16,05	16,05	16,05
2	16,04	16,04	16,04	16,04	16,04	16,04	16,05	16,05	16,05
1	16,03	16,03	16,04	16,04	16,04	16,04	16,05	16,05	16,05
0	16,00	16,03	16,04	16,04	16,04	16,04	16,05	16,05	16,05

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr in

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr

feste Phase

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,04	16,05	16,06	16,07	16,09	16,11	16,13	16,16	16,19	16,23	16,28
6	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,04	16,05	16,06	16,07	16,09	16,10	16,13	16,16	16,19	16,23	16,28
5	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,04	16,05	16,07	16,08	16,10	16,13	16,15	16,19	16,23	16,27	
4	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,03	16,04	16,05	16,06	16,08	16,10	16,12	16,15	16,18	16,22	16,26
3	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,03	16,04	16,05	16,06	16,08	16,09	16,11	16,14	16,17	16,21	16,25
2	16,00	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,04	16,05	16,06	16,07	16,08	16,10	16,13	16,15	16,19	16,22
1	16,00	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,04	16,05	16,06	16,07	16,09	16,11	16,13	16,16	16,19	
0	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,01	16,01	16,01	16,01	16,02	16,02	16,03	16,03	

Rohr im Längsschnitt

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr im Längsschnitt

feste Phase

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	29,96	29,96	29,96	29,96	29,95	29,95	29,95	29,95	29,95
6	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,95	29,95	29,95	29,95
5	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,95	29,95	29,95
4	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,95	29,95
3	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,95	29,95
2	29,97	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96
1	29,97	29,97	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96
0	30,00	29,97	29,97	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96	29,96

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Rohr

flüssige Phase

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,97	29,96	29,96	29,95	29,93	29,92	29,90	29,87	29,85	29,81	29,77	29,73	
6	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,97	29,96	29,95	29,93	29,92	29,90	29,88	29,85	29,81	29,77	29,73
5	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,97	29,96	29,95	29,94	29,92	29,90	29,88	29,85	29,82	29,78	29,74
4	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,97	29,96	29,95	29,94	29,92	29,91	29,88	29,86	29,83	29,79	29,75
3	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,98	29,97	29,96	29,95	29,94	29,93	29,91	29,89	29,87	29,84	29,80	29,76
2	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,97	29,96	29,95	29,93	29,92	29,90	29,88	29,85	29,82	29,78	
1	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,96	29,95	29,94	29,93	29,91	29,90	29,87	29,84	29,81	
0	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	29,99	29,99	29,99	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,97	

Rohr im Längsschnitt

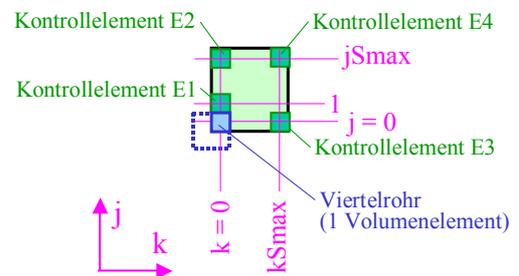
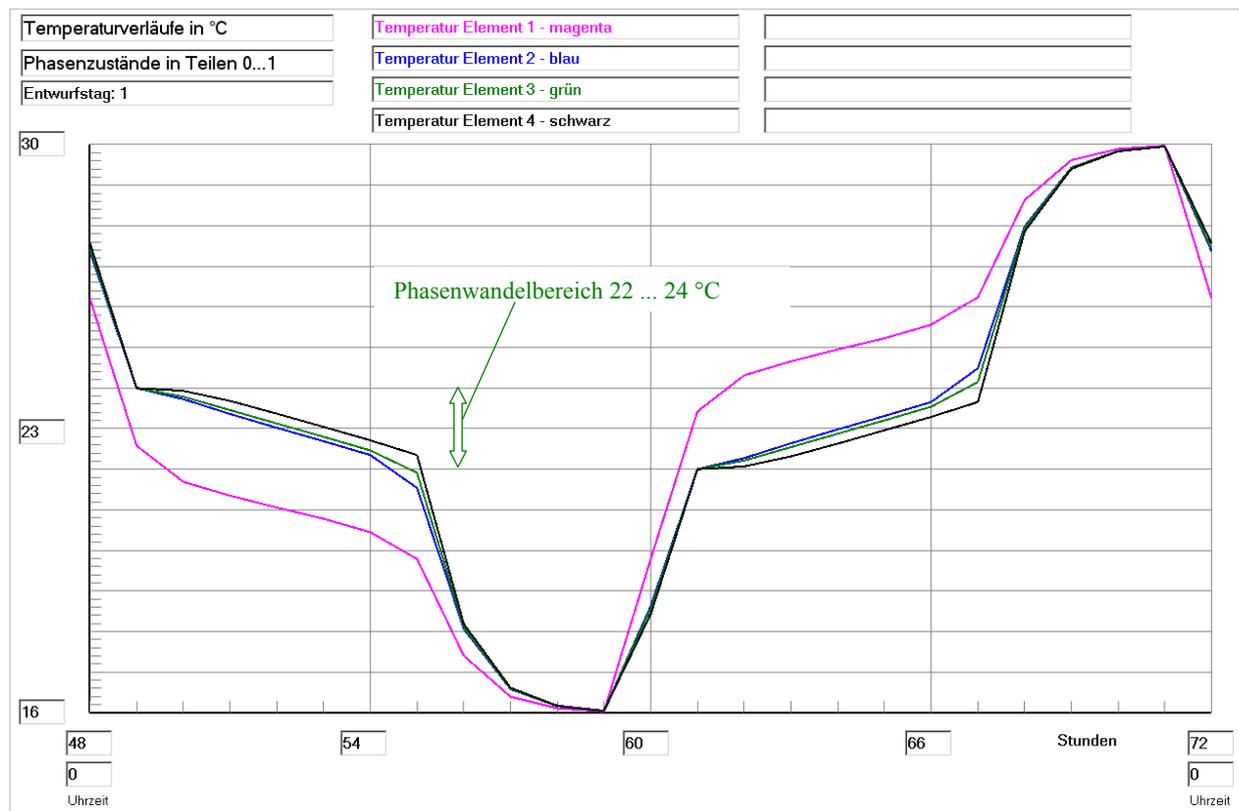
Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene  $k = 0$  zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

flüssige Phase

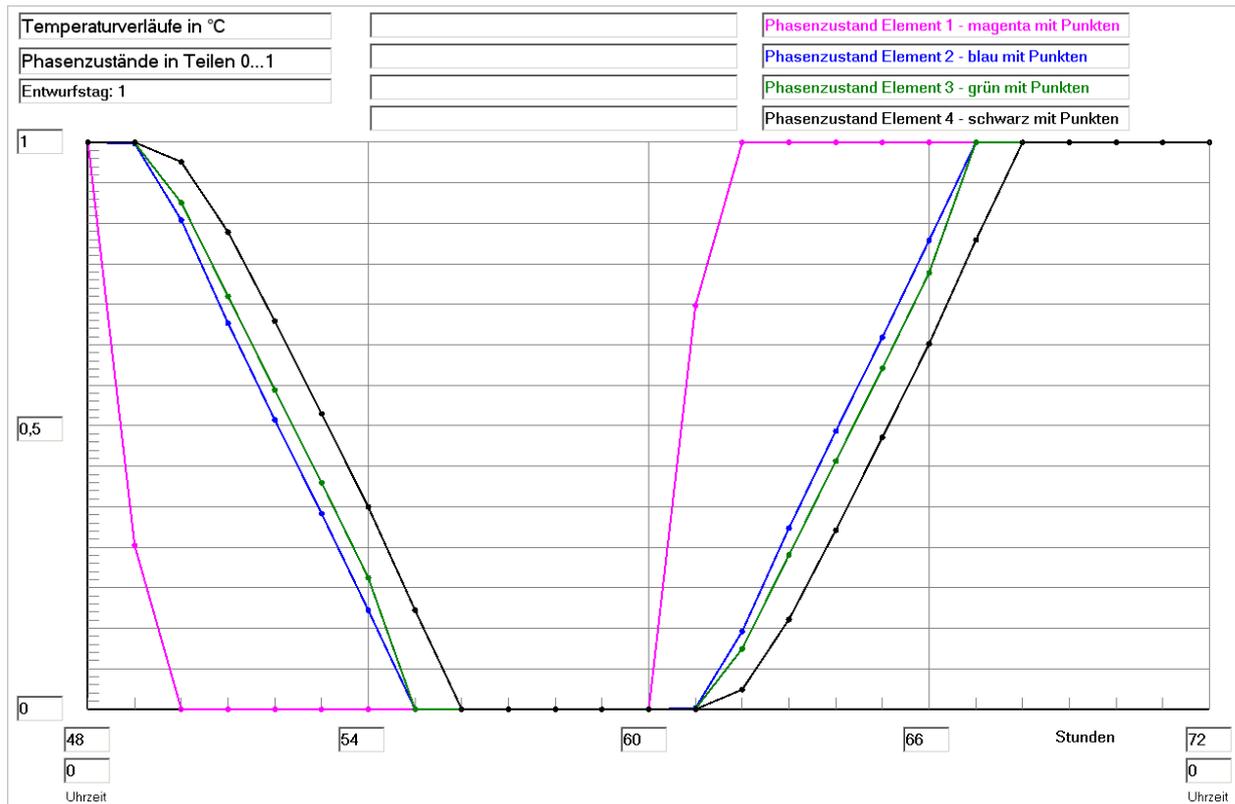
Rohr im Längsschnitt

In den Bildern 8.18 und 8.19 folgen die zeitlichen Verläufe der Temperaturen und der Phasenzustände für die vier exponierten Volumenelemente E1 ... E4.



**Bild 8.18** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe rechte Skizze) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante I

Die Elemente liegen etwa in der halben Speicherränge bei  $i = 10$ . Die  $i$ -Richtung zeigt in die Tafelenebene hinein.



**Bild 8.19** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante I

## Feststellungen II

- Der bereits ermittelte, ideale Speichernutzungsgrad von ca.  $\varepsilon = 1$  ergibt sich aufgrund der **sehr ausgeglichenen Temperaturverteilungen im Speicherkörper**. Sie zeigen sich sowohl am Ende der Abkühlphase um 11<sup>00</sup> Uhr als auch am Ende der Aufheizphase um 23<sup>00</sup> Uhr. In den betrachteten Schnittebenen weichen die Temperaturen der Volumenelemente nur maximal 0,28 K von der jeweiligen Wassereintrittstemperatur ab.
- Am Ende der Kaltwasserbeaufschlagung (16 °C) liegt das gesamte Speichermaterial in fester Phase vor. Analog dazu ist am Ende der Warmwasserbeaufschlagung (30 °C) das gesamte Material geschmolzen. Somit wird das **Latentspeichermaterial wärmetechnisch vollständig ausgenutzt**.  
Im Gegensatz zum Basisbeispiel existieren keine "gelben" Phasenwandelbereiche mehr.
- Die Temperatur- und Phasenzustandsverläufe der vier ausgewählten Volumenelemente E1 ... E4 (Skizze im Bild 8.18) zeigen:
  - Alle Volumenelemente durchlaufen den Phasenwandelbereich (22 °C ... 24 °C) komplett.
  - Die Temperaturänderung im Phasenwandelbereich ist bedeutend flacher als außerhalb.
  - Die Volumenelemente E2 und E3 sind im thermischen Verhalten nahezu identisch, was durch etwa die gleichen Abstände zum Rohr begründet ist. Demgegenüber bewirkt der etwas größere Abstand des Volumenelementes E4 eine verzögerte Temperatur- und Phasenänderung.
- Die Speicheroptimierung ist gelungen!

## 8.5 Optimierungsvariante II: Größere Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials

Es wird der Speicher nach Bild 8.2 mit seinen im Abschnitt 8.3 formulierten wärmetechnischen Randbedingungen verwendet. Um den Nutzungsgrad des Speichers zu verbessern, soll die Wirkung einer **höheren Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials** untersucht werden. Zu diesem Zweck sei die Wärmeleitfähigkeit von 0,6 W/(m K) auf 1,2 W/(m K) erhöht. Als Konsequenz muss zur Einhaltung des Stabilitätskriteriums gemäß Gl. (3.35) die Zeitschrittweite von bisher 4 s auf 2 s gesenkt werden.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\OPT1\_II\

### Speicher mit sensiblem / latentem Speichermaterial und integrierten Rohr- und Kanalregistern

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	1,75	1380,0	1,200	1,200	2500,0	2500,0	120,0	22,0	24,0	15

Legende: wie Seite 166

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1: 0,0280 m  
Höhe der Schicht 2: 0,0000 m  
Höhe der Schicht 3: 0,0000 m  
Breite des Speicherkörpers (Simulationsausschnitt): 0,0149 m  
Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 2,0000 m

Delta_x mm	Delta_z mm	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
				R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
100,00	1,65	19	8	1,13000	1,13000	1,13000	1,13000

Legende: wie Seite 167

### Geometrie der Rohre und Kanäle

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

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 1

} wie Basisvariante  
Seiten 167/168

### Allgemeine Simulationsdaten:

Entwurfstag: 1  
Startzeit: 0 Uhr Starttemperatur: 20,0 °C  
Zeitschritt: 2 s Anzahl der Zeitschritte: 129600 Simulationszeit: 72 Stunden  
Zur Ermittlung der Speicherenthalpie gilt die Bezugstemperatur: 0,0 °C

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden	BS	TZ	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
			Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
48	0	0,00	-0,76	-	-	-	-	53,66	0,00	0,0
49	1	0,00	2,45	-	-	-	-	51,21	0,00	0,0
50	2	0,00	3,89	-	-	-	-	47,32	0,00	-0,0
51	3	0,00	3,68	-	-	-	-	43,64	0,00	-0,0
52	4	0,00	3,54	-	-	-	-	40,10	0,00	-0,0
53	5	0,00	3,43	-	-	-	-	36,66	0,00	0,0
54	6	0,00	3,33	-	-	-	-	33,33	0,00	-0,0
55	7	0,00	3,24	-	-	-	-	30,10	0,00	-0,0
56	8	0,00	3,14	-	-	-	-	26,96	0,00	-0,0
57	9	0,00	3,02	-	-	-	-	23,94	0,00	-0,0

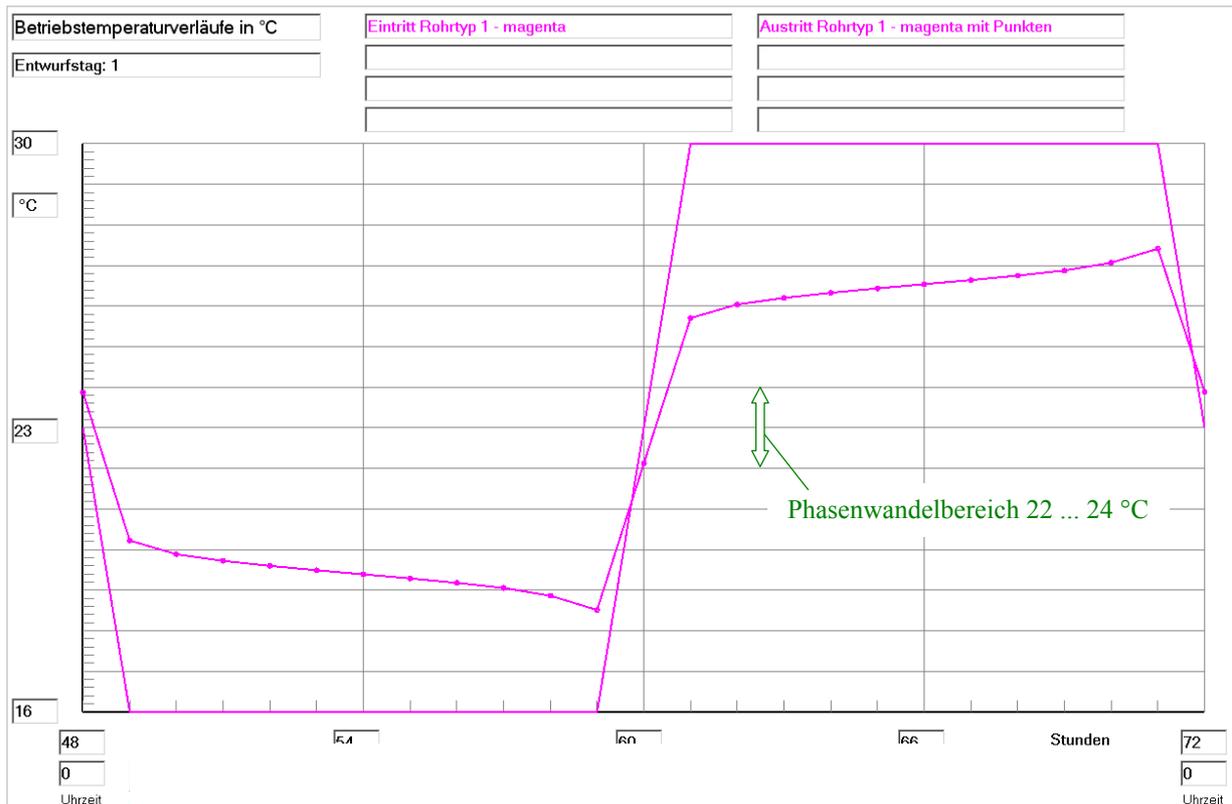
Stunden		QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
58	10	0,00	2,88	-	-	-	21,06	0,00	-0,0
59	11	0,00	2,62	-	-	-	18,44	0,00	-0,0
60	12	0,00	0,71	-	-	-	17,73	0,00	-0,0
61	13	0,00	-2,47	-	-	-	20,21	0,00	-0,0
62	14	0,00	-3,94	-	-	-	24,15	0,00	0,0
63	15	0,00	-3,73	-	-	-	27,87	0,00	0,0
64	16	0,00	-3,59	-	-	-	31,46	0,00	0,0
65	17	0,00	-3,48	-	-	-	34,94	0,00	-0,0
66	18	0,00	-3,38	-	-	-	38,32	0,00	0,0
67	19	0,00	-3,28	-	-	-	41,61	0,00	0,0
68	20	0,00	-3,18	-	-	-	44,78	0,00	-0,0
69	21	0,00	-3,07	-	-	-	47,85	0,00	0,0
70	22	0,00	-2,92	-	-	-	50,78	0,00	0,0
71	23	0,00	-2,66	-	-	-	53,44	0,00	0,0
72	0	0,00	-0,74	-	-	-	54,17	0,00	0,0

