

Einheitliches Näherungsverfahren zur Simulation von Latentwärmespeichern

Bernd Glück, Jößnitz (Plauen)

Latentspeichermaterialien im Bauseinbau zu verwenden, wurde und wird bereits vielfältig erörtert und bewertet. So ist beispielsweise der Einsatz von Bauplatten mit PCM-Anreicherungen bezüglich seiner Wirksamkeit – Heizenergieeinsparung und/oder Behaglichkeitsverbesserung an Hitzetagen – in [1] untersucht worden. Im Gegensatz zur dezentralen Anordnung der Latentspeichermaterialien mit passiver Arbeitsweise steht die Installation eines separaten Wärmespeichers – beispielsweise eines Zentralspeichers – mit vollkommen steuerbaren Be- und Entladevorgängen. Dieser Speicher ist in das wärmetechnische Versorgungskonzept komplett einzubinden. Hierzu gibt es die übliche Anlagenvielfalt von gut regelbaren Wassersystemen mit örtlichen Raumheizkörpern oder thermisch aktiven Raumumfassungen bis hin zu Luftheiz- und Kühlsystemen.

Als Latentspeicherstoffe werden von verschiedenen Anbietern Paraffine, Salzhydrate, Paraffin-Salzhydrat-Gemische usw. empfohlen. Sie haben teilweise eine Mikro- oder Makroverkapselung aus Kunststoff.

Autor



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

Die Verwendung von Latentspeichermaterialien befindet sich derzeit in verstärkter Diskussion. Für den Einsatz werden vielfältige Substanzen mit enorm unterschiedlichen chemo-physikalischen Eigenschaften vorgeschlagen. Dabei treten auch große wärmetechnische Divergenzen beim Phasenwandel auf, die bei der Simulation zu berücksichtigen sind. Trotz dieser Spezifika für die einzelnen Stoffe wird nachfolgend ein einheitliches, wärmetechnisches Näherungsverfahren zur numerischen Verfolgung des Phasenwandels vorgeschlagen. Da zur Zeit mehrere parallele Entwicklungen auf diesem Gebiet laufen, soll mit diesem Beitrag ein Gedankenaustausch initiiert werden.

