Gesundheits Ingenieur
Haustechnik · Bauphysik · Umwelttechnik

Herausgegeben von K. W. USEMANN 129. Jahrgang 2008 · Heft 1 · Seite 1 – 60

unter Mitwirkung von F. Baum, H. Erhorn und H.-J. Moriske

in Verbindung mit dem Umweltbundesamt, Fachbereich Umwelt und Gesundheit, Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Ökologie, Berlin-Dahlem; Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Augsburg und der Gesundheitstechnischen Gesellschaft, Berlin.

Simulationsmodell für einen Schotterspeicher

Bernd Glück

Die wärmetechnische Simulation von luftdurchströmten Schotterspeichern stellt ein sehr komplexes Problem dar, dass auch bei sorgfältiger Untersuchung teilweise spekulative Züge trägt. Nachfolgend wird ein neuartiges Modell vorgestellt, das plausible Ergebnisse liefert und sich nach der bisherigen Erfahrung sehr gut für Parametervariationen und Trenduntersuchungen eignet. Die weitere Bearbeitung und die endgültige Verifizierung an ausgeführten Anlagen erfolgt im Rahmen des vom BMWT geförderten Forschungsvorhabens „LowEx“.

1. Einleitung

Die Schwierigkeiten bei der Modellbildung resultieren aus Imponderabilien des Untersuchungsgegenstandes, wie beispielsweise Partikelgrößen und die Häufigkeit ihres Vorkommens, Partikelform, Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Partikel, Materialkenndaten, Größe und Gleichmäßigkeit der Hohlräume, Art und Wirkung der Luftverteil- und Luftsammeleinrichtung usw. Zu diesen natürlichen und technisch gegebenen Unsicherheiten kommen noch die modellbedingten Vereinfachungen und Annahmen bei der Simulation hinzu, wie z. B. Klassifizierung der Schottersteine in Partikeltypen p = 1 ... pmax, Ähnlichkeit der Partikelgeometrie, äquivalenter Partikeldurchmesser, Oberflächen-Volumen-Korrelation, Unterteilung der Partikel in Volumenelemente mit entsprechender Gittergestaltung, gleiche Luftgeschwindigkeit durch alle Hohlräume, abschnittsweise Unterteilung des Speichers in Strömungsrichtung der Luft, Wahl der Zeitschrittweite, stark vereinfachte Annahme der Randbedingungen usw.

Der grundsätzliche Aufbau des Simulationsmodells erfolgt in Anlehnung des in [1] vorgestellten Modells für „Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper“.

2. Geometrisches Simulationsmodell und maximale Zeitschrittweite

2.1 Approximierte Partikelform

In einer Voruntersuchung wurden geometrisch unterschiedliche, mathematisch gut beschreibbare Regelkörper zur Nachbildung der Partikel betrachtet (*Tabelle 1, Bild 1*). Eine Auswertung in [2] zeigt, dass die realen Schotter durch den Würfel und das Konglomerat relativ gut wiedergegeben werden, wogegen die Kugelform – die bei Schüttungen vielfach verwendet wird – keinesfalls geeignet ist. Für die untersuchten Schotter gibt [2] mit der Partikeloberfläche O in cm^2 und dem Partikelvolumen V in cm^3 die nachfolgende Regressionskurve an:

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, F+E TGA, Goethestraße 18, 08547 Jößnitz (Plauen) und Westsächsische Hochschule Zwickau (FH).

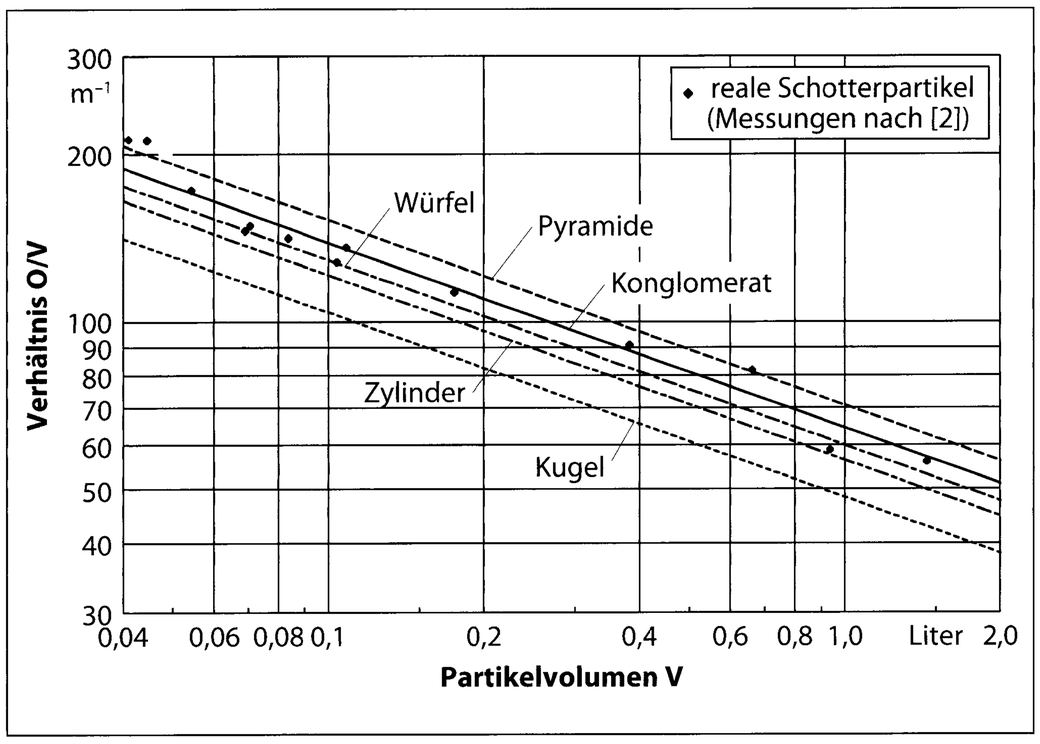

Bild 1. Verhältnis Partikeloberfläche zu Partikelvolumen O / V in Abhängigkeit des Partikelvolumens (Achsen logarithmisch geteilt).

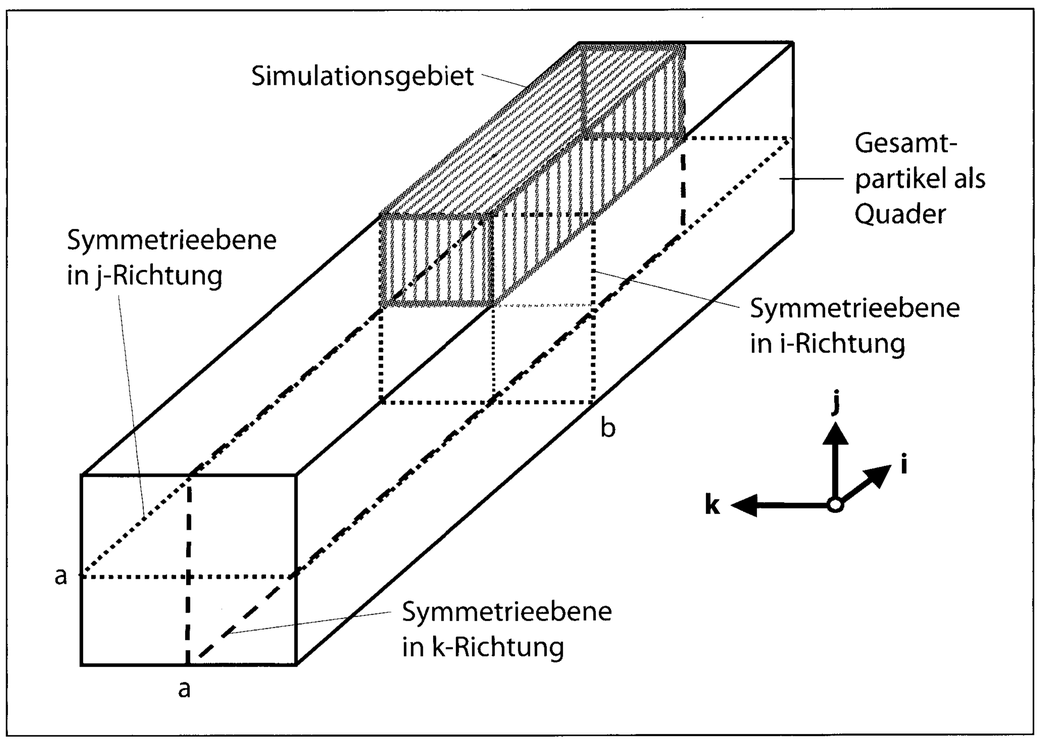

Bild 2. Gesamtpartikel als Quader a × a × b mit Symmetrieebenen und Kennzeichnung des Simulationsgebietes (Quader a/2×a/2×b/2).

$$O = 6{,}8209\ V^{0{,}6552}\ . \qquad (1)$$

Schlussfolgernd wird für die Modellierung eines Partikels ein Quader mit quadratischer Grundfläche a × a und angepasster Länge b verwendet. Aus dem vorgegebenen Volumen V und der zugehörigen Oberfläche O – nach Gl. (1) ermittelt – ergeben sich somit die Gleichungen

$$V = a^2\ b \qquad (2)$$

$$O = 2\ a^2 + 4\ a\ b. \qquad (3)$$

Weiter folgt die Bestimmungsgleichung

$$2\ a^3 - O\ a + 4\ V = 0. \qquad (4)$$

Die Lösung dieser Sonderform der kubischen Gleichung erfolgt im Simulationsprogramm numerisch unter Verwenden der regula falsi. Hierbei werden zwei technisch sinnvolle Lösungen a_1 sowie a_2 ermittelt, die in der Regel $b_1 > a_1$ und $b_2 < a_2$, im Sonderfall a = b enthalten. Sinnbildlich gesprochen, wird von einem Würfel ausgegangen, der zu einem Quader mit längerer oder kürzerer Seite als die Quadratseite entartet. Beide Lösungen werden im Rechenprogramm bestimmt und in einem relativ aufwändigen Verfahren gegenübergestellt. Es erfolgen nach einem noch vorzustellenden Algorithmus die Festlegung der Volumenelemente und die nach dem Stabilitätskriterium ermittelten maximalen Zeitschrittweiten $\Delta\tau_1$ sowie $\Delta\tau_2$. Die Paarung a_1, b_1 oder a_2, b_2, welche die größte Zeitschrittweite zulässt, wird ausgewählt. Die relativ große Vorarbeit ist nur einmal in einem Vorprogramm zu leisten, sie lohnt sich in der Regel durch eine beschleunigte Rechnung in der Zeitschleife.

Tabelle 1. Volumina V und Oberflächen O verschiedener Partikelformen.

Kugel mit Radius r	$O = 4\ \pi\ r^2$	$V = 1{,}333\ \pi\ r^3$	$O / V = 3 / r$
Zylinder mit Höhe h = 3 r	$O = 2\ \pi\ r^2 + 6\ \pi\ r^2 = 8\ \pi\ r^2$	$V = 3\ \pi\ r^3$	$O / V = 2{,}67 / r$
Würfel mit Kantenlänge a	$O = 6\ a^2$	$V = a^3$	$O / V = 6 / a$
Pyramide mit quadratischer Grundfläche a^2 und h = 3 a	$O = a^2 + 6{,}08\ a^2 = 7{,}08\ a^2$	$V = a^3$	$O / V = 7{,}08 / a$
Konglomerat: 6 Pyramiden auf Würfel mit der Kantenlänge a und Pyramidenhöhe h = a	$O = 13{,}42\ a^2$	$V = a^3 + 2\ a^3 = 3\ a^3$	$O / V = 4{,}47 / a$

2.2 *Approximierte Partikelgitter*

Die instationäre dreidimensionale Wärmeleitung in den Partikeln mit einem Wärmeübergang an der Partikeloberfläche (Randbedingung 3. Art) wird mittels der Volumen-Elemente-Methode untersucht, wobei man vereinfacht Quaderelemente betrachtet. Sie füllen lückenlos das Partikelvolumen aus.

Anmerkung: Es wurde auch überlegt, mit einem Schalenmodell zu arbeiten, da dann nur eine eindimensionale Untersuchung des Wärmetransports – von Schale zu Schale – erforderlich würde. Die Genauigkeit der Lösung leidet aber darunter und die Schalengeometrie ist mathematisch in der Regel auch nicht trivial zu beschreiben. Würde beispielsweise von der Körperform „Konglomerat" ausgegangen, so näherten sich mit zunehmender Tiefe die Schalen der Kugelform. Andererseits wäre das Minimalvolumen bestimmend für die maximale Zeitschrittweite, sodass kleine Zeitschrittweiten folgen würden.

Um kurze Rechenzeiten zu erzielen, sollen die vorhandenen Symmetrien in vollem Umfang genutzt werden.

Symmetrieebenen im Partikelquader parallel zu den Oberflächen

Drei Symmetrieebenen teilen das quaderförmige Partikel so, dass generell nur 1/8 des Körpers zu betrachten ist (*Bild 2*). Die Unterteilung des Partikelsimulationsgebietes in Volumenelemente und die Kennzeichnung des dreidimensionalen Gitters für das Partikel zeigt *Bild 3*.

Spiegelebene innerhalb des Partikelsimulationsgebietes

Das Simulationsgebiet wird zwar komplett betrachtet, aber die Volu-

menelemente besitzen teilweise wärmetechnisch spiegelbildliche Randbedingungen. Dies ist dadurch gegeben, da die Luftumströmung in den Hohlräumen als gleichartig angenommen wird. *Bild 4* zeigt, dass Volumenelemente mit gleicher Kennung gleichen Randbedingungen unterliegen und somit auch gleiche Temperaturen besitzen müssen. Es existiert die eingetragene Spiegelebene innerhalb des j, k-Gitters, sodass allgemein gelten:

$$t(..., j, k) = t(..., k, j) \,. \qquad (5)$$

Die Berechnungsalgorithmen sind so zu gestalten, dass nur die Volumenelemente, die sich oberhalb der Spiegelebene und auf der Spiegelebene befinden, in die Simulation einbezogen werden. Damit müssen die Berechnungen über i = 1 ... imax; j = 1 ... jmax und k = 1 ... j anstelle von k = 1 ... kmax (≡ jmax) laufen. Die Temperaturen der restlichen Volumenelemente ergeben sich gemäß Gl. (5), indem für j = 1 ... jmax die Spiegelungen der Elementtemperaturen für k = j+1 ... kmax (≡ jmax) zu erfolgen haben.

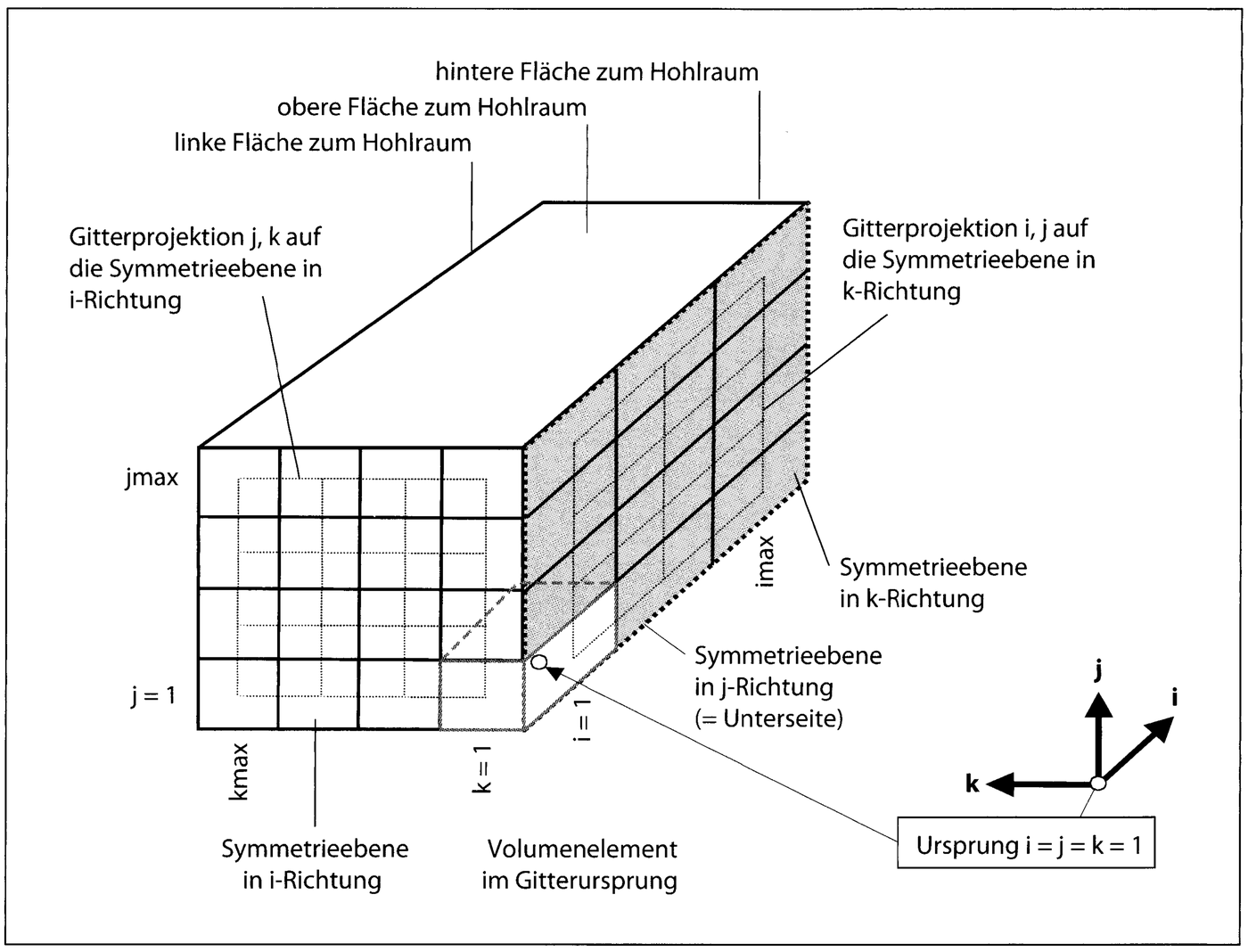

Bild 3. Partikelsimulationsgebiet mit Volumenelementen und dreidimensionalem Gitter.

