
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

Kurzbericht

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

1	Vorbemerkung	3
2	Grundbauart des Speichers und Festlegung des Berechnungsverfahrens	3
3	Geometriemodellierung	4
4	Wärmetechnische Modellierung	6
4.1	Wärmeleitung im Speicherkörper	6
4.2	Speichermaterial	6
4.3	Rohre und Kanäle im Speicherkörper	8
	Wärmetechnische Rohr- und Kanalkenngrößen bei Stillstand	8
	Wärmetransport in durchströmten Rohren und Kanälen	8
4.4	Randbedingungen am Speicherkörper	9
4.5	Stabilitätskriterien für die numerische Berechnung	12
4.6	Stündliche Wärmebilanzen für den Gesamtspeicher	12
5	Rechenprogramm	12
6	Testbeispiele für einen Speicher mit Paraffin-Salzhydrat-Gemisch und flüssigkeits- durchströmten Kunststoff-Kapillarrohrmatten	14
	Test 1: Speicherkörper mit drei Kapillarrohrmatten und vollen Rohrquerschnitten	14
	Test 2 und Test 3: Verkleinerte Simulationsgebiete gegenüber Test 1	23
	Einschwingverhalten des Speichers	24
7	Testbeispiele für einen Betonspeicher mit eingeformtem Luftkanal	25
8	Meteorologische Daten	30
9	Speicheroptimierung – Grundüberlegungen und beispielhaftes Vorgehen	33
	Basisvariante des wasserdurchströmten Festkörperspeichers	34
	Variantenuntersuchungen bezüglich Lagenabstand und Wärmeleitfähigkeit	36
	Einfluss der Periodendauer und der Geometrie	36
	Einfluss der Zyklen und der Geometrie	37
	Voraussage des thermischen Speicherverhaltens	38
	Hauptergebnisse	39
	Literaturverzeichnis	39

1 Vorbemerkung

Zur verstärkten Nutzung der im Winter und in der Übergangszeit durch transparente Raumumfassungen eingestrahlten Sonnenenergie dient eine Bauweise mit hoher Wärmespeicherkapazität. Diese ist gleichfalls im Sommer vorteilhaft, um den am Tage vorhandenen Wärmeeintrag zu speichern und durch eine intensive Nachtlüftung abzuführen. Bei Leichtbauten versucht man deshalb in neuerer Zeit die Raumumfassungen mit Latentspeichermaterialien (PCM) anzureichern. Zur quantitativen wärmetechnischen und wärmephysiologischen Untersuchung dieser Räume wurde das "Dynamische Raummodell" [1, 2] entwickelt und die Bewertung von sechs unterschiedlichen Bauweisen in [3, 4] durchgeführt. Die in den Raumumfassungen vorhandenen Speicherschichten mit Latentmaterialien werden in der Regel passiv be- und entladen. In Sonderfällen – z. B. bei Bestückung mit einem Rohrregister – können sie auch aktiv beladen und passiv entladen werden. Damit ist die Nutzung des in den Umfassungen vorhandenen Wärmespeichers überhaupt nicht oder nur teilweise steuerbar.

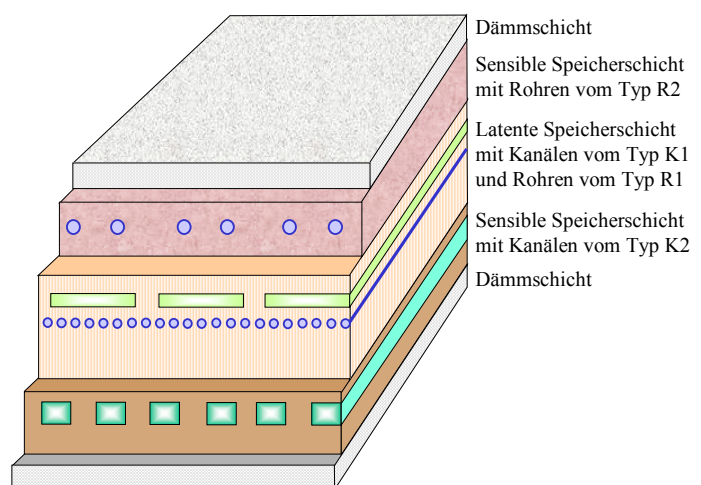
Im Gegensatz dazu steht die Installation eines separaten Wärmespeichers – beispielsweise eines Zentralspeichers – mit vollkommen steuerbaren Be- und Entladevorgängen. Dieser Speicher ist in das wärmetechnische Versorgungskonzept komplett einzubinden. Hierzu dient die übliche Anlagenvielfalt von gut regelbaren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

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist die Berechenbarkeit der Speicherdynamik mit sensiblen und/oder latenten Wärmespeichermaterialien und seine wärmetechnische Optimierung.

2 Grundbauart des Speichers und Festlegung des Berechnungsverfahrens

Der Speicherkörper besitzt eine quaderförmige Gestalt, wobei maximal drei Schichten gleicher Grundfläche in Sandwichbauweise zusammengefügt sind. Dabei können sich sensible und latente Wärmespeicherschichten abwechseln. Die Schichten werden beispielsweise von wasserbeaufschlagten Rohrregistern oder von luftbeaufschlagten Kanälen mit parallelliegenden Achsen durchzogen. Um im Modell allgemeingültig zu sein, sind je zwei Rohr- und Kanaltypen definierbar. An den Außenseiten befinden sich in der Regel Wärmedämmschichten.

Bild 1 Beispielhafter Aufbau eines Wärmespeichers in Sandwichform mit je zwei unterschiedlichen Rohr- und Kanaltypen, die mit einem flüssigen oder gasförmigen Medium zur Be- und/oder Entladung durchflossen werden



Die Materialwahl, die spezielle Formgebung des Speicherkörpers, die Anordnung und die Querschnitte der Rohre und/oder der Kanäle stellen ein typisches Optimierungsproblem dar.

Bezüglich der Betriebsweise gibt es vielfältige Möglichkeiten:

- Es kann ein periodischer Be- und Entladerhythmus mit dem gleichen Medium – beispielsweise mit Wasser – erfolgen. Damit ist das gleiche Rohr- oder Kanalregister verwendbar.
- Bei zeitgleicher Be- und Entladung mit gegebenenfalls unterschiedlichen Medien sind zwei Rohr- oder Kanalregister in den Speicherkörper einzuordnen.
- Die Medienströme können im Gleich- oder Gegenstrom fließen.
- 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.

Um die geometrische und stoffliche Vielfalt nach Bild 1 rationell modellieren zu können, wird die Finite-Volumen-Methode verwendet. Die Algorithmen und die zugehörige Programmumsetzung werden in Module aufgeteilt.

3 Geometriemodellierung

Die Volumenelemente werden 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. Modellrestriktionen:

- Keine Änderung der Schichtdicke; Trennebenen liegen äquidistant zueinander.
- Jede Speicherschicht hat in sich homogene wärmetechnische Eigenschaften.
- Die Querschnitte der Rohre bzw. Kanäle werden geometrisch als Rechtecke approximiert. Die wärmetechnische Betrachtung basiert jedoch auf der geometrischen Realität.
- Die Fixierung des Simulationsbereiches ist nach Symmetriegesichtspunkten zu wählen. Um kurze Rechenzeiten für die Simulation zu erreichen, sollte der kleinste mögliche Bereich bestimmt werden.
- 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.

Bild 2 demonstriert die Bildung der Simulationsbereiche beispielhaft. Die detaillierte, numerisch verarbeitbare Geometriebeschreibung ist Gegenstand der Programmeingabe.

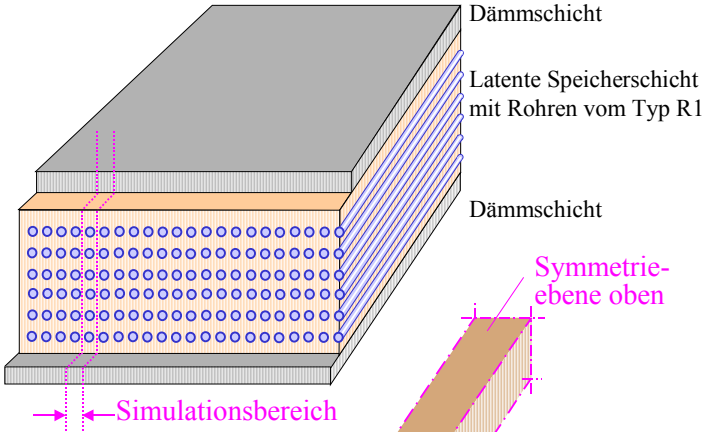
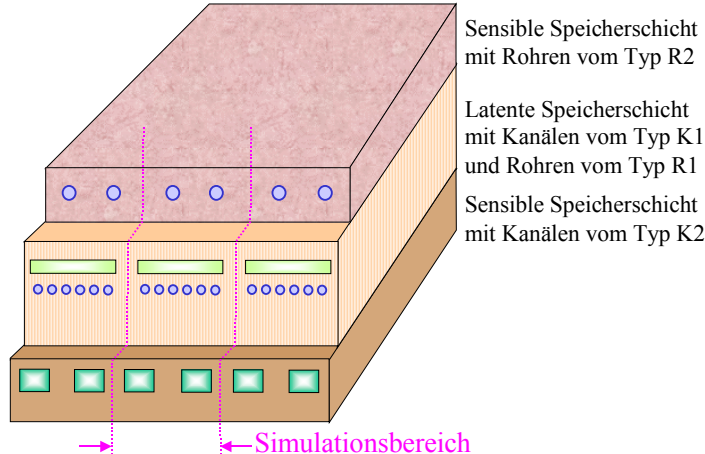
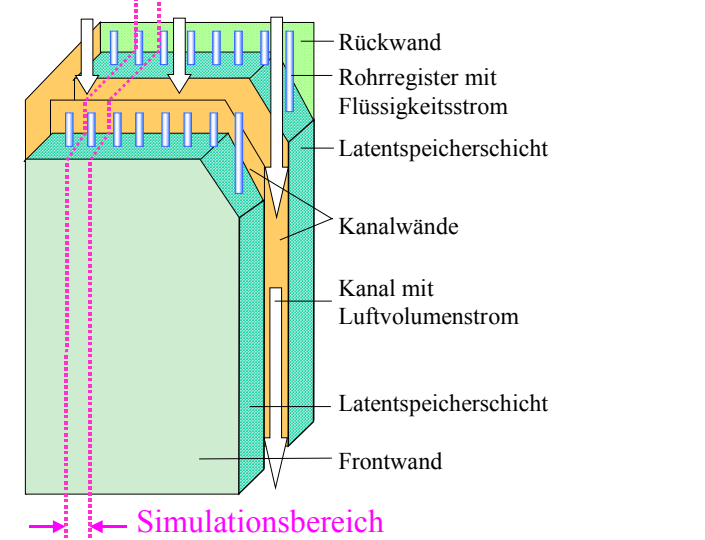
 Diagramm eines Normal üblicher Wärmespeichers. Die Struktur besteht aus einer Dämmschicht (oben), einer Latente Speicherschicht mit Rohren vom Typ R1 in der Mitte und einer weiteren Dämmschicht (unten). Die Rohre sind in einem Gittermuster angeordnet. Ein Bereich ist als 'Simulationsbereich' markiert. Ein Detailbild zeigt einen 'Minimalen Simulationsbereich' mit einem 'Viertelrohr' und vier Symmetrieebenen (oben, rechts, unten, links).	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). Der obere und untere Randeinfluss würde vernachlässigt, was bei guter Dämmung kaum Fehler bewirkt.
 Diagramm eines fiktiven Wärmespeichers. Die Struktur besteht aus drei Schichten: einer Sensible Speicherschicht mit Rohren vom Typ R2 (oben), einer Latente Speicherschicht mit Kanälen vom Typ K1 und Rohren vom Typ R1 (Mitte) und einer Sensible Speicherschicht mit Kanälen vom Typ K2 (unten). Ein Bereich ist als 'Simulationsbereich' markiert.	Fiktiver Wärmespeicher mit je zwei unterschiedlichen Rohr- und Kanalregistern Der für die Simulation gekennzeichnete Bereich ist aufgrund der Symmetrieverhältnisse gebildet.
 Diagramm eines Luftdurchströmter Schachts. Die Struktur besteht aus einer Rückwand (oben), Rohrregistern mit Flüssigkeitsstrom, einer Latentspeicherschicht, Kanalwänden, einem Kanal mit Luftvolumenstrom, einer weiteren Latentspeicherschicht und einer Frontwand (unten). Ein Bereich ist als 'Simulationsbereich' markiert.	Luftdurchströmter Schacht mit Latentspeichermaterial gefüllten Wänden (Frontwand und Rückwand) sowie Rohrregistern in den Wänden zur thermischen Aktivierung Das Wasser strömt im Gegenstrom zur Luft. 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.

Bild 2 Möglichkeiten zur Bildung der geometrischen Simulationsbereiche

4 Wärmetechnische Modellierung

Jedem Volumenelement, das durch seine Gitterlage i, j, k gekennzeichnet ist, sind die geometrischen Abmessungen und die Stoffwerte fest zugewiesen. Sie werden aus den Schichtdaten, die Eingabewerte darstellen, generiert. Hauptparameter der Berechnung sind die Elementtemperaturen $t_{i,j,k}$ in °C und bei Latentspeichermaterial die Elementphasenzustände $\text{Phase}_{i,j,k}$ in Anteilen 0...1. Es bedeuten:

$\text{Phase}_{i,j,k} = 0 \quad \Rightarrow$ vollkommen erstarrtes ("festes") Material

$\text{Phase}_{i,j,k} = 1 \quad \Rightarrow$ vollkommen geschmolzenes ("flüssiges") Material.

Entsprechend wird bei der spezifischen Wärmekapazität zwischen c und c_{fl} unterschieden. Bei der Wärmeleitfähigkeit erfolgt näherungsweise eine Mittelung $\lambda_{PH} = \lambda (1 - \text{Phase}_{i,j,k}) + \lambda_{fl} \text{Phase}_{i,j,k}$.

Die wichtigsten Besonderheiten seien nachfolgend erörtert.

4.1 Wärmeleitung im Speicherkörper

Es wird die FOURIERSche Differentialgleichung in dreidimensionaler Form mit einer Phasenwandlung für den homogenen, isotropen Körper bei vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen gelöst.

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. Die durch die Phasenumwandlung bedingte latente Wärme wird als innere Wärmequelle oder -senke dargestellt.

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.

In bekannter Weise wird gemäß der Finiten-Volumen-Methode die Wärmeleitung zwischen den Elementen bestimmt und anschließend die Wärmebilanz für jedes Volumenelement i, j, k aufgestellt. Die Anpassung der Wärmetransportvorgänge an den Rändern des Speicherkörpers und an den Oberflächen der Rohre bzw. Kanäle kann bei der gewählten Modellierung sehr anschaulich erfolgen.

4.2 Speichermaterial

Im allgemeinen Fall wird angenommen, dass die Materialien die Wärme sensibel und latent speichern. Der Phasenwandel mit der Phasenwandelenthalpie r (Schmelz- bzw. Erstarrungswärme) kann sich stoffbezogen sehr unterschiedlich darstellen (Bild 3).