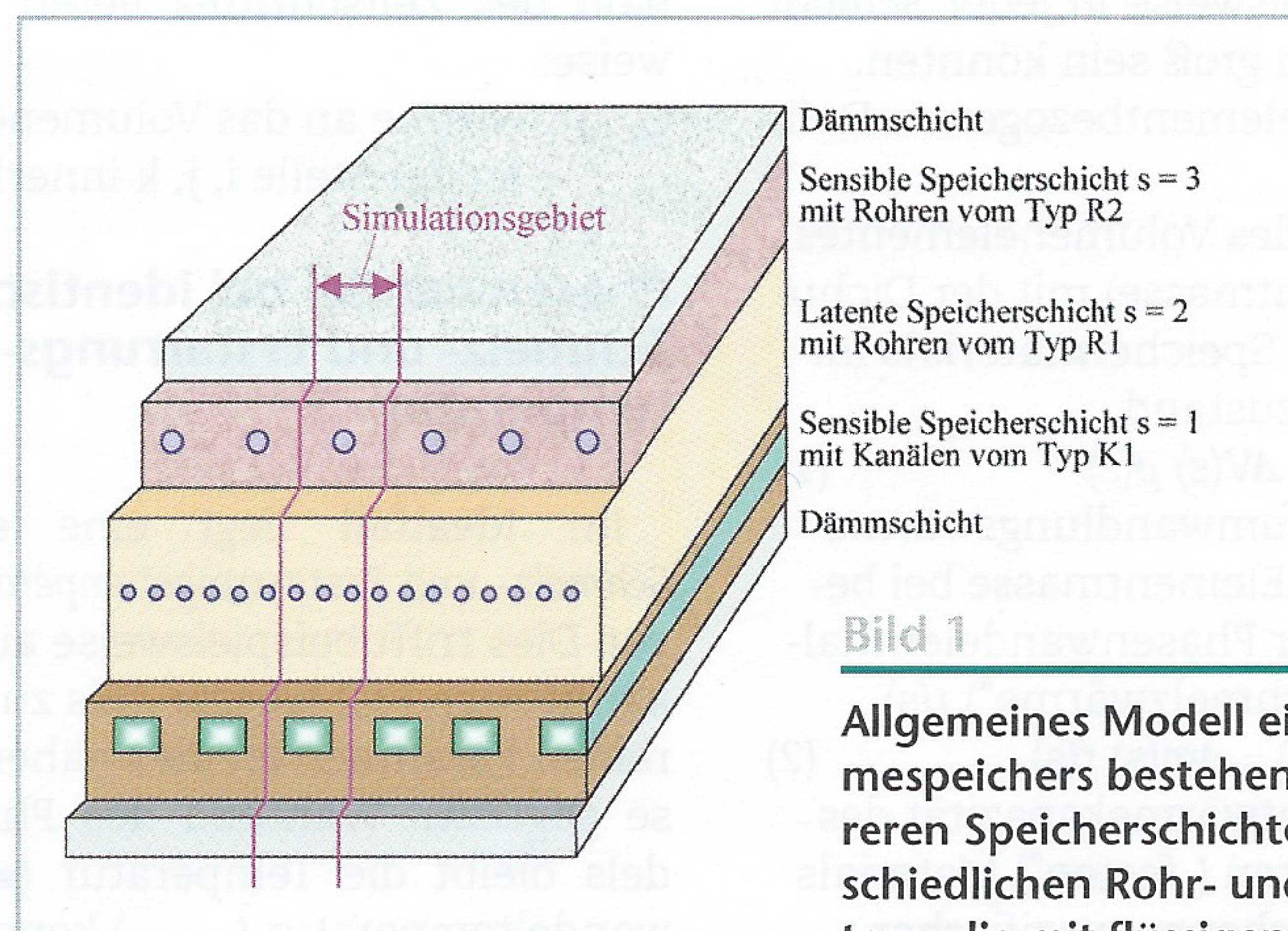


Bild 1

Allgemeines Modell eines Wärmespeichers bestehend aus mehreren Speicherschichten mit unterschiedlichen Rohr- und Kanalregistern, die mit flüssigen oder gasförmigen Wärmeträgern zur Be- und/oder Entladung durchflossen werden. Ein mögliches Simulationsgebiet zwischen zwei Symmetrieebenen ist eingetragen.

Wärmetechnisches Basismodell

Das Material mit Latentspeichereigenschaften (PCM) bildet den kompletten Speicherkörper oder es ist beispielsweise als Mikrogranulat dem nur sensibel speichernden Material beigemischt, so beispielsweise in Gipskartonplatten, Lehm- oder Putzbauplatten. In jedem der Fälle wird ein homogener Stoff mit gemittelten Stoffwerten angenommen. Generell kann der Speicherkörper aus mehreren Schichten s bestehen, wobei auch Schichten mit rein sensibler Speicherung einbezogen sein können. **Bild 1** zeigt einen universellen Aufbau mit $s = 3$ Speicherschichten, die durch eingeformte, von Wärmeträgern durchflossene Rohre und/oder Kanäle eine gesteuerte Be- bzw. Entladung erfahren. Den Simulationsbereich wird man unter Nutzung von vorhandenen Symmetrien zur Re-

chenzeitverringerung so klein wie möglich wählen. Im **Bild 1** ist ein Beispiel vermerkt. Lässt man das Schneiden von Durchströmteilen zu, so könnte der eingetragene Simulationsbereich nochmals halbiert werden. Mit dem allgemeinen Modell wäre im Sonderfall auch ein passiv arbeitender Speicher – z. B. eine Massivdecke nach **Bild 2** – darstellbar.

Für den Speicherkörper innerhalb des Simulationsgebietes ist die Fouriersche Differentialgleichung in dreidimensionaler Form für den homogenen, isotropen Körper bei vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen zu lösen. Die