Somit treten die auf der Spiegelebene liegenden Volumenelemente je 8- und alle übrigen Volumenelemente je 16-mal pro Partikel auf.

Infolge der gewählten Einteilung des Partikels in Volumenelemente und die Nutzung der Symmetrien und der Spiegelung sind nur etwas mehr als 1/16 aller realen Volumenelemente zu simulieren.

Automatische Festlegung der Partikelgitter

Die Quaderbreite (≡ Quaderhöhe) a sowie die Quaderlänge b (siehe *Bild 2*) – dargestellt in cm – wird halbiert und durch den Ganzzahlanteil der jeweiligen Größe geteilt. Dieser Ganzzahlanteil verkörpert jmax (≡ kmax) bzw. imax. Damit ergeben sich Volumenelemente mit Abmessungen zwischen 1 cm und < 2 cm. Sollte bei sehr kleinen Partikeln a/2 oder b/2 kleiner 1 cm sein, wird jmax (≡ kmax) bzw. imax gleich 1 gesetzt.

Es ergeben sich im Normalfall die Abmessungen der Volumenelemente zu:

$$\Delta x = \frac{a}{2}\,\frac{1}{\mathrm{INT}(a/2)}; \quad \Delta y = \frac{b}{2}\,\frac{1}{\mathrm{INT}(b/2)}. \qquad (6)$$

Selbstverständlich können – wenn erforderlich – die Abmessungen kleiner gewählt werden, was jedoch die Rechenzeit verlängert.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Berechnungen für *alle Partikeltypen* p und für die derzeit noch vorhandenen, jeweils zwei Lösungen pro Partikeltyp $a_1(p)$, $b_1(p)$ sowie $a_2(p)$, $b_2(p)$ erfolgen müssen.

Stabilitätskriterium für die numerische Berechnung der Wärmeleitung im Partikel

Verwendet man große Zeitschritte $\Delta\tau$, verkürzt sich die Rechenzeit für die durchzuführende Simulation. Das Ergebnis wird aber ungenauer, da man beim expliziten Verfahren den jeweiligen Istzustand über diesen Zeitraum als konstant betrachtet. Sind die Zeitschritte zu groß gewählt, entstehen numerische Schwingungen.

Die logischen Grenzen der möglichen Temperaturänderungen sind durch den II. Hauptsatz der Thermodynamik gegeben. So kann die neue Temperatur eines Volumenelementes z. B. nicht durch Wärmeaufnahme aus einer Umgebung niedrigerer Temperatur hervorgehen und umgekehrt. Im vorliegenden Fall gilt aus Stabilitätsgründen mit der Temperaturleitfähigkeit a_S des Schottermaterials folgende Beschränkung für den Zeitschritt:

$$\Delta\tau \le \frac{1}{2\,a_S\left(\dfrac{2}{\Delta x^2} + \dfrac{1}{\Delta y^2}\right)}. \qquad (7)$$

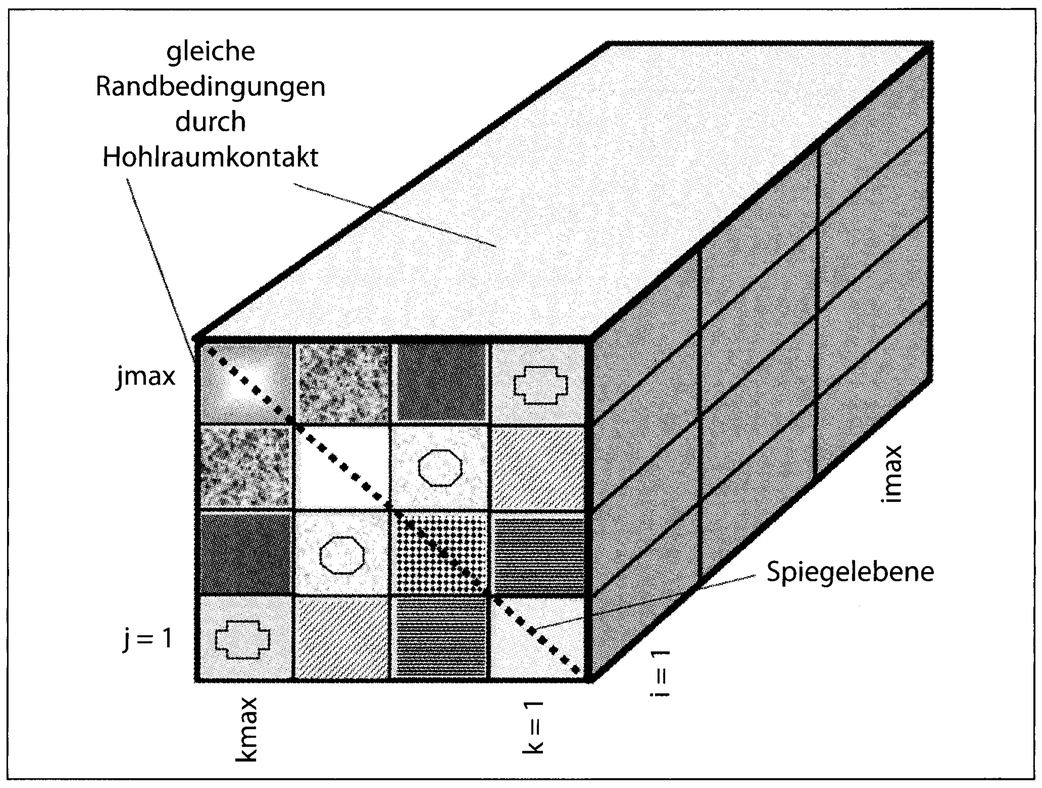

Bild 4. Spiegelebene innerhalb des j,k-Gitters.
Volumenelemente mit gleicher Kennzeichnung haben gleiche wärmetechnische Randbedingungen und besitzen deshalb gleiche Temperaturen.

Tabelle 2. Ausgabe aller Eingabewerte und der daraus aufbereiteten Basisgrößen sowie Eingabedaten zum Simulationsablauf für Beispiel 1.

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_1

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung
Speicherabmessungen und Luftvolumenstrom:

Höhe	Breite	Länge	Luftvolumenstrom
m	m	m	m³/h
2,500	10,000	6,500	30000,0

Daten des Speichermaterials:

Rho	Lambda	c	Hohlraumanteil	Äquivalenter Durchmesser
kg/m³	W/(m K)	J/(kg K)	%	mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Schottervolumen	Schottermasse	Luftvolumen
m³	kg	m³
91,00	250614,000	71,50

Partikeldaten:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm³									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00
Partikeloberflächen in cm²									
45,32	127,24	148,38	184,97	234,36	299,91	372,90	453,86	690,58	0,00
Approximierte Partikelquadratseite in cm									
3,53	3,30	3,59	6,93	7,76	5,27	5,94	10,62	12,95	0,00
Approximierte Partikellänge in cm									
1,45	7,99	8,54	3,21	3,67	11,58	12,72	5,37	6,86	0,00
Gesamtvolumen der approximierten Partikel in m³									
3,73	5,92	10,10	12,56	23,48	19,29	9,01	5,10	1,82	0,00
Anzahl der approximierten Partikel									
207278	67989	91827	81545	106235	59913	20065	8409	1583	0
Anteile der Partikeloberflächen an der Gesamtoberfläche in %									
9,21	8,48	13,36	14,79	24,41	17,61	7,33	3,74	1,07	0,00

Gitterdarstellung der Partikel und Ermittlung des maximalen Zeitschrittes:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unterteilung der halben Quadratseite: Dx(p) in cm Maximale Gitternummer: jmax(p) = kmax(p)									
1,76	1,65	1,79	1,16	1,29	1,32	1,49	1,06	1,08	0,00
1	1	1	3	3	2	2	5	6	0
Unterteilung der halben Quaderlänge: Dy(p) in cm Maximale Gitternummer: imax(p)									
0,72	1,33	1,07	1,60	1,84	1,16	1,06	1,34	1,14	0,00
1	3	4	1	1	5	6	2	3	0
Maximale Zeitschrittweite für die Partikelapproximation: DtauPartikel(p) in s									
19,90	39,19	33,96	26,96	34,09	26,83	28,32	21,87	20,50	0,00

Maximal wählbare Zeitschrittweite:	19 s
Vorgeschlagene Zeitschrittweite:	18 s (ganzzahlig in 3600 s enthalten)

Daten zum Simulationsablauf:

Simulationsstunden:	72 h
Tagesstartzeit:	18 Uhr
Gewählte Zeitschrittweite:	15 s
Betriebsablauf nach Entwurfstag:	3
Anzahl der Speicherunterteilungen:	100
Starttemperatur:	10,0 °C

Endgültige Fixierung des Partikelgitters
Werden die charakteristischen Größen in Gl. (7) eingesetzt, ergeben sich für jeden Partikeltyp p die Zeitschrittweiten $\Delta\tau_1(p)$ und $\Delta\tau_2(p)$. Wie im Abschnitt 2.1 bereits angesprochen, erfolgt die Auswahl der je zwei vorgeschlagenen Partikelgitter für die größtmögliche Zeitschrittweite. Der Vergleich liefert die für die Simulation verbindliche Auswahl zu:

$$\text{imax}(p), \text{jmax}(p), \text{kmax}(p), \Delta x(p), \Delta y(p), \Delta\tau(p). \quad (8)$$

Zeitschrittweite für die Simulation des Partikelgemisches
Da sich für jeden Partikeltyp p aufgrund der unterschiedlichen Volumina und Oberflächen unterschiedliche Zeitschrittweiten $\Delta\tau(p)$ ergeben, muss für die Gesamtsimulation als $\Delta\tau_{Sim}$ der Kleinstwert ausgewählt werden. Die Ermittlung erfolgt als abgerundeter Ganzzahlwert:

$$\Delta\tau_{Sim} = \text{INT}\{\text{MIN}[\Delta\tau(p)]\}. \quad (9)$$

Dieser Wert wird als maximal wählbare Zeitschrittweite ausgegeben. Schließlich ist noch zu beachten, dass im Simulationsverlauf die Ergebnisse stündlich dargestellt werden sollen. Dies ist aber nur möglich, wenn der tatsächlich verwendete Zeitschritt $\Delta\tau_{real}$ in s in 1 h (≡ 3600 s) ganzzahlig teilbar ist. Ein entsprechender Algorithmus führt zu einem Vorschlag für die individuelle Eingabe.

Beispiel der kompletten Daten zum Simulationsstart
In der zum späteren Beispiel 1 gehörigen *Tabelle 2* sind alle Eingabewerte zum Speichermaterial und die in der anschließenden Datenaufbereitung ermittelten Ergebnisse, die als Grundlage für die Simulation dienen, komplett wiedergegeben.

2.3 Idealisierte Speichermodellierung

Gemäß *Bild 5* wird der Speicher in seiner Länge in smax Abschnitte unterteilt. Sie sind alle gleich lang, sodass die Teillängen jeweils

$$\Delta L = \frac{L}{\text{smax}} \quad (10)$$

betragen. Die Anzahl der Längenunterteilungen smax stellt einen Eingabewert dar. Er sollte zwischen 50 und 100 gewählt werden, wobei wiederum ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit zu treffen ist.

Für den Speicherkörper gelten:

- Die Partikel sind regellos angeordnet und grenzen mit ihren Oberflächen an Hohlräume.
- Alle Partikeltypen p sind im Speichervolumen gleichverteilt, d. h., die in *Tabelle 2* vorgestellten, auf das Gesamtvolumen bezogenen Partikelgrößen gelten anteilig für jeden Speicherabschnitt.
- Somit sind auch die Hohlräume homogen im Speichervolumen verteilt, sodass in jeder Schnittebene der freie Durchströmquerschnitt F_F existiert (Ψ Hohlraumanteil):

$$F_F = \Psi\, B\, H. \quad (11)$$

- Die Stoffeigenschaften der Partikel gelten ortsunabhängig.
- Die Luftdurchströmung ist in Richtung der Speicherlänge L definiert. Sie wird als homogen angenommen.
- Die Abmessungen des Speichervolumens (L, B, H) sind so festzulegen, dass der Hauptdurchströmbereich der Luft wiedergegeben wird. Da die Luftverteil- und -sammelvorrichtungen unterschiedliche Ausbildung haben, müssen ingenieurmäßige Abschätzungen getroffen werden.

3. Wärmetechnische Randbedingungen und Zeitverläufe

Es wird angenommen, dass der Schotterspeicher allseits adiabate Oberflächen besitzt, sodass kein Wärmeaustausch mit dem Erdreich erfolgt. Diese Annahme ist sicherlich nur bedingt realistisch. Die getroffene Annahme wird vor allem damit begründet, dass der Schotterspeicher als Tagesspeicher betrieben werden soll und der Wärmeaustausch mit der durchströmenden Luft maßgeblich dominiert. Die effektiven Speicherabmessungen (L, B, H) sind kleiner als die gesamte Schotterfüllung, sodass sich Randbereiche ergeben, die ohnehin „wärmedämmend" zum Erdreich wirken.

Die Luftbeaufschlagung ist durch die beiden Zustandsgrößen Lufteintrittstemperatur t_{Lein}(ETag, Stunde) und Lufteintrittsfeuchte x_{Lein}(ETag, Stunde) als Zeitfunktionen charakterisiert.

Außerdem kann der Auslegeluftvolumenstrom V_h reduziert sein, was durch $V_{Lanteil}$(ETag, Stunde) im Bereich 0 ... 1 beschrieben wird.

Schließlich ist die Strömungsrichtung der Luft im Speicher umkehrbar, sie werde durch R(ETag, Stunde) mit 1 oder –1 angegeben. Die Eingabe 0 deutet auf den Stillstand des Luftstromes hin.

Die Beschreibung der vorgestellten Größen erfolgt mit stündlichen Stützstellen (Stunde als Tagesstunde), wobei t_{Lein}(ETag, Stunde) und x_{Lein}(ETag, Stunde) dazwischen linear interpoliert werden. $V_{Lanteil}$(ETag, Stunde) und R(ETag, Stunde) gelten für die gesamte Stunde.

Die Zeitverläufe sind weiterhin für unterschiedliche Entwurfstage (≡ Designdays) ETag zu kreieren. Wobei für die Simulation der zu betrachtende Entwurfstag ETagfix auszuwählen ist, sodass ETag = ETagfix gilt. Dieser Entwurfstag wird dann wiederholt abgearbeitet, wie es die gewünschte Betriebsstundenanzahl BSmax erfordert.

Durch einen speziellen Trick können aber auch mehrere, unterschiedliche Entwurfsstage nacheinander simuliert werden. Um Testreferenzjahre zu simulieren, wäre allerdings eine Programmergänzung notwendig.

Derzeit sei angenommen, dass beispielsweise die Simulation für typische jahreszeitliche Entwurftage ausreichend ist, um das Leistungsvermögen des Schotterspeichers bewerten zu können. Tagesgänge des Luftzustandes sind aus der DIN 4710:2003-01 entnehmbar.