Legende: wie Seite 169

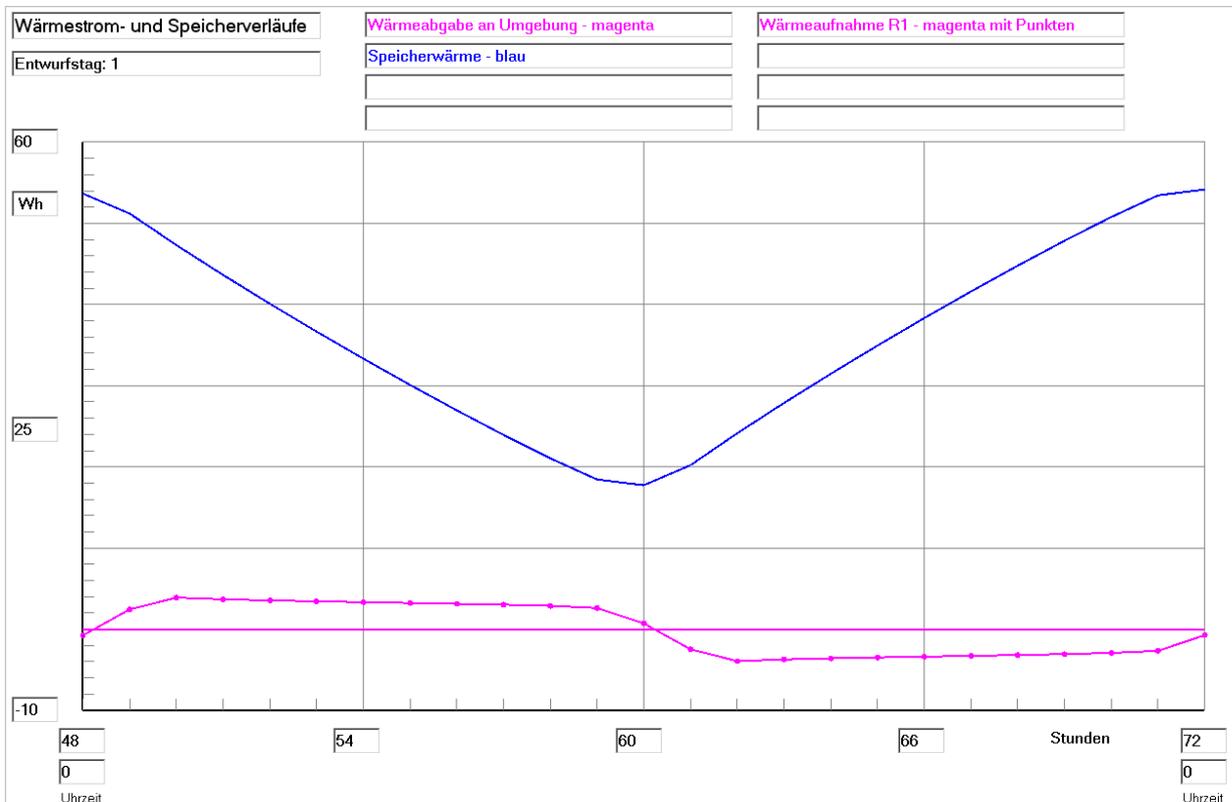
### Detaillierte Simulationsergebnisse für die Fluide (Werte am Ende der Stunde):

Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	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
48	0	23,0	23,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	1	16,0	20,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	2	16,0	19,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	3	16,0	19,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	4	16,0	19,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	5	16,0	19,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	6	16,0	19,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	7	16,0	19,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	8	16,0	19,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	9	16,0	19,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	10	16,0	18,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	11	16,0	18,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	12	23,0	22,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	13	30,0	25,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	14	30,0	26,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	15	30,0	26,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	16	30,0	26,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17	30,0	26,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18	30,0	26,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19	30,0	26,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20	30,0	26,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21	30,0	26,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22	30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23	30,0	27,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0	23,0	23,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende: wie Seite 171



**Bild 8.20** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante II



**Bild 8.21** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante II

**Feststellungen I**

- Um 11<sup>00</sup> Uhr – am Ende der **Kaltwasserbeaufschlagung** (16 °C) – nimmt das Rohr noch sehr viel Wärme auf. Demzufolge ist die Temperaturspannung zwischen Wasserein- und Wasseraustritt mit 2,5 K noch sehr groß.

Ähnlich verhält es sich mit der Wasserabkühlung um 23<sup>00</sup> Uhr – also am Ende der **Warmwasserbeaufschlagung** (30 °C) –, wobei die Temperaturspannung 2,6 K beträgt.

- Die Enthalpie des Speicherkörpers steigt beim Vergleich zwischen der 48. und 72. Stunde noch um ca. +1 % an. Damit ist die Optimierungsvariante II **näher am eingeschwungenen Zustand** als die Basisvariante, bei der der Unterschied etwa +2,6 % betrug.
- Der **Nutzungsgrad des Speichers** nach Gl. (8.1) errechnet sich mit den nachfolgenden Größen zu:

$$Q_{S,max} = 60,15 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 30 \text{ °C})$$

$$Q_{S,min} = 12,66 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 16 \text{ °C})$$

*Hinweis:* Die theoretischen Extremwerte sind identisch mit der Basisvariante (Seite 173), da die veränderte Wärmeleitfähigkeit selbstverständlich keinen Einfluss auf das Speichervermögen bei unendlich langer Abkühl- bzw. Aufheizphase hat.

$$Q_{SZ,max} = 54,17 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 72 \text{ (0}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$Q_{SZ,min} = 17,73 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 60 \text{ (12}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$\varepsilon = \frac{54,17 - 17,73}{60,15 - 12,66} = 0,767.$$

- Damit liegt der Nutzungsgrad zwar bedeutend höher als bei der Basisvariante (0,637) aber deutlich unter dem Idealergebnis der Optimierungsvariante I ( $\varepsilon \approx 1$ ).

Zur genauen Ursachenforschung ist es interessant zu wissen, wie sich die **detaillierten Temperatur- und Phasenzustandsverteilungen** darstellen. Letztere werden anschließend für den 3. Simulationstag für die Zeiten 11<sup>00</sup> Uhr und 23<sup>00</sup> Uhr wiedergegeben. Zur besseren Veranschaulichung erfolgt die direkte Gegenüberstellung der Basisvariante und der Optimierungsvariante II.

**Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr Basisvariante**

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
14	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
13	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
12	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25
11	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21
10	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
9	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr

**Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr Optimierungsvariante II**

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
14	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19
13	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
10	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
9	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr

teilweiser Phasenwandel

feste Phase

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 11<sup>00</sup> Uhr

Basisvariante

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	0,23	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
14	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
13	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29
12	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
11	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
10	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

teilweiser Phasenwandel

feste Phase

Rohr im Längsschnitt

Optimierungsvariante II

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,12	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,10	0,15	0,17	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,13	0,15	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,08	0,10	0,13	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,08	0,11	0,12	0,14	0,17	0,18	0,19
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,08	0,10	0,12	0,13
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,13
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,07	0,08
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

teilweiser Phasenwandel

feste Phase

Rohr im Längsschnitt

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

Basisvariante

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55
14	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,56
13	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58
12	0,62	0,62	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,60
11	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64
10	0,72	0,71	0,71	0,71	0,70	0,69	0,69	0,69	0,68
9	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,74	0,74
8	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,80
7	0,96	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,88	0,87
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,95
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

Optimierungsvariante II

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
15	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
14	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
13	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
12	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82
11	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85
10	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89
9	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

teilweiser Phasenwandel

flüssige Phase

Rohr

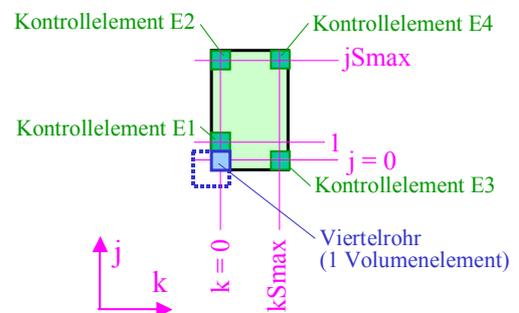
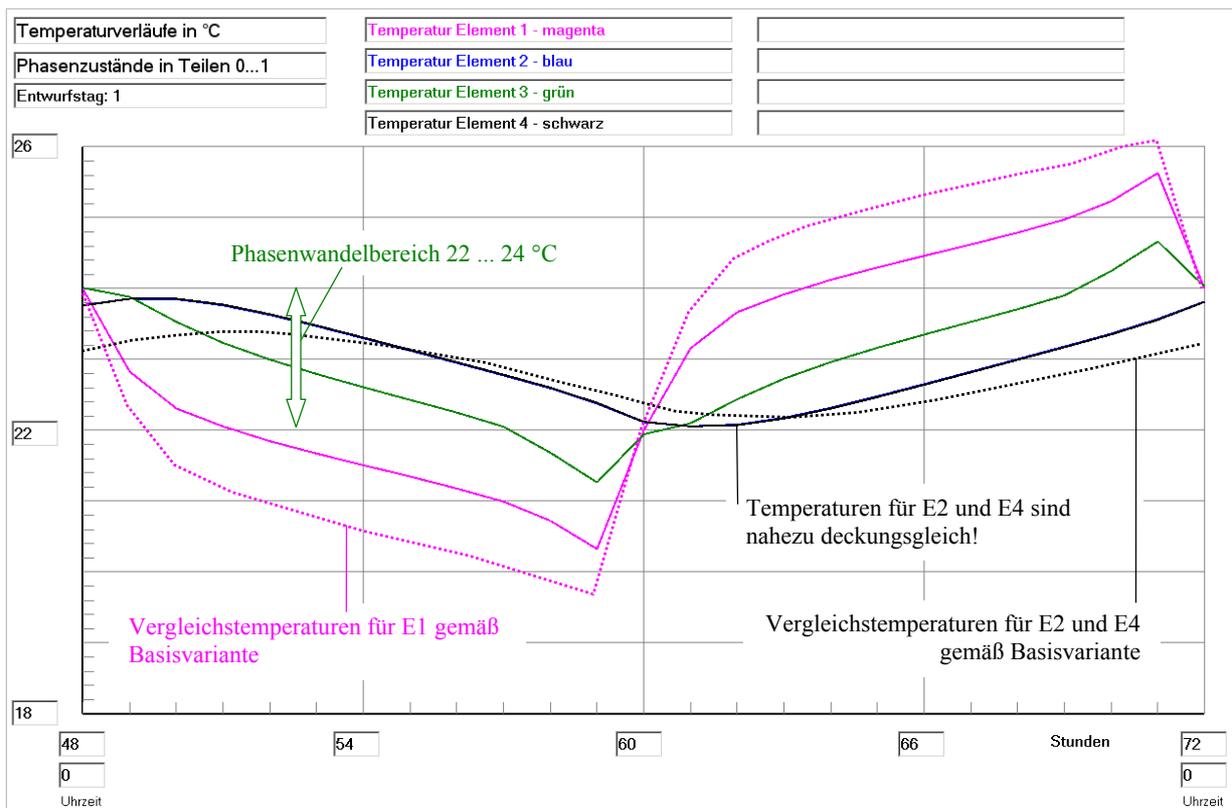
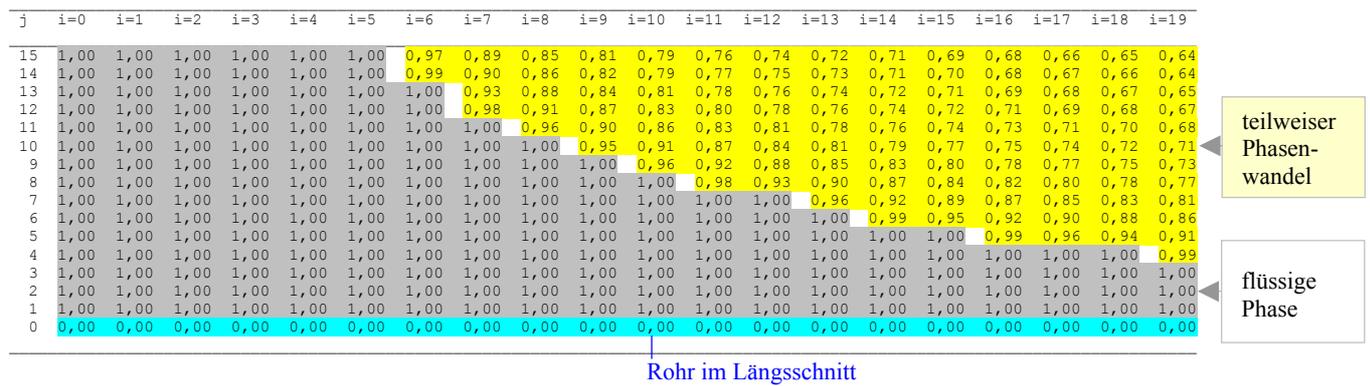
Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

Basisvariante

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
15	0,73	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,61	0,60	0,59	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48
14	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,63	0,61	0,60	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
13	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,53	0,53	0,52	0,51	0,50
12	0,83	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,64	0,62	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52
11	0,91	0,87	0,84	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,62	0,61	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55
10	1,00	0,97	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,65	0,64	0,62	0,61	0,60	0,59
9	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,92	0,89	0,86	0,83	0,81	0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,66	0,65	0,63
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0															

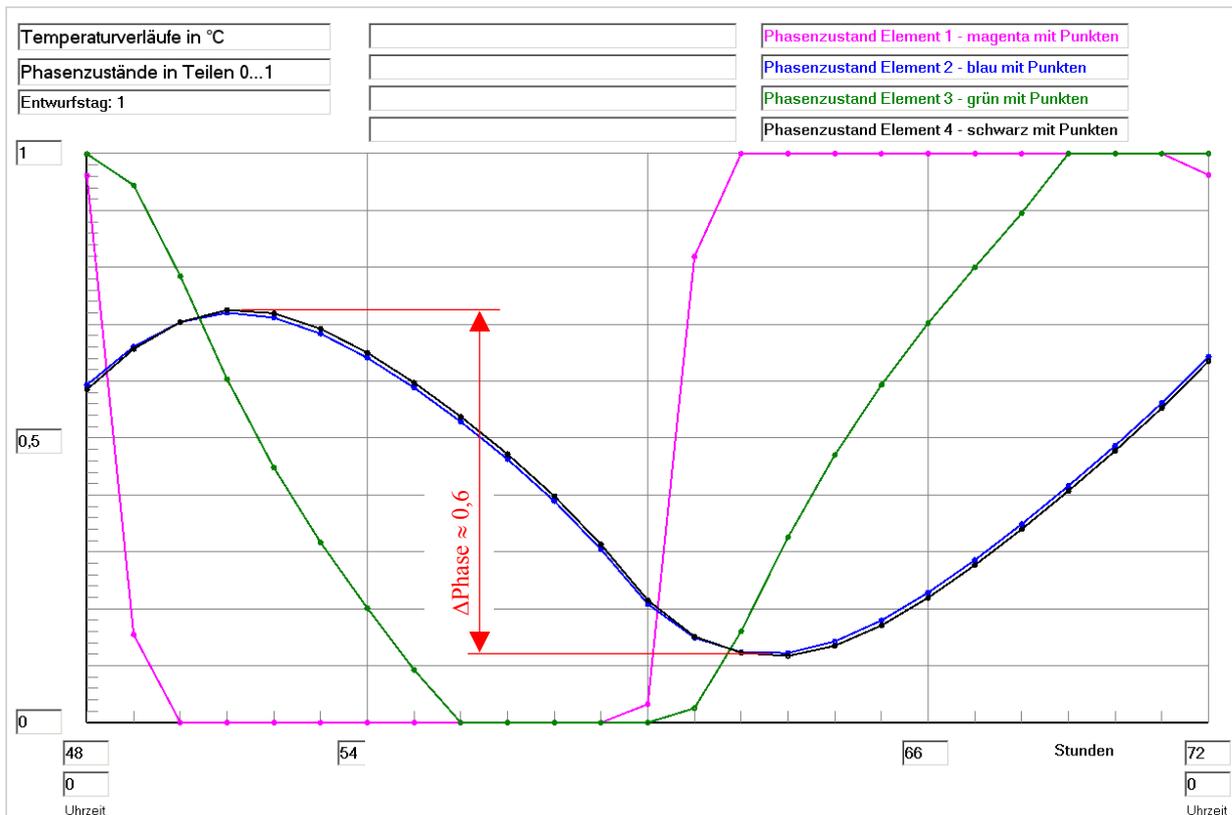
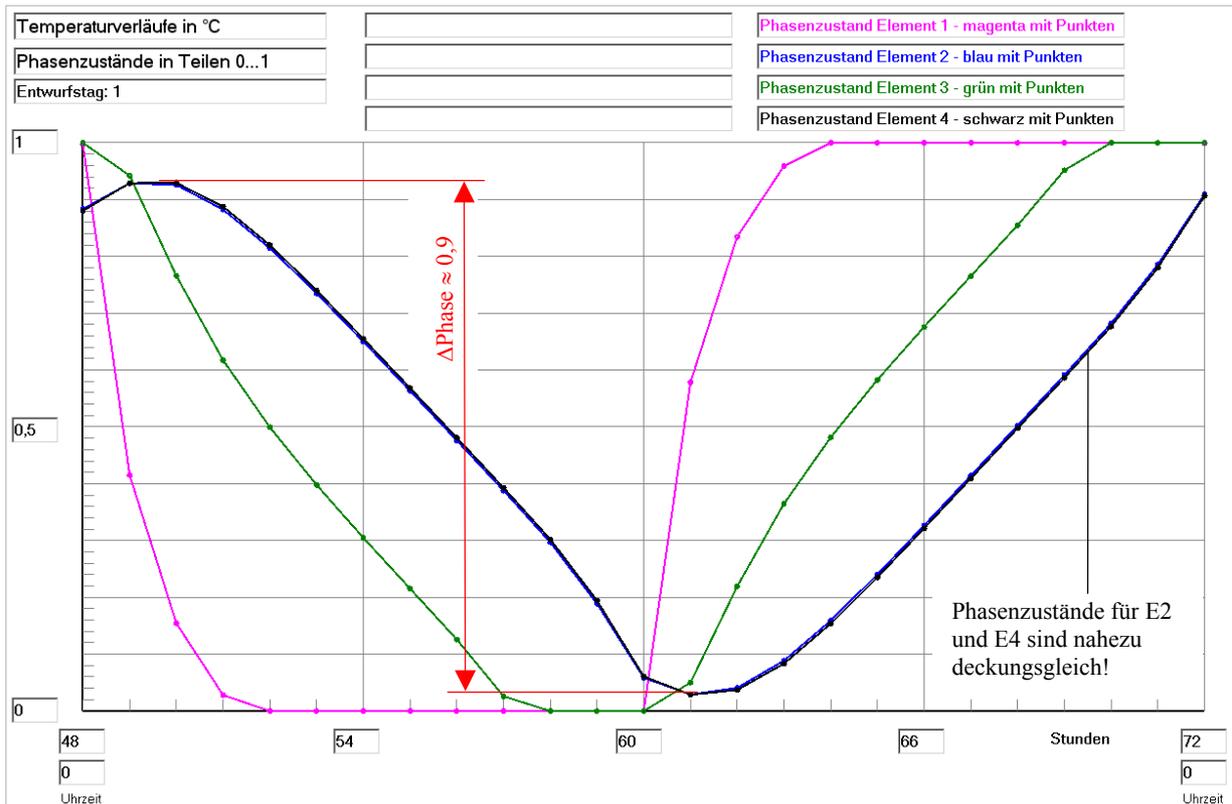
Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene  $k = 0$  zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

Optimierungsvariante II



**Bild 8.22** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe rechte Skizze) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante II  
 Zum Vergleich sind die Temperaturverläufe der Kontrollelemente E1, E3 und E4, die für die Basisvariante nach Bild 8.12 gelten, überlagert (gepunktete Linien).