Da bei realen Abläufen des Phasenwandels auch Teilbe- und -entladungen auftreten, sind auch vielfältige Verläufe zwischen den durchlaufenden Erstarrungs- und Schmelzvorgängen möglich. Im Modell wurden deshalb ein allgemeingültiger Algorithmus implementiert, der die im Bild 4 vorgestellten Idealisierungen wahlweise zulässt. Eine detaillierte Darstellung ist dem Hauptbericht zu entnehmen.

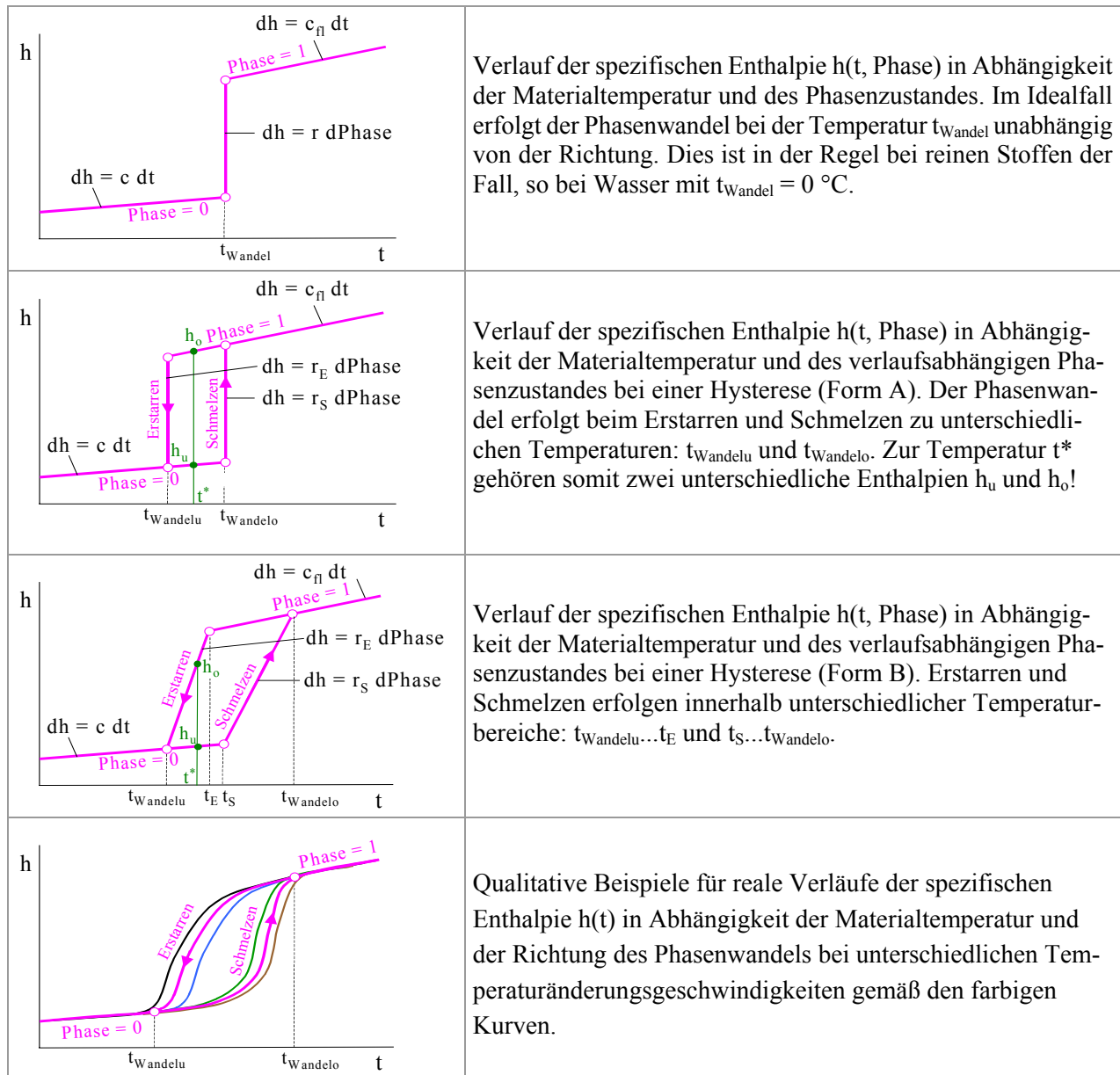


Bild 3 Ausgewählte Formen des Phasenwandels bei Latentspeichermaterialien im Enthalpie-Temperatur-Schaubild

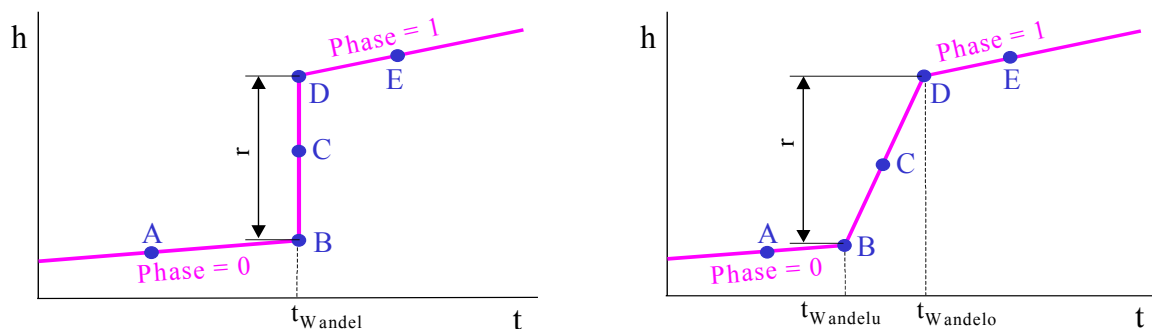


Bild 4 Approximationen des Phasenwandels (links: Idealfall des Phasenwandels bei konstanter Temperatur $t_{\text{Wandel}} = t_{\text{Wandelu}} = t_{\text{Wandelo}}$; rechts: Näherung für Phasenwandel mit veränderlicher Temperatur $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$ und eventueller Hysterese)

Der Algorithmus ist universell gestaltet, sodass alle Punkte A bis E Ausgangspunkte und gleichzeitig auch Endpunkte der Zustandsänderung sein können.

4.3 Rohre und Kanäle im Speicherkörper

Wie Bild 1 zeigte, wird der Speicherkörper im allgemeinen Fall von Rohren und/oder Kanälen durchzogen. Obwohl die geometrischen Querschnitte stets Rechtecke darstellen, werden die wärmetechnischen Größen Wärmeübergangskoeffizient vom Durchflussmedium an die Rohr- bzw. Kanalwand α_R und Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_R , der vom Durchflussmedium bis zur äußeren Rohr- bzw. Kanalwand definiert ist, für die reale Geometrie und die jeweils aktuelle Situation berechnet. Der Teilwärmedurchgangskoeffizient κ_R wird stets auf die Außenfläche des Rohres oder Kanals bezogen, sodass sich die wärmetechnische Berechnung der Durchströmteile exakt in die geometrische Quaderform einfügt. Den Rohren bzw. Kanälen ist jeweils ein Konstruktionstyp R1, R2, K1, K2 zugeordnet. D. h., es können maximal zwei unterschiedliche Rohr- und Kanalvarianten eingesetzt werden.

Als Durchflussmedien sind Wasser, wässrige Lösung mit Tyfocor L 40 % oder 50 % und Luft wählbar. Ihre temperaturabhängigen Zustands- und Stoffwerte sind im Rechenprogramm hinterlegt.

Weiterhin sind bei der Eingabe zu benennen:

- Volumenströme am Eintritt in den Speicherkörper
- Anzahl der Rohre bzw. Kanäle gleichen Typs
- Durchflussrichtung der Medien
- Zeitliche Temperaturverläufe der Medien am Eintritt in den Speicherkörper (zu einem Lufttemperaturverlauf gehört stets auch ein zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchte).

Die Temperaturverläufe sind vorerst als sich wiederholende Tagesgänge definiert, wobei mehrere Designdays vorgebar sind. Bei nur geringen Programmänderungen könnten auch Langzeitverläufe – beispielsweise gemäß Testreferenzjahr – Anwendung finden. Die Temperatur- und ggf. auch die Feuchteverläufe werden mit stündlichen Stützstellen benannt, wobei zwischenzeitlich linear interpoliert wird.

Bei den Durchströmteilen sind zwei Betriebsformen zu beachten:

- **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. Dies erfolgt vereinfacht im Vorfeld der zeitbezogenen Simulationen für jeden Rohr- bzw. Kanaltyp und das zugehörige Medium.

- **Wärmetransport in durchströmten Rohren und Kanälen**

Bei Durchströmung des Rohres bzw. Kanals bleiben näherungsweise die Änderung der Wandtemperatur und die Wärmeleitung innerhalb des Fluids unbeachtet. Letztere ist in der Regel gegenüber der bedeutend größeren Mediengeschwindigkeit tatsächlich auch vernachlässigbar. Die Summe der Elementwärmen aller in einem Rohrquerschnitt liegenden Elemente werden dann dem Medium (Flüssigkeit oder Luft) zugeordnet. Damit bewirkt beispielsweise die im Abschnitt i zugeführte Wärme $Q_{\text{Rohr}(i)}$ eine eindeutige Änderung der Medientemperatur (Bild 5). Die zeitabhängigen Medientemperaturen sind in Abhängigkeit der Wärmekapazität der Fluidströme und der Durchflussrich-

tung zu ermitteln. Damit ist es möglich, auch die thermodynamischen Vor- bzw. Nachteile bei Gleich- und Gegenstromführung in Überlagerung mit den Wärmespeichervorgängen zu bewerten.

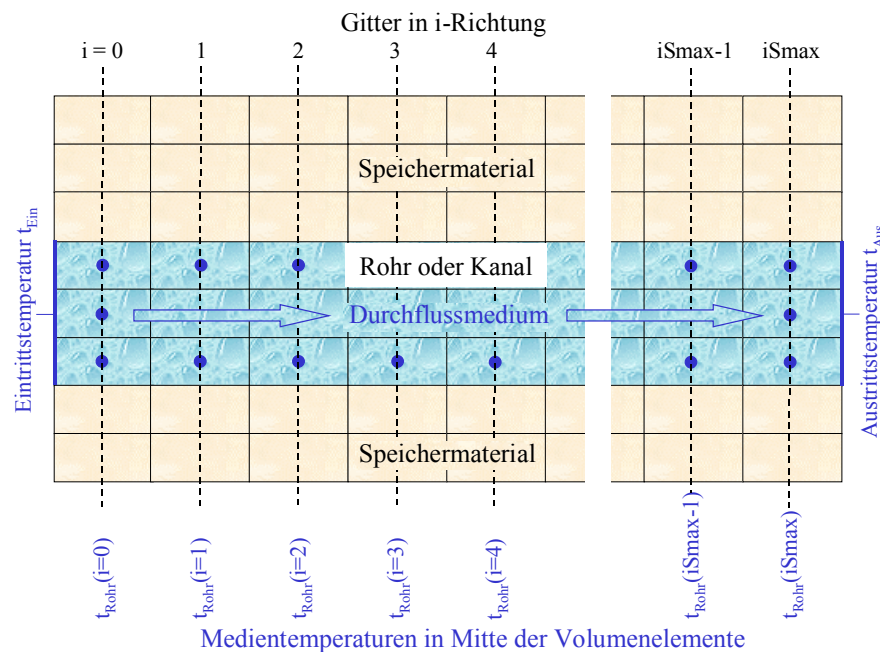


Bild 5 Rohr oder Kanal mit angrenzendem Speicherkörper und i-Gitter
Den Quaderelementen im Rohr bzw. Kanal werden vom Speicherkörper beispielsweise Wärmen QE zugeführt. Für jeden Querschnitt i erfolgt dann die Summenbildung, woraus in Abhängigkeit der Strömungsrichtung die neue Medientemperatur bestimmbar ist.

Beim Durchflussmedium Luft schließt sich im Abkühlfall für die Rohre bzw. Kanäle in Abhängigkeit von t_{Aus} und dem Sättigungsdampfgehalt x_S eine näherungsweise Bestimmung der Kondensatmenge an. Der genaue Kondensationsverlauf ist praktisch nicht 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 angenommene Näherung zeigt Bild 6.

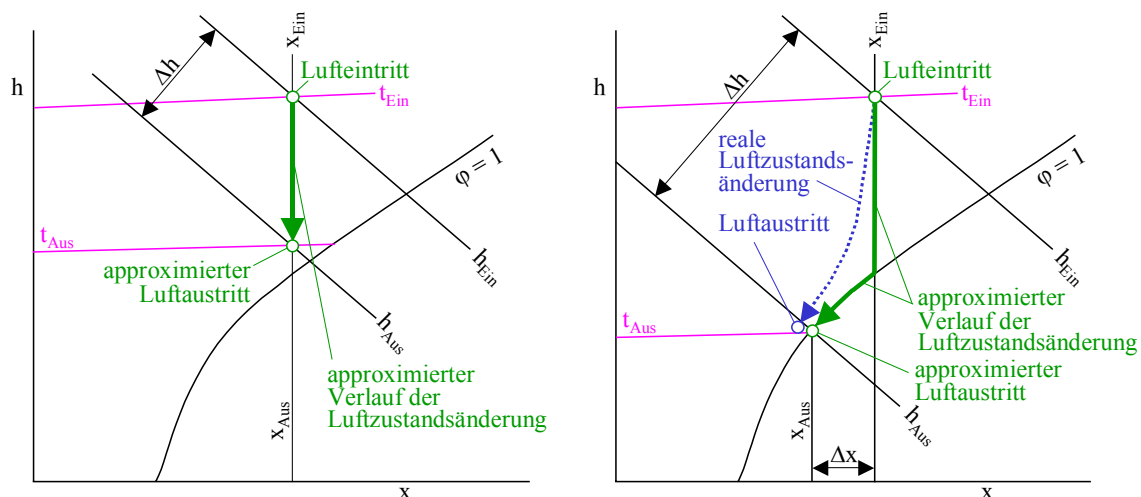


Bild 6 Näherungsweise Ermittlung der Luftzustandsänderung bei Abkühlung ohne (links) und mit (rechts) Kondensation (Die sogenannte reale Luftzustandsänderung gilt nur als Beispiel!)

4.4 Randbedingungen am Speicherkörper

Wie die Auswahl des Simulationsgebietes am zweckmäßigsten zu treffen ist, um die Rechenzeiten möglichst klein zu halten, zeigt beispielhaft das Bild 2. An der oberen, unteren, vorderen und hinteren Speicherbegrenzung kann eine Dämmschicht mit eindimensionaler Wärmeleitung angebracht

sein. Zudem wirkt dort eine Wärmeübergangsbedingung dritter Art. Bei der Eingabe ins Rechenprogramm werden beide als Wärmeübergangswiderstand zusammengefasst. An den seitlichen Schnittebenen ($k = 0$ und $k = k_{\text{Smax}}$) gelten Symmetriebedingungen (Bild 7) mit den Wärmeströmen null.