4. Thermodynamische Modellierung

Der Wärmetransport im Speicher wird als mehrstufiger Vorgang betrachtet:

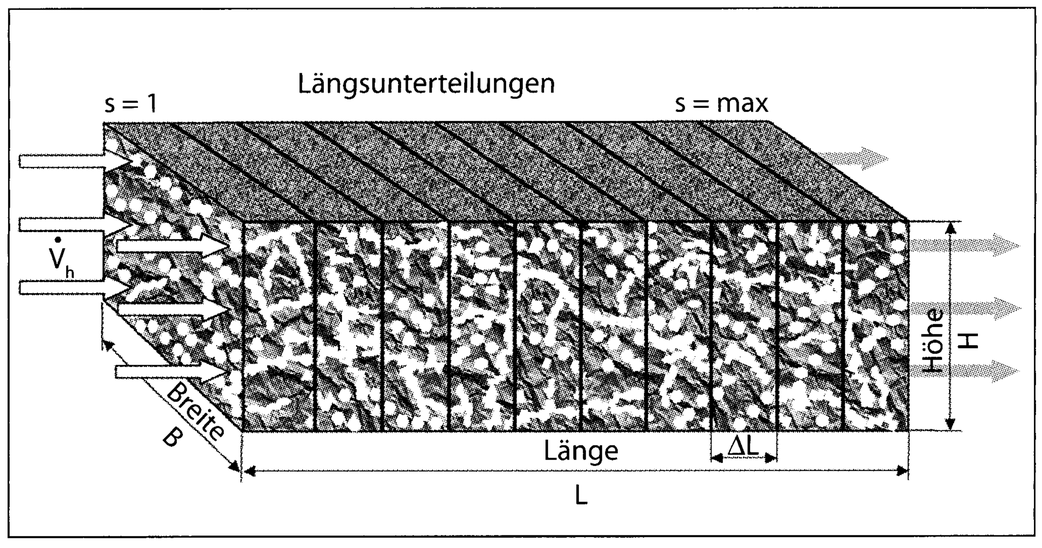

Bild 5. Speicher mit seinen Abmessungen und mit smax Längenunterteilungen.

- Im Inneren der Partikel erfolgt eine instationäre Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen.
- An den Partikeloberflächen vollzieht sich ein konvektiver Wärmeaustausch mit der Luft, die durch die Hohlräume strömt. Zur Ermittlung der abschnittsweise geltenden Wärmeübergangskoeffizienten wird vereinfacht ein Modell der gleichmäßigen Partikelumströmung gewählt. Dieses ist bei genauerem Erkenntnisstand gegebenenfalls zu verbessern.
- Die beiden vorgenannten Wärmeübertragungsmechanismen werden für alle Partikeltypen p innerhalb des Speicherabschnittes s während eines Zeitschrittes $\Delta\tau$ untersucht. Während $\Delta\tau$ und innerhalb s gelten konstante Randbedingungen. Dies sind:
  - die Temperaturen der Volumenelemente t(s, p, i, j, k)
  - die Lufttemperaturen in den Speicherabschnitten $t_L(s)$
  - die Luftfeuchte in den Speicherabschnitten $x_L(s)$
  - die Wärmeübergangskoeffizienten an den Partikeloberflächen $\alpha_L(s)$.
- Am Ende eines Zeitschrittes sind alle vorgestellten Zustandsbedingungen neu zu bestimmen.
  Für die Volumenelemente der Partikeltypen p ist dies relativ leicht möglich, da sie die Wärme nur sensibel speichern und die Zeitschrittweite so festgelegt wurde, dass keine Instabilitäten auftreten können.
  Bezüglich der Zustandsänderung des Luftvolumenstromes in den Speicherabschnitten s bedarf es relativ umfangreicher Betrachtungen. Die Änderung des Luftzustandes ist über eine Enthalpiebilanz durchzuführen. Stabilitätsbetrachtungen sind wegen der sehr geringen Wärmespeicherkapazität der Luft – besonders bei geringen Luftmassesströmen durch den Schotter und bei großen Zeitschrittweiten – zusätzlich erforderlich.
  Die Änderung der Luftfeuchte infolge Kondensation wird wegen der zahlreichen Unwägbarkeiten nur bilanzmäßig erfasst, ohne den Kondensationsvorgang an der Partikeloberfläche direkt zu berechnen. Falls sich dies als erforderlich erweisen sollte, wären Programmergänzungen möglich. Ob diese zu einer wesentlichen Genauigkeitsverbesserung führen würden ist aber sehr fraglich, da beispielsweise über die Kondensatabführung von den Partikeln nur in grober Weise spekuliert werden könnte. Eine eventuelle Erhöhung der Luftfeuchte durch benetzte Partikeloberflächen (Verdunstung) findet generell keine Beachtung.
- Die Luft tritt bei Richtung (≡ R(ETag, Stunde)) = 1 im Abschnitt s = 1 in den Speicherkörper ein und verlässt diesen bei s = smax (vgl. *Bild 5*). Am Eintritt liegt der Zustand Lufteintrittstemperatur t_{Lein}(ETag, Stunde), Lufteintrittsfeuchte x_{Lein}(ETag, Stunde) vor. Der Austrittszustand der Luft ist unter t_L(smax + 1) sowie x_L(smax + 1) abgespeichert. Bei Richtung = –1 liegt der Eintritt bei s = smax und der Austritt bei s = 1. Folgerichtig ist der Austrittszustand der Luft unter $t_L(0)$ sowie $x_L(0)$ vermerkt. Das Verfolgen der Zustandsgrößen entspricht dem bekannten „Upwind-Verfahren".
- Bei Stillstand des Speichers gelten besondere Festlegungen. Der Wärmetransport innerhalb der Partikel wird instationär in genauer Weise betrachtet. Es erfolgt jedoch kein konvektiver Wärmetransport an die stehende Luft in den Hohlräumen. Dies ist eine sehr vereinfachte Annahme, die nur den Temperaturausgleich innerhalb der Partikel betrachtet, nicht aber zwischen den Partikeln innerhalb der Schüttung. Eine weitergehende Betrachtung erscheint ohnehin fragwürdig, denn die Eigenkonvektion der eingeschlossenen Luft ist kaum realistisch modellierbar. Des Weiteren wird der Schotterspeicher zum Erdreich hin als adiabat betrachtet, was bei langen Stillstandszeiten auch nicht zutreffend ist. Bei kurzen Betriebspausen erscheint die Modellierung jedoch durchaus als wirklichkeitsnah.
- Zu jeder vollen Stunde (Betriebsstunde BS) werden für die spätere Auswertung des Speicherbetriebes nachfolgende Größen ermittelt und in der Datei „Ergebnis.dat" gespeichert: Richtung(BS), Tagestunde(BS), t_{Lein}(BS), x_{Lein}(BS), φ_{Lein}(BS), t_{Laus}(BS), x_{Laus}(BS), φ_{Laus}(BS), Q_{Medium}(BS) {≡ Wärmestrom an die Luft}, Kondensatmenge(BS), $Q_{Speicher}$(BS). Die zuletzt genannte Größe erfasst die in den Partikeln gespeicherte Wärme bezogen auf die momentane Lufteintrittstemperatur und stellt somit das momentane, theoretische Kühl- bzw. Heizpotenzial dar.
- Am Ende der Simulation wird das gesamte Temperaturfeld in den modellierten Partikeln aller Speicherabschnitte t(s, p, i, j, k) in der Datei „Speicherfeld.dat" für weitere Simulationen als mögliche Startoption gespeichert.
- Weitere Spezialausgaben, die den Zustandsverlauf der Luft in den Speicherabschnitten $t_L(s)$ und $x_L(s)$ sowie die Kern- und Oberflächentemperatur in einem vorbestimmten Partikeltyp $t_K(s)$ und $t_{OF}(s)$ charakterisieren, sind zu einer bestimmten vorgewählten Zeit BS = BS-Test sowie für einen Partikeltyp p = pTest möglich. Beide Größen stellen Eingabewerte dar. Die Verläufe für die Speicherabschnitte s werden in der Datei „Speicherverlauf.dat" abgelegt. Anhand dieser Ergebnisse kann man beispielsweise beurteilen, inwieweit die gewählten Konstruktionsparameter des Schotterspeichers sinnvoll sind.

4.1 Instationäre Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen

Die instationäre Wärmeleitung im Inneren des Speicherkörpers kann durch die Wärmeströme, die die sechs Oberflächen des Quaderelementes passieren, ihre Bilanzierung

und die daraus resultierende Temperaturänderung im Volumenelement numerisch nachgebildet werden. Im *Bild 6* ist für den im Speicherabschnitt s liegenden Partikeltyp p ein Volumenelement im Gitternetz an der Stelle i, j, k gezeigt, und die durch die Oberflächen tretenden Wärmeströme sind dargestellt.

Nach dem *Fourier*schen Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung lautet der Wärmestrom

$$\dot{Q}_{j,ein} = -\lambda \frac{dt}{dn} A \qquad (12)$$

mit
λ Wärmeleitfähigkeit
A Fläche, in der die Isothermenfläche t liegt
dt/dn Temperaturgradient.

Für die Wärmeleitung von Volumenelement zu Volumenelement durch eine gemeinsame Berührungsfläche nach Bild 6 gilt beispielsweise für den in Richtung j eintretenden Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{j,ein} = \lambda \frac{t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta x \, \Delta y \qquad (13)$$

wobei im Zeitintervall $\Delta\tau$ die Wärme

$$Q_{j,ein} = \lambda \frac{t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta x \, \Delta y \, \Delta\tau \qquad (14)$$

übertragen wird. In analoger Weise gelten

$$Q_{j,aus} = \lambda \frac{t_{i,j,k} - t_{i,j+1,k}}{\Delta x} \Delta x \, \Delta y \, \Delta\tau \qquad (15)$$

usw. Hinweis: In i-, j-, k-Richtung existieren nach *Bild 3* gemäß den Symmetriebedingungen an den Stellen i = 1, j = 1 bzw. k = 1 keine eintretenden Wärmeströme.

Bei einer Randbedingung dritter Art (Wärmeübergang) – das Volumenelement liegt an der Außenfläche des Partikels – gilt mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α_L für die an die Luft im Hohlraum abgegebene Wärme:

$$Q_{i,aus} = \left(\frac{1}{\alpha_L} + \frac{\Delta y}{2\,\lambda} \right)^{-1} (t_{i,j,k} - t_L) \, \Delta x \, \Delta x \, \Delta\tau \qquad (16)$$

$$Q_{j,aus} = \left(\frac{1}{\alpha_L} + \frac{\Delta x}{2\,\lambda} \right)^{-1} (t_{i,j,k} - t_L) \, \Delta x \, \Delta y \, \Delta\tau \qquad (17)$$

usw.

Die Ermittlung der Wärmemengen erfolgt jeweils für das in der Schicht s befindliche Partikel p und dort für alle Elemente i, j, k. Schließlich ergibt sich die Wärmezufuhr an das Volumenelement während des betrachteten Zeitintervalls zu:

$$Q_E = Q_{i,ein} + Q_{j,ein} + Q_{k,ein} - Q_{i,aus} - Q_{j,aus} - Q_{k,aus}. \qquad (18)$$

Die neue Elementtemperatur am Ende des Zeitintervalls $\Delta\tau$ berechnet sich unter Beachten der spezifischen Wärmekapazität c und der Volumenelementmasse m_E zu:

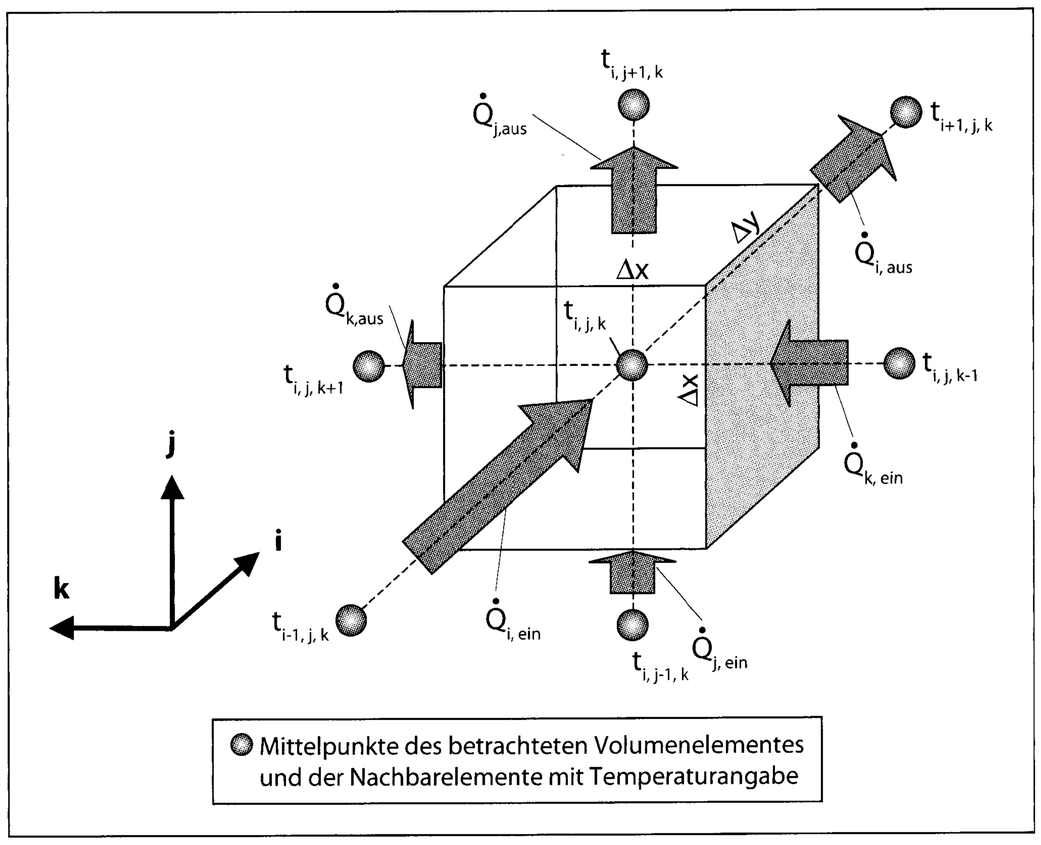

Bild 6. Quaderelement $\Delta V = \Delta x \, \Delta x \, \Delta y$ im Gitternetz an der Stelle i, j, k mit der Temperatur $t_{i,j,k}$ sowie Kennzeichnung der Temperaturen der Nachbarelemente und die durch Wärmeleitung übertragenen Wärmeströme.

$$tn_{i,j,k} = t_{i,j,k} + \frac{Q_E}{c \, m_E}. \qquad (19)$$

Die Wärmezufuhr an die Luft ist gleich der Wärme, die durch die luftberührten Volumenelementflächen austritt. Gleichzeitig erfolgt die Aufsummierung für alle p im jeweiligen Speicherabschnitt s zu $Q_L(s)$. Im Einzelnen gelten für die betreffenden Rand-Volumenelemente:

$$Q_L(s) = Q_L(s) + \xi \, Q_{i.aus} \qquad \{\text{wenn } i = imax\} \qquad (20)$$

$$Q_L(s) = Q_L(s) + \xi \, Q_{j,aus} \qquad \{\text{wenn } j = jmax\} \qquad (21)$$

$$Q_L(s) = Q_L(s) + \xi \, Q_{k,aus} \qquad \{\text{wenn } k = kmax\}. \qquad (22)$$

Der Faktor ξ berücksichtigt einerseits die Anzahl gleicher Oberflächen des Partikels p (dies sind nach *Bild 4* in Verbindung mit *Bild 2* in der Regel 16 Flächen, für auf der Spiegelebene liegende Volumenelemente in i-Richtung 8 Flächen) und anderseits die Anzahl der Partikel im Speicherabschnitt (ZP(p) / smax).

Auf die wärmetechnische Konsequenz der Wärmezufuhr an die Luft wird später eingegangen.