Die Elemente liegen etwa in der halben Speicherränge bei  $i = 10$ .  
 Die  $i$ -Richtung zeigt in die Tafelenebene hinein.



**Bild 8.23** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.22) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72)

Bild oben: Optimierungsvariante II

Bild unten: Basisvariante nach Bild 8.13 zum Vergleich

## Feststellungen II

- Wie bereits festgestellt wurde, liegt der **Speichernutzungsgrad höher als bei der Basisvariante**, erreicht jedoch **nicht** den **Idealwert** von  $\varepsilon = 1$ . Demzufolge ist es interessant, die derzeitigen Ergebnisse denen der Basisvariante gegenüberzustellen und im direkten Vergleich zu diskutieren.
- Die Ausdrücke der Phasenzustandsbereiche verdeutlichen, dass das **Latentspeichermaterial wärmetechnisch nicht vollständig aber besser als im Basisfall genutzt** wird:
  - Es durchlaufen nicht alle Volumenelemente den Phasenwandelbereich (22 °C ... 24 °C) komplett. Dies verdeutlichen die "gelben" Bereiche sowohl in den Querschnitten als auch in den Längsschnitten (siehe Seiten 189 bis 191).
  - Gegenüber der Basisvariante sind die Restbereiche des unvollständigen Wandels aber kleiner geworden. Dies wird vor allem in den Längsschnitten deutlich. Auch sind z. B. die Phasenanteile an geschmolzenem Speichermaterial am Ende der Warmwasserbeaufschlagung bei Optimierungsvariante II größer als im Basisfall.
- Die **Temperaturverläufe der vier ausgewählten Volumenelemente** E1 ... E4 (Skizze im Bild 8.22) zeigen **zwei gegenläufige Sachverhalte**:
  - Die Temperaturamplitude für das Volumenelement E1 verkleinert sich gegenüber der Basisvariante, da durch die höhere Wärmeleitfähigkeit die Wärme "besser" vom Rohr abfließt.
  - Die Amplitude der Temperaturschwingung in den Volumenelementen E2 und E4 vergrößert sich im Vergleich zur Basisvariante, da aufgrund der größeren Wärmeleitfähigkeit der Periodenwechsel zwischen Heizen und Kühlen an diesen entfernten Stellen spürbarer wird.
- Die Phasenzustandsverläufe der vier ausgewählten Volumenelemente E1 ... E4 (Skizze im Bild 8.22) demonstrieren sehr deutlich die Unterschiede beider Varianten:
  - Die bei der Optimierungsvariante II verringerte Temperaturänderung im Volumenelement E1 bewirkt einen langsameren Phasenwandel. In abgeschwächter Form trifft dies auch auf E3 zu.
  - Der **Phasenwandel** bei den **Volumenelementen E2 und E4** wird zu etwa **90 %** wirksam, bei der Basisvariante betrug dieser nur ca. 60 %.

### 8.6 Optimierungsvariante III: Einfluss der Periodendauer

Die bisherigen Untersuchungen zeigten, dass die Rohr- bzw. die Rohrregisterabstände entscheidenden Einfluss auf den Speichernutzungsgrad nehmen. So erwies sich die **Optimierungsvariante I** mit dem Rohrregisterabstand von 28 mm, der etwa auch dem Rohrabstand von 30 mm entspricht, als **wärmetechnisch ideal**. Als Nutzungsgrad wurde  $\varepsilon = 0,998$  erreicht.

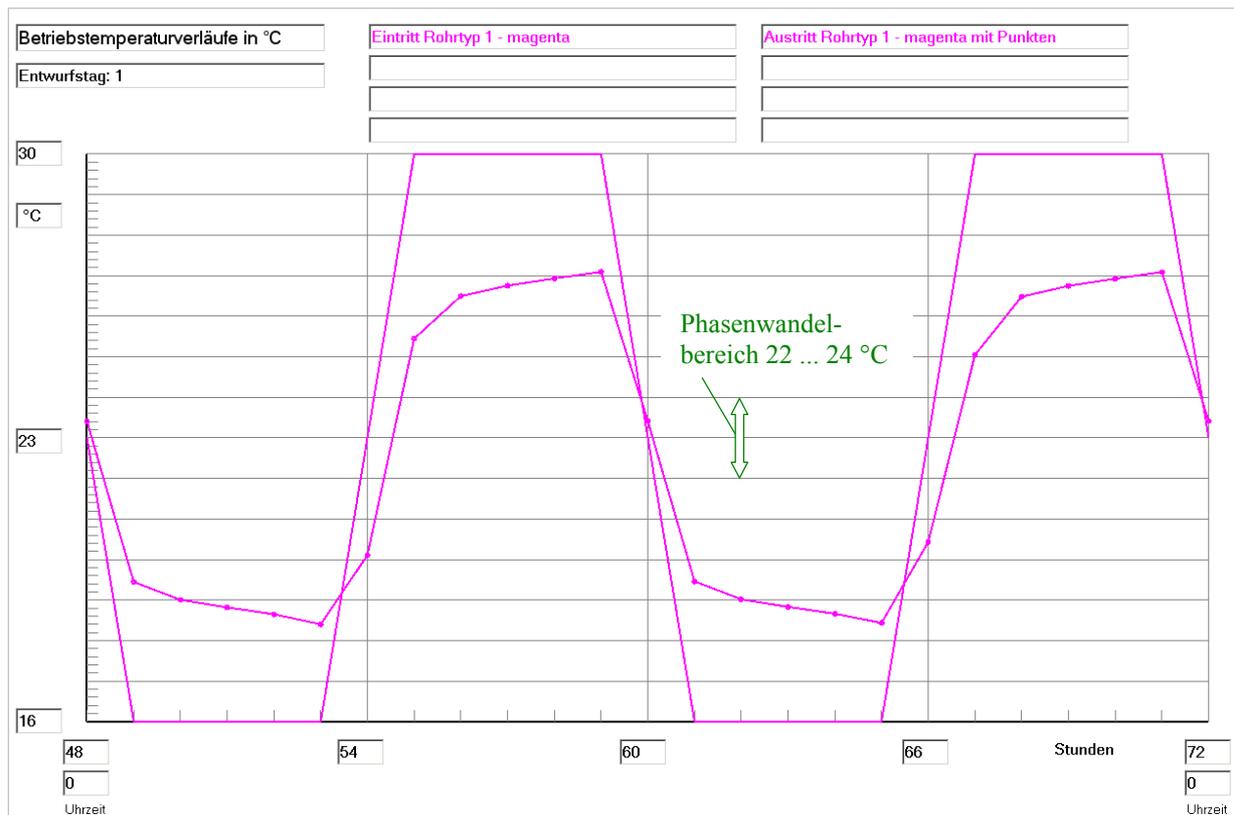
Bei der Aufzählung der Einflussfaktoren im Abschnitt 8.1 wurde bereits auch die Zyklusform der Temperaturfunktion genannt. Im Weiteren soll eine sehr einfache Variation des Be- und Entladezyklus erfolgen, indem die Optimierungsvariante I mit allen bekannten Abmessungen und Stoffgrößen verwendet wird, jedoch die **Periodendauer eine Halbierung** erfährt. Bild 8.24 zeigt den neuen Verlauf, der ansonsten wie im Vergleichsbeispiel durch die gleiche Amplitudengröße und die Symmetrie der Schwingung bezogen auf den Phasenwandelbereich charakterisiert wird.



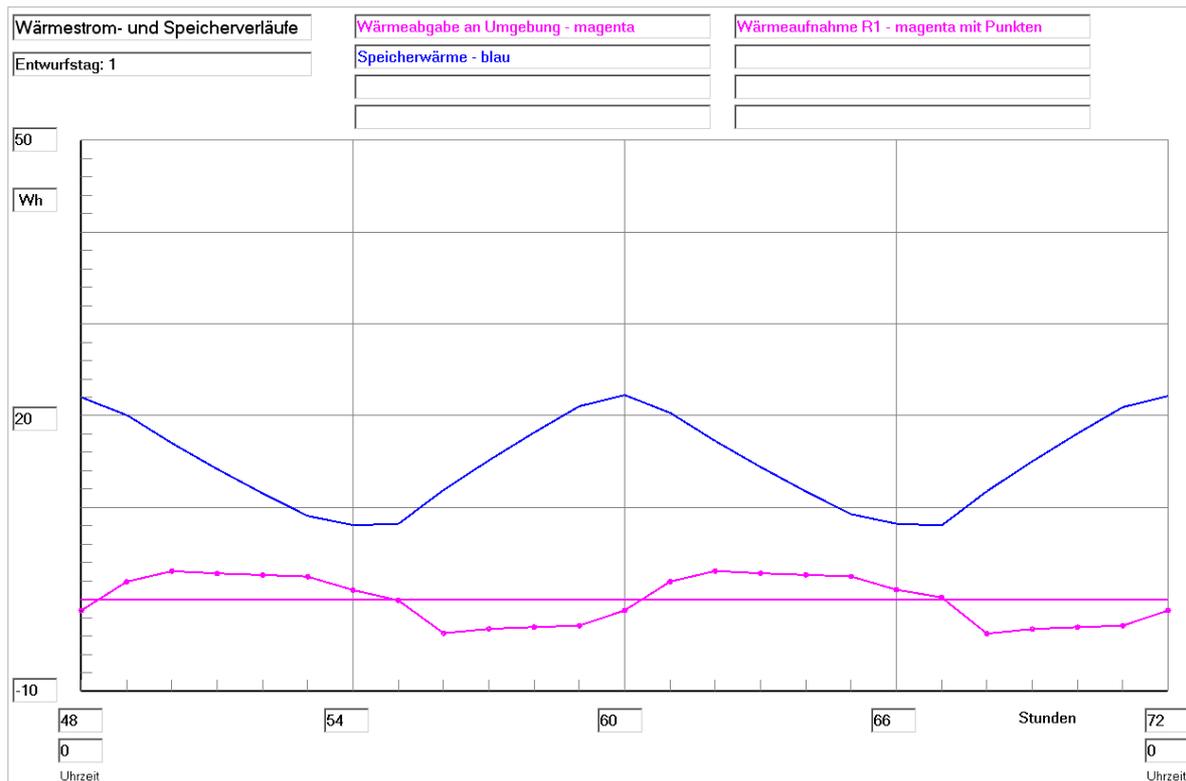


Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h
53	5	16,0	18,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	6	23,0	20,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	7	30,0	25,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	8	30,0	26,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	9	30,0	26,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	10	30,0	26,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	11	30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	12	23,0	23,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	13	16,0	19,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	14	16,0	19,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	15	16,0	18,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	16	16,0	18,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17	16,0	18,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18	23,0	20,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19	30,0	25,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20	30,0	26,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21	30,0	26,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22	30,0	26,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23	30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0	23,0	23,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende: wie Seite 171



**Bild 8.25** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante III



**Bild 8.26** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante III

### Feststellungen I

- Am Ende der **Kaltwasserbeaufschlagung** (16 °C) und auch am Ende der **Warmwasserbeaufschlagung** (30 °C) findet noch ein intensiver Wärmeaustausch zwischen Rohr und Speichermaterial statt. Dies ist ein eindeutiger Hinweis dafür, dass innerhalb der jetzt verkürzten Periode die **Speicherausnutzung ungenügend** ist.
- Der **Nutzungsgrad des Speichers** nach Gl. (8.1) ergibt sich mit den nachfolgenden Größen zu:
 
$$Q_{S,max} = 29,86 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 30 \text{ °C})$$

$$Q_{S,min} = 6,29 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 16 \text{ °C})$$

$$Q_{SZ,max} = 22,15 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 72 \text{ (0}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$Q_{SZ,min} = 8,03 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 67 \text{ (19}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$\varepsilon = \frac{22,15 - 8,03}{29,86 - 6,29} = 0,599.$$
- Der Speicher zeigt infolge der Periodenverkürzung eine sehr deutliche wärmetechnische Verschlechterung, da der Nutzungsgrad von 1 auf 0,6 abfällt. Um an die früheren idealen Verhältnisse anzuknüpfen, müssten beispielsweise die Rohr- und Rohrregisterabstände verringert werden.

Die folgenden **Temperatur- und Phasenzustandsverteilungen** um 23<sup>00</sup> Uhr am Ende des dritten Simu-

lationstages (≡ 6. Periode) verdeutlichen die ungenügende Speicherladung.

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	23,15	23,13	23,08	23,03	22,96	22,91	22,85	22,82	22,80
6	23,22	23,19	23,14	23,07	23,00	22,93	22,88	22,84	22,82
5	23,36	23,32	23,25	23,16	23,07	22,99	22,92	22,87	22,85
4	23,58	23,51	23,41	23,29	23,17	23,06	22,98	22,92	22,89
3	23,90	23,80	23,64	23,46	23,29	23,16	23,05	22,98	22,94
2	24,38	24,18	23,91	23,65	23,43	23,25	23,12	23,03	22,99
1	25,09	24,65	24,21	23,84	23,54	23,33	23,17	23,07	23,02
0	28,34	25,13	24,44	23,96	23,62	23,37	23,20	23,10	23,04

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	0,58	0,56	0,54	0,51	0,48	0,45	0,43	0,41	0,40
6	0,61	0,59	0,57	0,54	0,50	0,47	0,44	0,42	0,41
5	0,68	0,66	0,62	0,58	0,54	0,49	0,46	0,44	0,42
4	0,79	0,76	0,71	0,65	0,59	0,53	0,49	0,46	0,45
3	0,95	0,90	0,82	0,73	0,65	0,58	0,52	0,49	0,47
2	1,00	1,00	0,96	0,82	0,71	0,62	0,56	0,51	0,49
1	1,00	1,00	1,00	0,92	0,77	0,66	0,59	0,54	0,51
0	0,00	1,00	1,00	0,98	0,81	0,69	0,60	0,55	0,52

Rohr

teilweiser Phasenwandel

flüssige Phase

Feldtemperaturen im Längsschnitt der Ebene k = 0 in °C zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	23,61	23,55	23,50	23,45	23,40	23,35	23,31	23,27	23,23	23,19	23,15	23,12	23,08	23,05	23,02	22,99	22,96	22,93	22,91	22,88
6	23,70	23,64	23,58	23,53	23,48	23,43	23,38	23,34	23,30	23,26	23,22	23,18	23,15	23,11	23,08	23,05	23,02	22,99	22,96	22,93
5	23,90	23,83	23,76	23,70	23,64	23,59	23,54	23,49	23,44	23,40	23,36	23,31	23,28	23,24	23,20	23,17	23,13	23,10	23,07	23,04
4	24,22	24,14	24,06	23,97	23,91	23,85	23,79	23,73	23,67	23,62	23,58	23,53	23,48	23,44	23,40	23,36	23,32	23,28	23,25	23,21
3	24,64	24,55	24,46	24,38	24,30	24,24	24,17	24,10	24,03	23,96	23,90	23,85	23,80	23,74	23,69	23,64	23,59	23,55	23,51	23,47
2	25,20	25,11	25,01	24,92	24,84	24,76	24,68	24,60	24,52	24,45	24,38	24,32	24,26	24,19	24,13	24,07	24,01	23,95	23,90	23,85
1	26,04	25,94	25,83	25,72	25,62	25,53	25,44	25,35	25,26	25,17	25,09	25,01	24,93	24,85	24,78	24,71	24,63	24,56	24,50	24,44
0	29,91	29,74	29,58	29,41	29,25	29,09	28,93	28,78	28,63	28,48	28,34	28,19	28,05	27,92	27,78	27,65	27,52	27,39	27,27	27,15