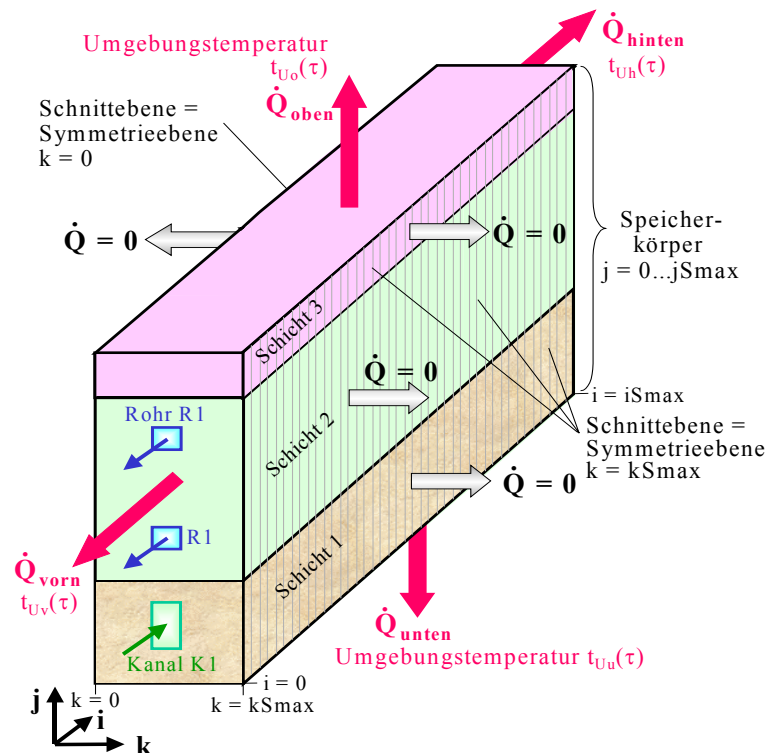


Bild 7 Kennzeichnung des Simulationsbereiches innerhalb eines Speicherkörpers

Die wärmetechnische Untersuchung des Simulationsgebietes lässt nur an den Bauteilgrenzen unten, oben, vorn und hinten Wärmeströme zu. An den seitlichen Schnittebenen existieren aus Symmetriegründen keine Wärmeströme.

Die Umgebungstemperaturen an den realen Speicheroberflächen können Zeitfunktionen darstellen, z. B. $t_{Uu}(\tau)$. Sie werden in analoger Weise zu den Eintrittstemperaturen für die Medienströme mit stündlichen Stützstellen definiert. Sind die Temperaturstundenwerte mit -273 °C gefüllt, so bedeutet dies, dass zu dieser Zeit der Wärmestrom vom Volumenelement nach außen null sein soll. Damit können dann weitere fiktive Speicherbegrenzungen in i - und j -Richtung gestaltet werden. 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.

Da durch die fiktive Speicherbegrenzung kein Wärmestrom fließt, sind auch Wärmeverluste im Realfall nicht erfassbar. Durch eine wirkungsvolle Dämmung entspräche man der Realität wieder in guter Näherung.

Die fiktiven Speicherbegrenzungen sind aber dennoch sehr sinnvoll, um die Simulationsgebiete und damit die Rechenzeiten weiter zu reduzieren.

Ausgewählte Beispiele für die Gestaltung der Randbedingungen zeigen die Bilder 8 und 9.

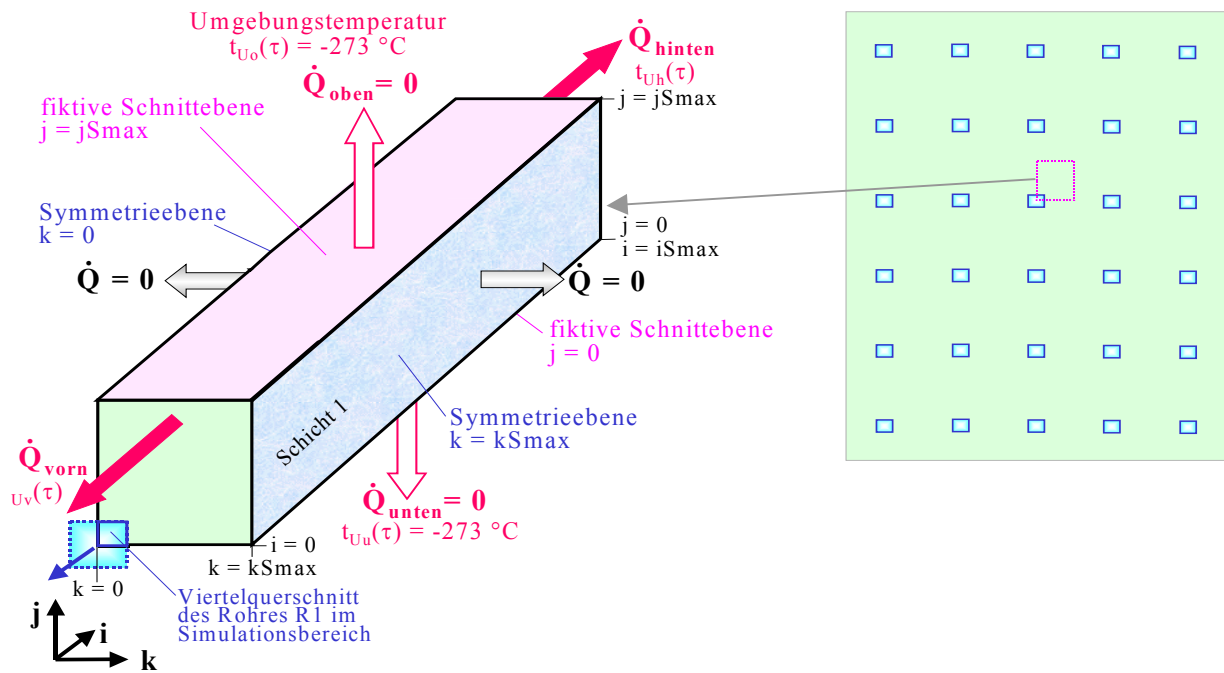


Bild 8 Definition eines Minimalausschnittes (links) aus einem Speicherkörper (rechts) mit Rohrdurchgang zur verkürzten Simulation (vgl. auch Detaildarstellung im Bild 2)

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

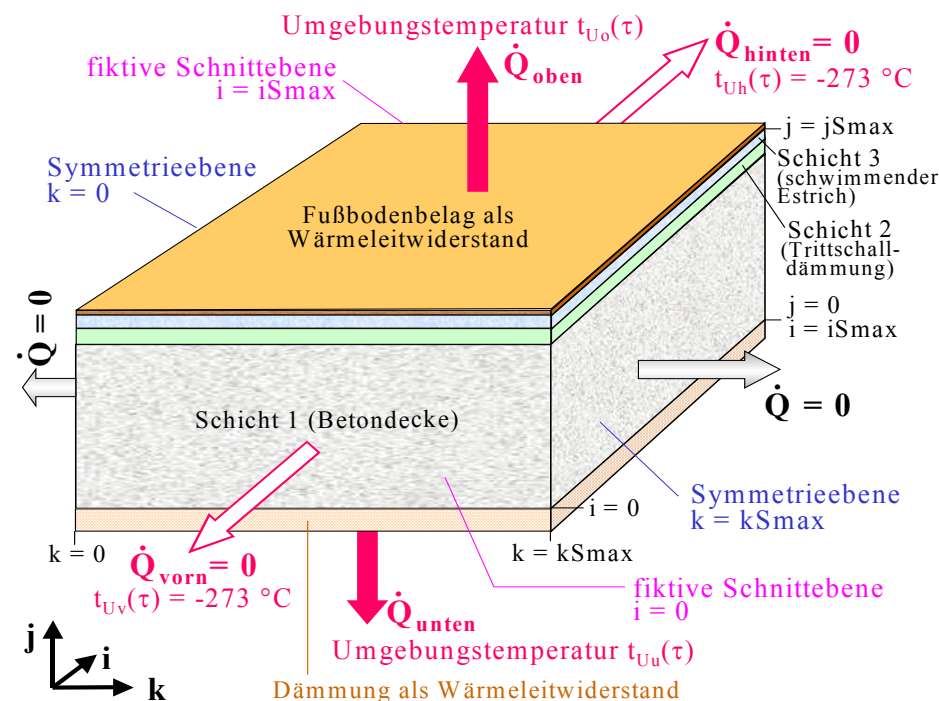


Bild 9 Definition eines Ausschnittes zur verkürzten Simulation eines passiv wirkenden Deckenspeichers über einem Kellerraum (keine Rohrbestückung)

Symmetrieebenen: $k = 0$ und $k = kSmax$; fiktive Schnittebenen: $i = 0$ und $i = iSmax$. Der höhenmäßige Aufbau ist komplett dargestellt.

Als Besonderheiten sind an den Unter- und Oberseiten des Speicherkörpers eindimensional wärmeleitende Schichten ohne Wärmespeicherfähigkeit angeordnet. 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.

4.5 Stabilitätskriterien für die numerische Berechnung

Die logischen Grenzen der möglichen Temperaturänderungen in den Volumenelementen des Speicherkörpers 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 somit eine Beschränkung für den Zeitschritt. Zu Beginn der numerischen Berechnung wird dieser für alle denkbaren Konstellationen unter Beachtung der Phasenzustände und der Rohr- bzw. Kanalkenngrößen bei Stillstand überprüft.

Zusätzlich kann sich im Rohr- bzw. Kanalbereich vor allem bei sprunghaften Änderungen der Medientemperatur, bei Volumenelementen großer Länge in Achsrichtung, bei großen Zeitschritten sowie bei geringem Wärmekapazitätsstrom eine Situation einstellen, die ebenfalls gegen den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verstößt. In einem rechenorganisatorischen aufwändigen Verfahren bildet man die maximale und minimale Umgebungstemperatur und korrigiert über mehrere Zeitschritte die jeweilige Rohrabschnittstemperatur, sodass keine Schwingungen bei der Lösungsentwicklung auftreten.

4.6 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 ($\equiv$ Simulationsstunde). Insgesamt werden ermittelt:

- Wärme an die Umgebung innerhalb der letzten Stunde
- Wärme an das fließende Medium innerhalb der letzten Stunde
- Gespeicherte Wärme im Speichermaterial unter Beachten einer vorgebbaren Bezugstemperatur und Annahme der festen Phase zur vollen Stunde
- Gespeicherte Wärme in Rohren bzw. Kanälen bei stehenden Medien zur vollen Stunde.

Damit sind die am Ende einer Betriebsstunde gespeicherten und innerhalb der jeweils letzten Stunde zugeführten Wärmemengen bilanzierbar und stundenweise vergleichbar.

5 Rechenprogramm

Der Ablaufplan ist im Bild 10 dargestellt. Das Rechenprogramm ist in Visual Basic.NET geschrieben. Das Rechenprogramm mit dem Quellcode (Programmlisting) ist als Download kostenfrei beigelegt.

Die Datenverwaltung geschieht in drei Dateien:

EINGABE.dat	(Daten des Speicherkörpers)
ZVERLAUF.dat	(Zeitverläufe der Randbedingungen)
ERGEBNIS.dat	(Ergebnisdaten der Simulation).

Die Eingaben erfolgen über zwei umfangreiche Bildschirmmasken, sie werden bei der Vorstellung des Testbeispiels gezeigt. Die Erläuterung der Größen ist dem Hauptbericht zu entnehmen.

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.

Dateneingabe mittels Bildschirmmasken

Teil 1 Speicheraufbau:	• Schichten: Geometrie und Stoffdaten • Rohre und Kanäle: Anzahl, Geometrie, Stoffdaten, • Durchflussmedien: Art (Wasser, Tyfocor L, Luft), Volumenstrom, Richtung, Temperaturgang • Thermische Bedingungen an den Speicherrändern • Bezugstemperatur
Teil 2 Temperaturverläufe für verschiedene Entwurfstage (Designdays)	• Tagesgänge der Fluidtemperaturen am Speichereintritt • Tagesgänge der Umgebungstemperaturen (unten, oben, vorn, hinten) • Starttemperatur für den Simulationsbeginn • Uhrzeit des Simulationsbeginns, Zeitschritt, Simulationszeitraum

Basisberechnungen

- Rohr- bzw. Kanaldatenaufbereitung
- Verifizierung des Schichtaufbaus
- Verifizierung der Rohre bzw. Kanäle
- Rohr- bzw. Kanalapproximationen bei Medienstillstand
- Überprüfung der numerischen Stabilität
- Zusammenstellung aller konstanten Elementdaten (Flächen, Volumina, Speicherkapazitäten, Wärmeleitwiderstände)
- Kennzeichnung der Rohr- bzw. Kanalbereiche
- Startdatenbereitstellung in Abhängigkeit der Starttemperatur

Instationäre Berechnung im Intervall der Zeitschritte

- Zeitsteuerung
- Bestimmung der aktuellen Temperaturvorgaben durch Interpolation der vorgegebenen Zeitverläufe
- Ermittlung der Eintrittsbedingungen für die Medienströme (Wasser, Tyfocor L, Luft)
- Berechnung der thermodynamischen Größen der Rohr- bzw. Kanalströmung
- Elementweise Ermittlung der Wärmebilanzen nach Berechnung der Wärmeströme über die Begrenzungen der Volumenelemente
- Berechnung der "neuen" thermischen Elementzustände ($tn_{i,j,k}$ und $Phase_{i,j,k}$) am Ende des Zeitintervalls unter Beachten der Speicherkapazität und des Phasenwandels
- Berechnung der i-abschnittswisen Rohr- bzw. Kanaltemperaturen mit speziellen Korrekturen für das Medium Luft im Falle der Wasserdampfkondensation
- Umspeichern des Temperaturfeldes ($t_{i,j,k} = tn_{i,j,k}$; Endzustände werden zu Anfangswerten)
- Summierung der intervallbezogenen Wärmemengen zu Stundenwerten und Bestimmung der Speicherenthalpie zur vollen Simulationsstunde

Zeitschleife

Datenausgabe als Tabellen und Grafiken

Bild 10 Ablaufplan des Rechenprogramms zur wärmetechnischen Simulation eines mehrschichtigen Wärmespeichers aus sensiblem und latentem Material mit integrierten Rohren bzw. Kanälen

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

- Test 1: Speicherkörper mit drei Kapillarrohrmatten und vollen Rohrquerschnitten (Bild 11)

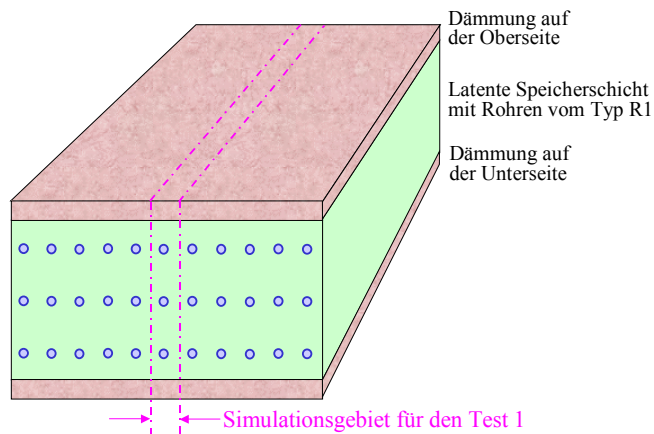


Bild 11 Wärmespeicher mit drei Lagen Kapillarrohrmatten und allseitiger Dämmung gleicher Dicke, wobei nur die obere und die untere Dämmschicht dargestellt sind

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 Speicheroberflächen von je 40 mm Dicke ($\lambda_D = 0,04 \text{ W/(m K)}$) und die jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten ($\alpha_U \approx 7,7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) finden Beachtung.