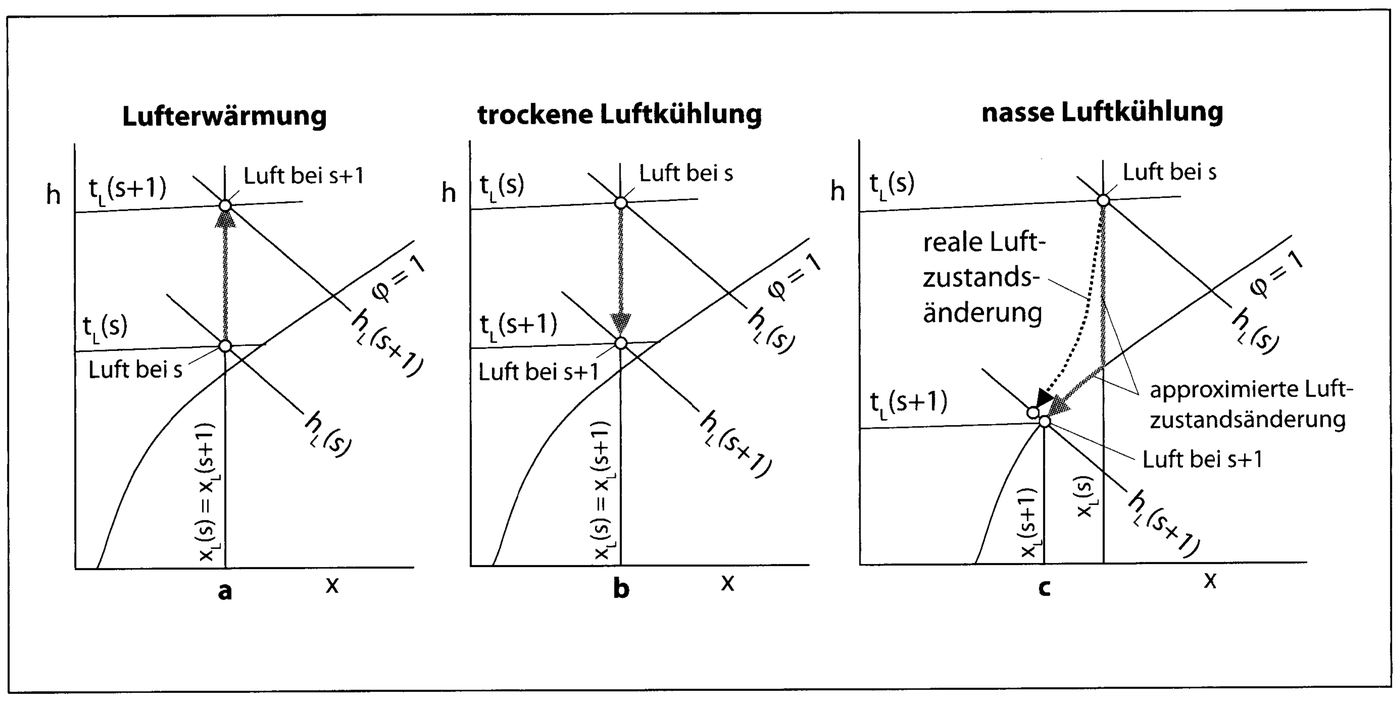

Bild 7. Mögliche Luftzustandsänderungen und Approximationen im Simulationsmodell.

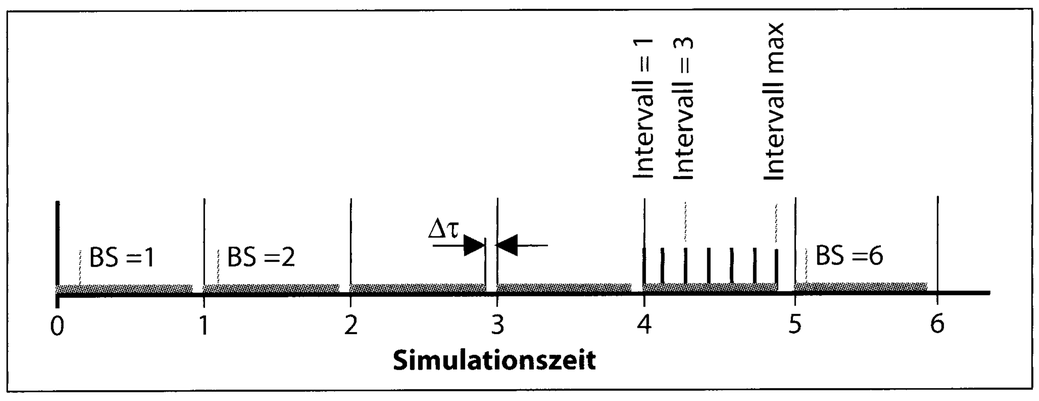

Bild 8. Definition und Zählung der Betriebsstunden.

4.2 *Wärmeübergangskoeffizient zwischen Partikel und umströmender Luft*

Für die Volumenelemente, deren Oberfläche teilweise an den Hohlraum grenzt, ist die Kenntnis des Wärmeübergangskoeffizienten α_L z. B. für Gl. (16) notwendig. Für den umströmten Körper gelten nach [3; 4] mit der Luftgeschwindigkeit w, dem äquivalenten Kugeldurchmesser der Partikel d_K (Eingabewert nach Ermittlung aus der Sieblinie) und den Stoffwerten für Luft ν_L, λ_L, Pr_L:

– *Reynolds*zahl

$$Re = w\, d_K / \nu_L \tag{23}$$

– Nußeltzahl für eine umströmte Kugel

$$Nu_0 = 2 + \left[0{,}441\, Re\; Pr_L^{0{,}667} + \frac{Re^{1{,}6}\, Pr_L^2}{\left[27{,}027 + 66{,}027\, Re^{-0{,}1} \left(Pr_L^{0{,}667} - 1\right)\right]^2} \right]^{0{,}5} \tag{24}$$

– Näherungsweise Korrektur der Nußeltzahl für umströmte Würfel

$$Nu = 1{,}6\, Nu_0 \tag{25}$$

– Wärmeübergangskoeffizient

$$\alpha_L = Nu\, \lambda_L / d_K\,. \tag{26}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient und alle zugehörigen Größen werden am Eintritt in den Speicherabschnitt s bestimmt.

L0	Zählen der Simulationsstunde (Betriebsstunde BS)
	Ermittlung der Tageszeit (Uhrzeit)
	Fixierung von vollen Stunden
	Stundenweise Zählung der Intervalle von 1 bis Intervallmax
	Bestimmung der aktuellen Temperaturvorgaben aus den thermischen Randbedingungen für den gewählten Entwurfstag durch Interpolation der gespeicherten Zeitverläufe
	Ermittlung der Luftrichtung und des Luftmassestromes am Eintritt
	Fixierung der Abarbeitungsgrenzen für die abschnittsweise Speicheruntersuchung in Abhängigkeit der Luftrichtung
	Zu Berechnungsbeginn Ermittlung der Speicherwärme bezogen auf die Lufteintrittstemperatur
L1	*Abarbeitung der instationären Verhältnisse im Speicher für alle Speicherabschnitt s in Richtung des Luftstromes*
	Ermittlung der Stoffwerte für Luft in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte
	Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten
	Elementweise Ermittlung der Wärmebilanzen nach Berechnung der Wärmeströme über die Begrenzungen der Volumenelemente
	Berechnung der neuen thermischen Volumenelementzustände am Ende des Zeitintervalls unter Beachten der Speicherkapazität
	Zuweisung der neuen Temperaturen für spiegelbildliche Volumenelemente
	Bestimmung der mittleren Partikeloberflächentemperatur im betrachteten Abschnitt s
	Ermittlung des Luftzustandes (Temperatur, absolute Feuchte) am Ende des Abschnittes s
	Überprüfung des Stabilitätskriteriums und ggf. Änderung des Luftzustandes
	Nach Abarbeitung des Abschnittes s erfolgt Rücksprung zu L1
	Bei Ereichen von s = smax oder bei Rückwärtsdurchströmung von s = 1 weiter ↓
Wenn der betrachtete Zeitschritt eine volle Stunde markiert (Intervall = Intervallmax), dann Speicherung der Stundenwerte (z. B. t_{Lein} (BS), t_{Laus}(BS), x_{Lein}(BS), x_{Laus} (BS) usw.)	
Die Gesamtwärme an die Luft Q_{Medium} (BS), die Kondensatmenge(BS) und die im Speicher enthaltene Wärme bezogen auf die Lufteintrittstemperatur $Q_{Speicher}$(BS) muss vorher aus den Teilergebnissen der Speicherabschnitte s und im letzten Fall auch für alle Partikeltypen p ermittelt werden.	
	Nach spezieller Steuerung sind auch die Verläufe Lufttemperatur, Luftfeuchte, Partikelkern- und -oberflächentempertur für jeden Speicherabschnitt s unter „Speicherverlauf.dat" speicherbar.
	Umspeichern des Temperaturfeldes in allen Speicherabschnitten und Partikeltypen t (s, p, i, j, k) = tn (s, p, i, j, k) (zeitliche Endzustände werden zu Anfangswerten für den folgenden Zeitschritt)
	Wenn BS = BSmax und Intervall = Intervallmax, Speicherung des letzten Temperaturfeldes unter „Speicherfeld.dat"
	Abarbeitung des nächsten Zeitschrittes; Rücksprung zu L0
Speicherung der relevanten Ergebnisse in der Datei „Ergebnis.dat"	

Bild 9. Abarbeitung des Kernalgorithmus (Zeitschleife).

4.3 *Zustandsgrößen für feuchte Luft*

Für die im Abschnitt 4.2 benötigten Stoffdaten der feuchten Luft gelten die Approximationen gemäß [5] in Abhängigkeit der Temperatur t_L und der absoluten Feuchte x_L.

Der Zustand der feuchten Luft wird im vorliegenden Simulationsmodell durch die Parameter Luftdruck p_L, Temperatur t_L, absolute Feuchte x_L, spezifische Enthalpie h_L, relative Feuchte φ_L beschrieben. Im Rechengang sind wechselweise zwei unterschiedliche Ermittlungen notwendig:

– Gegeben: p_L, t_L, x_L ⇒
  Bestimmung von h_L und φ_L mit dem Unterprogramm ZUSTAND
– Gegeben: p_L, h_L, x_L ⇒
  Bestimmung von t_L und φ_L mit dem Unterprogramm ZUSTAND.

Bei der Formulierung der Unterprogramme wird auf [5; 6] Bezug genommen.

4.4 *Änderung des Luftzustandes beim Durchströmen des Speichers*

Es wird zunächst angenommen, dass die Luftdurchströmung in aufsteigender Speicherabschnittsnummer s – von s = 1 bis s = smax – erfolgt (Richtung = 1). Liegen am Eintritt von s die Parameter spezifische Enthalpie

$h_L(s)$ und absolute Feuchte $x_L(s)$ vor, dann ergibt sich am Ende von s (≡ Eintritt von s + 1) mit $Q_L(s)$ (übertragene Wärme im Zeitschritt $\Delta\tau$) und dem Luftmassestrom $\dot{m}_L$ die spezifische Enthalpie zu

$$h_L(s + 1) = \\ = h_L(s) + Q_L(s) / (\Delta\tau\, \dot{m}_L). \quad (27)$$

Mit dem Unterprogramm ZUSTANDH sind zu $h_L(s + 1)$ die Temperatur $t_L(s + 1)$ und die Feuchte $x_L(s + 1)$ bzw. $\varphi_L(s + 1)$ bestimmbar. Das Ergebnis kann qualitativ sehr unterschiedlich sein:

- Bei einer Wärmezufuhr bleibt die absolute Luftfeuchte konstant (*Bild 7a*).
- Bei einer Wärmeabfuhr (Luft hat eine höhere Temperatur als der Schotter) ändert sich die absolute Luftfeuchte ebenfalls nicht, solange die Oberflächentemperatur der Partikel über der Taupunkttemperatur der Luft liegt (*Bild 7b*). Bei der pauschalen Ermittlung gemäß Gl. (27) bleibt eine möglicherweise vorhandene örtliche Kondensation unerkannt, wenn die mittlere Luftaustrittstemperatur im ungesättigten Gebiet liegt. Dennoch könnten in der Realität einige niedrige Partikeltemperaturen eine Teilkondensation bewirken.
- Wird die Taupunkttemperatur unterschritten, kondensiert Wasserdampf aus der Luft aus. Die genaue Menge wäre nur bestimmbar, wenn die einzelnen Partikeloberflächentemperaturen betrachtet würden und die Lage der Partikel entlang des Luftstromes (innerhalb des Abschnittes s) zugeordnet erfolgte. Dies ist in Anbetracht der praktischen Gegebenheiten nicht sinnvoll. Stattdessen wird nach dem einfachen Modell gemäß *Bild 7c* verfahren.

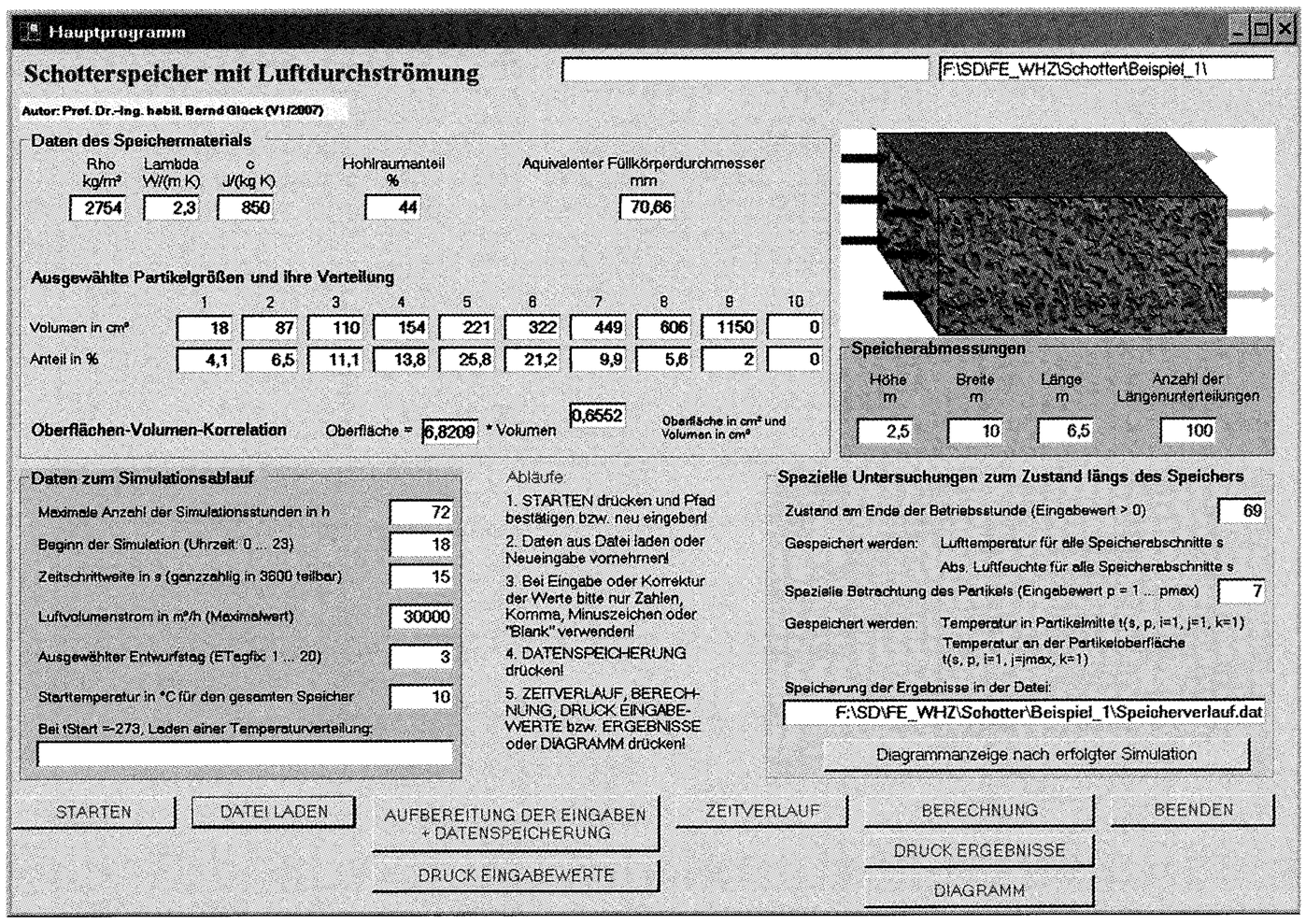

Bild 10. Hauptprogramm (Maske 1) für Beispiel 1.