Rohr im Längsschnitt

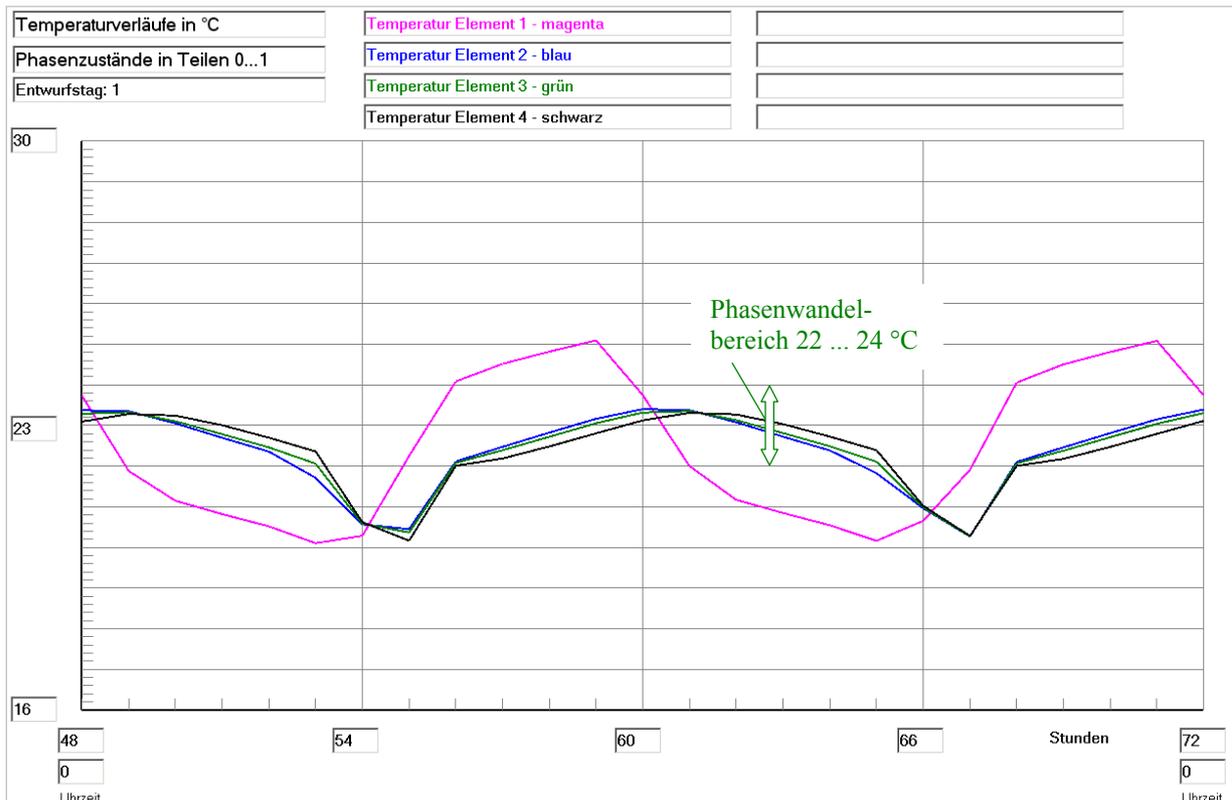
Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	0,80	0,78	0,75	0,72	0,70	0,68	0,65	0,63	0,61	0,59	0,58	0,56	0,54	0,53	0,51	0,49	0,48	0,47	0,45	0,44
6	0,85	0,82	0,79	0,76	0,74	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,48	0,47
5	0,95	0,92	0,88	0,85	0,82	0,80	0,77	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,57	0,55	0,53	0,52
4	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,61
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78	0,75	0,73
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,95	0,92
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

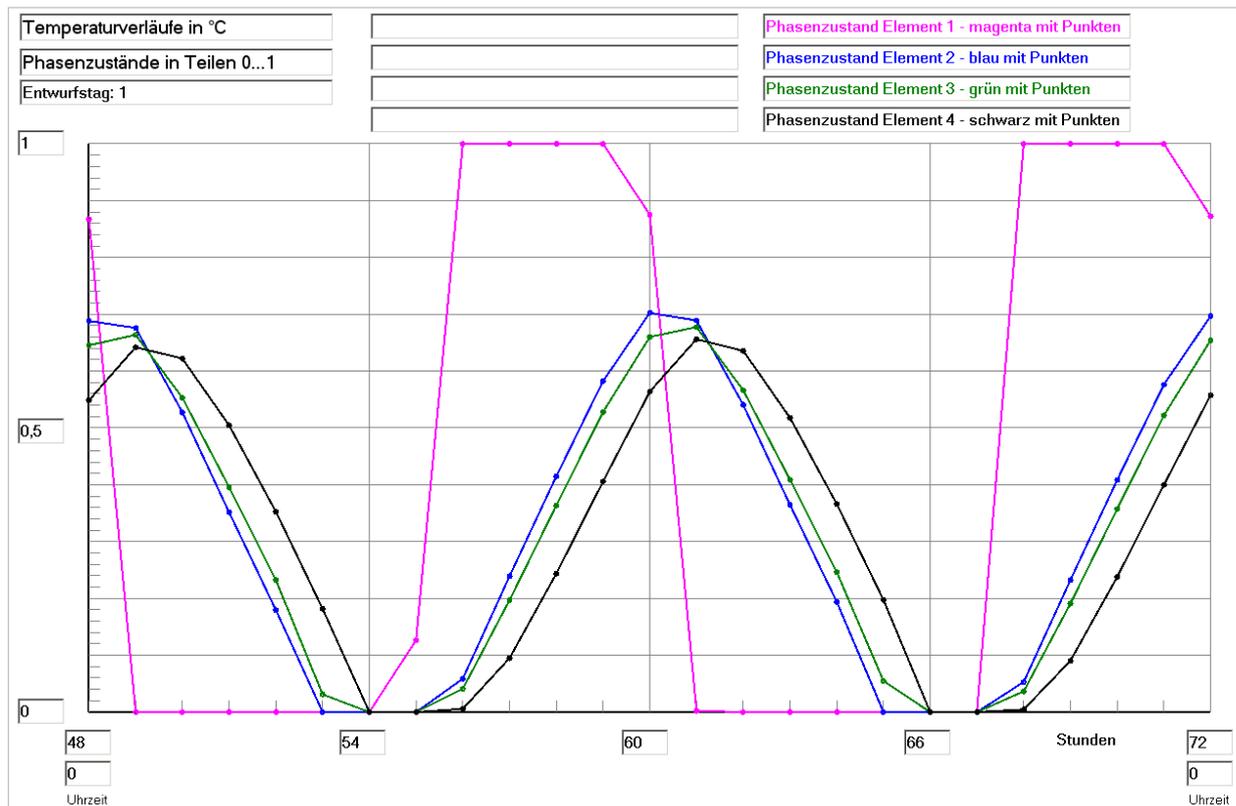
Rohr im Längsschnitt

teilweiser Phasenwandel

flüssige Phase



**Bild 8.27** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante III



**Bild 8.28** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante III

## Feststellungen II

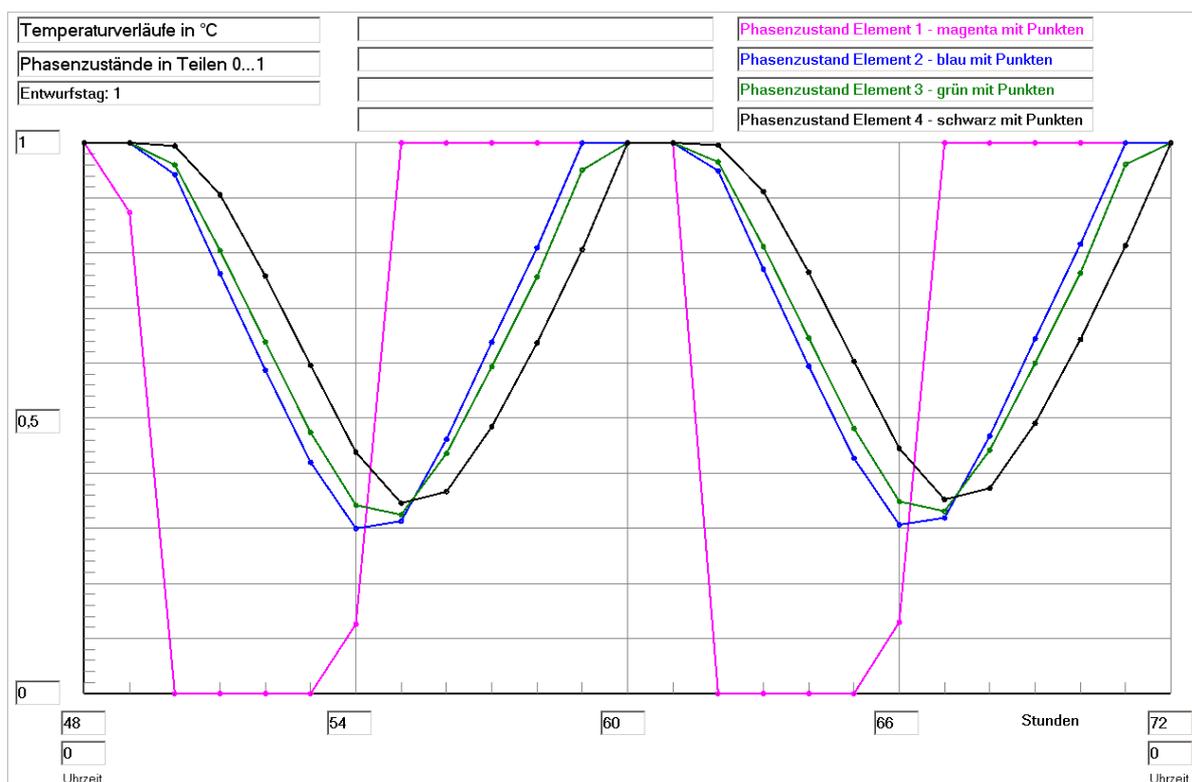
- Der ermittelte Speichernutzungsgrad von ca.  $\varepsilon = 0,6$  lässt auf eine **ungleichmäßige Temperaturverteilung im Speicherkörper** schließen. Die Ausdrücke der Feldtemperaturen bestätigen dies auch sowohl für den Quer- als auch für den Längsschnitt (Seite 198).  
Die "gelben" Bereiche, die den nur **unvollkommenen Phasenwandel** am Ende der Aufheizperiode angeben, drücken dies ebenfalls deutlich aus.  
Somit wird das **Latentspeichermaterial wärmetechnisch völlig ungenügend ausgenutzt**.
- Die **Temperatur- und Phasenzustandsverläufe der vier ausgewählten Volumenelemente E1 ... E4** (Skizze im Bild 8.18) zeigen gegenüber dem Optimierungsbeispiel I (Bilder 8.18 und 8.19) auffallende Unterschiede:
  - Bei der Tagesperiode (Bild 8.18) hebt sich der Temperaturverlauf für E1 zwar deutlich von den übrigen Temperaturverläufen E2 bis E4 ab, es ist aber keine Phasenverschiebung der Temperaturschwingungen erkennbar. Bei der halbierten Periodendauer (Bild 8.27) sind die Temperaturverläufe für E2 bis E4 gegenüber E1 deutlich zeitversetzt.
  - Für die Volumenelemente E2 und E3 sind die Temperaturverläufe aufgrund der etwa gleichen Rohrentfernung näherungsweise kongruent, der Verlauf von E4 ist wegen der größeren Entfernung zum Rohr nach hinten zeitverschoben.
  - Der Zeitversatz zeigt sich besonders deutlich beim Phasenwandel (Bild 8.28). Die Entfernungen zum Rohr werden akribisch nachgebildet. Nur das Volumenelement E1 durchläuft einen

kompletten Phasenwandel zwischen 0 und 1, während das Speichermaterial in den übrigen Volumenelementen nur zu maximal 70 % schmilzt ("flüssig wird").

- Die Speicheroptimierung hängt in bedeutendem Maße auch von der Länge der Temperaturperioden des Be- und Entladens ab.

### Untervariante: Veränderte Starttemperatur

Bild 8.28 zeigt, dass die Phasenwandlung für die Volumenelemente E2 ... E4 sich stets im unteren Bereich – beginnend beim festen Zustand (Phase = 0) – und nicht symmetrisch um die mittlere Phasenwandeltemperatur von 23 °C erstreckt. Dies liegt eindeutig – wie die nachfolgenden Simulationsergebnisse ausweisen – an der Starttemperatur von 20 °C (< Beginn des Phasenwandels). Wird diese auf 26 °C (> Ende des Phasenwandels) gesetzt, folgen Simulationsergebnisse, die quasi "spiegelbildlich" zum mittleren Phasenwandel liegen:



**Bild 8.28a** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante III mit der Starttemperatur von 26 °C

### Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:

Stunden	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
65	17	0,00	2,88	-	-	15,28	0,00	-0,0
66	18	0,00	1,21	-	-	14,07	0,00	-0,0
67	19	0,00	-1,91	-	-	15,99	0,00	-0,0
68	20	0,00	-3,08	-	-	19,07	0,00	0,0
69	21	0,00	-2,83	-	-	21,89	0,00	0,0
70	22	0,00	-2,66	-	-	24,55	0,00	0,0
71	23	0,00	-2,47	-	-	27,03	0,00	0,0
72	0	0,00	-1,02	-	-	28,05	0,00	0,0

Legende: wie Seite 169

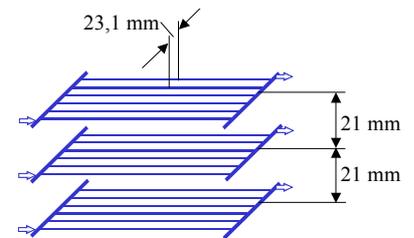
Der Speichernutzungsgrad bleibt trotz der veränderten Starttemperatur – abgesehen von Rundungsungenauigkeiten – gleich:

$$\varepsilon = \frac{28,05 - 14,07}{29,86 - 6,29} = 0,593.$$

**Optimierungsvorschlag**

Zur Verbesserung der Speichernutzung sollen – wie bei Optimierungsvariante I bereits erfolgreich getestet – die Rohr- und Rohrregisterabstände weiter verkleinert werden. Alle anderen Daten bleiben unverändert bestehen. Es gelten:

**OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\OPT1\_IIIA\**  
 iSmax = 19; jSmax = 5; kSmax = 6  
 Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:  
 Höhe der Schicht 1: **0,0105 m**  
 Höhe der Schicht 2: 0,0000 m  
 Höhe der Schicht 3: 0,0000 m  
 Breite des Speicherkörpers (Simulationsausschnitt): **0,0116 m**  
 Länge des Speicherkörpers (= Rohr- bzw. Kanallänge): 2,0000 m



**Simulationsergebnisse für den Speicher (Stundenwerte) am Entwurfstag 1:**

Stunden	QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
48 0	0,00	0,68	-	-	-	16,31	0,00	0,0
49 1	0,00	2,28	-	-	-	14,03	0,00	0,0
50 2	0,00	3,34	-	-	-	10,69	0,00	-0,0
51 3	0,00	2,99	-	-	-	7,70	0,00	-0,0
52 4	0,00	2,51	-	-	-	5,19	0,00	-0,0
53 5	0,00	1,31	-	-	-	3,88	0,00	-0,0
54 6	0,00	-0,68	-	-	-	4,56	0,00	-0,0
55 7	0,00	-2,28	-	-	-	6,85	0,00	-0,0
56 8	0,00	-3,35	-	-	-	10,20	0,00	0,0
57 9	0,00	-3,00	-	-	-	13,20	0,00	0,0
58 10	0,00	-2,51	-	-	-	15,70	0,00	0,0
59 11	0,00	-1,30	-	-	-	17,00	0,00	0,0
60 12	0,00	0,68	-	-	-	16,31	0,00	0,0
61 13	0,00	2,28	-	-	-	14,03	0,00	0,0
62 14	0,00	3,34	-	-	-	10,69	0,00	-0,0
63 15	0,00	2,99	-	-	-	7,70	0,00	-0,0
64 16	0,00	2,51	-	-	-	5,19	0,00	-0,0
65 17	0,00	1,31	-	-	-	3,88	0,00	-0,0
66 18	0,00	-0,68	-	-	-	4,56	0,00	-0,0
67 19	0,00	-2,28	-	-	-	6,85	0,00	-0,0
68 20	0,00	-3,35	-	-	-	10,20	0,00	0,0
69 21	0,00	-3,00	-	-	-	13,20	0,00	0,0
70 22	0,00	-2,51	-	-	-	15,70	0,00	0,0
71 23	0,00	-1,30	-	-	-	17,00	0,00	0,0
72 0	0,00	0,68	-	-	-	16,31	0,00	0,0