Für die Simulation werde ein symmetrisches Gebiet gemäß dem im Bild 11 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 Rand-einfluss dann vernachlässigbar ist. Bild 12 zeigt die detaillierte Geometrie des Speichers.

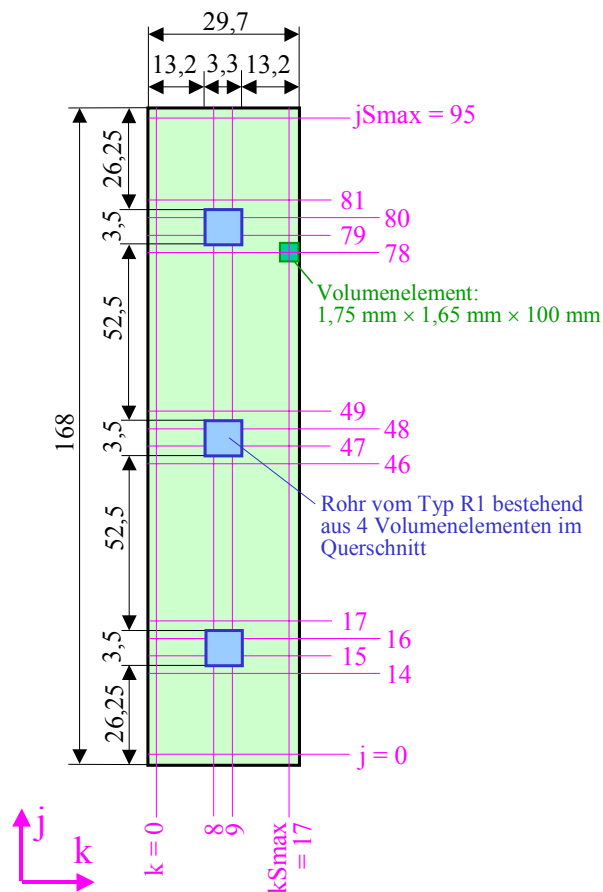


Bild 12 Geometrie des Simulationsgebietes für den Test 1 mit Angaben in mm (nicht maßstäblich)
In i-Richtung – in die Tafelenebene hinein – gelten die Unterteilungen $i = 0$ bis $iS_{max} = 19$, sodass die Länge des Speicherkörpers 2000 mm beträgt.

Hauptprogramm

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

	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
Flüssigwerte >>							< Oberwert
Schicht s = 2	0	0	0	0	0	-273	< Unterwert
Flüssigwerte >>							< Oberwert
Schicht s = 1	1,75	1380	0,5	2500	120	22	< Unterwert
Flüssigwerte >>							95
Flüssigwerte >>							< Oberwert

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

Ro oberer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha_oben: 1,13 m²K/W

Ru unterer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha_unten: 1,13 m²K/W

Rv vorderer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha_vorn: 1,13 m²K/W

Rh hinterer Wärmeleitwiderstand mit 1/alpha_hinten: 1,13 m²K/W

Bezugstemperatur für Speicherwärmebestimmung: 0 °C

Gitterdaten für x- und z-Achse:

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 Tyfoacor 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

ba in mm ha in mm

STARTEN DATEILADEN ZEITVERLAUF DATENSPEICHERUNG BERECHNUNG DRUCK EINGABEWERTE DIAGRAMM DRUCK ERGEBNISSE BEENDEN

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!

Bild 13 Benutzeroberfläche 1 nach dem Eintragen der Speicherdaten für Test 1

- Der Speicher besteht nur aus einer Schicht. Als Gitterteilung wurde gewählt: 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. Ihr Umfang beträgt somit $4(1,75 \text{ mm} + 1,65 \text{ mm}) = 13,6$ mm. Der reale Außenumfang des Kapillarrohres ergibt sich zu: $\pi d_a = \pi 4,3 \text{ mm} = 13,5$ mm. Damit besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Realität und Approximation. Gleiches gilt für den Rohrabstand, der gemäß Approximation der Breite des Simulationsgebietes von 29,7 mm entspricht und nahe dem üblichen Mattenmaß von 30 mm ist.
- Alle Umgebungstemperaturen betragen während der gesamten Simulationsdauer 22 °C.
- Die Rohre (Anzahl 3 Stück) werden mit Wasser (zugehöriger Volumenstrom 10 l/h, Wassergeschwindigkeit ca. 0,16 m/s) beaufschlagt. Die Wassereintrittstemperatur ändert sich zeitabhängig. Die Simulation beginnt um 18⁰⁰ Uhr.
- Die Starttemperatur beträgt 20 °C.
- Als Latentspeichermaterial kommt ein Paraffin-Salzhydrat-Gemisch zum Einsatz, wobei die technischen Daten an das Produkt SP 22 A4 der Fa. Rubitherm angelehnt sind. Einige Differenzierungen – beispielsweise bei der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität im geschmolzenen und ungeschmolzenen Bereich – sind für die Testphase des Rechenprogramms

bewusst vorgenommen worden.

- Die Materialdaten des Speichers und der Rohre sowie die Betriebsbedingungen sind den Bildschirmmasken (Bilder 13 und 14) sowie dem Rechnerausdruck zu entnehmen.
- Vor dem Rechnungsbeginn erfolgen zahlreiche Prüfungen, die im Hauptbericht beschrieben sind.

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\TEST1\ZVERLAUF.dat

Tagessunde

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 Flüssigkeitsstromes 1 in °C	1	15,9	15,6	15,1	14,8	14,7	15,1	-273	-273	22	22,5	23	23,2	23,5	24	24,5	24,5	24,5	19	18,7	18,4	18,1	17,7	17,4	17,1
tF2 Temperaturverlauf des Flüssigkeitsstromes 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	-273
tL1 Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes 1 in °C	3	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273	-273
xL1 Absolute Luftfeuchte des Luftvolumenstromes 1 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	
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	-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		22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
tUu Temperaturverlauf der unteren Speicherumgebung in °C		22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
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	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	22	22	22	22	22

Zeiten / Zeitschritte
 Simulationsbeginn: 18 Uhrbeginn
 Zeitschritt: 3 Dtau in s
 max. Schrittzahl: 28800 Zeitmax

Starttemperatur
 Speichertemperatur: 20 tStart in °C

ANZEIGEN **DATENSPEICHERUNG**
KONTROLLGRAFIK **KONTROLLDRUCK** **BEENDEN**

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

Bild 14 Benutzeroberfläche 2 nach dem Eintragen der Temperaturtagesgänge und Zeitdaten zum Simulationsablauf sowie der Starttemperatur für Test 1

Der Ergebnisdruck beinhaltet die gesamte, für die Simulation zutreffende Eingabe und die Stundenresultate 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
	mm	kg/m ³	fest	flüssig	fest	flüssig	kJ/kg	Beginn	Ende	
			W/(m K)		J/(kg K)			°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_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): 0,0297 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
				m²K/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/m³	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

Tages- stunde	tF1 °C	tF2 °C	tL1 °C	xL1 g/kg	tL2 °C	xL2 g/kg	tUo °C	tUu °C	tUv °C	tUh °C
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
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: 28800 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	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	-	-	-	182,63	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
5	23	-0,38	3,60	-	-	-	173,00	0,00	-0,0
6	0	-0,42	3,47	-	-	-	169,95	0,00	-0,0
7	1	-0,46	5,13	-	-	-	165,27	0,00	0,0
8	2	-0,52	5,86	-	-	-	159,93	0,00	-0,0
9	3	-0,58	5,35	-	-	-	155,16	0,00	-0,0
10	4	-0,63	4,96	-	-	-	150,83	0,00	-0,0
11	5	-0,68	4,04	-	-	-	147,46	0,00	0,0
12	6	-0,71	2,20	-	-	-	145,96	0,00	0,0
13	7	-0,72	1,04	-	-	-	145,65	0,79	-0,8
14	8	-0,72	0,00	-	-	-	146,35	0,80	0,0
15	9	-0,71	0,00	-	-	-	147,11	0,00	0,8
16	10	-0,60	-23,80	-	-	-	171,48	0,00	0,0
17	11	-0,37	-16,32	-	-	-	188,16	0,00	0,0

Stunden		QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
18	12	-0,19	-11,48	-	-	-	199,83	0,00	0,0
19	13	-0,08	-8,80	-	-	-	208,70	0,00	0,0
20	14	-0,02	-9,14	-	-	-	217,87	0,00	-0,0
21	15	-0,00	-10,86	-	-	-	228,72	0,00	0,0
22	16	0,00	-11,39	-	-	-	240,11	0,00	-0,0
23	17	0,00	-10,86	-	-	-	250,96	0,00	0,0
24	18	0,00	4,70	-	-	-	246,23	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		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
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	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	23	17,4	17,7	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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:	-

Die Grafiken zeigen die Ergebnisse der Simulation besonders anschaulich.

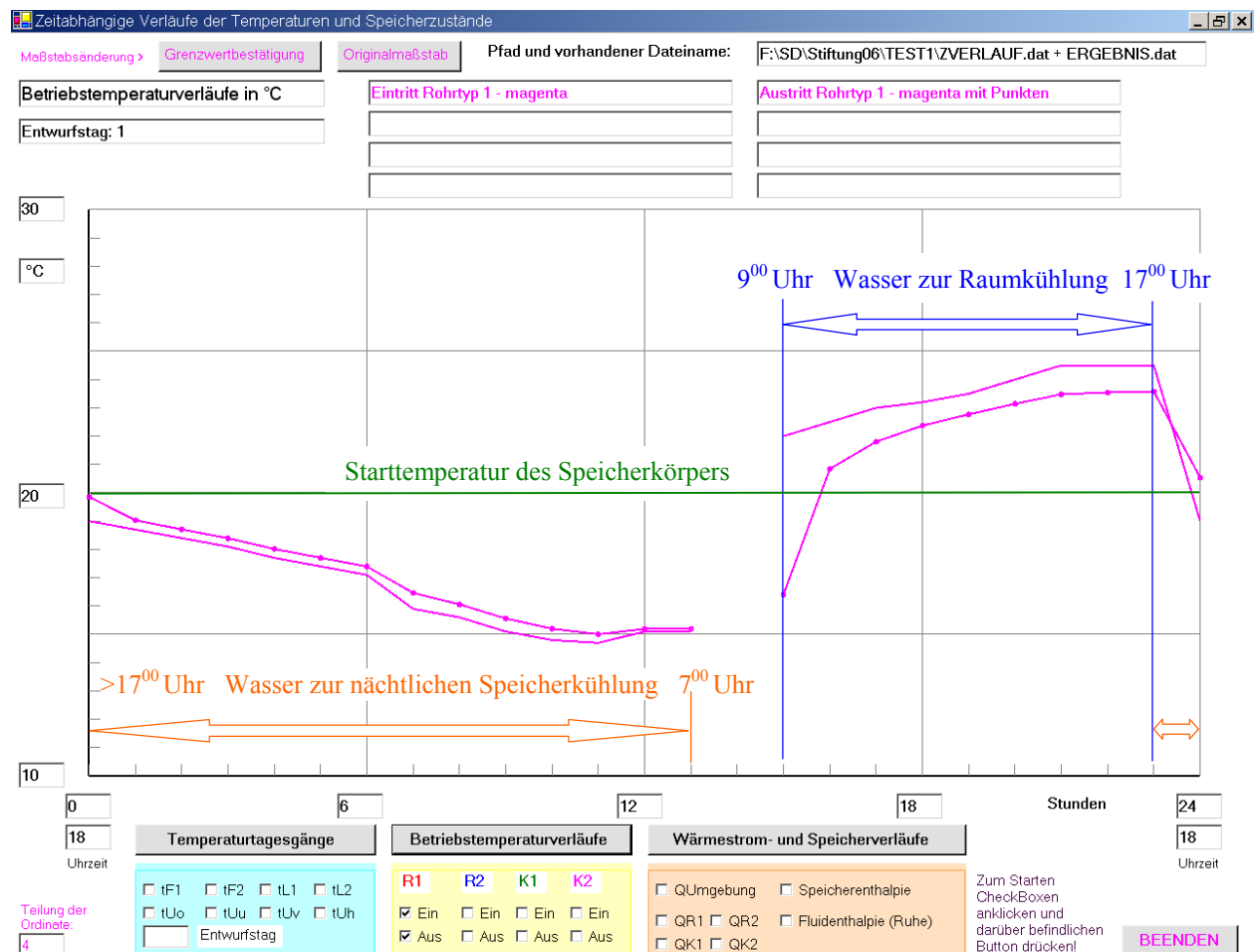


Bild 15 Wassertemperaturen am Ein- und Austritt des Speichers mit Kennzeichnung möglicher Betriebsbedingungen (Die Auswahl der Temperaturverläufe wird gemäß Kennung in den CHECKBOXEN getroffen.)

- Eine Maßstabsveränderung ist leicht möglich, wie im Hauptbericht beschrieben.
- 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 6⁰⁰ und 7⁰⁰ 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 Wassereintrittstemperatur deutlich angestiegen ist. Der große Temperaturunterschied zum Speichermaterial bewirkt zum Neustart des Wasserdurchflusses einen großen Wärmestrom und damit eine relativ niedrige Wasseraustrittstemperatur.
- Nach 17⁰⁰ Uhr kehren sich die Verhältnisse um, das Speichermaterial wird wieder gekühlt.
- Beispielhaft ist ein denkbare, praktisches Belastungsregime (tags Anschluss eines Raumkühlsystems, nachts Speicherkühlung durch Kühlturbetrieb) eingetragen.