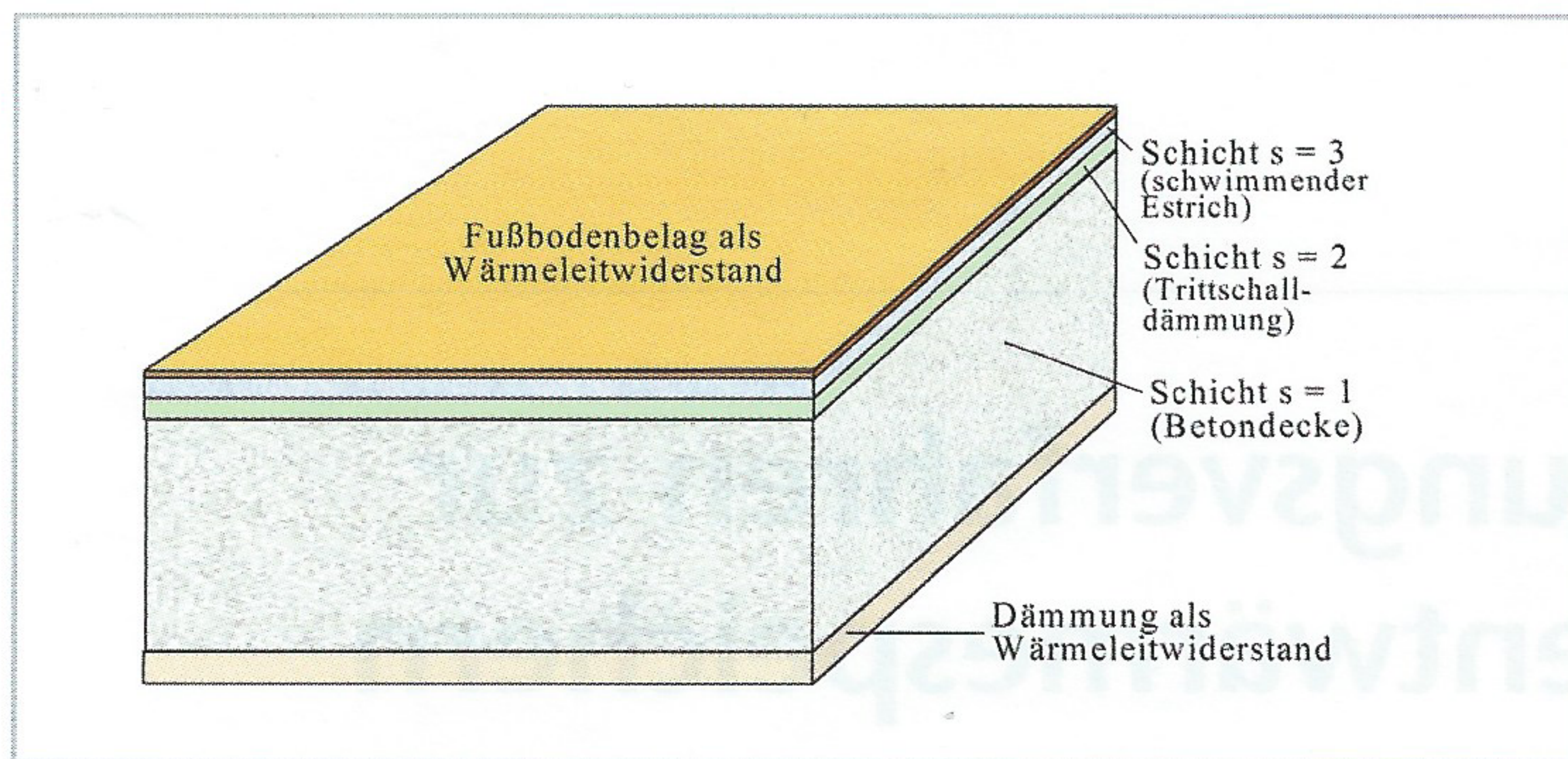


Bild 2

Ausschnitt aus einem passiv wirkenden Deckenspeicher über einem Kellerraum. Dieses Bauteil ohne Rohrbestückung kann beispielsweise aus dem allgemeinen Modell (Bild 1) entwickelt werden.

durch die Phasenumwandlung bedingte latente Wärme wird dabei als innere Wärmequelle oder -senke betrachtet. Die Rohre und Kanäle mit den durch die Wandungen tretenden Wärmeströmen gelten dagegen als spezielle Randbedingungen des Speicherkörpers.

Als geeignetes numerisches Lösungsverfahren wird die Finite-Volumen-Methode ausgewählt. Im Simulationsbereich ist ein dreidimensionales orthogonales Gitter mit den Knotenpunkten i, j, k definiert. Die Knotenpunkte liegen im Zentrum der Volumenelemente $\Delta V(s)$, die beispielsweise in jeder Schicht s unterschiedlich groß sein könnten.

Es gelten die elementbezogenen Definitionen:

$\Delta m(s)$ Masse des Volumenelementes (Elementmasse) mit der Dichte $\rho(s)$ des Speichermaterials im Einbauszustand

$$\Delta m(s) = \Delta V(s) \rho(s) \quad (1)$$

$Q_{\text{Phase}}(s)$ Phasenumwandlungswärme für die Elementmasse bei bekannter Phasenumwandlenthalpie („Schmelzwärme“) $r(s)$

$$Q_{\text{Phase}}(s) = \Delta m(s) r(s) \quad (2)$$

$CE(s)$ Elementwärmekapazität des erstarrten („festen“) Materials bei gegebener spezifischer Wärmekapazität für den erstarrten Stoff $c(s)$

$$CE(s) = \Delta m(s) c(s) \quad (3)$$

$CE_{\text{fl}}(s)$ Elementwärmekapazität des geschmolzenen („flüssigen“) Materials bei gegebener spezifischer Wärmekapazität für den geschmolzenen Stoff $c_{\text{fl}}(s)$

$$CE_{\text{fl}}(s) = \Delta m(s) c_{\text{fl}}(s) \quad (4)$$

Zur Beschreibung des thermodynamischen Zustandes der Speicherelemente werden verwendet:

$t_{i,j,k}$ Temperatur am Gitterpunkt i, j, k (Mittelpunkt des Volumenelementes)

$\text{Phase}_{i,j,k}$ Phasenzustand am Gitterpunkt i, j, k mit der Definition:

$\text{Phase}_{i,j,k} = 0$: vollkommen erstarrtes („festes“) Material

$\text{Phase}_{i,j,k} = 1$: vollkommen geschmolzenes („flüssiges“) Material.

Die Simulation wird in konstanten Zeitschritten durchgeführt. Während $t_{i,j,k}$ und $\text{Phase}_{i,j,k}$ am Anfang des Zeitschrittes gelten, seien die Zustandsgrößen am Ende des Zeitschrittes mit $tn_{i,j,k}$ sowie $\text{Phasen}_{i,j,k}$ bezeichnet (n bedeutet „neu“). Nach kompletter Abarbeitung eines Zeitschrittes erfolgt das Umspeichern der Größen $t_{i,j,k} = tn_{i,j,k}$ usw.

Die Berechnung der Wärmeleitung zwischen den Volumenelementen einschließlich der eventuell vorhandenen Berandungen (Rohr- bzw. Kanalwände und/oder äußerer Speicherrand) innerhalb des Zeitschrittes liefert elementweise:

$Q_{i,j,k}$ Wärme an das Volumenelement an der Stelle i, j, k innerhalb $\Delta \tau$.

Phasenwandel bei identischer Schmelz- und Erstarrungstemperatur

Im Idealfall liegt eine einheitliche Schmelz- und Erstarrungstemperatur t_{Wandel} vor. Dies trifft beispielsweise auf den bekanntesten Fall Wasser / Eis zu. Auch bei reinen Paraffinen ist dies näherungsweise gegeben. Während des Phasenwandels bleibt die Temperatur ($\equiv$ Phasenumwandlungstemperatur t_{Wandel}) konstant.

Der temperaturabhängige Verlauf der spezifischen Enthalpie $h(t)$ ist im Bild 3 visualisiert. Der betrachtete Idealfall zeichnet sich durch lineare Anstiege im ungeschmolzenen („festen“) Stoff von $dh/dt = c$ und im geschmolzenen („flüssigen“) Stoff von $dh/dt = c_{\text{fl}}$ aus. Im Bereich des Phasenwandels von $\text{Phase} = 0 \dots 1$ ist die Temperatur konstant (t_{Wandel}), so dass hier eine fiktive spezifische Wärmekapazität $c_{\text{Phasenwandel}} \rightarrow \infty$ gelten würde. Zur rechnerischen Verfolgung des Schmelz- bzw. Erstarrungsvorganges wird der vertikale Enthalpiesprung vom Phasenzustand linear geteilt. Zusammenfassend stellt h somit eine Funktion der Temperatur t und des Phasenzustandes Phase dar:

$$h = h(t, \text{Phase}) \quad (5)$$

Mit Kenntnis der Wärmezufuhr an das Volumenelement Q sind bestimmbar:

- die Temperaturänderung bei rein sensibler Wärmespeicherung
- die Änderung des Phasenzustandes bei rein latenter Wärmespeicherung
- die Temperatur- und Phasenzustandsänderungen bei sensibler und latenter Wärmespeicherung.

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

$$\Delta t = \frac{Q_{i,j,k}}{CE(s)} \quad \text{bzw. bei geschmolzenem Material} \quad \Delta t = \frac{Q_{i,j,k}}{CE_{\text{fl}}(s)} \quad (6)$$

$$tn_{i,j,k} = t_{i,j,k} + \Delta t \quad (7)$$

Die Berücksichtigung des Phasenwandels beim Aufheizen oder Abkühlen muss differenzierter erfolgen. Hierbei ist der vorhandene Umwandlungsgrad $\text{Phase}_{i,j,k}$ zu beachten und Δt sowie $tn_{i,j,k}$ nach den Gln. (6) und (7) stellen zunächst nur Zwischenergebnisse einer Vorrechnung dar. Die erforderlichen Rechenabläufe werden zweckmäßigerweise in einer Programmstruktur formuliert. Sie ist im Bild 13 als Teil einer komplexeren Wiedergabe, die auch die Hysterese beim Phasenwandel beachtet, integriert.