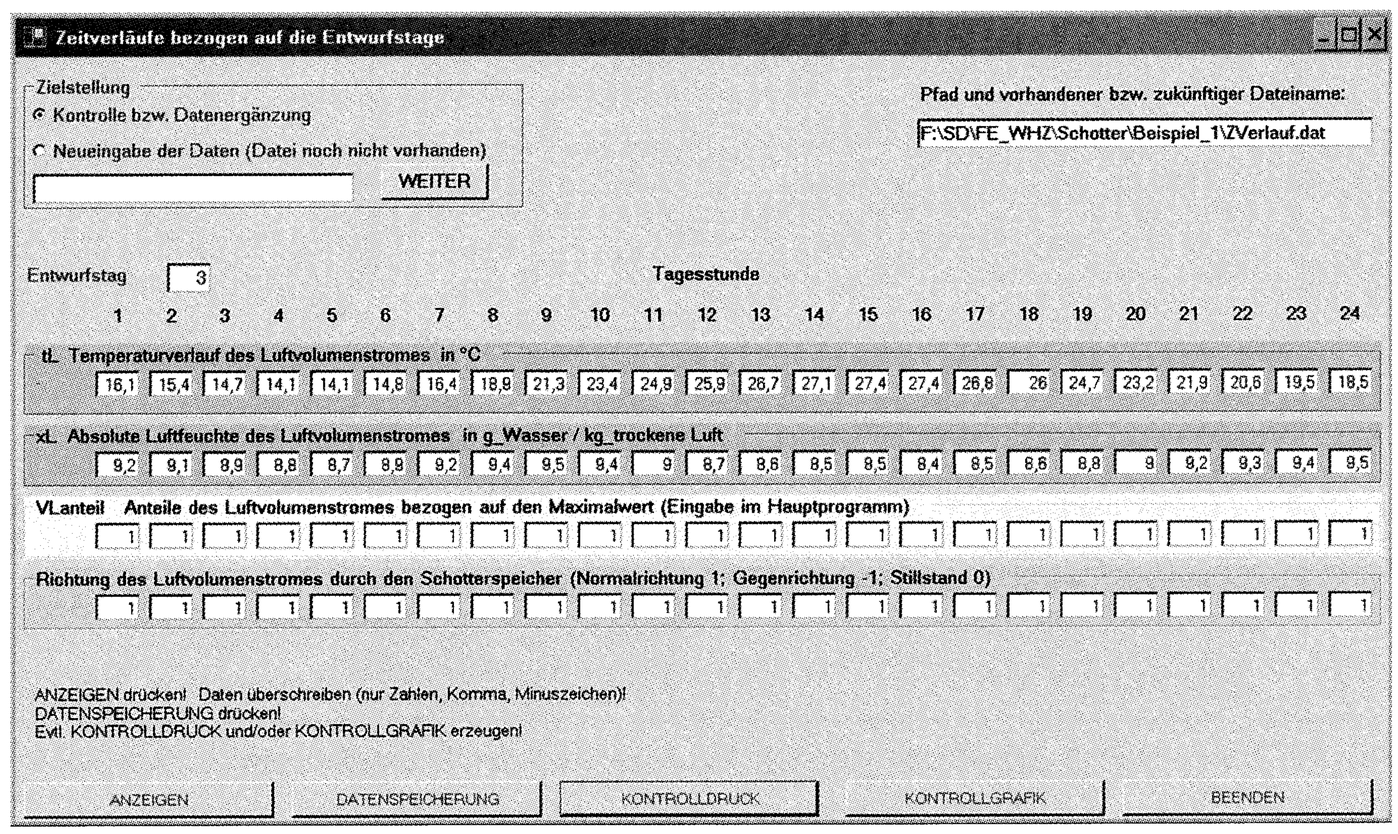

Bild 11. Zeitverläufe (Maske 2) für Beispiel 1.

Wenn $x_{Sättigung} < x_L(s)$ gilt, wird am Abschnittsende $x_L(s + 1) = x_{Sättigung}$ gesetzt und der ausfallende Kondensatstrom zu

$$\dot{m}_{Kondensat}(s) = \dot{m}_L\,(x_L(s + 1) - x_L(s)) \quad (28)$$

näherungsweise bestimmt. Die im Speicher insgesamt während einer Betriebsstunde ausgeschiedene Kondensatmenge wird durch Summationen über die Zeitschritte und die Speicherabschnitte gebildet.

Bei entgegengesetzter Durchströmrichtung (Richtung = –1) gelten die entsprechenden Beziehungen. Zum Lufteintritt s gehört der Luftaustritt s – 1, wobei mit s = smax begonnen wird. Beide Abarbeitungen folgen dem bereits genannten Upwind-Verfahren.

Vorbeugung von Instabilitäten

Bei der Luftdurchströmung kann sich vor allem bei sprunghaften Änderungen der Medientemperatur, großen Speicherabschnittslängen, großen Zeitschrittweiten und/oder geringem Luftvolumenstrom ein instabiler Berechnungszustand einstellen. Dies sei beispielhaft geschildert:

Eine große Wärmemenge gelangt in den den Speicherabschnitt s beaufschlagenden Luftstrom. Am Ende des Zeitschrittes ergibt sich nach Gl. (27) und dem Unterprogramm ZUSTANDH eine Lufttemperatur $t_L(s+1)$, die höher liegt als die Temperaturen der angrenzenden Partikeloberflächen. Dies ist ein Verstoß gegen den II. Hauptsatz der Thermodynamik. Diese hohen Temperaturen bewirken im Weiteren einen Wärmestrom in gegensätzlicher Richtung, die Lösungsentwicklung schwingt eine Zeit lang bzw. ist überhaupt nicht konvergent. In diesem Fall kann wegen der zahlreichen Einflüsse kein zu Gl. (7) analoges Kriterium formuliert werden.

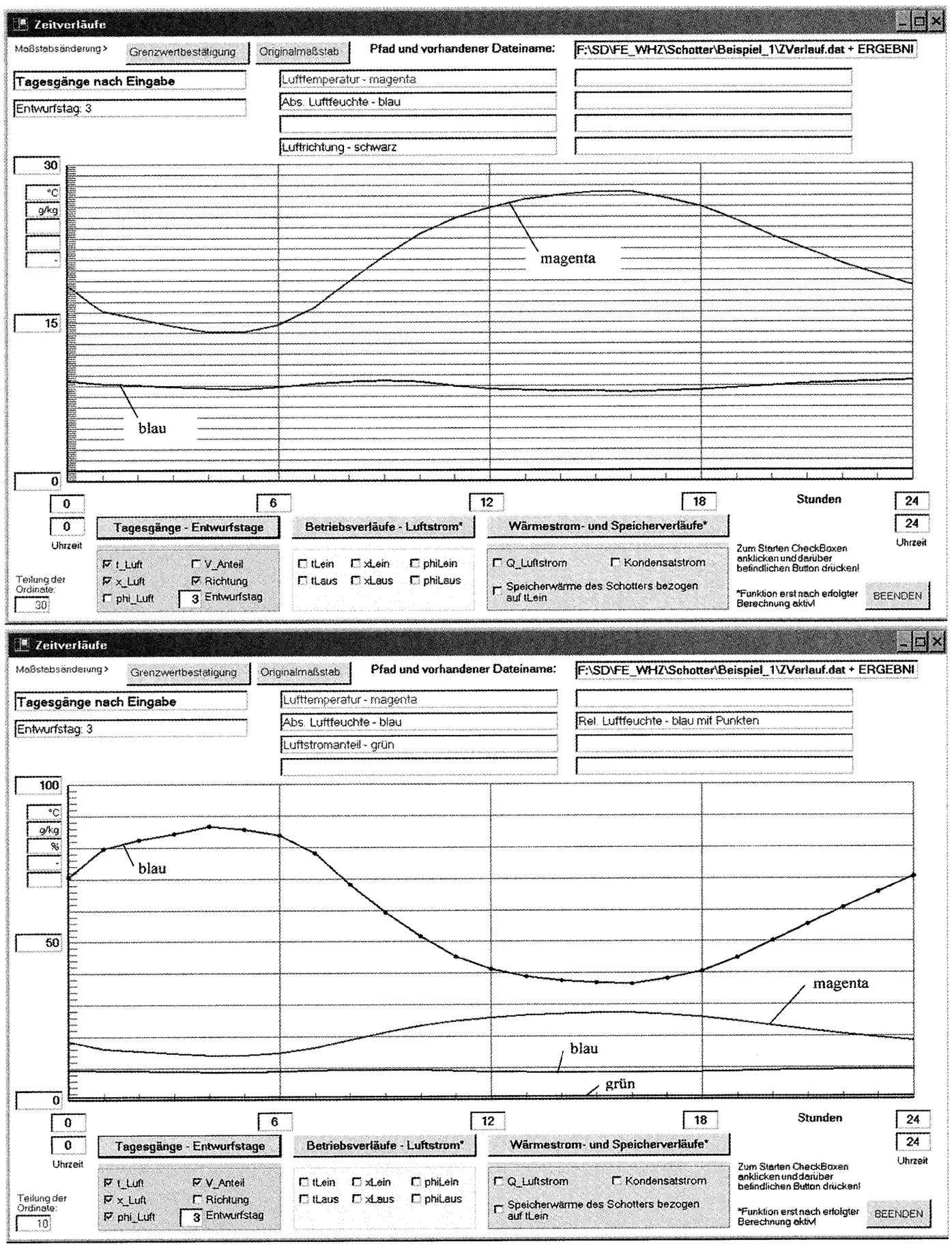

Bild 12. Tagesverläufe gemäß Entwurfstag 3 in verschiedenen Darstellungen für Beispiel 1.

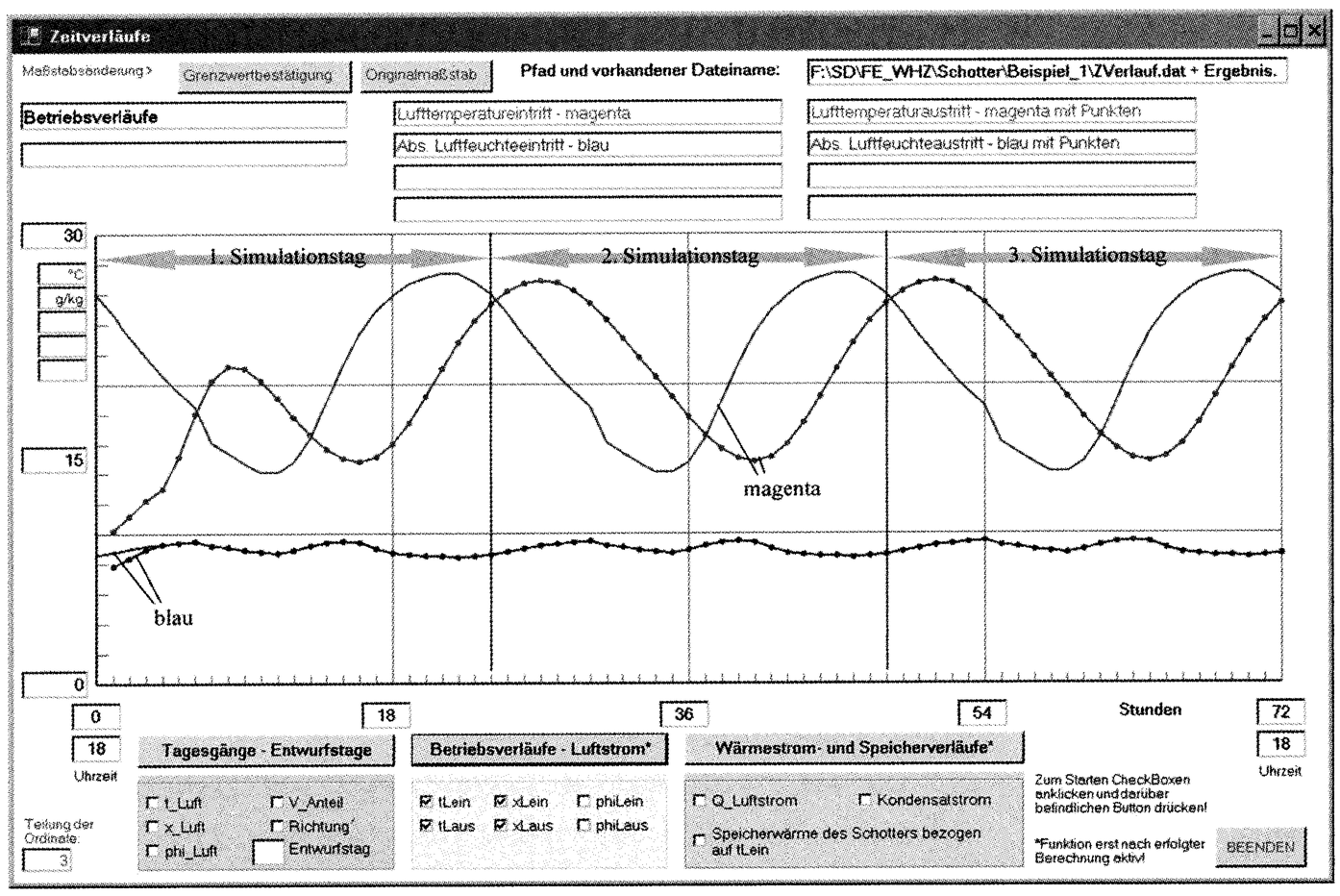

Bild 13 Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die absoluten Luftfeuchten für Beispiel 1. (Die Austrittszustände werden erst nach einer realen Betriebsstunde angezeigt.)

Deshalb wird folgendermaßen vorgegangen:

Die mittlere Oberflächentemperatur t_{mittel} der Partikel p im Abschnitt s wird näherungsweise bestimmt, indem die Temperatur des „oberen" Volumenelementes i = 1, j = jmax(p), k = 1 (siehe *Bild 4*) als Referenztemperatur benutzt wird. Diese „punktuelle" Partikeloberflächentemperatur t(s, p, 1, jmax(p), 1) werde mit dem Anteil der Partikeloberflächen $O_{anteil}(p)$ gewichtet. Somit folgt der repräsentative Mittelwert zu:

$$t_{mittel} = \sum_{p=1}^{p\max} t(s, p, 1, jmax(p), 1)\ O_{anteil}(p). \tag{29}$$

Als Stabilitätstest und Gegenmaßnahme für eine möglichst schwingungsfreie numerische Rechnung folgen bei Richtung = 1:

Wenn $Q_L(s) > 0$ und $t_L(s + 1) > t_{mittel}$, dann wird gesetzt

$$t_L(s + 1) = t_{mittel} \tag{30}$$

Wenn $Q_L(s) < 0$ und $t_L(s + 1) < t_{mittel}$, dann wird gesetzt

$$t_L(s + 1) = t_{mittel} \tag{31}$$

Analoge Formulierungen gelten für Richtung = –1.

Generell sollten die Zeitschrittweiten und/oder die Speicherunterteilungen stets so gewählt werden, dass der vorstehend beschriebene „Noteingriff" vermeidbar ist.

4.5 Sonderfestlegungen bei Stillsand der Luftdurchströmung

Die Ermittlung der Stoffgrößen für feuchte Luft und die des Wärmeübergangskoeffizienten α_L entfallen, da keine Wärmeübertragung zur Luft erfolgt. Aus dem gleichen Grund werden auch keine Enthalpiebilanzen aufgestellt und die vorgenannten Stabilitätstests können entfallen.

Während des Luftstillstandes erfolgt – wie bereits zu Beginn des Abschnittes geschildert – lediglich ein Temperaturausgleich innerhalb der Partikel, ohne auf die Umgebung Bezug zu nehmen.

4.6 Definition der Betriebsstunde

Die Zeitschrittweite $\Delta\tau$ bildet das Grundmaß für die Simulation. Eine Simulationsstunde bzw. Betriebsstunde BS entspricht Intervallmax × $\Delta\tau$. Die Einteilung der Betriebsstunde ist aus *Bild 8* ersichtlich. Eine Betriebsstunde beginnt zur vorhergehenden vollen Stunde und endet eine Zeitschrittweite vor der vollen Zählstunde. Die Zählweise der Intervalle ist ebenfalls aus *Bild 8* ersichtlich. Daten am Ende einer Betriebsstunde entsprechen in Wirklichkeit dem zu Intervallmax vorliegenden aktuellen Werten (z. B. Lufteintrittstemperatur, Luftaustrittstemperatur, Speicherwärme bzw. den bis dahin innerhalb der Stunde gebildeten Summengrößen wie beispielsweise die Wärme an den Luftstrom).

Hinweis: Selbstverständlich hätte die Definition der Betriebsstunde auch jeweils an den rechten Vollstundenrand rücken können. Dies wurde aber vermieden, da zu einer vollen Stunde der Eingabewert – beispielsweise die Durchflussrichtung – sprungförmig geändert werden kann. Bei der derzeitigen Festlegung bleibt der Ausgangswert wenigstens eine Stunde konstant erhalten.