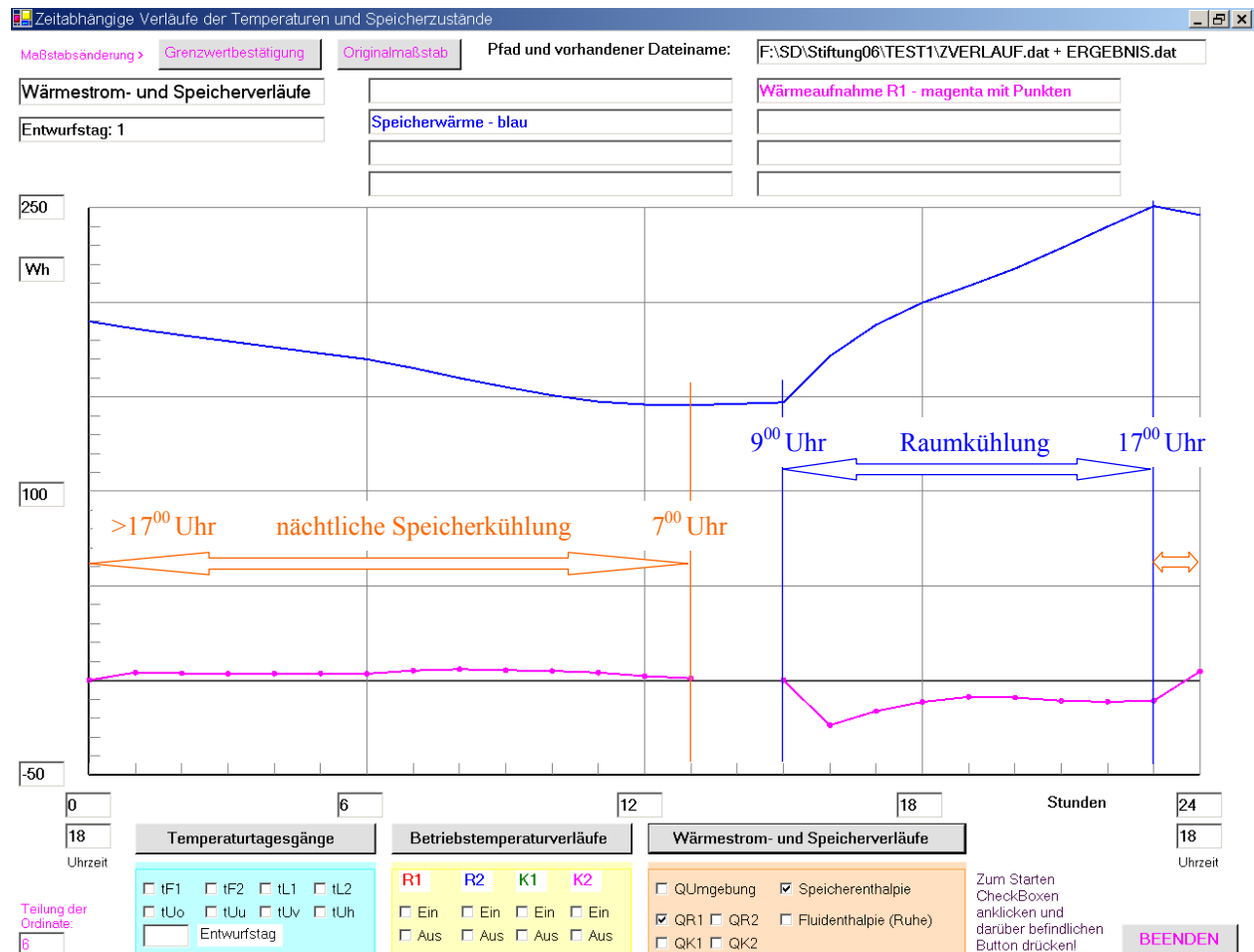


Bild 16 Enthalpie ("Wärmeinhalt") des Speichermaterials – ermittelt am Ende einer jeden Simulationsstunde – und Wärmeaufnahme durch das Rohrregister – summiert über die jeweils vorhergehende Simulationsstunde – für die Simulationszeit von 24 Stunden

Zusätzlich sind zur Verbesserung der Anschaulichkeit die denkbaren Nutzungsmöglichkeiten vermerkt.

- Die Bilder 16 und 17 zeigen die Wärmestrom- und Speicherverläufe in getrennten Darstellungen, da sich ihre absoluten Größen zu stark unterscheiden (Wahl ungleicher Ordinatenmaßstäbe).
- Die Auswahl der Kurvendarstellung erfolgt wiederum durch Markierung der CHECKBOXEN. Die Kurven und ihre Beschreibungen sind farblich identisch.
- Zum eindeutigen Verständnis sei 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 7⁰⁰ und 9⁰⁰ 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.
- Infolge des willkürlich gewählten Anfangszustandes kann innerhalb der ersten 24 Stunden kein Gleichgewicht zwischen den getauschten Wärmemengen vorliegen.

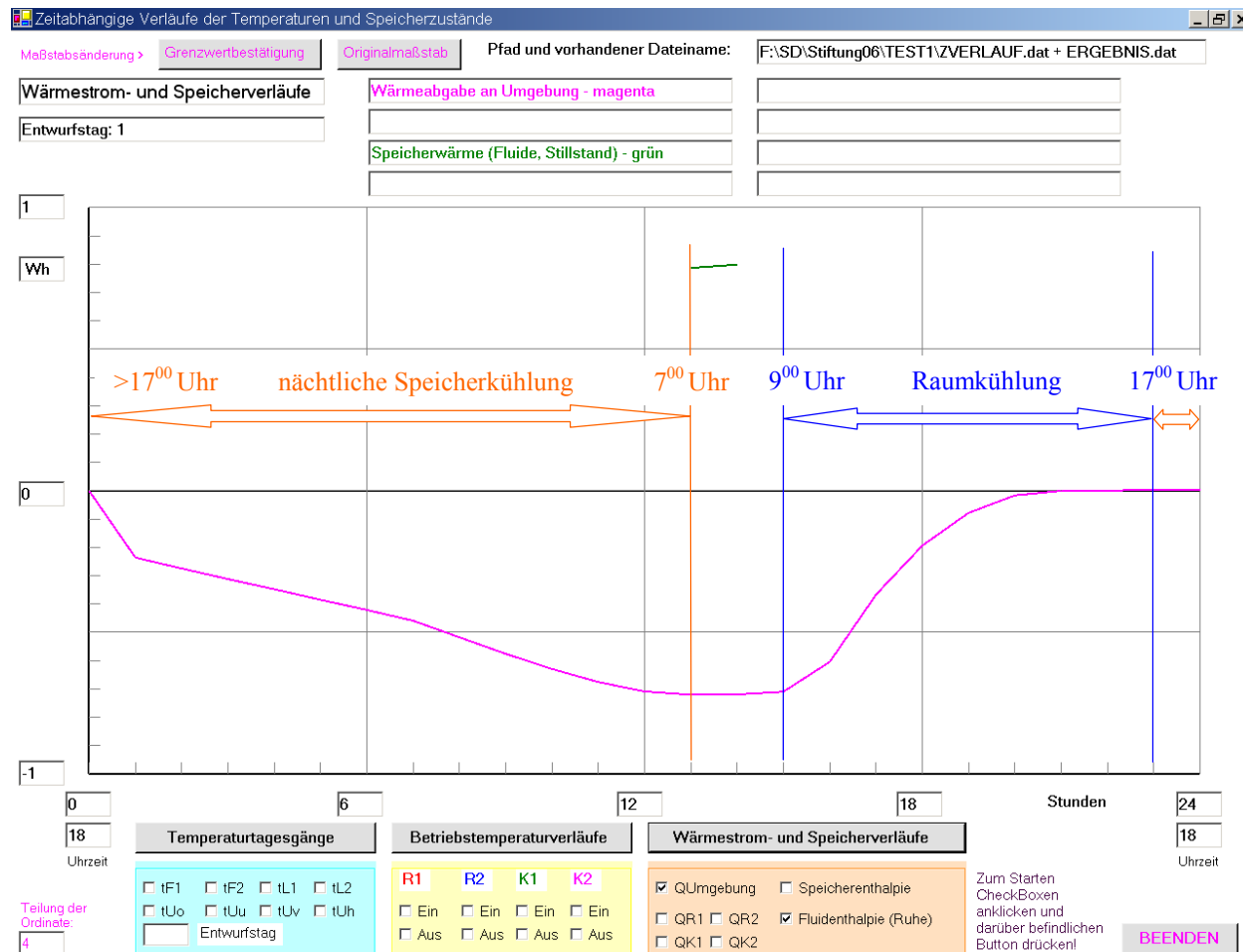


Bild 17 Fluidenthalpie ("Wärmeinhalt") des stehenden Wassers im Rohr – ermittelt am Ende der betreffenden Simulationsstunde – und Wärmeabgabe des Speicherkörpers an die Umgebung – summiert über die jeweils vorhergehende Simulationsstunde – für die Simulationszeit von 24 Stunden

- Wegen der Kleinheit der Ergebniswerte ist der Ordinatenmaßstab extrem groß gewählt worden.
- Die Wärmeabgabe des Speicherkörpers an die Umgebung (hier ≤ 0) gilt für die vorhergehende Simulationsstunde. Deshalb ist zur Betriebsstunde = 0 auch die Wärmeabgabe null.
- Von 7⁰⁰ bis 9⁰⁰ Uhr besteht kein Wasserdurchfluss. Da er genau 9⁰⁰ Uhr wieder beginnt, werden nur für 7⁰⁰ und 8⁰⁰ Uhr die im Rohrregister gespeicherten Wärmemengen bestimmt.

Zusätzlich zu den vorgestellten Ausgabemöglichkeiten können die Temperaturen und die Phasenzustände im Speicherkörper noch detailliert im Querschnitt und im Längsschnitt geplottet werden.

Feldtemperaturen in °C im Längsschnitt der Ebene k = 9 zur Zeit 22⁰⁰ Uhr (Auszug)

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	18,88	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
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
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	18,66	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
Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 1: 18,03 °C																				
Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 2: 18,00 °C																				
Austrittstemperatur aus Rohr/Kanal 3: 18,03 °C																				

Rohrlage

Kennzeichnung der Symmetrie

Im Hauptbericht sind für das Testbeispiel **umfangreiche Verifikationen** erfolgt:

- Fehleranzeigen bei Falscheingaben
- Überschlägige Nachrechnungen
- Gegensätzliche Rohrdurchströmung mit gleichen Ergebnissen usw.
- Korrekte Übernahme der Eingabedaten
- Vergleiche zu Mehrschichtspeicherkörpern
- **Test 2 und Test 3: Verkleinerte Simulationsgebiete gegenüber Test 1 (Bild 18)**

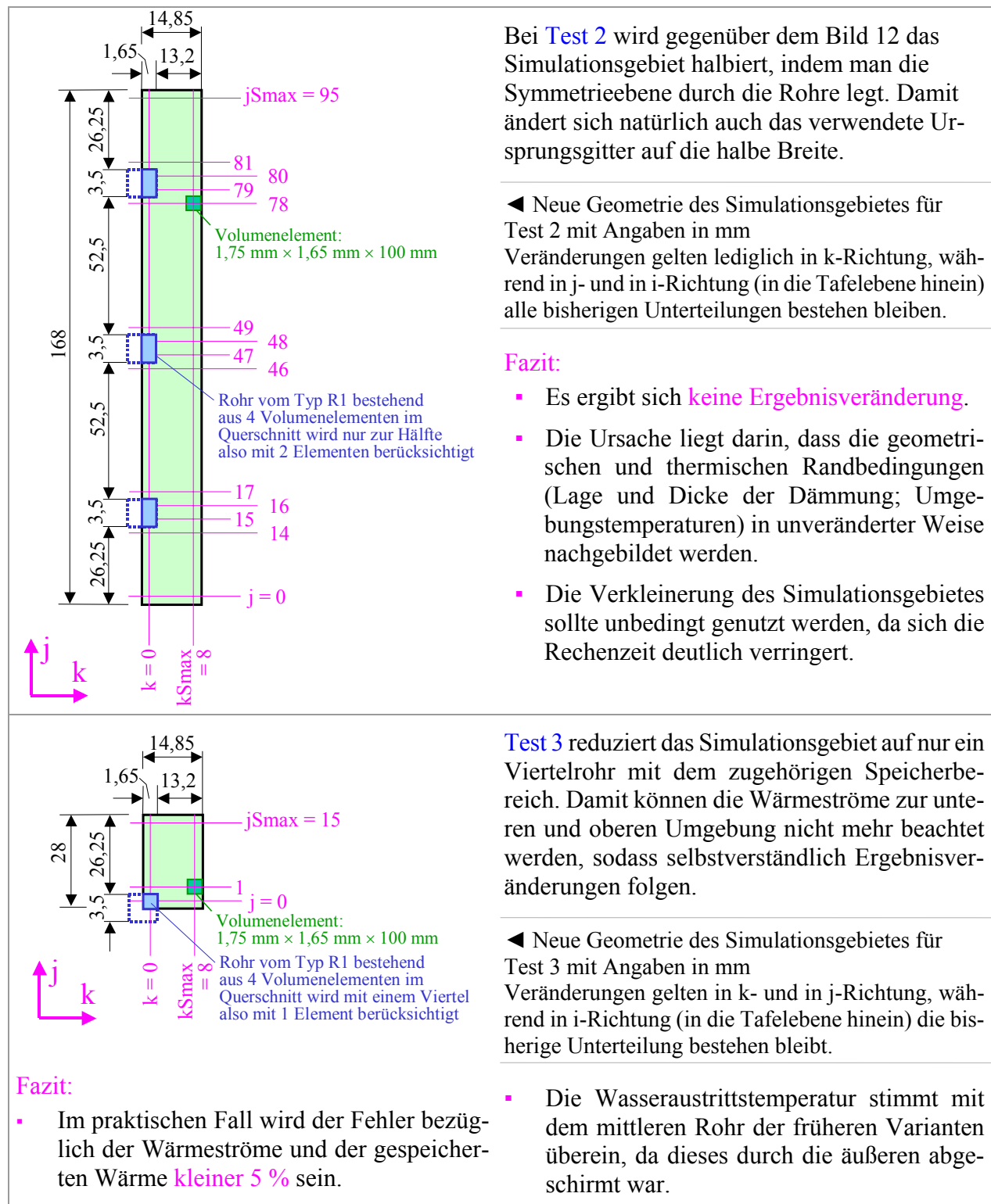


Bild 18 Zusammenstellung der Varianten Test 2 und Test 3 mit reduzierten Simulationsgebieten

- Einschwingverhalten des Speichers

Für Test 3 wurde die Simulation über 72 Stunden geführt. Die Ergebnisse (Bild 19) zeigen, dass bei der gegebenen Speichergeometrie und dem Ent- und Beladerhythmus sich bereits nach 12 Betriebsstunden wiederkehrende Verhältnisse einstellen. D. h., der Speicher arbeitet **sehr reaktionsschnell**.