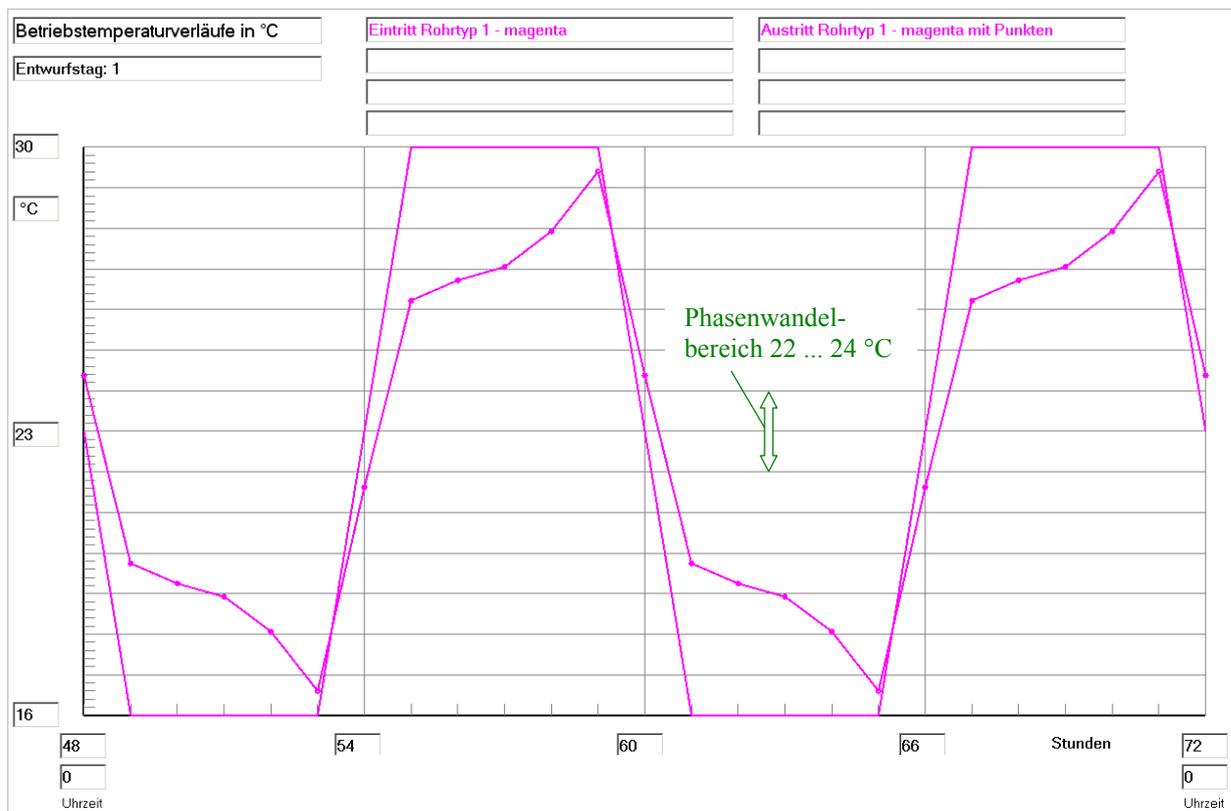
Legende: wie Seite 169

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

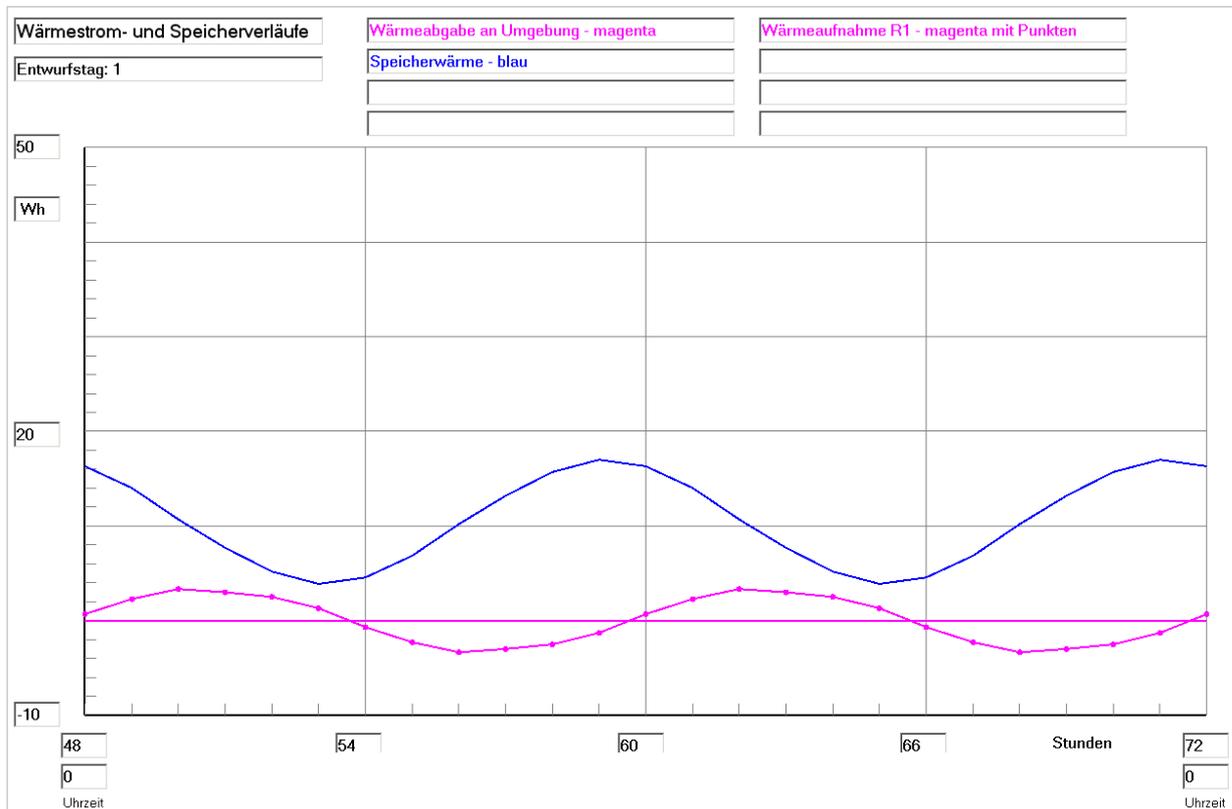
Stunden	Rohrtyp R1	Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
		Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h
48 0	23,0	24,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-
49 1	16,0	19,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-

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
50	2		16,0	19,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	3		16,0	18,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	4		16,0	18,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	5		16,0	16,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	6		23,0	21,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	7		30,0	26,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	8		30,0	26,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	9		30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	10		30,0	27,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	11		30,0	29,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	12		23,0	24,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	13		16,0	19,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	14		16,0	19,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	15		16,0	18,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	16		16,0	18,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17		16,0	16,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18		23,0	21,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19		30,0	26,2	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20		30,0	26,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21		30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22		30,0	27,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23		30,0	29,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0		23,0	24,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende: wie Seite 171



**Bild 8.29** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IIIa (verkleinerte Rohrabstände)



**Bild 8.30** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IIIa (verkleinerte Rohrabstände)

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
5	29,36	29,36	29,35	29,34	29,33	29,32	29,31
4	29,37	29,37	29,36	29,34	29,33	29,32	29,32
3	29,40	29,39	29,37	29,36	29,34	29,33	29,32
2	29,45	29,43	29,40	29,37	29,35	29,34	29,33
1	29,53	29,48	29,43	29,39	29,36	29,34	29,34
0	29,93	29,54	29,46	29,41	29,37	29,35	29,34

Rohr

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Rohr

flüssige Phase

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
5	29,95	29,93	29,91	29,88	29,84	29,80	29,74	29,67	29,59	29,49	29,36	29,21	29,01	28,78	28,49	28,14	27,71	27,18	26,54	25,77
4	29,95	29,93	29,91	29,88	29,85	29,80	29,75	29,68	29,60	29,50	29,37	29,22	29,04	28,81	28,52	28,18	27,76	27,24	26,61	25,86
3	29,95	29,94	29,91	29,89	29,85	29,81	29,76	29,70	29,62	29,52	29,40	29,26	29,08	28,86	28,59	28,26	27,86	27,37	26,77	26,05
2	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,78	29,72	29,65	29,56	29,45	29,32	29,16	28,95	28,71	28,40	28,03	27,58	27,03	26,37
1	29,96	29,95	29,93	29,91	29,89	29,85	29,81	29,76	29,70	29,63	29,53	29,42	29,28	29,11	28,90	28,64	28,32	27,93	27,46	26,89
0	30,00	30,00	30,00	29,99	29,99	29,98	29,98	29,97	29,96	29,95	29,93	29,91	29,89	29,86	29,82	29,77	29,72	29,65	29,56	29,46

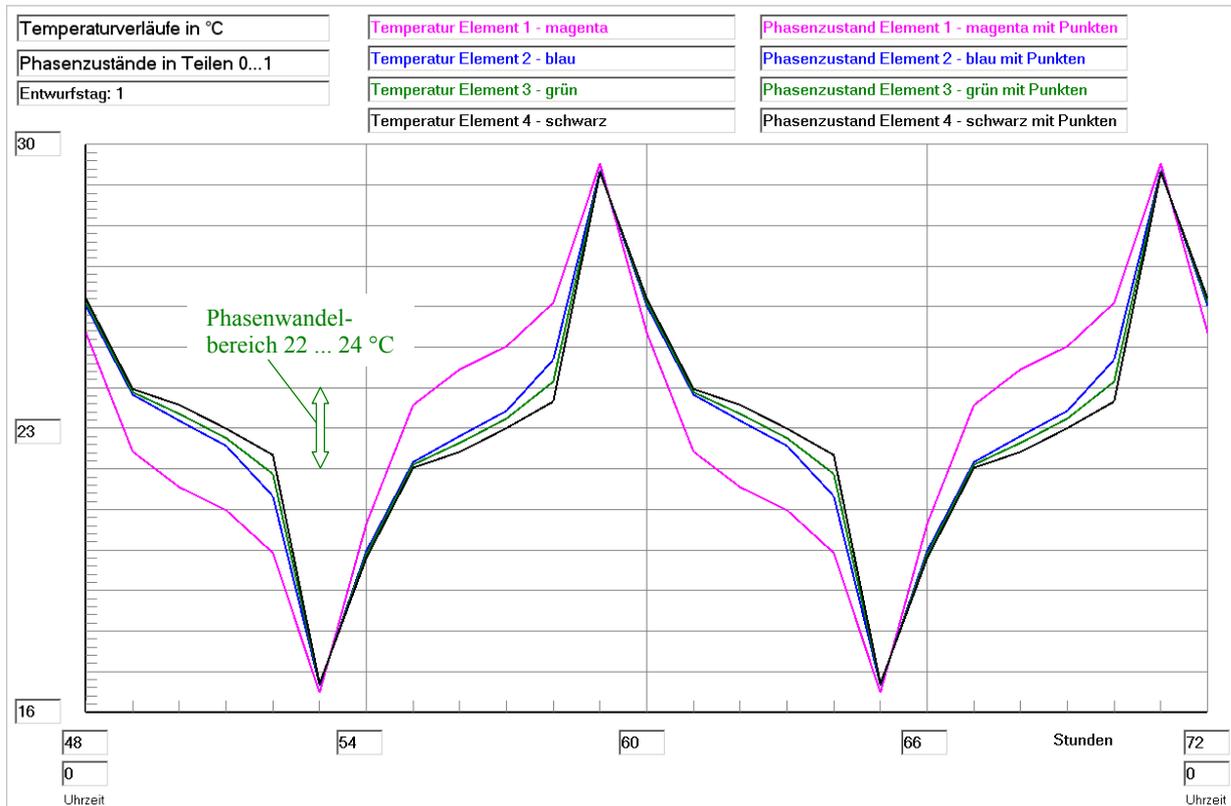
Rohr im Längsschnitt

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

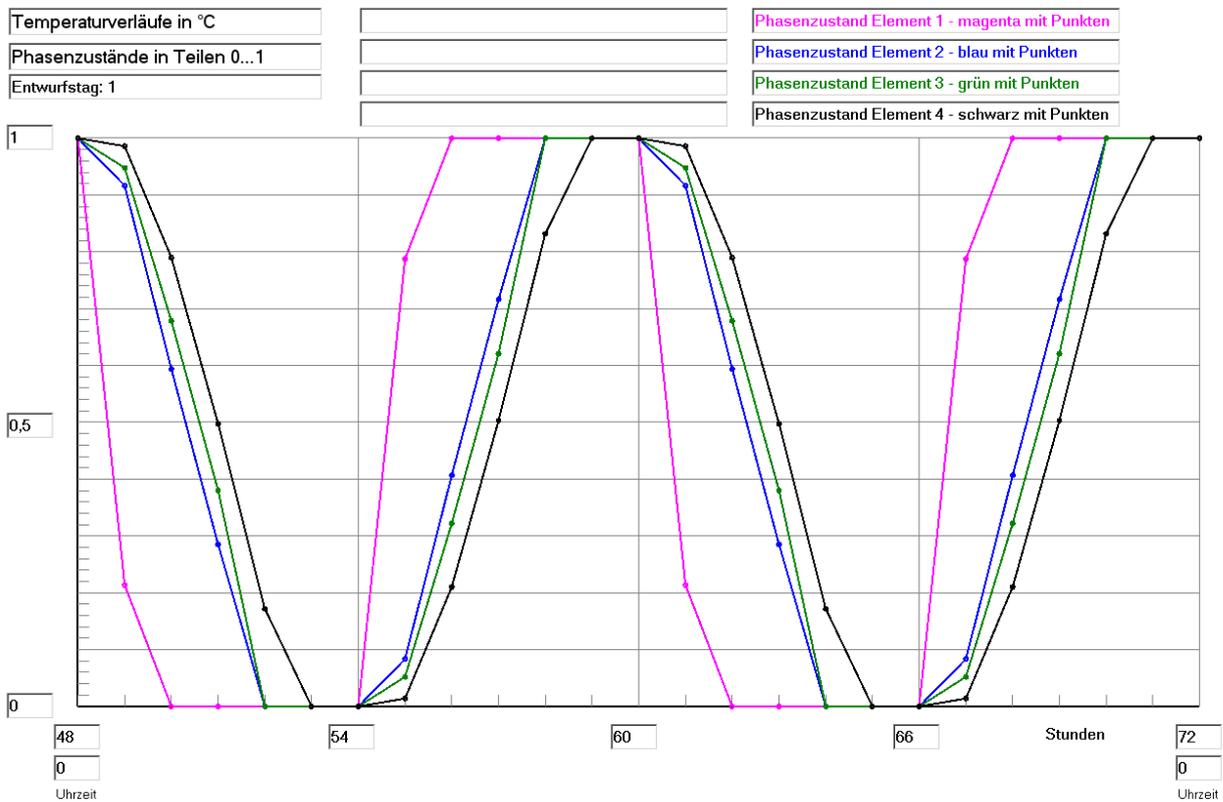
j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr im Längsschnitt

flüssige Phase



**Bild 8.31** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IIIa (verkleinerte Rohrabstände)



**Bild 8.32** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IIIa (verkleinerte Rohrabstände)

### Feststellungen III

- Durch die dichtere Rohranordnung im Speicherkörper steigt unter sonst unveränderten Bedingungen der **Nutzungsgrad des Speichers** nach Gl. (8.1) enorm an. Es gelten:

$$Q_{S,\max} = 17,24 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 30 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_{S,\min} = 3,63 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 16 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_{SZ,\max} = 17,00 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 71 \text{ (} 23^{00} \text{ Uhr)})$$

$$Q_{SZ,\min} = 3,88 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 65 \text{ (} 17^{00} \text{ Uhr)})$$

$$\varepsilon = \frac{17,00 - 3,88}{17,24 - 3,63} = 0,964.$$

- Der Speicher ist somit der Belastung angepasst konfiguriert.
- Der hohe Speichernutzungsgrad wird durch relativ **gleichmäßige Temperaturverteilungen im Speicherkörper** bewirkt. Die **Feldtemperaturen** im Quer- und im Längsschnitt (Seite 203) zeigen im aufgeladenen Zustand stets Werte **über der oberen Phasenwandeltemperatur**.
- Somit gibt es auch einen **vollkommenen Phasenwandel** und keine "gelben" Bereiche mehr, wie diese bei Variante III (Seite 198) überwiegend auftraten.
- Die **Temperatur- und Phasenzustandsverläufe der vier ausgewählten Volumenelemente E1 ... E4** zeigen den positiven Sachverhalt auch in den Bildern 8.31 und 8.32. Der Zeitversatz der einzelnen Kurven hat sich deutlich verringert.
- Das **Latentspeichermaterial wird aufgrund der geometrischen Speicheroptimierung wärmetechnisch sehr gut ausgenützt**.

### 8.7 Optimierungsvariante IV: Einfluss der Zyklenform

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Periodendauer halbiert und festgestellt, dass dies zunächst eine merkliche Senkung des Speichernutzungsgrades bewirkte. Der praktisch übliche Verlauf bei z. B. einer **Speicherentladung in der Nacht** mittels Kühlturm und einer **Beladung am Tage** mit Wärme aus einem Aufenthaltsraum ist dadurch gekennzeichnet, dass zwischen beiden Vorgängen **thermisch inaktive Pausen** liegen.

Eine solche Variante soll im Weiteren untersucht werden, wobei noch die Besonderheit gilt, dass die Nachtentladung länger als die Beladung am Tage währt.

Die beiden Abschnitte der Wassereintrittstemperaturverläufe sind aus Bild 8.33 ersichtlich. Hierzu sei angemerkt, dass die Wassereintrittstemperaturen in Wirklichkeit jeweils einen Zeitschritt – dies sind hier 4 s – vor der vollen Stunde enden.

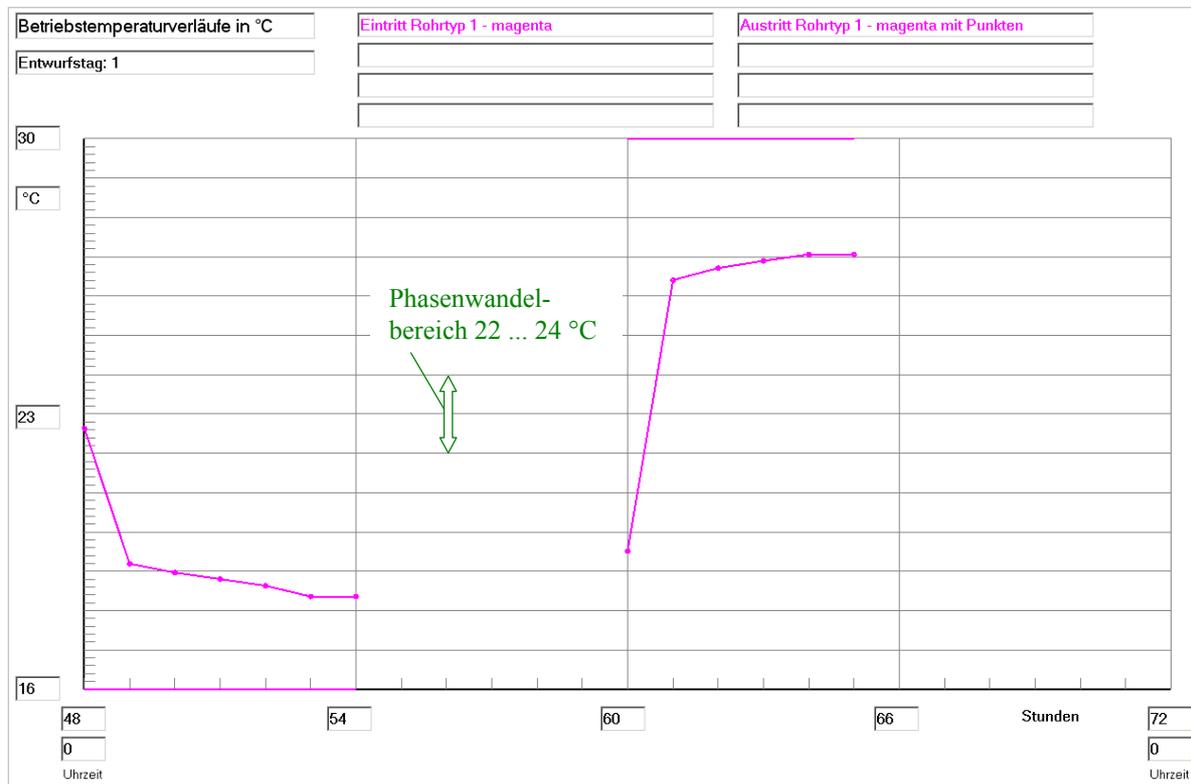
Grundlage für die Ausgangsbetrachtung bildet die im Abschnitt 8.4 verwendete Optimierungsvariante I. Die Wiedergabe der Ein- und Ausgabewerte erfolgt sehr verkürzt.





Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	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
58	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	12	30,0	19,5	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	13	30,0	26,4	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	14	30,0	26,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	15	30,0	26,9	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	16	30,0	27,1	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0	16,0	22,6	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende: wie Seite 171



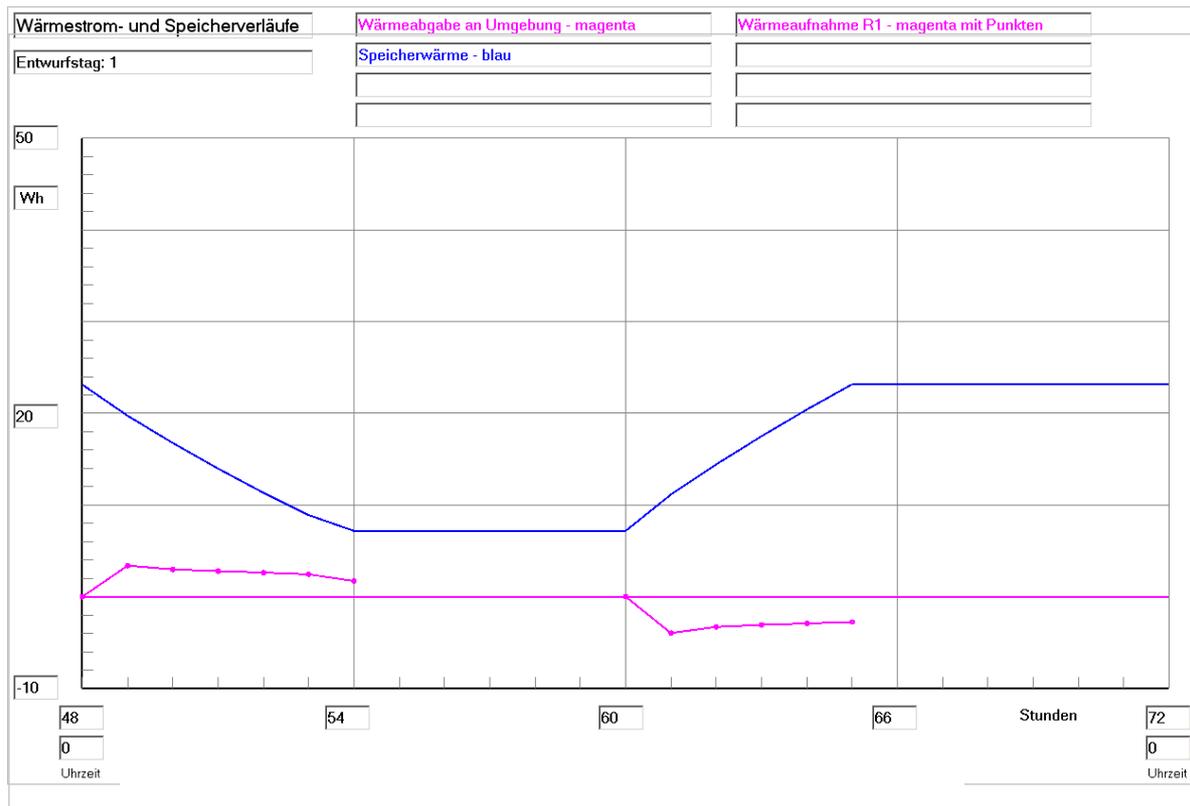
**Bild 8.34** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für Optimierungsvariante IV

**Hinweis:**

Gemäß Bild 4.6 gilt bei plötzlicher Temperaturänderung z. B. der Wassereintrittstemperatur (Stundenwerte) auf  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  die Temperatur der vorangegangenen Stunde bis einen Zeitschritt (hier sind dies beispielsweise 4 s) vor diesem Sprung konstant weiter.

Folgerichtig erscheinen im Rechnerausdruck zum Zeitpunkt des Temperatursprunges keine Werte mehr in der Tabelle. Hier tritt ein Sprung z. B. um 6<sup>00</sup> Uhr auf, sodass um 5<sup>00</sup> Uhr die letzten Daten aufgelistet sind.

Bei den Grafiken wurde aber ein Kompromiss getroffen, der den tatsächlichen Betriebsverlauf andeuten soll. Deshalb wird der letzte echte Stundenwert (hier z. B. für 5<sup>00</sup> Uhr) ohne Änderung bis zum Temperatursprung extrapoliert. Die Ergebnisgrößen – z. B. die Wasseraustrittstemperatur – gelten dann nur näherungsweise!



**Bild 8.35** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für Optimierungsvariante IV

### Feststellungen I

- Der noch große Wärmeaustausch zwischen Rohr und Speichermaterial am Ende der **Kaltwasserbeaufschlagung** (16 °C) und am Ende der **Warmwasserbeaufschlagung** (30 °C) deutet auf **ungenügende Speicherausnutzung** hin.

- Der **Nutzungsgrad des Speichers** nach Gl. (8.1) ergibt sich zu:

$$Q_{S,max} = 29,86 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 30 \text{ °C})$$

$$Q_{S,min} = 6,29 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 16 \text{ °C})$$

$$Q_{SZ,max} = 23,19 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 66 \text{ (18}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$Q_{SZ,min} = 7,18 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 54 \text{ (6}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$\varepsilon = \frac{23,19 - 7,18}{29,86 - 6,29} = 0,679.$$

- Der **Speichernutzungsgrad** ist unbefriedigend.

Die folgenden **Temperatur- und Phasenzustandsverteilungen** um 23<sup>00</sup> Uhr am Ende des dritten Simulationstages zeigen die Ursachen der ungenügenden Speicherladung.

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
6	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
5	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
4	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
3	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
2	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
1	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
0	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51

Rohr als Festkörper betrachtet

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8
7	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
6	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
5	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
4	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
3	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
2	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
1	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
0	0,00	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76

Rohr als Festkörper betrachtet

teilweiser Phasenwandel

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
6	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
5	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
4	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
3	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
2	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
1	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21
0	23,92	23,87	23,83	23,79	23,75	23,71	23,66	23,63	23,59	23,55	23,51	23,47	23,44	23,40	23,37	23,34	23,30	23,27	23,24	23,21

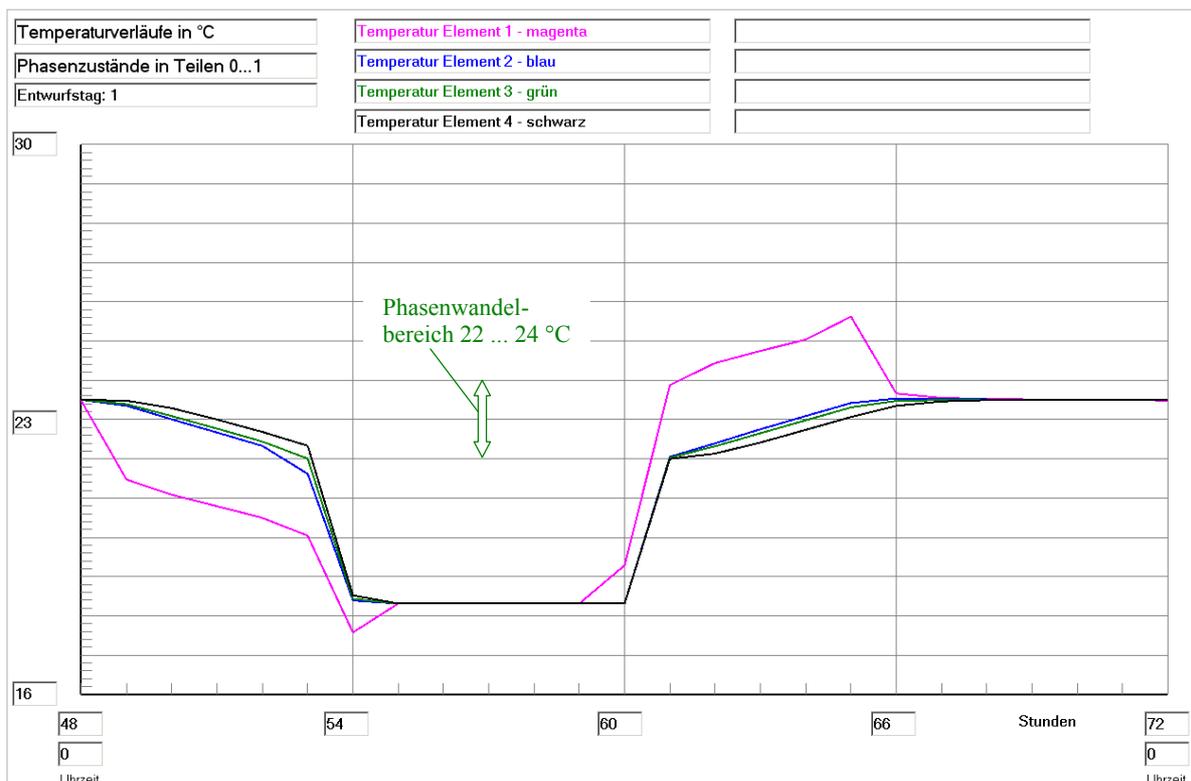
Rohr im Längsschnitt als Festkörper betrachtet

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

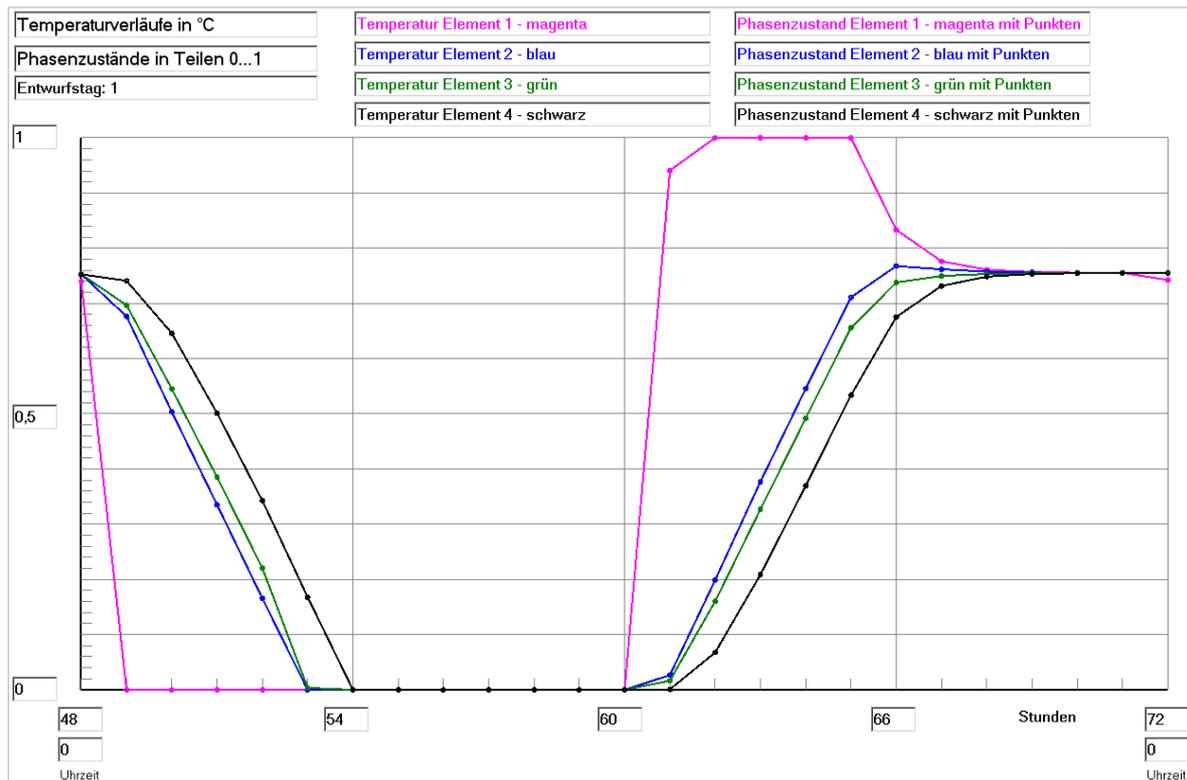
j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
7	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
6	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
5	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
4	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
3	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
2	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
1	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,67	0,65	0,64	0,62	0,60
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Rohr im Längsschnitt als Festkörper betrachtet

teilweiser Phasenwandel



**Bild 8.36** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für Optimierungsvariante IV



**Bild 8.37** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für Optimierungsvariante IV

## Feststellungen II

- Deutlich ist der ungleiche Ent- und Beladezeitraum zu erkennen. Aufgrund der längeren Beaufschlagung mit Wasser von 16 °C liegen die Temperatur- und Phasenzustandskurven deutlich unter dem Mittelwert von 23 °C = (30 °C + 16 °C)/2.
- Die "gelben" Bereiche (Seite 210), die den **unvollkommenen Phasenwandel** im aufgeladenen Speicherzustand kennzeichnen, erstrecken sich über alle Volumenelemente in den betrachteten Quer- und Längsschnitten.
- Die **Temperatur- und Phasenzustandsverläufe der vier ausgewählten Volumenelemente** (Skizze im Bild 8.18) zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen E1 und dem in erster Näherung gleichen Verhalten der Volumenelemente E2 ... E4.
- In seiner Gesamtheit wird das **Latentspeichermaterial wärmetechnisch ungenügend genützt**.

## Optimierungsvorschlag

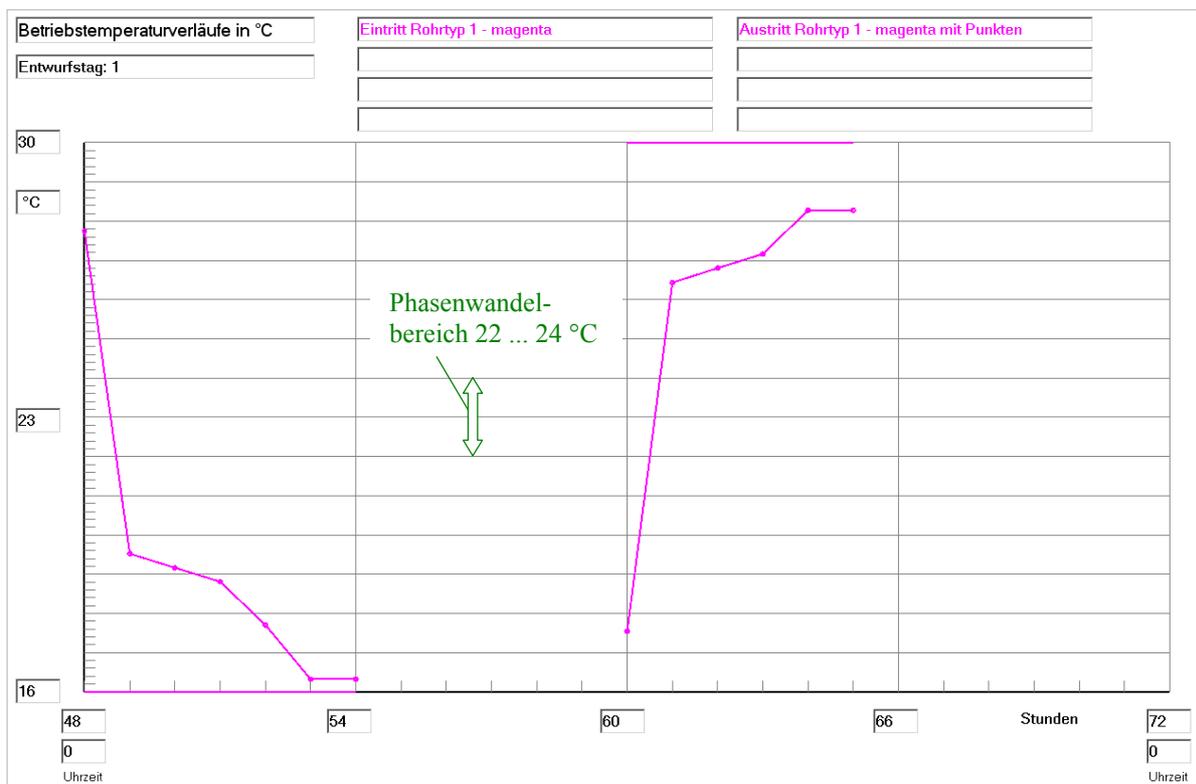
Auch in diesem Fall erscheint es zur Erhöhung des Speichernutzungsgrades zielführend zu sein, die **Rohr- und Rohrregisterabstände** zu **verringern**. Es wird hierbei die **Geometrie der Optimierungsvariante IIIa** verwendet, da diese dort sehr erfolgreich wirkte.

Die Ergebnisse der Rechnungswiederholung folgen auszugsweise.

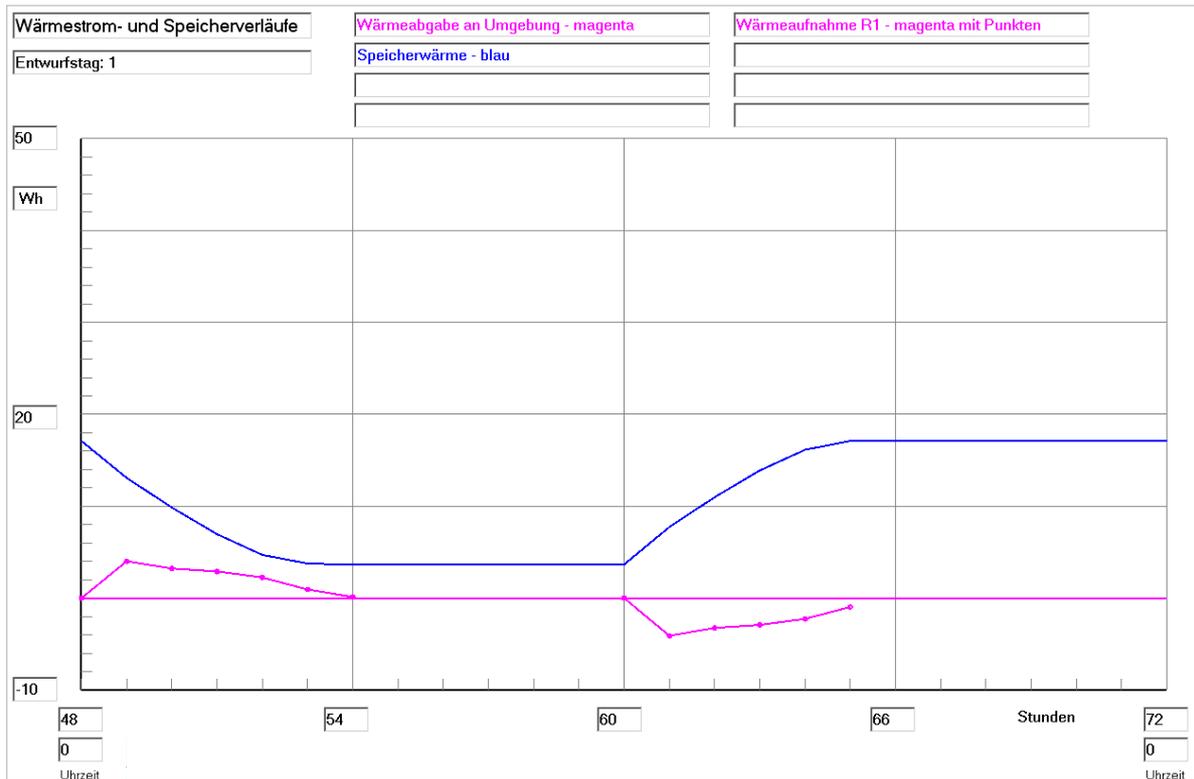


Stunden		Rohrtyp R1			Rohrtyp R2			Kanaltyp K1			Kanaltyp K2		
BS	TZ	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h	Ein °C	Aus °C	Kond gW/h
64	16	30,0	28,3	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	0	16,0	27,8	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende: wie Seite 171



**Bild 8.38** Wassereintrittstemperatur und Wasseraustrittstemperatur im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IVa (verkleinerte Rohrabstände) Bezüglich der Temperaturverläufe während der letzten Stunde vor dem jeweiligen Durchflusstopp ist der Hinweis auf Seite 208 zu beachten.