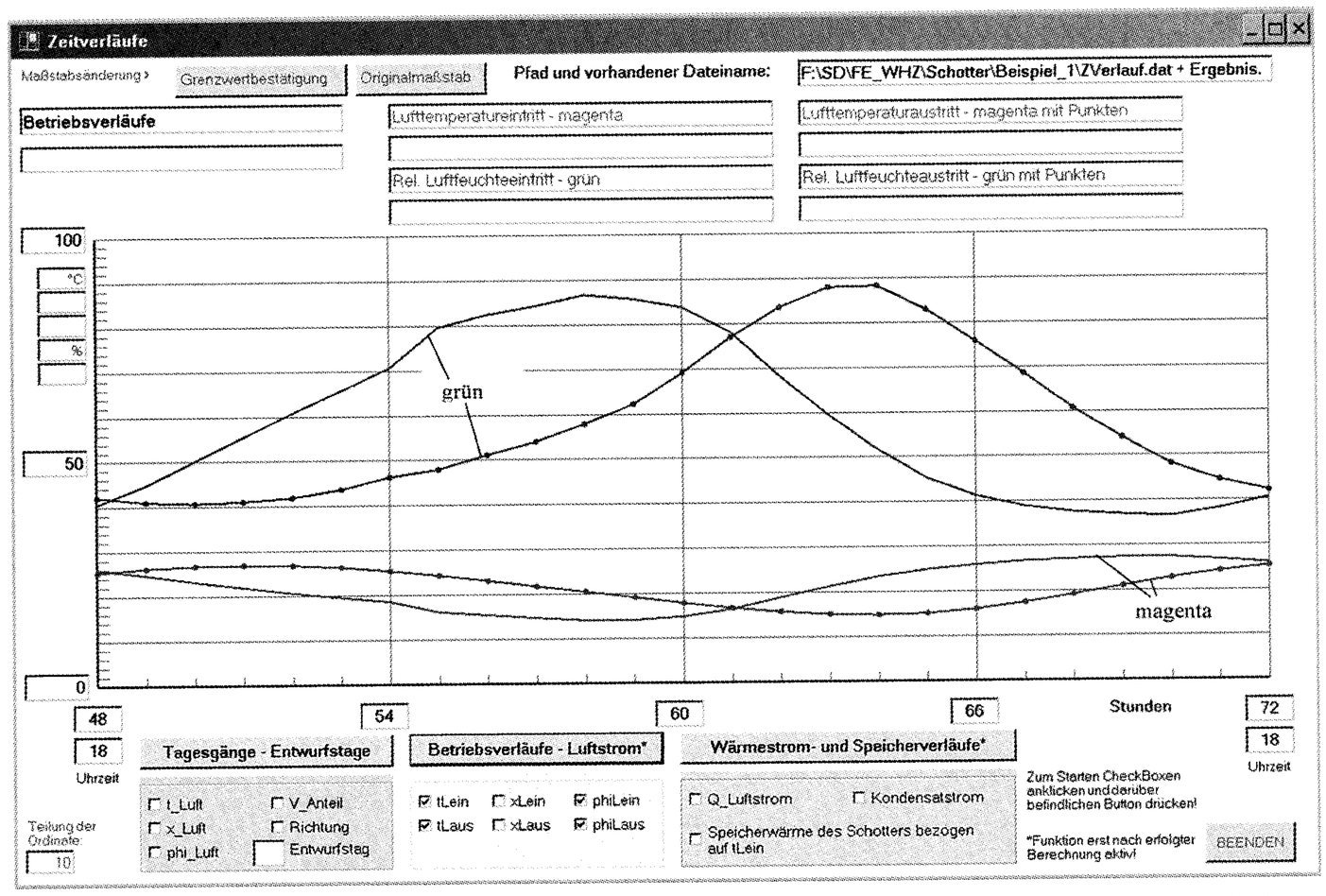

Bild 14. Simulationsverläufe für die Luftein- und -austrittstemperatur sowie die relativen

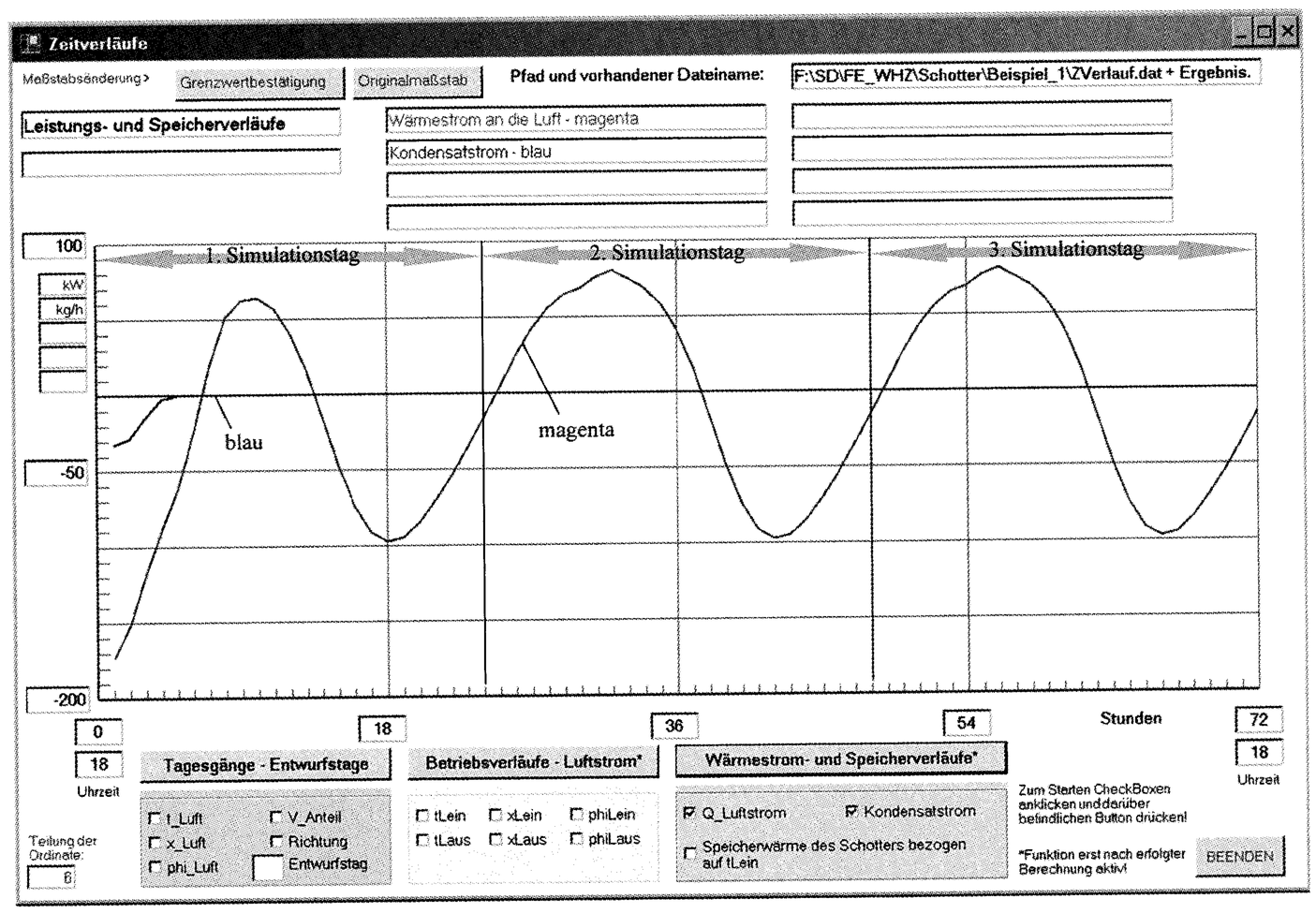

Bild 15. Simulationsverlauf für den Wärme- und Kondensatstrom für Beispiel 1. (Die Austrittszustände werden erst nach einer realen Betriebsstunde angezeigt.)

5. Grobablauf der Rechenorganisation

Im *Bild 9* ist der Grobablaufplan für die Abarbeitung der Zeitschleife vorgestellt. Das Simulationsprogramm ist in Visual Basic.NET Standard geschrieben. Die Dateneingabe beschränkt sich auf zwei Masken:

- Hauptprogramm (Maske 1) gemäß *Bild 10*
- Zeitverläufe bezogen auf die Entwurfstage (Maske 2) gemäß *Bild 11*.

Die Ausgaben erfolgen in Tabellenform als Word-Dokumente sowie in Diagrammform als vielfältig gestaltbare Vektorgrafiken.

6. Beispiel

Es handelt sich um ein Realbeispiel, d. h. um eine im Bau befindliche Anlage [2]. Der eingesetzte Schotter trägt die Bezeichnung „Metagrauwacke Erzgebirge 45/150". Aus der Sieblinie wurden 9 Bereiche bestimmt, deren mittlere Partikelgrößen und Anteile in der Maske 1 (*Bild 10*) verzeichnet sind. Des Weiteren wurde für diesen Schotter die Oberflächen-Volumen-Korrelation nach Gl. (1) angesetzt und ebenfalls in Maske 1 eingegeben. Für die gesamte Simulationszeit von 72 Stunden wurden eine einheitliche Durchflussrichtung (Richtung = 1) und die Beaufschlagung mit dem maximalen Luftvolumenstrom (30000 m^3/h) angenommen. Als thermische Randbedingung gelte der Entwurfstag 3 „Heiterer Sommertag im Juli" nach DIN 4710 für den Standort Kassel. Der Dateneintrag erfolgte in Maske 2 (*Bild 11*). Die maximale Simulationszeit beträgt 72 Betriebsstunden.

Die wichtigsten Eingabedaten und die daraus abgeleiteten Größen sind in *Tabelle 2* und *Bild 12* erfasst, die Ergebnisse finden sich in *Tabelle 3* sowie in den *Bildern 13 bis 17*.

Tabelle 3. Ausgabe aller Ergebnisse für Beispiel 1.

Objektbezeichnung: F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_1

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung
Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages-stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	26,0	–	8,6	–	40,6	–	–	–	–946,8
1/19	24,7	10,2	8,8	7,8	44,8	100,0	32,5	–173,5	–696,7
2/20	23,2	11,2	9,0	8,4	50,1	100,0	28,4	–151,7	–456,3
3/21	21,9	12,2	9,2	9,0	55,5	100,0	14,4	–117,9	–261,4
4/22	20,6	13,0	9,3	9,3	60,7	98,4	2,4	–88,4	–96,0
5/23	19,5	15,2	9,4	9,4	65,7	86,5	0,0	–61,0	30,1
48/18	26,0	25,4	8,6	8,6	40,6	42,1	0,0	–15,5	37,1
49/19	24,7	26,2	8,8	8,8	44,8	41,0	0,0	4,4	109,5
50/20	23,2	26,7	9,0	9,0	50,1	40,7	0,0	24,9	173,3
51/21	21,9	26,9	9,2	9,2	55,5	41,1	0,0	42,6	207,7
52/22	20,6	26,8	9,3	9,3	60,7	41,9	0,0	56,0	228,5
53/23	19,5	26,2	9,4	9,4	65,7	43,6	0,0	65,0	228,7
54/24	18,5	25,4	9,5	9,5	70,6	46,4	0,0	68,9	219,0
55/ 1	16,1	24,3	9,2	9,2	79,6	48,0	0,0	76,5	284,1
56/ 2	15,4	23,1	9,1	9,1	82,4	51,1	0,0	80,7	245,2
57/ 3	14,7	21,8	8,9	8,9	84,4	54,1	0,0	75,2	211,5
58/ 4	14,1	20,5	8,8	8,8	86,7	57,9	0,0	68,8	178,2
59/ 5	14,1	19,1	8,7	8,7	85,8	62,2	0,0	58,5	119,8
60/ 6	14,8	17,8	8,9	8,9	83,8	69,2	0,0	41,1	37,5
61/ 7	16,4	16,6	9,2	9,2	78,2	77,1	0,0	16,3	–73,3
62/ 8	18,9	15,7	9,4	9,4	68,2	83,7	0,0	–15,4	–205,6
63/ 9	21,3	15,0	9,5	9,5	59,4	88,0	0,0	–47,8	–299,8
64/10	23,4	14,8	9,4	9,4	51,8	88,3	0,0	–74,1	–350,0
65/11	24,9	15,1	9,0	9,0	45,3	83,0	0,0	–91,1	–347,8
66/12	25,9	16,0	8,7	8,7	41,3	75,9	0,0	-97,3	–309,8
67/13	26,7	17,4	8,6	8,6	38,9	68,6	0,0	-94,5	–262,7
68/14	27,1	19,2	8,5	8,5	37,6	60,7	0,0	-84,5	–202,0
69/15	27,4	21,0	8,5	8,5	36,9	54,2	0,0	-69,9	–149,8
70/16	27,4	22,8	8,4	8,4	36,5	48,2	0,0	-53,7	–96,2
71/17	26,8	24,2	8,5	8,5	38,3	44,6	0,0	-35,1	–25,7
72/18	26,0	25,4	8,6	8,6	40,6	42,1	0,0	-15,5	37,1

Legende: {Ende der Betriebsstunde = 1 Zeitschritt vor Erreichen der vollen Stunde!}

tLein Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
tLaus Luftaustrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
xLein absolute Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
xLaus absolute Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLein relative Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLaus relative Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
mKon ausgefallener Kondensatmassestrom während der Betriebsstunde
QLuft mittlerer Wärmestrom während der Betriebsstunde an die strömende Luft
QSpeicher Speicherwärme im Schotter bezogen auf die Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde

Das letzte Temperaturfeld ist gespeichert in der Datei:
F:\SD\FE_WHZ\Schotter\Beispiel_1\Speicherfeld.dat

Feststellungen:

- Die Kurvenverläufe zeigen, dass der anfängliche große Unterschied zwischen (26 °C) und Schottertemperatur (10 °C) rasch abgebaut wird, wobei eine stabile Lösungsentwicklung auftritt. Somit arbeitet die im Simulationsmodell implementierte Numerik wie beabsichtigt.
- Aufgrund des großen Luftdurchsatzes entstehen nach einer Einschwingphase von etwa einem halben Tag (12 Betriebsstunden) sich wiederholende Schwingungen der Zustandsgrößen.
- Kondensat fällt nur in den ersten Betriebsstunden aus, da zu Beginn der Simulation der Schotter die niedrige Temperatur von 10 °C besaß. Nach Beendigung der Kondensation ist folgerichtig die absolute Eintrittsfeuchte stets gleich der absoluten Austrittsfeuchte. Dies bestätigen die Daten in *Tabelle 3* und der x-Verlauf im *Bild 13*.
- Die am Ende einer Betriebsstunde ermittelte Speicherwärme und die innerhalb einer Stunde an den Luftstrom übertragene Wärme stimmen bilanzmäßig überein, wobei jedoch die unterschiedliche Bezugsbasis für die Speicherwärme – die Lufteintrittstemperatur – zu beachten ist. Die im *Bild 16* erkennbare Auffälligkeit zwischen 24.00 Uhr und 1.00 Uhr wird durch einen großen Sprung der Lufteintrittstemperatur verursacht.
- Im eingeschwungenem Zustand ist der Wärmeeintrag in den Speicher und die Wärmeentnahme aus dem Speicher betragsmäßig gleich, d. h., der Speicher ist nach außen adiabat.
- Die im *Bild 17* dargestellten Temperaturverläufe zeigen, dass die Partikeloberflächentemperatur thermodynamisch richtig zwischen der Partikelkerntemperatur und der Lufttemperatur liegt.

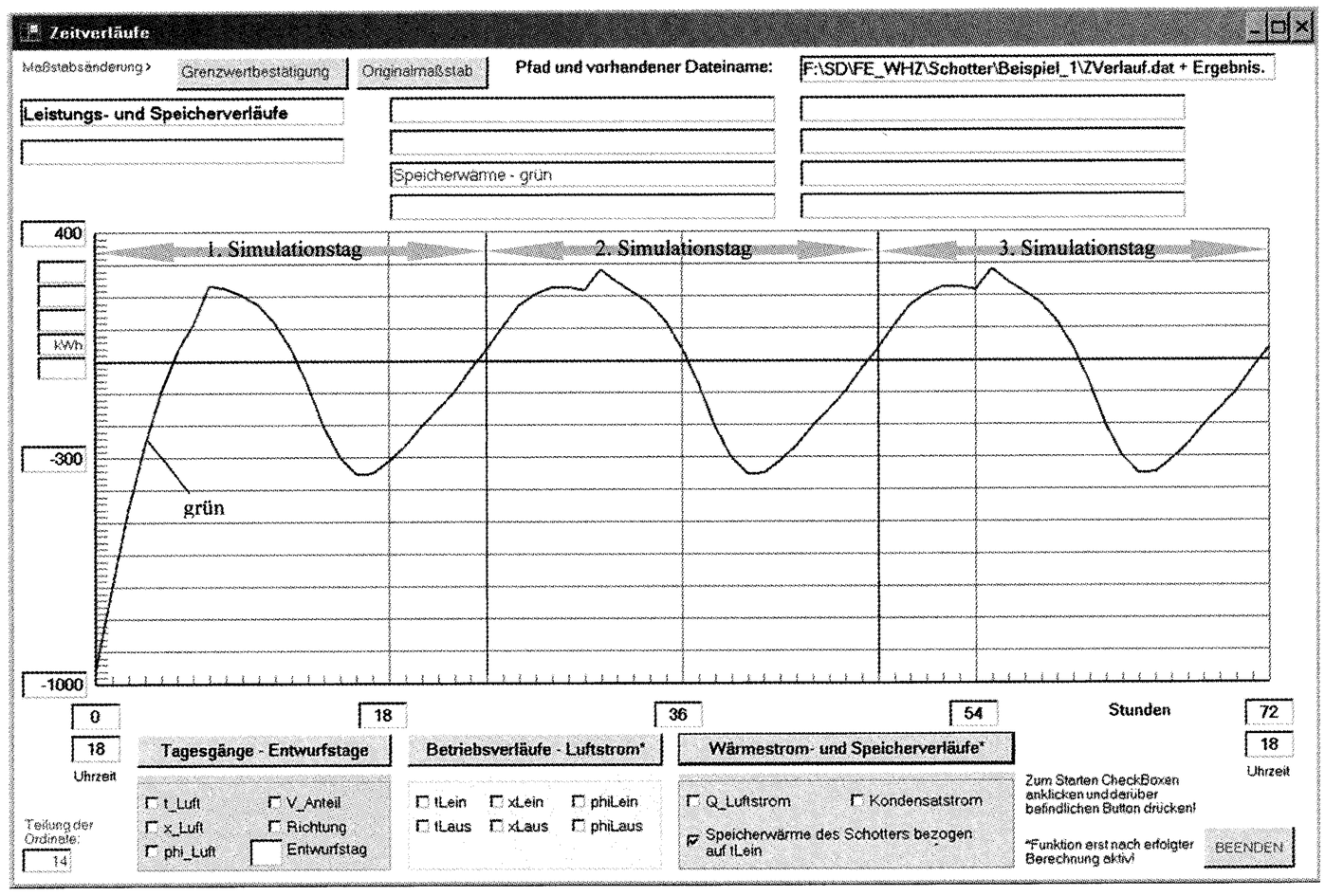

Bild 16. Simulationsverlauf der auf die Lufteintrittstemperatur bezogenen Speicherwärme für Beispiel 1.