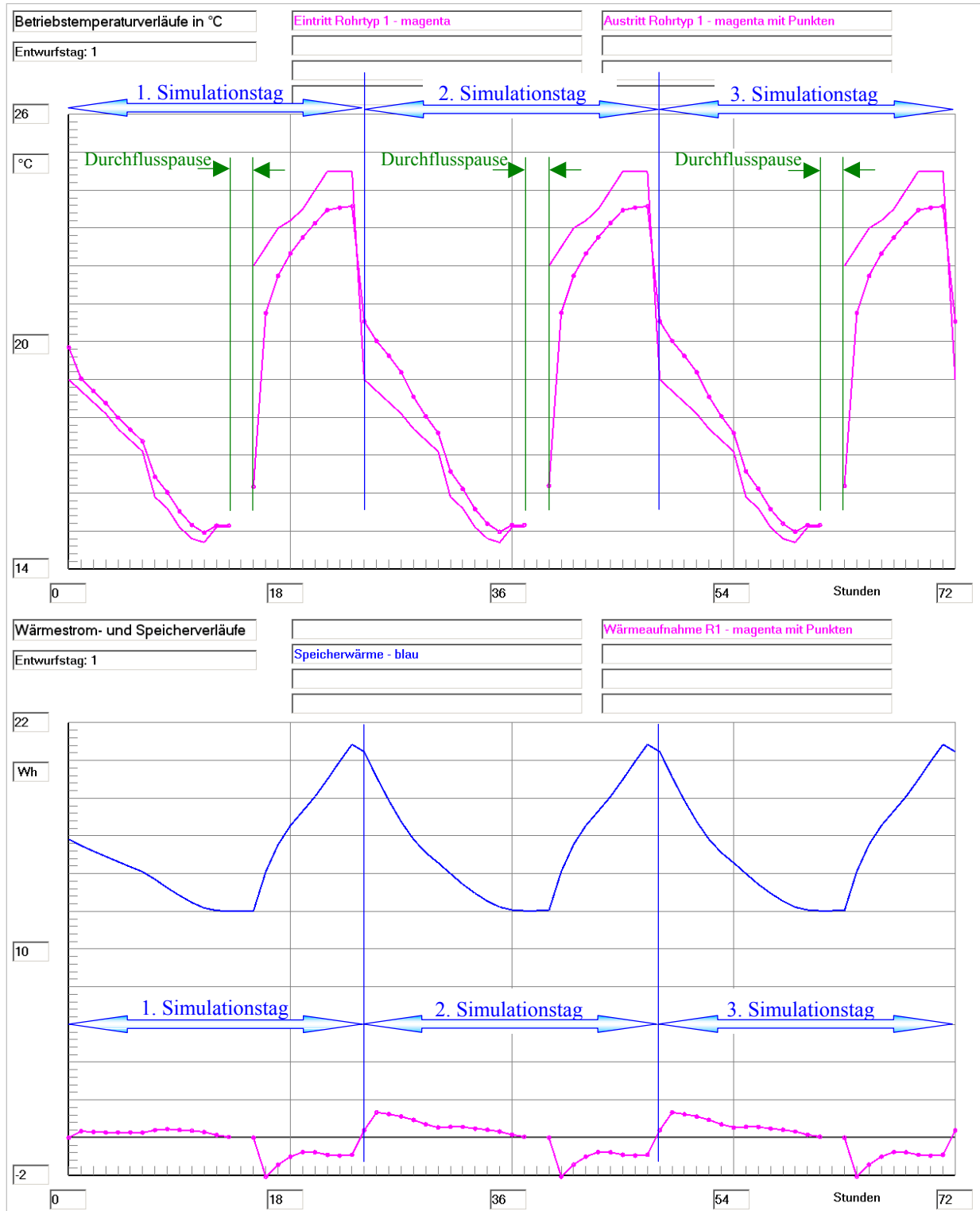


Bild 19 oben: Wasserein- und Wasseraustrittstemperatur
 unten: Speicherenthalpie ("Wärmeinhalt" im Speichermaterial) am Ende der jeweiligen Stunde und Wärmeaufnahme des Viertelrohres im Simulationsgebiet während der vorhergehenden Stunde im gesamten Simulationszeitraum von 72 Stunden

7 Testbeispiele für einen Betonspeicher mit eingeformtem Luftkanal

Es werden die Besonderheiten von luftdurchströmten Kanälen im Speichermaterial Beton mit nur sensibler Wärmespeicherung untersucht, wobei Variationen des Zeitschrittes (100 s und 0,1 s) erfolgen, um die Wirkungsweise des im Hauptbericht entwickelten Stabilitätskriteriums für die numerische Berechnung im Rohr- bzw. Kanalbereich zu prüfen.

Es wird die zweifache Symmetrie zur Verkleinerung des Simulationsgebietes herangezogen, sodass aus dem Originalspeicher nur ein Minimalausschnitt nach Bild 20 folgt.

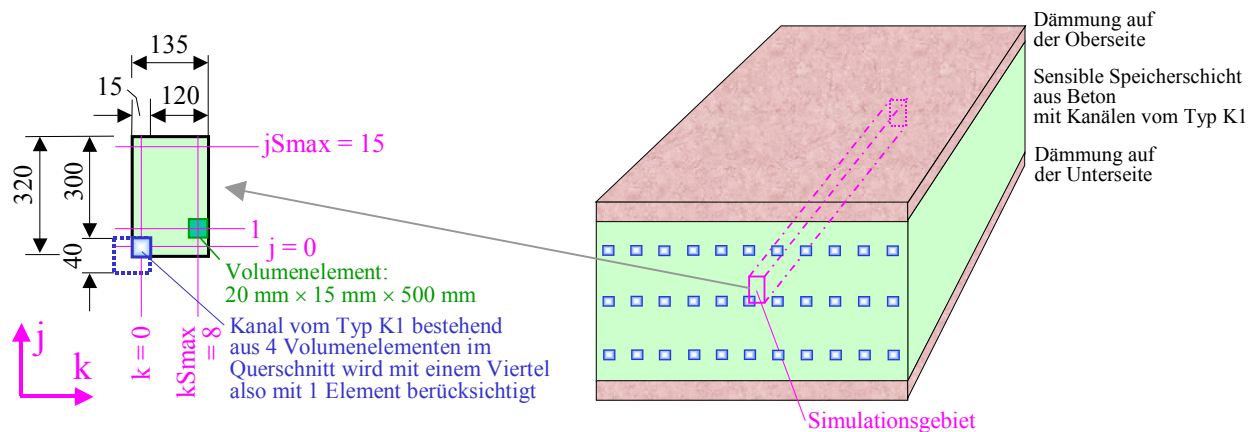


Bild 20 links: Geometrie des Simulationsgebietes für die Testbeispiele mit Maßangaben in mm

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

rechts: Gesamtansicht des Wärmespeichers aus Beton mit Kennzeichnung des Simulationsgebietes

Es wird nur ein Viertel des Luftkanals (Originalgröße: 30 mm × 40 mm) und ein zugehöriger Symmetriebereich des Speichermaterials einbezogen. Die Dämmschichten an der Ober- und Unterseite bleiben unbeachtet.

Als Besonderheiten gelten:

- Die Luft Eintrittstemperatur ändert sich zeitabhängig. Sie ist bei Beginn der Simulation mit 0 °C um 10 K niedriger als die einheitliche Temperatur des Speichermaterials. Nach 12 Stunden Betriebszeit ändert sich die Temperatur innerhalb einer Stunde um 20 K.
- Der Luft Eintrittstemperatur ist eine bestimmte Luftfeuchte zugeordnet.
- Die Luftgeschwindigkeit in den Kanälen beträgt etwa 5,9 m/s.

Die weiteren Eingabe- und Ergebnisdaten sind dem nachfolgenden Rechnerausdruck zu entnehmen.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\STIFTUNG06\TEST5\

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/m³	W/(m K)		J/(kg K)		kJ/kg	°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 (Unterwert)
t_Wandel_Ende(s)	Ende des Phasenwandels (Oberwert)
jSSmax(s)	maximale Gitterzahl der Schicht in j-Richtung

Gesamtabmessungen des Speicherkörpers:

Höhe der Schicht 1: 0,3200 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	Delta_z	iSmax	kSmax	Wärmeleitwiderstände vom Speicher zur Umgebung			
mm	mm			R_oben	R_unten	R_vorn	R_unten
				m²K/W			
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	ba	ha	D_W	Rho_W	Lambda_W	c_W	Zahl	V_S	SR	T_Typ	Medium
	mm	mm	mm	mm	kg/m³	W/(m K)	J/(kg K)	-	l/h	-	-	-
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	tF2	tL1	xL1	tL2	xL2	tUo	tUu	tUv	tUh
	°C	°C	°C	g/kg	°C	g/kg	°C	°C	°C	°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	-	-	-	-	-	-

Tages- stunde	tF1 °C	tF2 °C	tL1 °C	xL1 g/kg	tL2 °C	xL2 g/kg	tUo °C	tUu °C	tUv °C	tUh °C
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
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

Stunden		QU	QR1	QR2	QK1	QK2	QSpeicher	QRK	DQ
BS	TZ	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
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 °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	-	-	-
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	-	-	-
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:	-

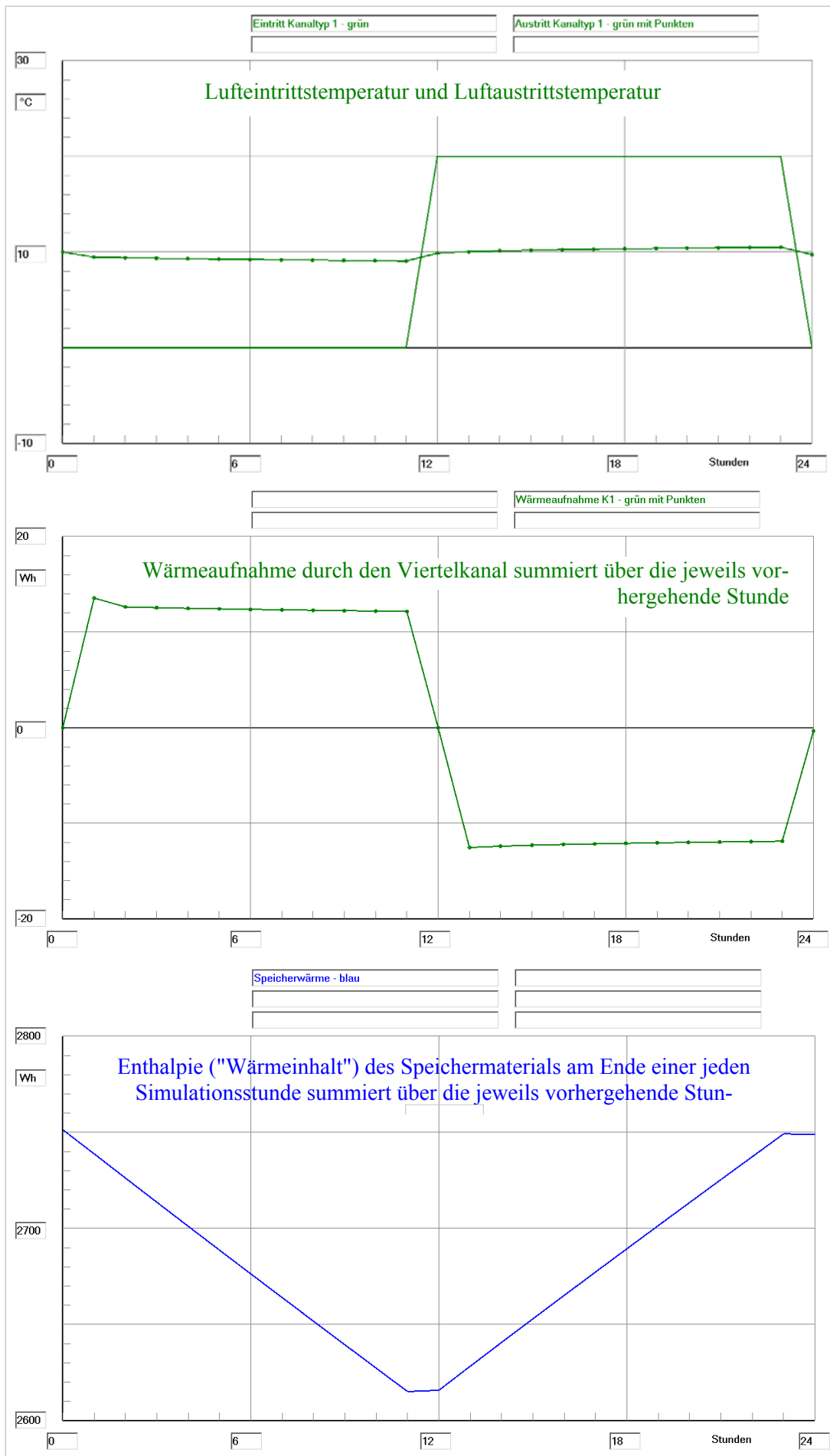


Bild 21

- Der zeitliche Verlauf zeigt eine stabile Lösungsentwicklung. Die Änderungen der Luft Eintrittstemperatur werden vom Algorithmus innerhalb einer Simulationsstunde bewältigt. Die numerisch bedingte Schwingung wird wirkungsvoll gedämpft (Details siehe Hauptbericht).
- Die Wärmeströme an die Umgebung sind wegen der zweifachen Symmetrie gleich null.
- Der Wärmekapazitätsstrom ($\text{Massestrom} \times \text{spezifische Wärmekapazität}$) 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 Herabsetzung der Zeitschrittweite von 100 s auf 0,1 s zeigt bereits nach 1 s Simulationszeit einen unkorrigierter Rohrtemperaturverlauf. Die bedeutungsvolle Speicherenthalpie weist mit maximal 0,1 % praktisch keine Unterschiede auf. (Beide Erkenntnisse folgen aus Hauptbericht.)
- Große Zeitschrittweiten zur Verkürzung der Rechenzeit sind somit anwendbar.

8 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 Raumkühleinrichtung Wärme zugeführt.

Das vorgenannte Verfahren kann in abgewandelter Form Anwendung finden, wenn die Raumkühleinrichtung 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.

- **Wärmerückgewinnungssysteme** mit Aufwärmung der Außenluft.
- **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 "Ergielieferern". 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.

Im Hauptbericht sind folgende meteorologische Daten aufbereitet worden:

- t_x -Korrelation und Jahreshäufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für den 24 Stundentag, für 6 ... 18 Uhr und 18 ... 6 Uhr	Tabellen- und Dateidarstellung (Die DIN-Angaben wurden unter Beachten der Klassenmitten so verändert, dass für die Luftzustände stets $\phi \leq 99\%$ gilt!)
- t_x -Korrelation und Jahreshäufigkeitsverteilung der Feuchtkugelttemperatur für den 24 Stundentag, für 6 ... 18 Uhr und 18 ... 6 Uhr	
- Außenlufttemperatur, Solarstrahlung und Sonnenlufttemperatur für jahreszeitlich typische Tagesgänge (Entwurfstage: heiterer Februartag, heiterer Julitag, Extremsommertag)	Tabellen-, Grafik- und Dateidarstellung
- Außenlufttemperatur und -feuchte für die drei vorgenannten Entwurfstage	Tabellen- und Grafikdarstellung (Beispiel: Bild 22)
- Erdbodentemperaturen in Tabellen- und Diagrammform	

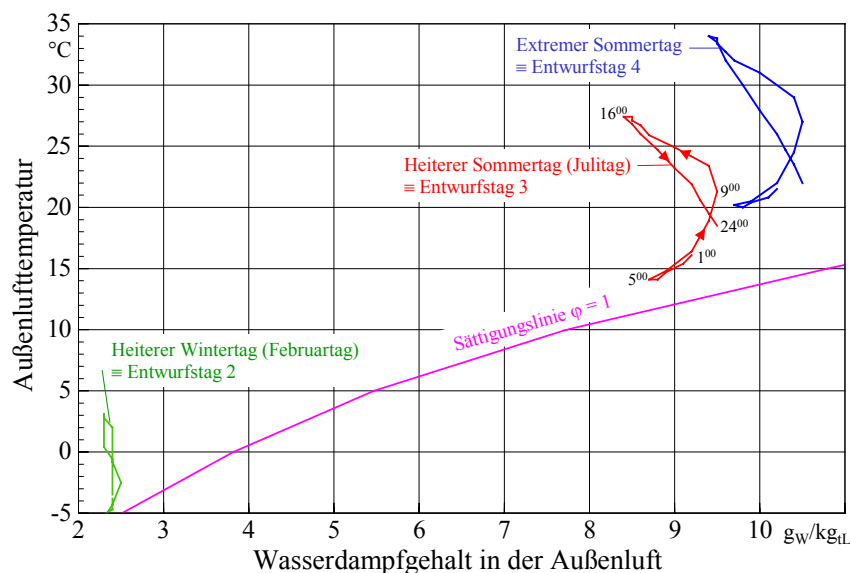


Bild 22

Außenluftzustandsverläufe (Lufttemperatur und Luftfeuchte) für drei ausgewählte Entwurfstage im h_x -Diagramm

Fazit:

- Die vorgestellten Angaben können beispielsweise die **thermischen Randbedingungen** als Umgebungstemperaturen (Lufttemperatur, Sonnenlufttemperatur usw.) von Speicherkörpern, Flächenabsorbern 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.