**Bild 8.39** Enthalpie ("Speicherwärme") des Speicherkörpers bezogen auf 0 °C, Wärmeaufnahme des Viertelrohres und Wärme an die Umgebung (aufgrund der Eingabedaten ist diese 0) im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IVa (verkleinerte Rohrabstände)

Feldtemperaturen in °C im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
5	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66
4	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66
3	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66
2	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66
1	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66
0	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66	29,66

Rohr als Festkörper betrachtet

Phasenzustand im Querschnitt der Ebene i = 10 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

flüssige Phase

Rohr als Festkörper betrachtet

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
5	29,98	29,97	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,79	29,73	29,66	29,57	29,46	29,33	29,16	28,96	28,71	28,40	28,04	27,73
4	29,98	29,97	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,79	29,73	29,66	29,57	29,46	29,33	29,16	28,96	28,71	28,40	28,04	27,73
3	29,98	29,97	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,79	29,73	29,66	29,57	29,46	29,33	29,16	28,96	28,71	28,40	28,04	27,73
2	29,98	29,97	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,79	29,73	29,66	29,57	29,46	29,33	29,16	28,96	28,71	28,40	28,04	27,73
1	29,98	29,97	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,79	29,73	29,66	29,57	29,46	29,33	29,16	28,96	28,71	28,40	28,04	27,73
0	29,98	29,97	29,96	29,94	29,92	29,90	29,87	29,83	29,79	29,73	29,66	29,57	29,46	29,33	29,16	28,96	28,71	28,40	28,04	27,73

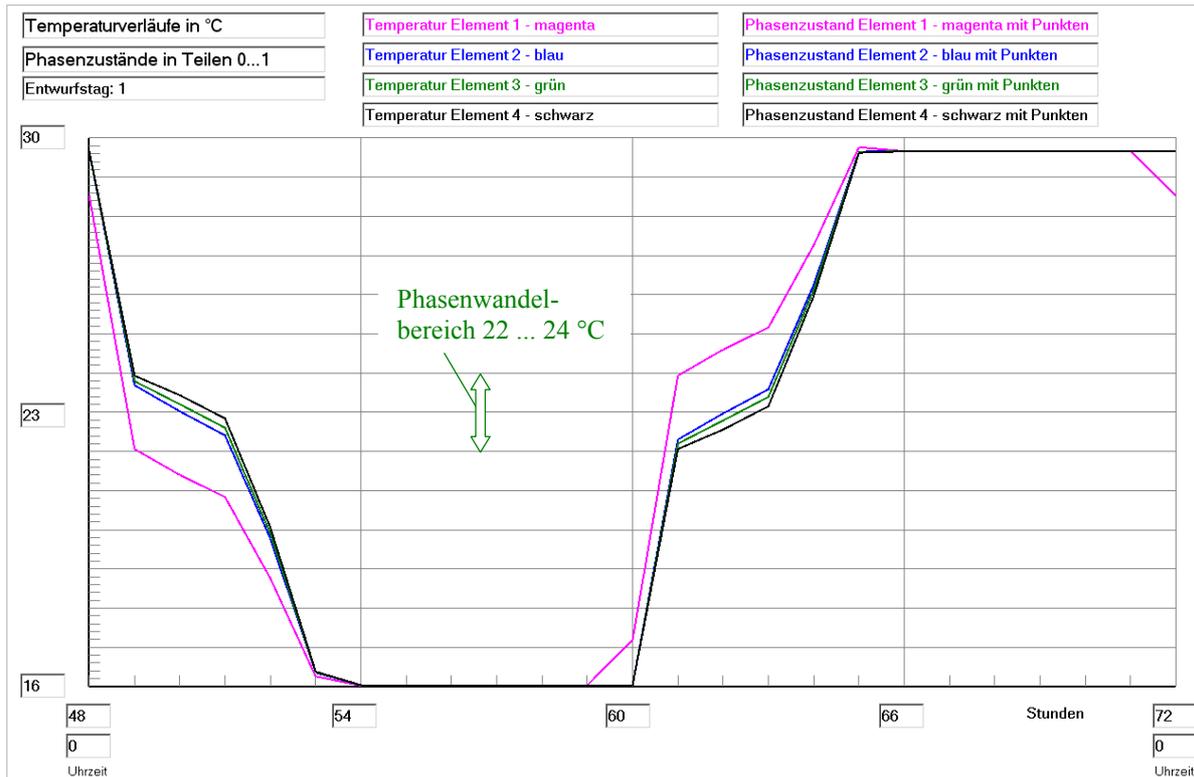
Rohr im Längsschnitt als Festkörper betrachtet

Phasenzustand im Längsschnitt der Ebene k = 0 zur Zeit 23<sup>00</sup> Uhr

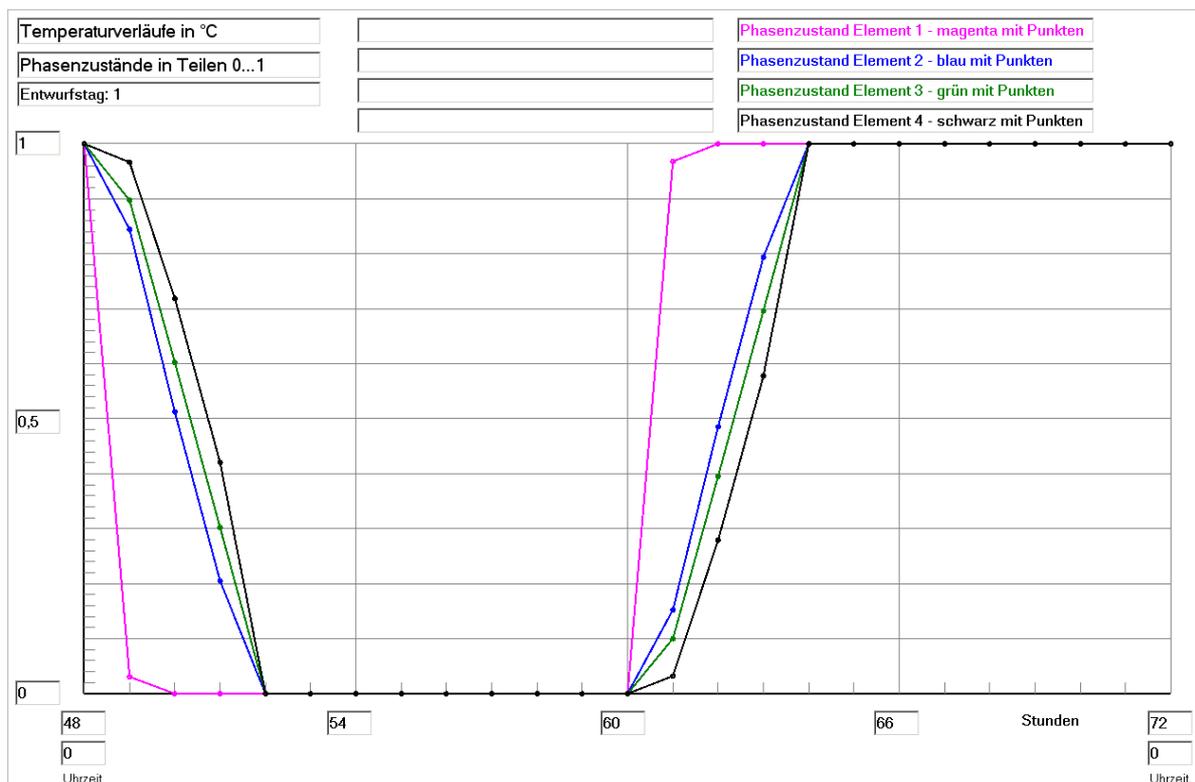
j	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11	i=12	i=13	i=14	i=15	i=16	i=17	i=18	i=19
5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

flüssige Phase

Rohr im Längsschnitt als Festkörper betrachtet



**Bild 8.40** Temperaturverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IVa (verkleinerte Rohrabstände)



**Bild 8.41** Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4 (siehe Skizze im Bild 8.18) über den dritten Simulationstag (Betriebsstunde 48 bis 72) gültig für die Optimierungsvariante IVa (verkleinerte Rohrabstände)

### Feststellungen III

- Auch unter den thermischen Bedingungen des Ent- und Beladezyklus dieser Optimierungsvariante IV (Bild 8.33) bringt die dichtere Rohranordnung im Speicherkörper eine deutliche Steigerung des **Speichernutzungsgrades** nach Gl. (8.1) mit sich. Es gelten:

$$Q_{S,\max} = 17,24 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 30 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_{S,\min} = 3,63 \text{ Wh} \quad (\text{theoretischer Wert bei einer homogenen Speichertemperatur von } 16 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_{SZ,\max} = 17,11 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 65 \text{ (17}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$Q_{SZ,\min} = 3,64 \text{ Wh} \quad (\text{realer Wert zur Betriebsstunde } 54 \text{ (6}^{00} \text{ Uhr)})$$

$$\varepsilon = \frac{17,11 - 3,64}{17,24 - 3,63} = 0,990.$$

- Die **Temperaturänderung im Speicherkörper** durchläuft fast den maximalen Bereich von 16 °C bis 30 °C (Bild 8.40) und der **Phasenwandel** wird **komplett vollzogen** (Bild 8.41), sodass es keine "gelben" Bereiche wie im nicht optimierten Fall mehr gibt (vgl. Seite 210 mit 214).
- **Das Latentspeichermaterial wird wärmetechnisch ideal ausgenützt.**

### 8.8 Versuche zur analytischen Beschreibung des thermischen Speicherverhaltens

In verschiedenen Ausarbeitungen [10, 11] wurde immer wieder versucht, eine analytische Berechnungsmöglichkeit zu finden, um die Speicherzeit abschätzen zu können. In der Regel sind nachfolgende einfache Körper betrachtet worden:

- Platten der Dicke  $D$  mit unendlicher zweidimensionaler Ausdehnung
- Zylinder des Durchmessers  $R$  mit unendlicher Länge
- Kugeln des Durchmessers  $R$ .

Alle genannten Körper werden nur über die Oberfläche (Randbedingung dritter Art) be- und entladen. Sie enthalten keine Rohre bzw. Kanäle im Inneren.

Diese Betrachtungen sind weiterhin durch folgende **sehr große Vereinfachungen** gekennzeichnet:

- Der **Speicherkörper** besitzt zu allen Zeiten eine konstante Temperatur, die der **Phasenwandeltemperatur** entspricht.

Dadurch bleibt die reale Temperaturverteilung, die sich infolge der instationären Wärmeleitung im festen und im geschmolzenen Speichermaterial außerhalb des Phasenwandels einstellt, unbeachtet. Folglich bleibt auch die Enthalpieänderung nur auf den Phasenwandel beschränkt.

- Die **Stoffwerte** und die **thermischen Randbedingungen** gelten während des gesamten Vorganges als **konstante Größen**.

Sehr unreal ist es, dass beispielsweise dann auch der Temperaturabfall des Medienstromes längs des Rohr- bzw. Kanalsystems keine Beachtung findet.

- Es kann nur ein **sprunghafter Phasenübergang ohne Hysterese** berücksichtigt werden.

Aus dem Abschnitt 3.2 geht hervor, dass diese Annahme nur im Idealfall auf das Speichermaterial zutrifft.

In [10] wird darauf verwiesen, dass die Ergebnisse – Schmelz- bzw. Erstarrungszeit – infolge der Idealisierungen vom Realfall bis zu 300 % abweichen können. Sehr große Abweichungen wurden auch durch eigene Betrachtungen bestätigt, denn die sensible Speicherung und die instationären Temperaturfelder sind bei den meisten praktischen Fällen durchaus bedeutungsvoll.

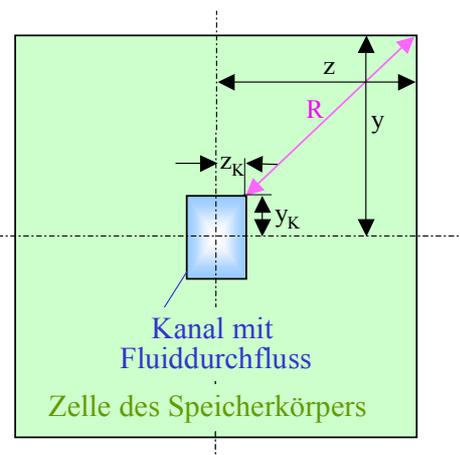
Somit ist die weitere Verfolgung von idealisierten, analytischen Lösungen nicht zielführend.

### 8.9 Empfehlung zur Vorgehensweise bei der Optimierung

Die **numerische Berechnung** ist die **einzige Methode**, die die wärmetechnischen Vorgänge bei der sensiblen und latenten Wärmespeicherung unter den gegebenen Randbedingungen realistisch nachbilden kann. Deshalb ist ihre Anwendung ohne Alternative.

Um eine **Optimierung** durchzuführen, verbleibt nur die Möglichkeit von **Variantenvergleichen**. Es ist aber zur Reduzierung der Berechnungen sinnvoll, einen geeigneten **Ordnungsparameter zur Ergebnisdarstellung** zu finden. Die Suche nach einem solchen Kriterium soll nachfolgend auf halbempirischer Grundlage erfolgen.

Es wird eine Zelle aus dem Speicherkörper gemäß Bild 8.42 herausgegriffen.



**Bild 8.42** Rechteckige Zelle eines Speicherkörpers mit integriertem, symmetrisch angeordnetem Fluidkanal und Kennzeichnung der zur wärmetechnischen Betrachtung benötigten geometrischen Größen

Die Bezeichnungen  $y$  und  $z$  sind an das Programm der Speichersimulation angelehnt. Die Länge  $L$  geht in die Tafelebene hinein.

Die **Enthalpieänderung** infolge des Phasenwandels  $r$  und infolge der sensiblen Wärmespeicherung zwischen den theoretischen Grenztemperaturen  $t_{\max} - t_{\min}$  beträgt – bezogen auf eine Viertelzelle des Speicherkörpers – beispielsweise beim Schmelzen ( $t_f > t_w$ ):

$$\Delta H = \varepsilon [r + c (t_{\max} - t_{\min})] \rho V = \varepsilon [r + c (t_{\max} - t_{\min})] \rho L (y z - y_K z_K). \quad (8.2)$$

Der Term  $[r + c (t_{\max} - t_{\min})]$  verkörpert die theoretisch maximale, spezifische Speicherkapazität. Sie wird in praxi nicht erreicht, weshalb zur Charakterisierung der Realität der Speichernutzungsgrad  $\varepsilon$  nach Gl. (8.1) eingeführt wurde.

Um die Enthalpieänderung  $\Delta H$  zu bewirken, muss dem Speicherkörper vom Fluidkanal – es wird wiederum ein Viertelkanal betrachtet – während der Aufheizzeit  $\tau$  die **Wärme**

$$Q = L (y_K + z_K) \kappa (t_f - t_w) \tau \quad (8.3)$$

zugeführt werden, wobei in grober Näherung der Teilwärmedurchgangskoeffizient

$$\kappa = \left( \frac{1}{\kappa_{K,a}} + \frac{R}{\lambda} \right)^{-1} \quad (8.4)$$

angenommen wird.

Es gelten die geometrischen Größen nach Bild 8.42 und weiterhin:

H Enthalpie des Speichermaterials beispielsweise bezogen auf 0 °C

r Schmelzenthalpie des Speichermaterials

c spezifische Wärmekapazität des Speichermaterials (Mittelwert aus flüssiger und fester Phase)

$\rho$  Dichte des Speichermaterials (Mittelwert aus flüssiger und fester Phase)

$t_{\max}$  theoretisch maximale Speichertemperatur ( $\equiv$  maximale Fluideintrittstemperatur)

$t_{\min}$  theoretisch minimale Speichertemperatur ( $\equiv$  minimale Fluideintrittstemperatur)

L Länge des Speicherkörpers

Q Wärme an das Speichermaterial während der Zeit  $\tau$

$\kappa$  mittlerer Teilwärmedurchgangskoeffizient vom Fluid bis zu einem charakteristischen Bereich im Speicherkörper

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials (Mittelwert aus flüssiger und fester Phase)

$\kappa_{K,a}$  Teilwärmedurchgangskoeffizient des Fluidkanals bezogen auf die äußere Oberfläche

$t_F$  mittlere Fluidtemperatur unter Beachtung der Spreizung

$t_W$  mittlere Phasenwandeltemperatur unter Beachtung der Hysterese

$\tau$  Zeit für das Be- oder Entladen.

Für die Ermittlung von  $\kappa_{K,a}$  gilt beispielsweise für ein Rohr mit dem inneren bzw. äußeren Rohrdurchmesser  $d_{R,i}$  bzw.  $d_{R,a}$ , der Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand  $\lambda_R$  und dem fluidseitigen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_{R,i}$ :

$$\kappa_{K,a} = \left( \frac{d_{R,a}}{d_{R,i} \alpha_{R,i}} + \frac{d_{R,a}}{2 \lambda_R} \ln \frac{d_{R,a}}{d_{R,i}} \right)^{-1}. \quad (8.5)$$

Das Gleichsetzen der Gln. (8.2) und (8.3) sowie die Substitution der Gl. (8.4) liefert:

$$\varepsilon [r + c (t_{\max} - t_{\min})] \rho (y_Z - y_K Z_K) \left( \frac{1}{\kappa_{K,a}} + \frac{R}{\lambda} \right) = (y_K + z_K) (t_F - t_W) \tau.$$

Der **Speichernutzungsgrad**  $\varepsilon$  stellt sich dann in der allgemeinen Form dar:

$$\varepsilon = \frac{(y_K + z_K) |t_F - t_W| \tau}{[r + c (t_{\max} - t_{\min})] \rho (y_Z - y_K Z_K) \left( \frac{1}{\kappa_{K,a}} + \frac{R}{\lambda} \right)}. \quad (8.6)$$

Die Gl. (8.6) sollte keinesfalls dazu verleiten, den Speichernutzungsgrad berechnen zu wollen. Sie soll lediglich zeigen, welche funktionellen Zusammenhänge bestehen, wenn bereits vorliegende Ergebnisse darzustellen sind, um eine eventuell verbesserte Speichernutzung aufzusuchen.