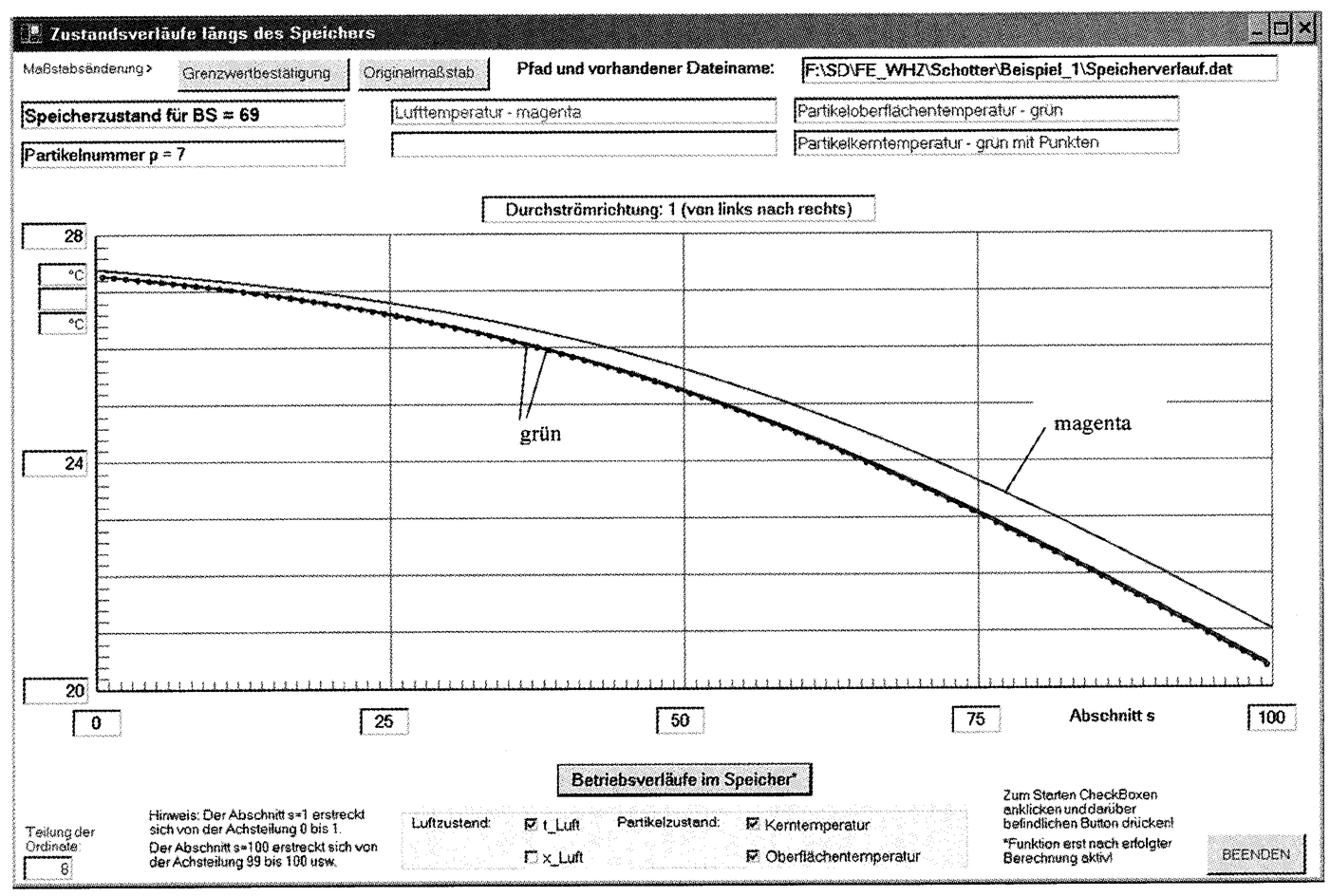

Bild 17. Lufttemperatur und ausgewählte Temperaturen für Partikeltyp 7 am Ende der 69. Betriebsstunde längs der Speicherabschnitte s = 1 ... 100 für Beispiel 1. (Die Luftzustände werden am Anfang und am Ende der Abschnitte s dargestellt, die Partikeltemperaturen in der jeweiligen Abschnittsmitte.)

7. Diskretisierungseinflüsse auf das Simulationsergebnis

Die Unterteilungen des Speichers in Längenabschnitte smax und der Simulationsstunde in Zeitschrittweiten $\Delta\tau$ sind die frei wählbaren Diskretisierungen bei der Simulation. Die Gittergestaltung der Partikel ist dagegen programmintern festgelegt. Es erfolgten

Tabelle 4. Vergleich der Ergebnisse bei Variation der Diskretisierungsgrößen bezogen auf Beispiel 1 (Abschnitt 6).

	smax	$\Delta\tau_{Sim}$	Partikelgitter	maximale Abweichungen	
		s		Luftaustrittstemperatur K	Wärmestrom %
Beispiel 1	100	15	normal	0	0
Beispiel 1a	50	15	normal	0,3	9
Beispiel 1b	100	10	normal	0	<1
Beispiel 1c	50	10	normal	0,3	9
Beispiel 1d	100	4*)	doppelt fein*)	0,1	<1

*) Die feinere Unterteilung des Partikelgitters verlangt nach Gl. (7) auch eine Herabsetzung der Zeitschrittweite.

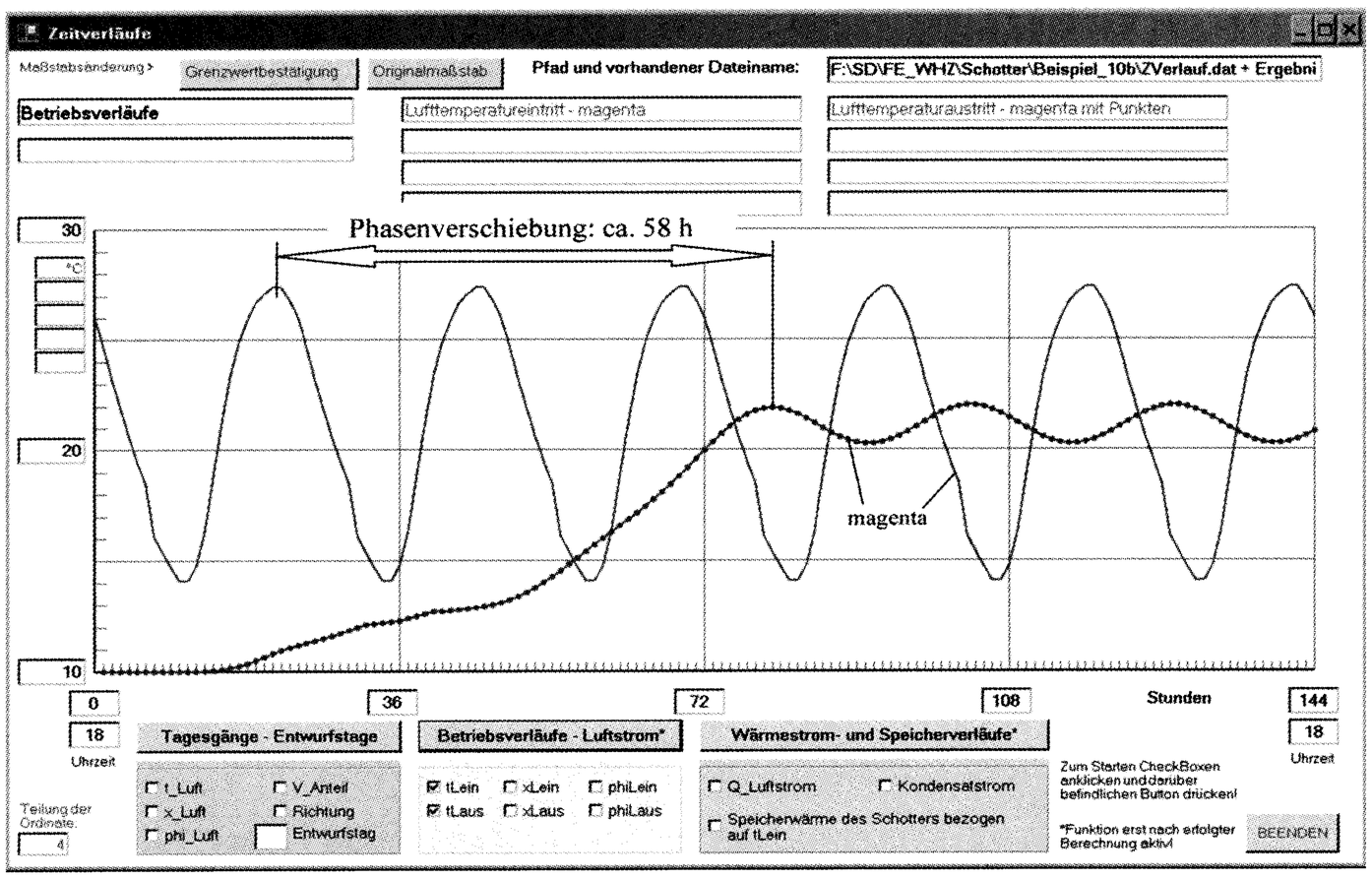

Bild 18. Tagesschwingungen der Lufteintrittstemperatur und das „langsame Einschwingen" der Luftaustrittstemperatur beim Beispiel 10b (Luftvolumenstrom 3000 m³/h).

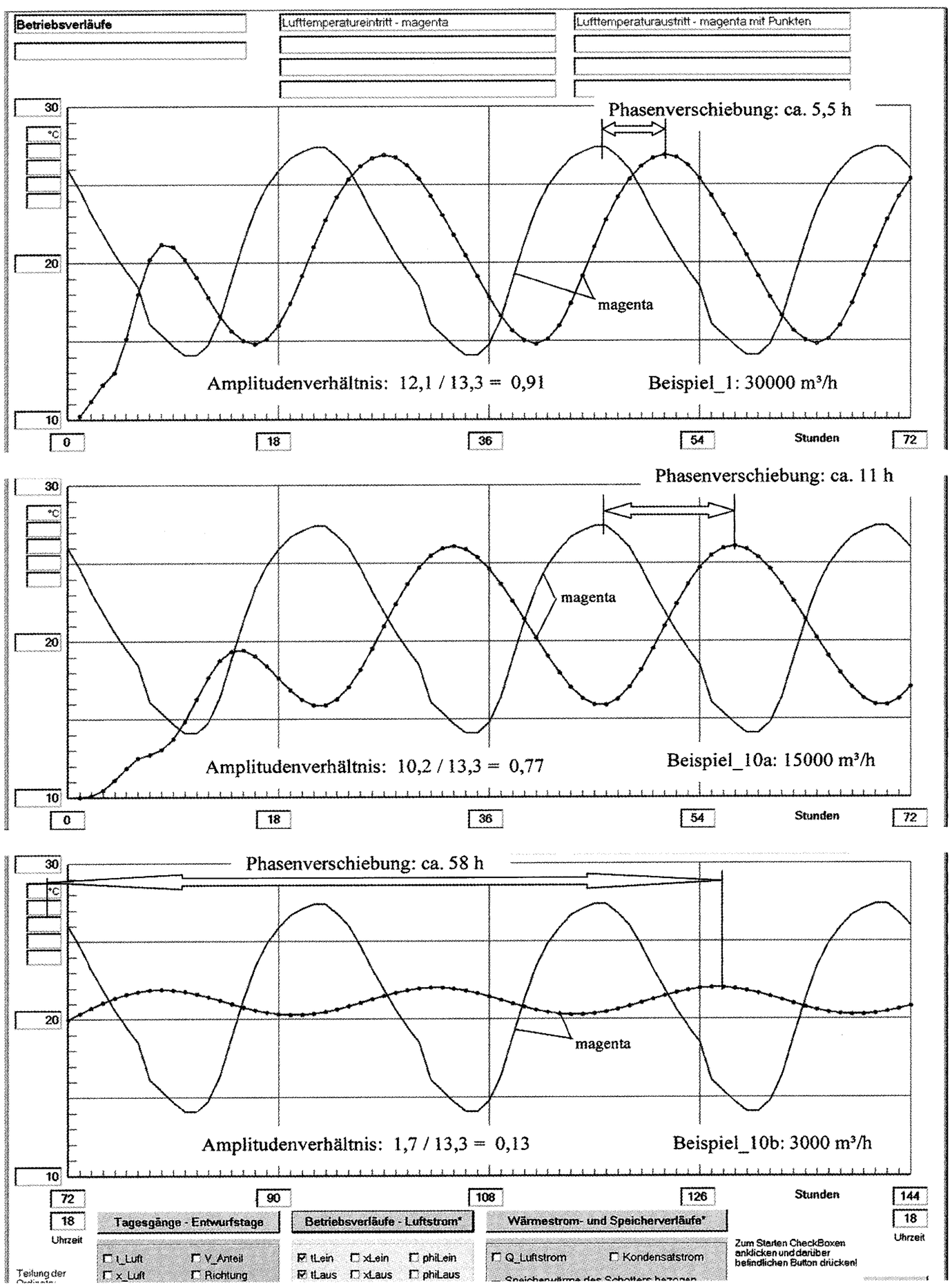

Bild 19. Gegenüberstellung der Luftaustrittstemperaturen bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen.

verschiedene Variationen der genannten Diskretisierungsgrößen auf Basis von Beispiel 1. In *Tabelle 4* sind die Untersuchungen zusammengestellt.

Feststellungen:

- Die Speicherunterteilung nimmt großen Einfluss auf die Genauigkeit. Die Größe smax = 100 erscheint bei der betrachteten Speicherlänge als geeignete Festlegung.
- Eine Verkürzung der Zeitschrittweite $\Delta\tau$ führt zu keiner markanten Genauigkeitssteigerung. D. h., die automatisch vorgeschlagene Zeitschrittweite muss nicht unterschritten werden.
- Der im Rechenprogramm implementierte Algorithmus zur Gitterfestlegung ist von völlig ausreichender Qualität. Eine Halbierung der Gitterabstände brachte keine nennenswerte Ergebnisverbesserung. Besonders nachteilig erwies sich in diesem Fall die Rechenzeiterhöhung um das ca. 30-fache, da mit der Gitterverfeinerung automatisch auch eine Reduzierung der Zeitschrittweite gemäß Gl. (7) zwingend ist.
- Die verfeinerte Gitterstruktur ergibt im Vergleich zu *Bild 17* praktisch identische Temperaturverteilungen längs des Speichers. Dennoch ist bei einer entsprechenden Diagrammauflösung (hier nicht dargestellt) erkennbar, dass die Spreizung der Kurven Partikeloberflächentemperatur und Partikelkerntemperatur größer geworden ist.

8. Unsicherheiten bei der Simulation

In den Vorbemerkungen (Abschnitt 1) wurden verschiedene Annahmen zur Grundlage für das Simulationsmodell erhoben.

- Ein zentraler Punkt war die Annahme gleicher Luftgeschwindigkeit in allen Hohlräumen. Auf deren Grundlage wird der Wärmeübergangskoeffizient α_L abschnittsweise – lediglich in Abhängigkeit des Luftzustandes – bestimmt. In einer Sensitivitätsbetrachtung wurde ein stets um 20% niedrigerer Wert als beim Beispiel 1 angesetzt.