Die letztgenannte Variante sei anhand eines Beispiels ausführlicher erläutert. Einem Speicherkörper wird nachts mittels eines Hybridkühlturmes Wärme entzogen, wobei ein direkter Verbund des Flüssigkeitskreislaufes (Wasser, wässrige Tyfocorlösung) besteht.

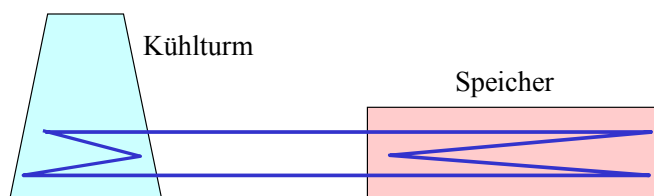
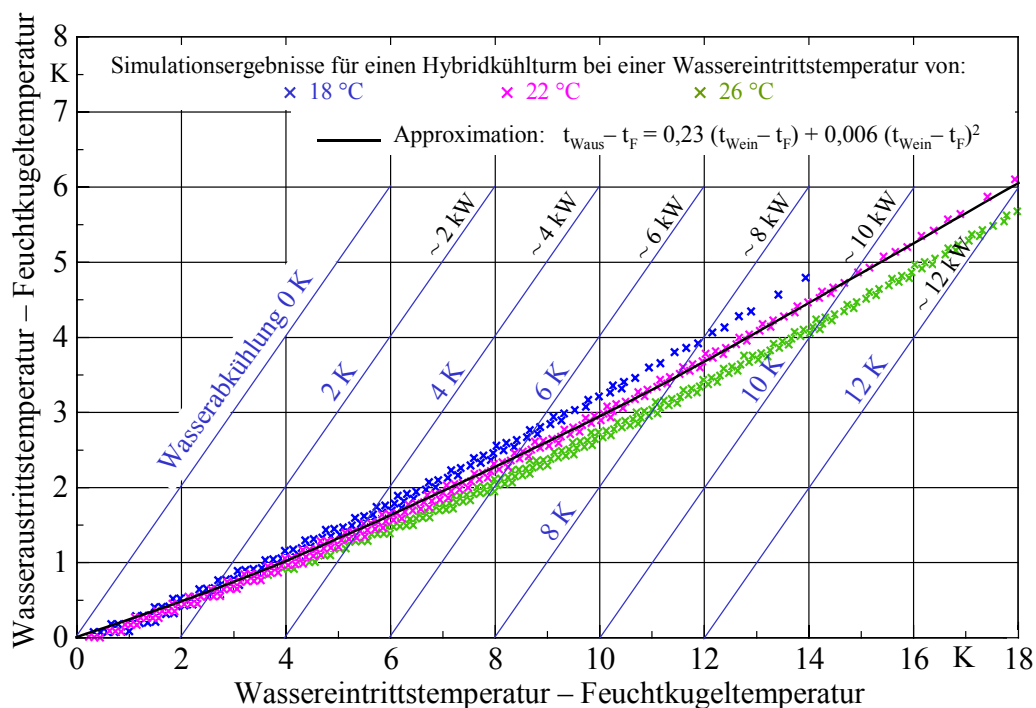


Bild 23 oben: Hydraulische Verknüpfung zwischen einem Kühlturm und einem Speicher

rechts: Hybridkühler mit spiralförmig gewickelten Kunststoff-Kapillarrohrmatten (Oberfläche ca. 24 m²), radialem Luftdurchtritt von innen nach außen und Besprühung mit Wasser zur Nutzung des Verdunstungseffektes auf dem Versuchsstand (Höhe ca. 1 m, Durchmesser ca. 0,9 m)



unten: Leistungsdaten für den Hybridkühler nach umfangreichen Simulationen für drei unterschiedliche Wassereintrittstemperaturen und nächtlichen Außenluftzuständen für Lufttemperaturen ≥ 10 °C



Damit kann bei der dynamischen Untersuchung im nächtlichen Abkühlfall des Speichers auf die detaillierte Nachbildung der wärmetechnischen Verbindung zwischen Kühlturm und Speicherkörper verzichtet werden, indem der Kühlturm bei der Simulation lediglich durch die im Diagramm angegebene Gleichung "modelliert" wird.

9 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. Zahlreiche Faktoren nehmen Einfluss:

- Bezüglich der **Speichergeometrie** sind sowohl die Abstände zwischen den Rohren als auch zwischen den Registerebenen bedeutungsvoll.
- Die **Stoffdaten** des Speichermaterials stellen sehr wichtige Größen dar, wobei 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** 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 Hauptbericht wurden die genannten Einflussgrößen systematisch variiert.

Die **wärmetechnische Effizienz** eines Festkörperspeichers kann aus dem Verhältnis der praktisch nutzbaren Speicherwärme zur theoretisch möglichen innerhalb eines Zyklus gefolgert werden (Bild 24). Der **Nutzungsgrad** des Speichers kann dann als

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

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.

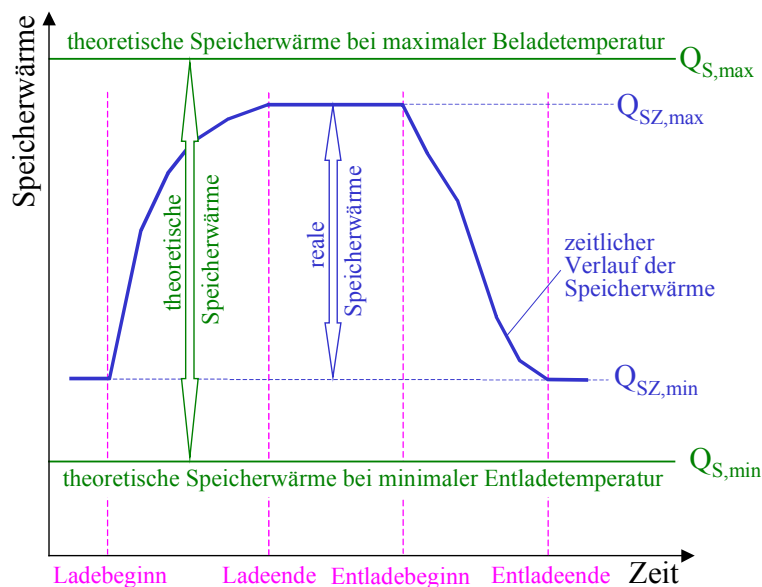


Bild 24 Schematische Darstellung der Grenzwerte zur Definition des Nutzungsgrades

Die **qualitative Beurteilung des Speicherzustandes** während des Zyklus kann durch die Anzeige der **Temperaturen** und **Phasenzustände** in den Volumenelementen erfolgen (siehe Hauptbericht).

- **Basisvariante des wasserdurchströmten Festkörperspeichers**

Grundlage bildet der im Bild 18 veranschaulichte Test 3. Die Stoffwerte des Paraffin-Salz-Hydrates sind den Herstellerangaben für SP 22 A4 der Fa. Rubitherm angepasst. Sie werden später gezielt verändert.

Hauptdaten (Bild 25):

- Abstand der Kapillarrohrmatten 56 mm
- Röhrchenabstand ca. 30 mm
- Wassereintrittstemperatur je 10 Stunden lang 16 °C bzw. 30 °C; linearer Übergang 2 Stunden
- Phasenwechseltemperatur von 22 ... 24 °C
- Simulationszeit 72 Stunden (Auswertung 3. Simulationstag).

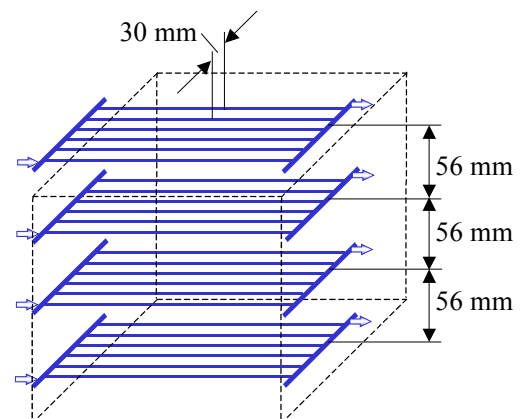


Bild 25 Hauptabmessungen des Rohrregisters im Speicherkörper

Ergebnisse:

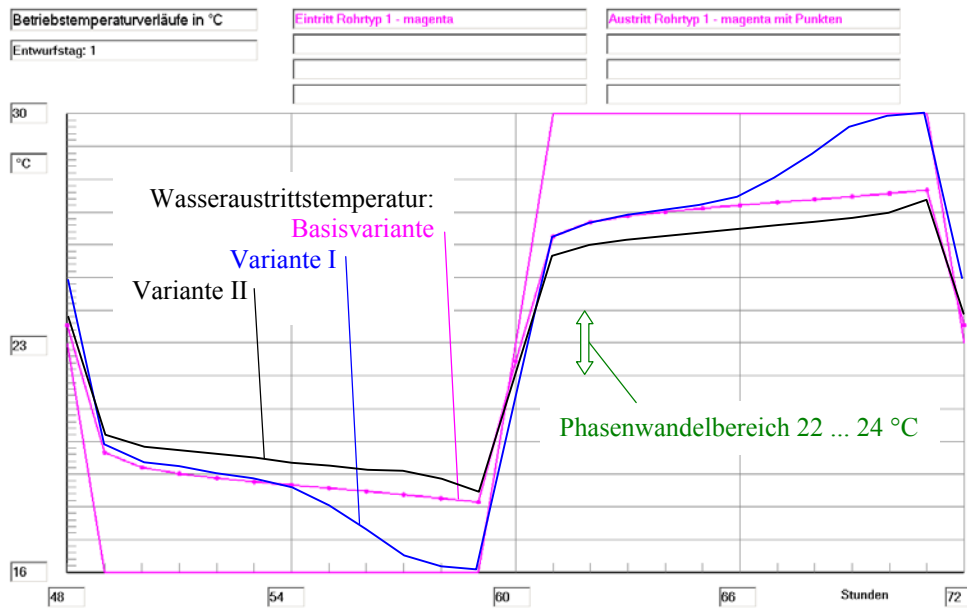


Bild 26 Einheitliche Wassereintrittstemperatur und unterschiedliche Wasseraustrittstemperaturen für die Basisvariante sowie die folgenden Varianten I und II im Verlaufe des dritten Simulationstages

Nutzungsgrad: $\epsilon = 0,637$

Phasenwechsel erfasst die entfernt liegenden Volumenelemente nur teilweise, z. B. nur zu 60 % (Bild 27). Siehe auch die Temperatur- und Phasenzustandsfelder im Hauptbericht Seite 174/175.

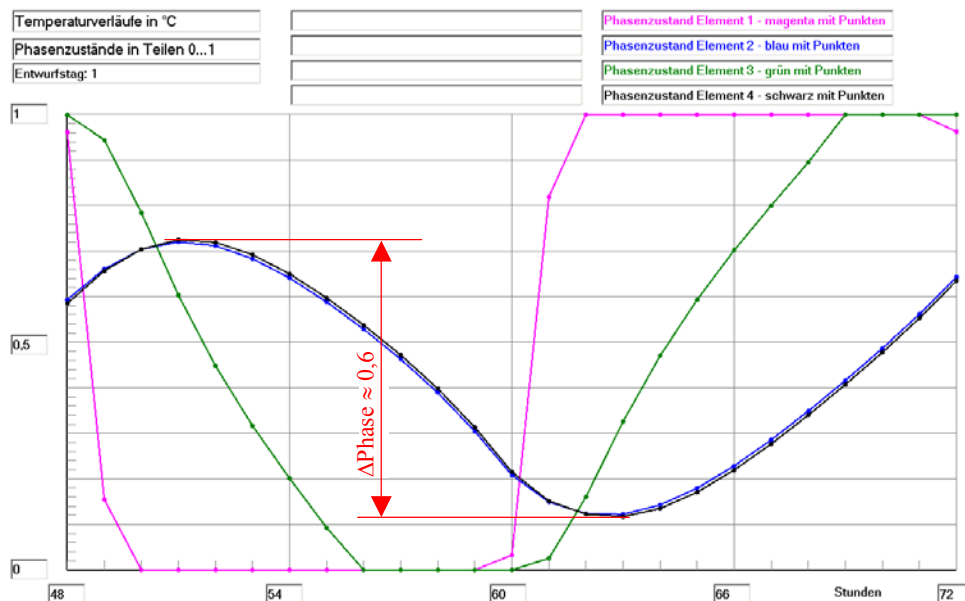
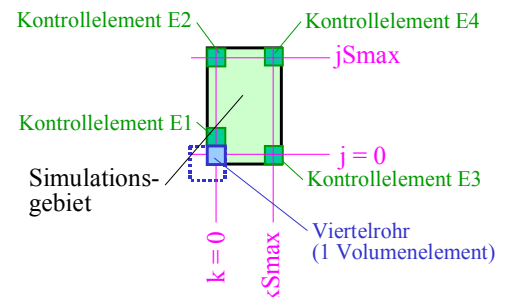
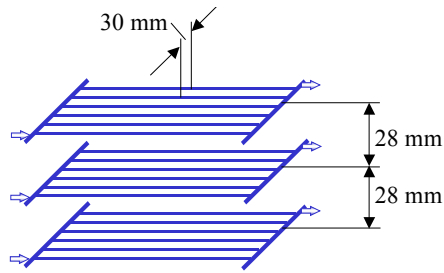


Bild 27 Phasenzustandsverläufe für vier ausgewählte Kontrollelemente E1 ... E4



- Variantenuntersuchungen bezüglich Lagenabstand und Wärmeleitfähigkeit

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


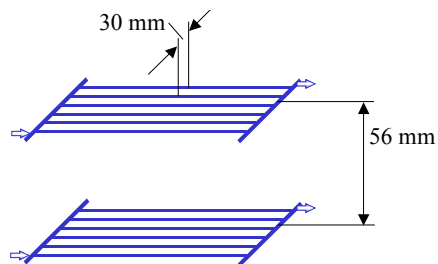
Nutzungsgrad

$$\varepsilon = 0,998$$

Ideale Lösung!

Alle Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen einen 100 %igen Phasenwandel.

Siehe auch Hauptbericht S. 183...185.

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


Nutzungsgrad

$$\varepsilon = 0,767$$

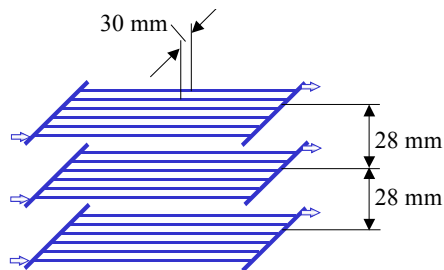
Keine Ideallösung, aber besser als Originalvariante!