Die in den Abschnitten 8.3 bis 8.7 vorliegenden Ergebnisse sollen diesbezüglich betrachtet werden. Sie sind in Tabelle 8.1 zusammengestellt.

**Tabelle 8.1** Relevante Parameter und Ergebnisse der numerisch berechneten Basisvariante und der Optimierungsvarianten I bis IV

Variante	Halber Abstand		Halbe Kanalabmessung		Speicherdiagonale R	Wärmeleitfähigkeit Speicher-material $\lambda$	Ladezeit $\tau$	Mittlere Temperaturdifferenz am Ende der Ladezeit $ t_F - t_W $	Speichernutzungsgrad $\varepsilon$
	Rohrregister y	Rohre z	Höhe $y_K$	Breite $z_K$					
	mm	mm	mm	mm	mm	W/(m K)	h	K	-
Basisvariante	28	14,85	1,75	1,65	29,4	0,6	10	5,9	0,637
Optimierungsvariante I	14	14,85	1,75	1,65	18,0	0,6	10	7,0	0,998
Optimierungsvariante II	28	14,85	1,75	1,65	29,4	1,2	10	5,7	0,767
Optimierungsvariante III	14	14,85	1,75	1,65	18,0	0,6	4	5,5	0,599
Optimierungsvariante IIIa	10,5	11,55	1,75	1,65	13,2	0,6	4	6,7	0,964
Optimierungsvariante IV	14	14,85	1,75	1,65	18,0	0,6	5	5,5	0,679
Optimierungsvariante IVa	10,5	11,55	1,75	1,65	13,2	0,6	5	6,2	0,990

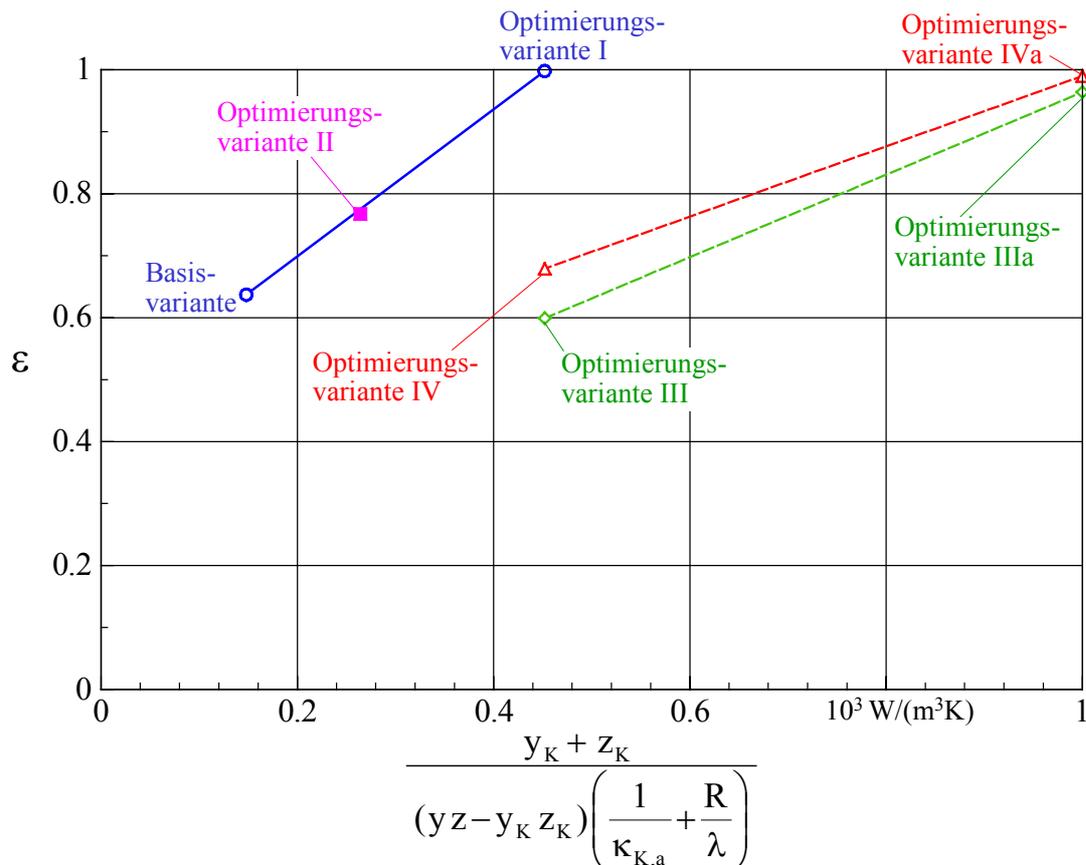
Bei den betrachteten Varianten sind die Daten des Speichermaterials  $[r + c(t_{\max} - t_{\min})] \rho$  gleich, sodass aus Gl. (8.6) beispielsweise die folgenden funktionellen Zusammenhänge extrahierbar sind:

$$\varepsilon = f \left( \frac{y_K + z_K}{(y z - y_K z_K) \left( \frac{1}{\kappa_{K,a}} + \frac{R}{\lambda} \right)} \right) \quad (8.7)$$

$$\varepsilon = f \left( \frac{(y_K + z_K) \tau}{(y z - y_K z_K) \left( \frac{1}{\kappa_{K,a}} + \frac{R}{\lambda} \right)} \right) \quad (8.8)$$

$$\varepsilon = f \left( \frac{(y_K + z_K) \tau |t_F - t_W|}{(y_Z - y_K z_K) \left( \frac{1}{\kappa_{K,a}} + \frac{R}{\lambda} \right)} \right). \quad (8.9)$$

Mit dem Teilwärmehdurgangskoeffizienten für Kunststoffkapillarrohre der Abmessungen 4,3 mm × 0,8 mm ergeben sich beim gewählten Volumenstrom  $\kappa_{K,a} \approx 150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Unter Verwendung der funktionellen Zusammenhänge nach den Gln. (8.7) bis (8.9) folgen die Bilder 8.43 bis 8.45.

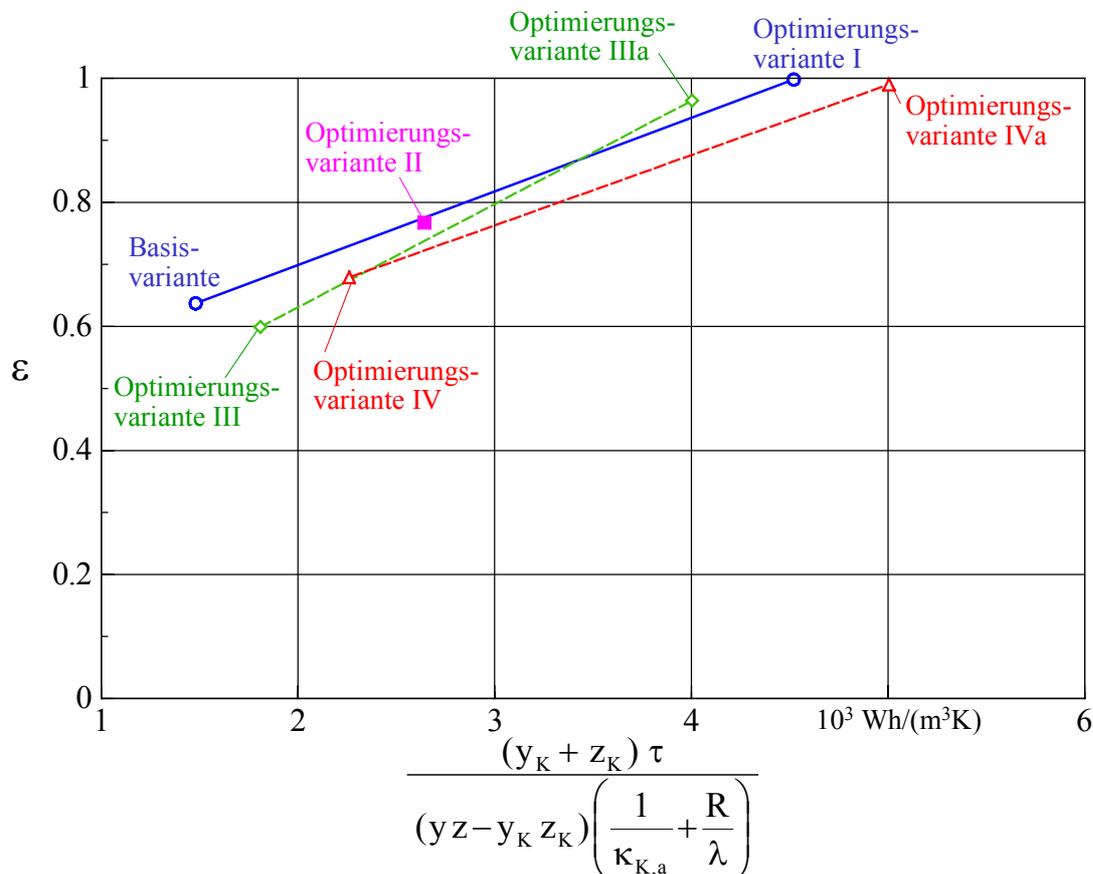


**Bild 8.43** Speichernutzungsgrad  $\varepsilon$  in Abhängigkeit einer kriteriellen Größe gemäß Gl. (8.7)

- Im Bild 8.43 sind nur die geometrischen Verhältnisse und die Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials im Abszistenterm berücksichtigt. Es handelt sich somit um die **einfachste Korrelation** bezogen auf die Beispielvarianten.
- Die Basisvariante und die Optimierungsvariante I unterscheiden sich bezüglich der **Geometrie von Speicherkörper und Rohrregister**. Des Weiteren besteht geometrische Identität zwischen Basisvariante und Optimierungsvariante II, jedoch ein großer Unterschied bezüglich der **Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials**.

Der **Zusammenhang zwischen Geometrie und Wärmeleitfähigkeit** des Speicherkörpers wird offensichtlich **richtig im Abszistenterm wiedergegeben**, denn auf der blauen Kurve befinden sich die Ergebnisse  $\varepsilon$  für die Basisvariante sowie für die Optimierungsvarianten I und II in sehr guter Zuordnung.

- Die Optimierungsvarianten III sowie IV gelten für völlig andere Laderegime und haben somit mit der blauen Geraden keine Beziehung.
- Bei der weiteren Auswertung – Bild 8.44 – wird deshalb im Abszissenterm die Ladezeit gemäß Gl. (8.8) einbezogen.

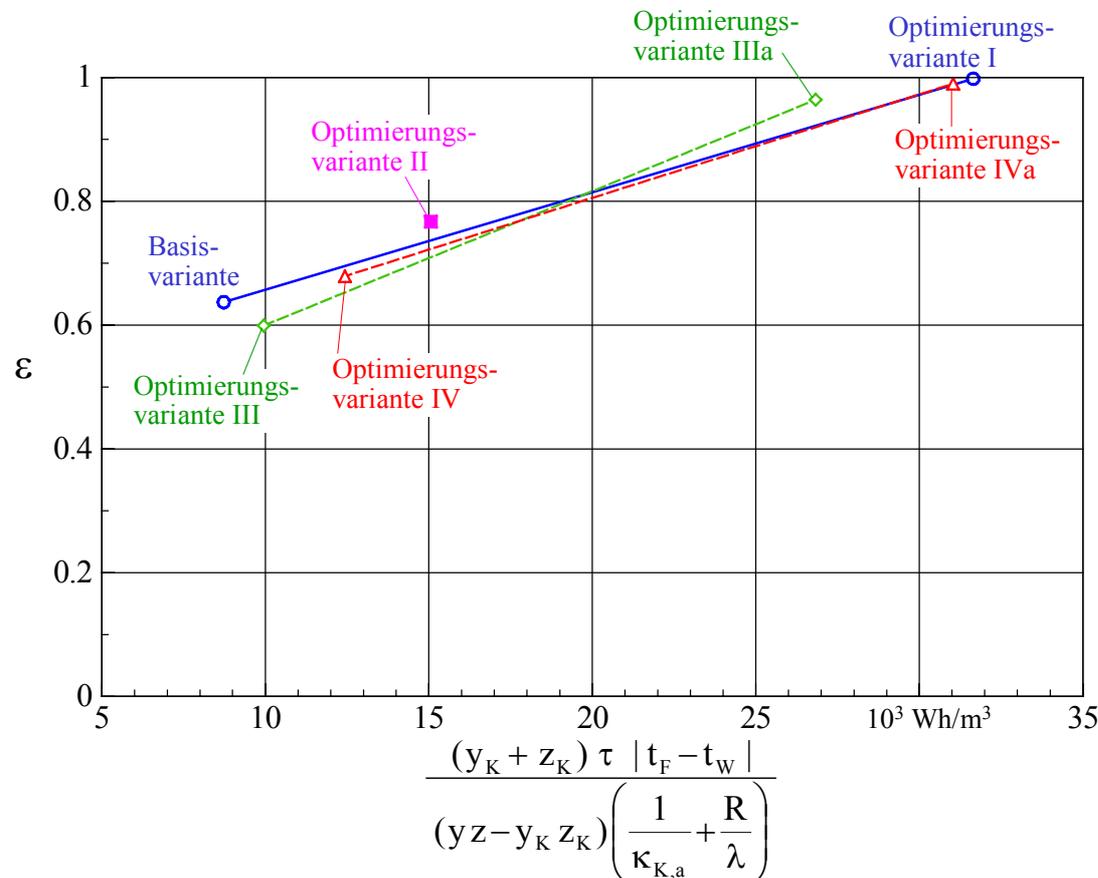


**Bild 8.44** Speichernutzungsgrad  $\varepsilon$  in Abhängigkeit einer kritischen Größe gemäß Gl. (8.8)

- Die **Berücksichtigung der Ladezeit** im Abszissenterm des Bildes 8.44 führt die unterschiedlichen Varianten näher zusammen.
- Da die Ladezeiten der Basisvariante sowie der Optimierungsvarianten I und II gleich sind, bleibt auch der bereits im Bild 8.43 nachgewiesene gute Zusammenhang für diese Varianten (blaue Linie) erhalten.
- Die Optimierungsvarianten III und IV zeichnen sich durch **sehr unterschiedliche Zeitregime** aus. So ist bei den Optimierungsvarianten III und IIIa die Periodendauer des Be- und Entladens gegenüber den übrigen Varianten halbiert. Bei den Optimierungsvarianten IV und IVa gibt es innerhalb von 24 Stunden zwar auch nur eine Be- und Entladeperiode, aber die Zeiten sind gegenüber der Basisvariante bzw. der Optimierungsvarianten I sowie II stark verkürzt und ungleich lang. Zwischen der sprunghaft beginnenden Be- und Entladung liegen lange Stillstandszeiten.

Trotz der **nicht vergleichbaren Temperatur-Zeit-Regime** wird dennoch in erster Näherung eine **akzeptable Korrelation** erreicht.

- Bei den Simulationen ergaben sich sehr unterschiedliche zeitliche Verläufe bezüglich der Temperaturspreizung (Wassereintrittstemperatur – Wasseraustrittstemperatur), die selbstverständlich auch Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Als ein näherungsweise Indiz werden im Weiteren die Temperaturdifferenzen  $|t_F - t_W|$  am Ende der Ladezeit eingeführt.



**Bild 8.45** Speichernutzungsgrad  $\varepsilon$  in Abhängigkeit einer kritischen Größe gemäß Gl. (8.9)

- Die Berücksichtigung der mittleren Temperaturdifferenzen am Ende der Ladezeit nach Tabelle 8.1, die näherungsweise aus den einzelnen Ergebnisausdrücken gewonnen wurden, zeigen eine weitere Verbesserung der Korrelation.
- Diese Temperaturdifferenzen stehen selbstverständlich auch im Zusammenhang mit der Spreizung, sodass auch Hinweise auf einen optimalen Fluiddurchsatz folgen könnten.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass Gl. (8.6) wichtige Parameter für eine gemeinsame Darstellung der Simulationsdaten beinhaltet und physikalisch richtig zuordnet. Auf dieser Grundlage können dann gezielt weitere Optimierungsschritte erfolgen.

Es sei aber auch noch mal deutlich darauf verwiesen, dass die vorgestellten Auswertungen und Darstellungsmethoden keinesfalls die numerische Simulation ersetzen können.

## Literaturverzeichnis

- [1] GLÜCK, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2005.  
Kostenlos erhältlich unter:  
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Raummodell\_Teil C)  
oder <http://www.berndglueck.de/Raummodell> (Teil C)
- [2] GLÜCK, B.: Wärmetechnischer Vergleich ausgewählter Bautechniken und Betriebsweisen von Wohnbauten. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2005.  
Kostenlos erhältlich unter:  
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Wohnbauten) oder  
<http://www.berndglueck.de/Bautechniken>
- [3] SCHMITZ, H. (Delft): Aussagen zum thermischen Verhalten von PCMs (Mitteilung im persönlichen Gespräch), 2005
- [4] GLÜCK, B.: Wärmeübertragung - Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990
- [5] GLÜCK, B.: Zustands- und Stoffwerte (Wasser, Dampf, Luft) - Verbrennungsrechnung (Reihe Bausteine der Heizungstechnik). 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1991  
Kostenlos erhältlich unter: <http://www.berndglueck.de/Stoffwerte>
- [6] GLÜCK, B.: LowEx-Komponente: Luftdurchströmte Säule mit spiralförmig gewickelten Kunststoff-Kapillarrohrmatten. Bericht der Fa. Clina und der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH) – Verbundvorhaben LowEx "Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung", 2006. Kostenlos erhältlich unter: <http://www.berndglueck.de/LowEx>
- [7] GLÜCK, B.: Vergleichsprozesse der Klimatechnik. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1998
- [8] GLÜCK, B.: Energetische, wärmetechnische und wärmephysiologische Bewertungskriterien für Wohnbauten zur Optimierung des Baustoffeinsatzes anhand ausgewählter Beispiele. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2005.  
Kostenlos erhältlich unter:  
<http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Raummodell\_Teil D)  
oder <http://www.berndglueck.de/Raummodell> (TeilD)
- [9] NADLER, N.: Kombinierte Außentemperatur mit langwelligen Reflexionen an der terrestrischen Umgebung, Gesundheits-Ingenieur (1997) Heft 6, S. 310 bis 315
- [10] ELSNER, N; FISCHER, S.; HUHN, J.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 2 Wärmeübertragung. Berlin: Akademie-Verlag 1993
- [11] VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage, Abschnitt Ec-Phasenumwandlung. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1994