  Feststellungen:

  - Es verringert sich logischerweise der Wärmeaustausch zwischen

Schotter und Luftstrom, weshalb kleinere Schwingungen der Luftaustrittstemperatur und des Wärmestromes gegenüber Beispiel 1 auftreten.

– Die Temperaturabweichung bezüglich des Luftaustritts beträgt maximal 0,4 K, die Leistungsabweichung erreicht mit 14% ihren Höchstwert.
– Falls sich im Ergebnis von Verifizierungen des Simulationsmodells an realen Leistungsmessungen Modifikationen erforderlich machen, so bietet die Änderung des Berechnungsansatzes für den Wärmeübergangskoeffizienten (Gln. (23) bis (26)) eine wichtige Möglichkeit.

- Eine weitere grundlegende Annahme für die Erstellung des Simulationsmodells war, dass keine Wärmeleitung zwischen den Partikeln angenommen wurde. D. h., der Speicher stellt kein Kontinuum dar. Eine Gegenüberstellung mit einem Modell, welches einen teilweise wärmeleitenden Kontakt zwischen den Partikeln beinhaltet, ist wegen fehlender Algorithmen nicht möglich.
- Schließlich verbleibt noch die Ungenauigkeit, dass keine Verknüpfung zwischen Durchströmgeschwindigkeit und Zeitschrittweite existiert. Inwieweit das Fehlen dieser Verbindung Ungenauigkeiten verursacht, kann ebenfalls wegen fehlender Vergleichsmöglichkeiten nicht quantifiziert werden. Falls zeitliche Speichereffekte im Luftstrom wider Erwarten zu berücksichtigen wären, könnte man gedankliche Anleihen aus [7] sowohl für eine analytische Betrachtung (Seite 53) als auch für einen numerisch, diskretisierten Zusammenhang (Seite 84) der Temperatur-Weg-Zeit-Funktion entnehmen.

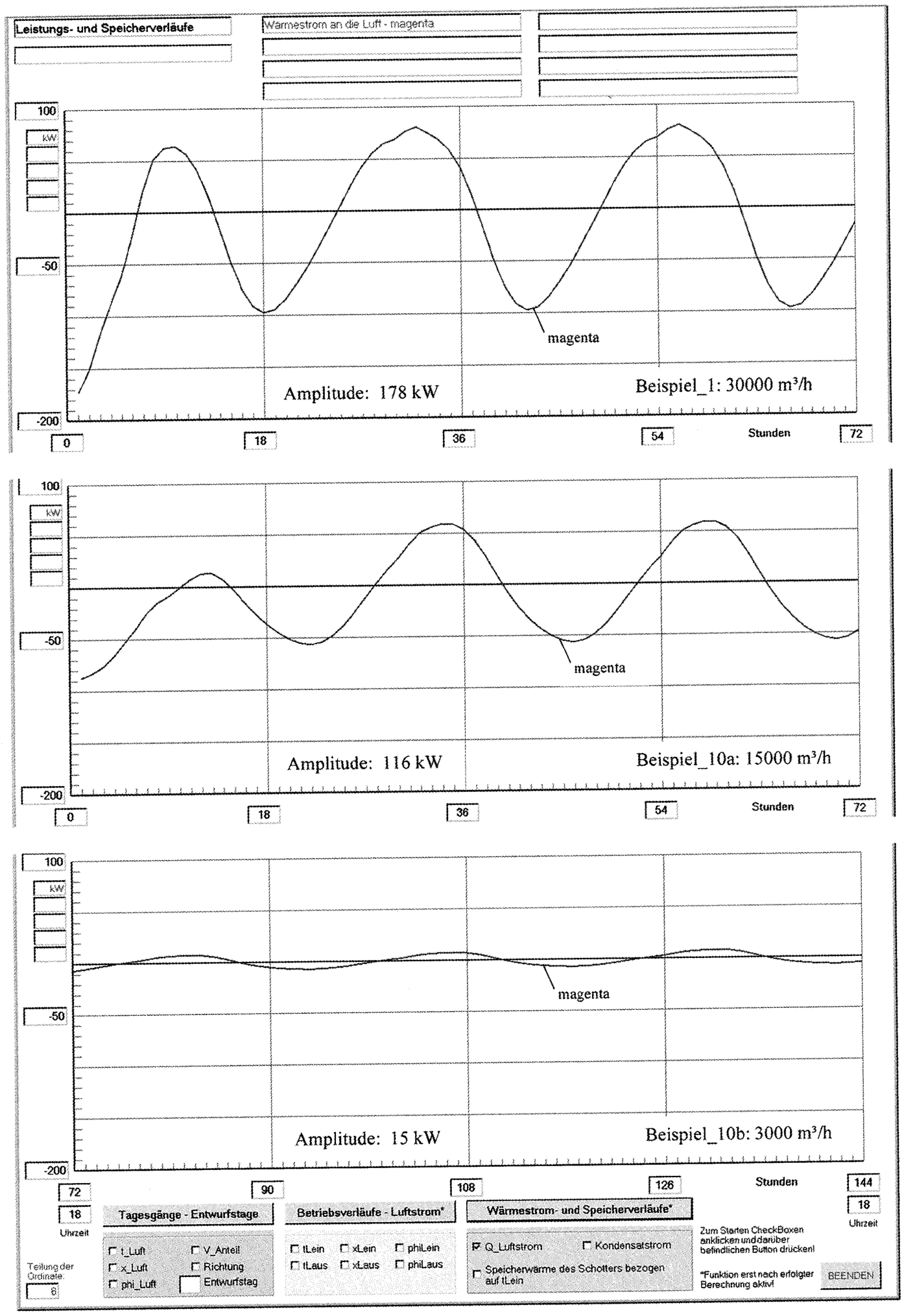

Bild 20. Gegenüberstellung der Leistungen bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen.

9. Hauptanwendungsgebiete für das Simulationsmodell

- Das erste Hauptanwendungsgebiet wird in Trenduntersuchungen gesehen. So können sehr gut Parametervariationen beispielsweise bezüglich
  – der Durchströmlänge,
  – der Partikelzusammensetzung
  – und mit geringerem Einfluss der wärmetechnischen Gesteinsparameter

  durchgeführt werden. Als durchaus interessant könnten auch künstlich hergestellte Schüttmaterialien sein, deren wärmetechnische Eigenschaften in Grenzen gestaltbar wären.

  Die genannten Betrachtungen sollten möglichst für verschiedene Entwurfstage, die den Jahresgang des Außenluftzustandes repräsentieren, durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind dann den Bedarfsanforderungen gegenüberzustellen, um z. B. einen „Erfüllungsgrad" ermitteln zu können.
- Das zweite Hauptanwendungsgebiet sind Untersuchungen zur Betriebsoptimierung. Relevant sind beispielsweise in Abhängigkeit der Entwurfstage
  – die Festlegung der Betriebszeiten,
  – die Fixierung eventueller Stillstandszeiten
  – sowie die Optimierung der Speicherregeneration (Zeiten, Durchflussrichtung, Volumenstrom).

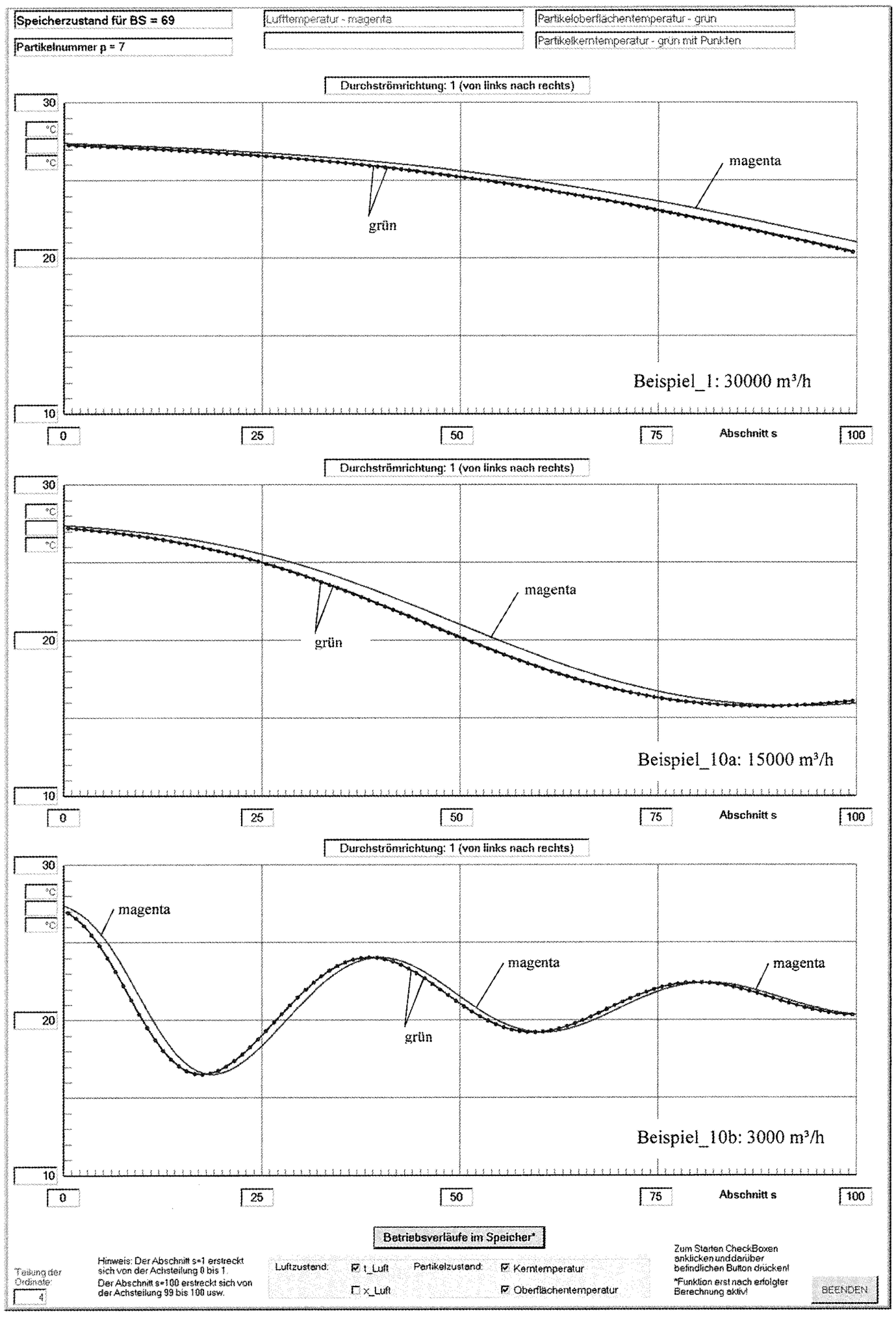

Bild 21. Gegenüberstellung der Temperaturen längs des Speichers bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen zur Betriebsstunde 69 für die oberen Varianten und zur Betriebsstunde 141 für die untere Variante.

Generell hat der *Volumenstrom dominierenden Einfluss auf die Betriebscharakteristik* des Speichers. Er kann somit zum entscheidenden Steuerungsinstrument werden.

Dies sei an Beispiel 1 (Luftvolumenstrom 30000 m³/h) und zwei weiteren Volumenstromvariationen (Beispiel 10a: 15000 m³/h; Beispiel 10b: 3000 m³/h) demonstriert (*Bilder 19 bis 21*). Bei den ersten beiden Varianten werden 72 Betriebsstunden nach dem Start mit der homogenen Speichertemperatur von 10 °C betrachtet. Da bei der dritten Variante (Luftvolumenstrom 3000 m³/h) sich nur ein sehr langsames „Hocharbeiten des Speichers" gemäß *Bild 18* ergab, sind 144 Stunden simuliert worden, wobei die letzten 72 Stunden für die Gegenüberstellung verwendet werden.

Feststellungen:

- Der Verlauf der markanten Speichergrößen – wie beispielsweise Luftaustrittstemperatur und Leistung – korreliert außerordentlich stark mit der Größe Luftvolumenstrom.
- *Bild 19* zeigt, dass das Amplitudenverhältnis – Amplitude der Luftaustrittstemperatur / Amplitude der Lufteintrittstemperatur – mit sinkendem Luftvolumenstrom abnimmt.
- Im Gegensatz dazu wächst die Phasenverschiebung. Die Zunahme steht im umgekehrten Verhältnis zum Luftvolumenstrom. Während in den ersten beiden Fällen (30000 m³/h und 15000 m³/h) die Zuordnung der Phasenverschiebung sofort erkennbar ist, wird im letzten Fall (3000 m³/h) die Phasenverschiebung aus *Bild 18* gefolgert. Zusätzlich wurde aufbauend auf den eingeschwungenen Zustand eine weitere Simulation durchgeführt, bei der das Maximum der Lufteintrittstemperatur um weitere 5 K – quasi als Temperaturmarker – erhöht wurde. Die Reaktion in der Luftaustrittstemperatur war erst nach etwa 58 Stunden erkennbar.

  Damit kann mit der Wahl des Luftvolumenstromes eine gute Zeitsteuerung für die Lieferung von erwärmter oder gekühlter Zuluft an den Verbraucher erfolgen.
- Mit der Größe des Luftvolumenstromes ist – wie aus *Bild 20* ersichtlich – sehr eng auch die Leistung als Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe der Luft beim Durchströmen des Speichers verbunden. Damit wird die bestehende Komplexität zwischen Phasenverschiebung, Temperaturamplitudendämpfung und Leistung deutlich.
- Soll beispielsweise lediglich eine Frischluftversorgung für einen Raum mit möglichst konstanter Temperatur erfolgen, so wäre beispielsweise die dritte Variante – ein großer Speicher mit kleinem Luftvolumenstrom – geeignet.
- Hat die Lastkompensation für einen Raum, der maßgeblich durch den Tagesgang der Außentemperatur und der Solarstrahlung belastet wird, Priorität, so ist z. B. der Einsatz der zweiten Variante – möglichst mit einer Phasenverschiebung von 12 Stunden – zu empfehlen.
- Interessant ist auch der im *Bild 21* dargestellte Verlauf der Temperaturen längs des Speichers für Partikeltyp 7

zu einer bestimmten Zeit (hier jeweils 3 Stunden vor Simulationsende). Während bei der ersten Variante (30 000 m³/h) noch eine Differenz zwischen der Luftaustrittstemperatur und der Schottertemperatur besteht (Speicher ist zu „kurz"), zeigt sich bei der zweiten Variante (15 000 m³/h) eine Übereinstimmung der Luftaustrittstemperatur und der Schottertemperatur bereits vor dem Speicherende (Speicher ist zu „lang"). Bei der dritten Variante wird die Besonderheit offenbar, dass sich im Speicher mehrere Tagesgänge widerspiegeln. Ein Tagesgang umfasst in diesem Fall 41,5 Speicherabschnitte. In den 100 Speicherabschnitten passen somit 100/41,5 Tage = 2,41 Tage. Dies entspricht einer Zeit von 2,41 × 24 Stunden ≈ 58 Stunden. Dieser Wert stimmt wiederum mit der ermittelten Phasenverschiebung überein.

– Der im *Bild 21* für die letzte Variante gezeigte Verlauf der Schottertemperatur zeigt deutlich eine gedämpfte Schwingung, wie sie in bekannter Weise als Temperaturschwingung in einem Kontinuum auftritt. Im vorliegenden Modell haben die Partikel aber keinen Wärmeleitkontakt, sondern der Wärmetransport zwischen den Partikeln erfolgt nur konvektiv durch den Luftstrom.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Wärmespeicher als mediendurchströmter Festkörper. Bericht der RUD. OTTO MEYER – Umwelt – Stiftung, Hamburg 2006.
Kostenlos erhältlich unter: http://www.rom-umwelt-stiftung.de (⇒ Arbeit bisher ⇒ Projekt 14, Teil 3)
Detailaufruf:
http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Kurzbericht03.pdf http://www.rom-umwelt-stiftung.de/arbbisher/pdf/Glueck_Bericht_Waermespeicher.pdf

[2] *Stieber, R.:* Luftdurchströmte Erdwärmespeicher mit Schotterschüttung, 1. Zwischenbericht (unveröffentlicht), Westsächsische Hochschule Zwickau (FH) 2007.

[3] VDI-Wärmeatlas, 2. bis 9. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994 bis 2002.

[4] *Glück, B.:* Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1990, ISBN 3-345-00515-8.

[5] *Glück, B.:* Zustands- und Stoffwerte (Wasser, Dampf, Luft), 2. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen 1991, ISBN 3-345-00487-9.

[6] *Glück, B.:* Vergleichsprozesse der Klimatechnik. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 1998, ISBN 3-7880-7643-7.

[7] *Glück, B.:* Heizwassernetze für Wohn- und Industriegebiete. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1985 und Frankfurt /M: Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH 1985, ISBN 3-8022-0095-0.