Entfernt liegende Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen nur einen 90 %igen Phasenwandel.

Siehe auch Hauptbericht S. 189...192.

- Einfluss der Periodendauer und der Geometrie

Die Periodendauer ist gegenüber der Originalvariante halbiert: Wassereintrittstemperatur je 4 Stunden lang 16 °C bzw. 30 °C; linearer Übergang jeweils 2 Stunden (Bild 28).

Variante III (Geometrie wie bei Variante I; weitere Daten wie bei Originalvariante)


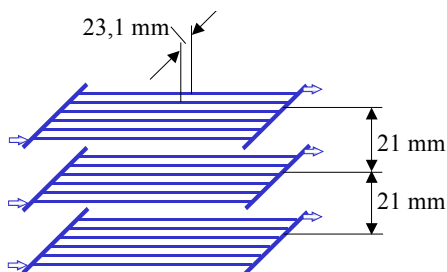
Nutzungsgrad

$$\varepsilon = 0,599$$

Sehr unbefriedigende Lösung!

Entfernt liegende Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen nur einen knapp 70 %igen Phasenwandel. Die Starttemperatur hat bleibenden Einfluss.

Siehe auch Hauptbericht S. 198...200.

Variante IIIa (Rohr- und Lagenabstand kleiner; weitere Daten wie bei Originalvariante)


Nutzungsgrad

$$\varepsilon = 0,964$$

Sehr gute Lösung!

Alle Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen einen 100 %igen Phasenwandel.

Siehe auch Hauptbericht S. 203...204.

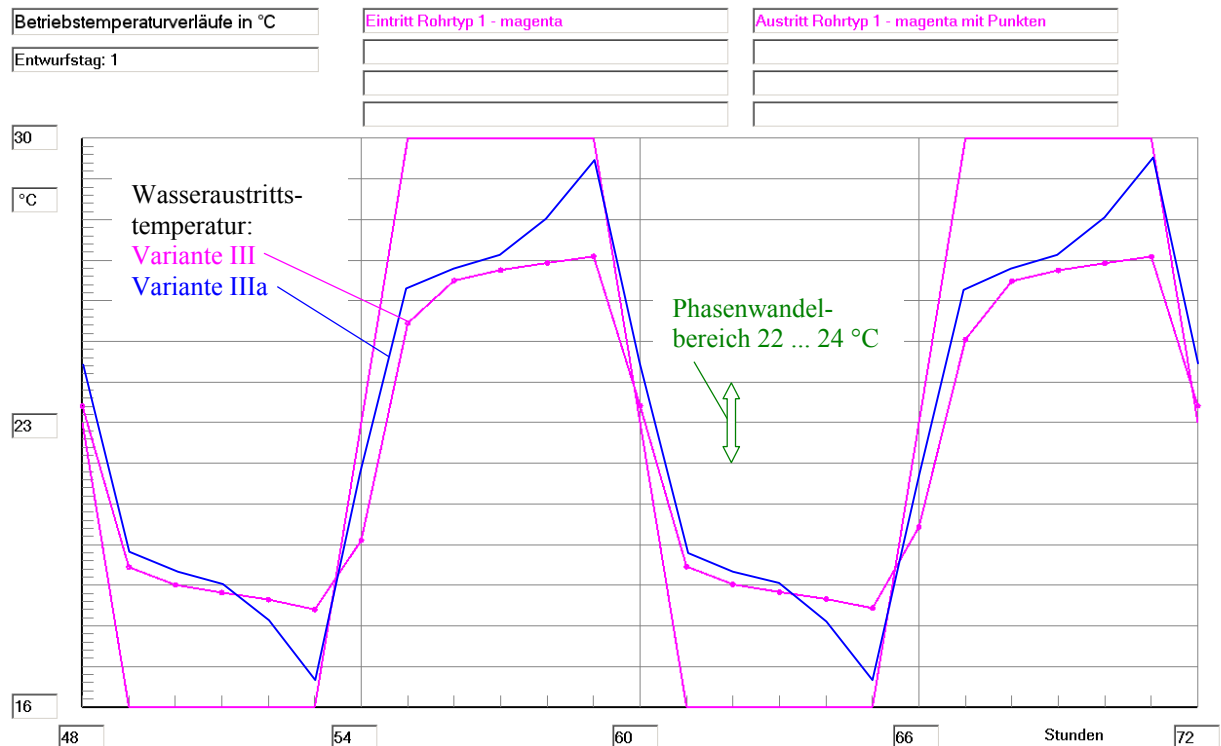
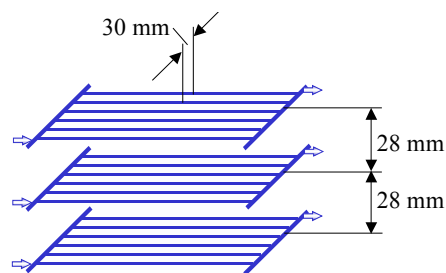


Bild 28 Einheitliche Wassereintrittstemperatur und unterschiedliche Wasseraustrittstemperaturen für die Varianten III und IIIa im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72)

• Einfluss der Zyklen und der Geometrie

Die **nächtliche Entladung** erfolgt über 6 Stunden mit der Wassereintrittstemperatur von 16 °C und nach einer Pause wird die **Tagesbeladung** 5 Stunden lang mit 30 °C vorgenommen (Bild 29).

Variante IV (Geometrie wie bei Variante I; weitere Daten wie bei Originalvariante)



Nutzungsgrad

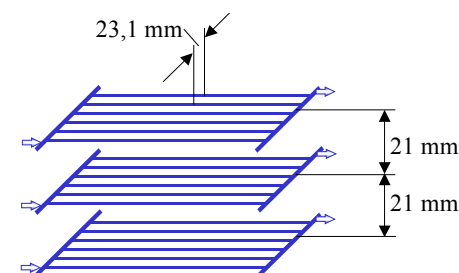
$$\epsilon = 0,679$$

Unbefriedigende Lösung!

Entfernt liegende Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen nur einen ca. 75 %igen Phasenwandel.

Siehe auch Hauptbericht S. 210...211.

Variante IVa (Rohr- und Lagenabstand kleiner; weitere Daten wie bei Originalvariante)



Nutzungsgrad

$$\epsilon = 0,990$$

Sehr gute Lösung!

Alle Volumenelemente im Simulationsgebiet durchlaufen einen 100 %igen Phasenwandel.

Siehe auch Hauptbericht S. 214...215.

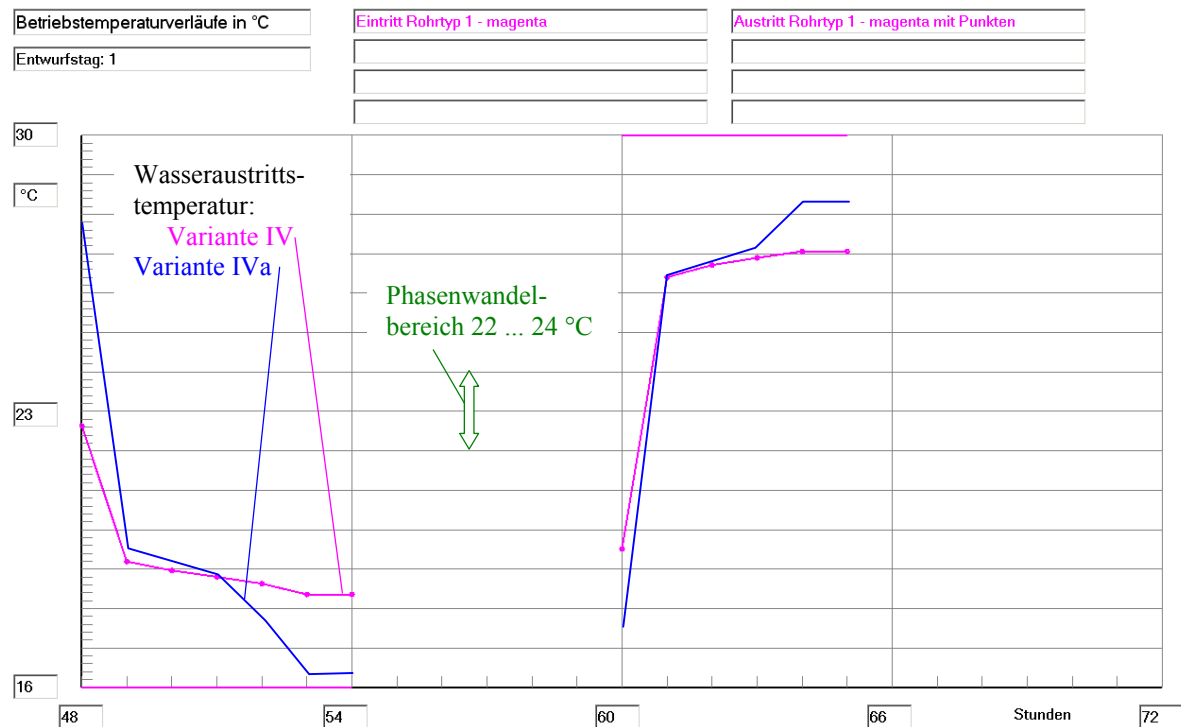


Bild 29 Einheitliche Wassereintrittstemperatur und unterschiedliche Wasseraustrittstemperaturen für die Varianten IV und IVa im Verlaufe des dritten Simulationstages (Betriebsstunde 48 bis 72)

• Voraussage des thermischen Speicherverhaltens

Generell ist das neuentwickelte numerische Simulationsverfahren zu verwenden, um eine Aussage zum Nutzungsgrad ε treffen zu können.

Im Hauptbericht wurden zusätzlich mehrere Versuche unternommen, um auch eine Vorhersage mittels Diagramm zu ermöglichen. Für einen bestimmten Speichertyp ist dies zwar näherungsweise möglich (Bild 30), der Aufwand nach der Suche der bestimmenden unabhängigen Variablen (Größe auf der Abszisse) ist aber zu hoch.

Die Variablen des Abszissenkriteriums bedeuten:

λ Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials (Mittelwert aus flüssiger und fester Phase)

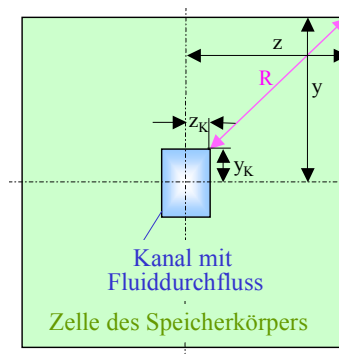
$\kappa_{K,a}$ Teilwärmehduregangskoeffizient des Fluidkanals bezogen auf die äußere Oberfläche

t_F mittlere Fluidtemperatur unter Beachtung der Spreizung

t_w mittlere Phasenwandeltemperatur unter Beachtung der Hysterese

τ Zeit für das Be- oder Entladen

Geometrische Größen gemäß Skizze $\Rightarrow$



(Die Bezeichnungen y und z sind an das Programm der Speichersimulation angelehnt.)

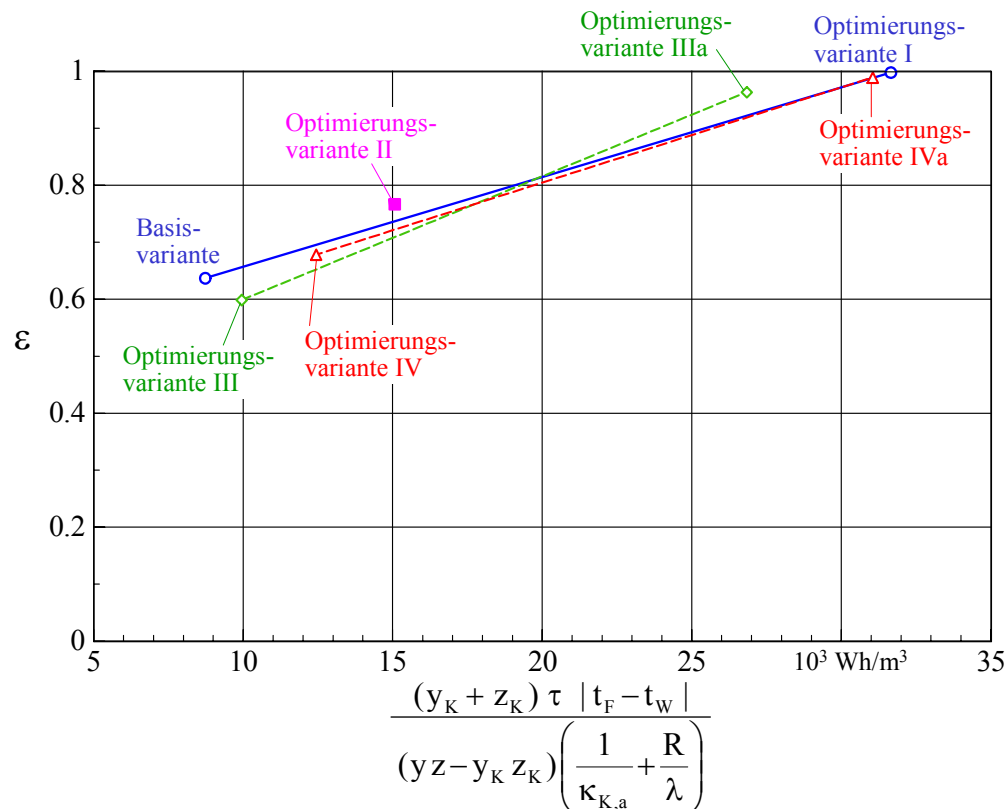


Bild 30 Speichernutzungsgrad ε in Abhängigkeit einer kriteriellen Größe gemäß Abszisse

• Hauptergebnisse

Ein großer Speichernutzungsgrad bei Be- und Entladevorgängen im Tagesrhythmus ist – wie die verschiedenen Variationen zeigten – generell nur bei einer **relativ dichten Rohr- bzw. Kanalanordnung** im Speicherkörper erreichbar.

Selbstverständlich sollte durch die Rohre und Kanäle aber auch nur wenig vom eigentlichen Speichervolumen verloren gehen.

Bei wasserbeaufschlagten Rohrregistern sind deshalb Kapillarrohrmatten prädestiniert.

Sinn und Zweck des Simulationsprogramms ist die **Optimierung** mittels **Variantenrechnungen**. Außer der Geometrie sollten bei wasser- und luftbeaufschlagten Rohren bzw. Kanälen die Durchsätze (Geschwindigkeiten) und die Länge der Durchströmteile variiert werden. Vorgegeben sind in der Regel die spezifische Wärmekapazität des Fluids und die zeitabhängigen Fluideintrittstemperaturen.

Literatur

- [1] <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (Raummodell: Teil C)
oder <http://www.berndglueck.de/Raummodell> (Teil C)
- [2] <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (Raummodell: Teil E)
oder <http://www.berndglueck.de/Raummodell> (Teil E)
- [3] <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (Bericht: Wohnbauten)
oder <http://www.berndglueck.de/Bautechniken> (Bericht_Wohnbauten)
- [4] <http://www.rom-umwelt-stiftung.de> (Ergänzungsbericht_Wohnbauten)
oder <http://www.berndglueck.de/Bautechniken> (Bericht_Wohnbauten_Ergaenzung)