Phasenwandel bei unterschiedlichen Schmelz- und Erstarrungsverläufen – Hystereseformen

Gegenüber dem Idealfall zeigen die meisten PCMs, so beispielsweise Salzhydrate und Paraffin-Salzhydrat-Gemische ein deutlich verändertes Verhalten beim Phasenwandel. Die Schmelz- und Erstarrungstemperatur unterscheiden sich, es liegt eine Hysterese vor.

Dabei könnten die Vorgänge aufgrund der vorhandenen Anomalien in verschiedene Kategorien eingeteilt und ent-

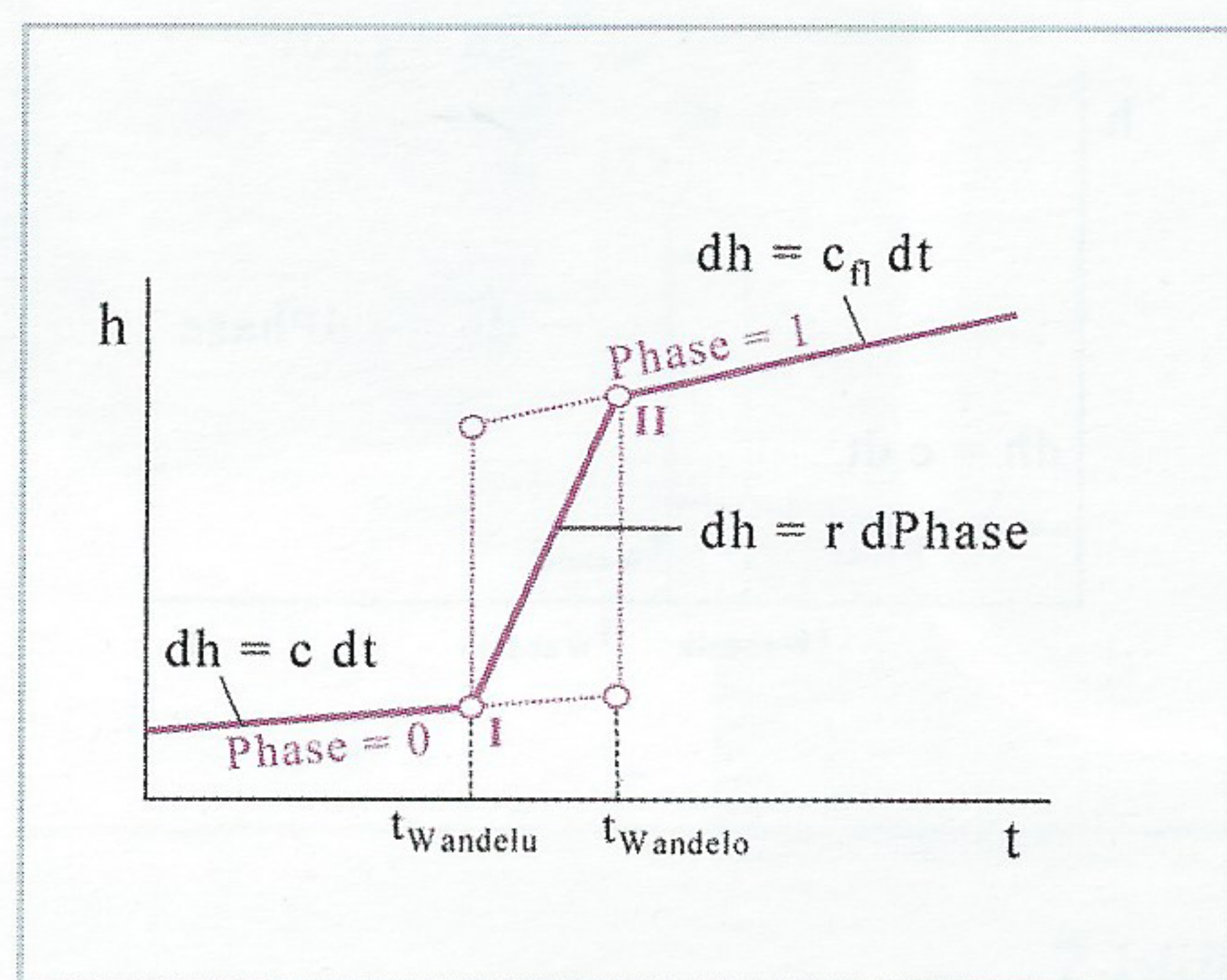


Bild 6

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

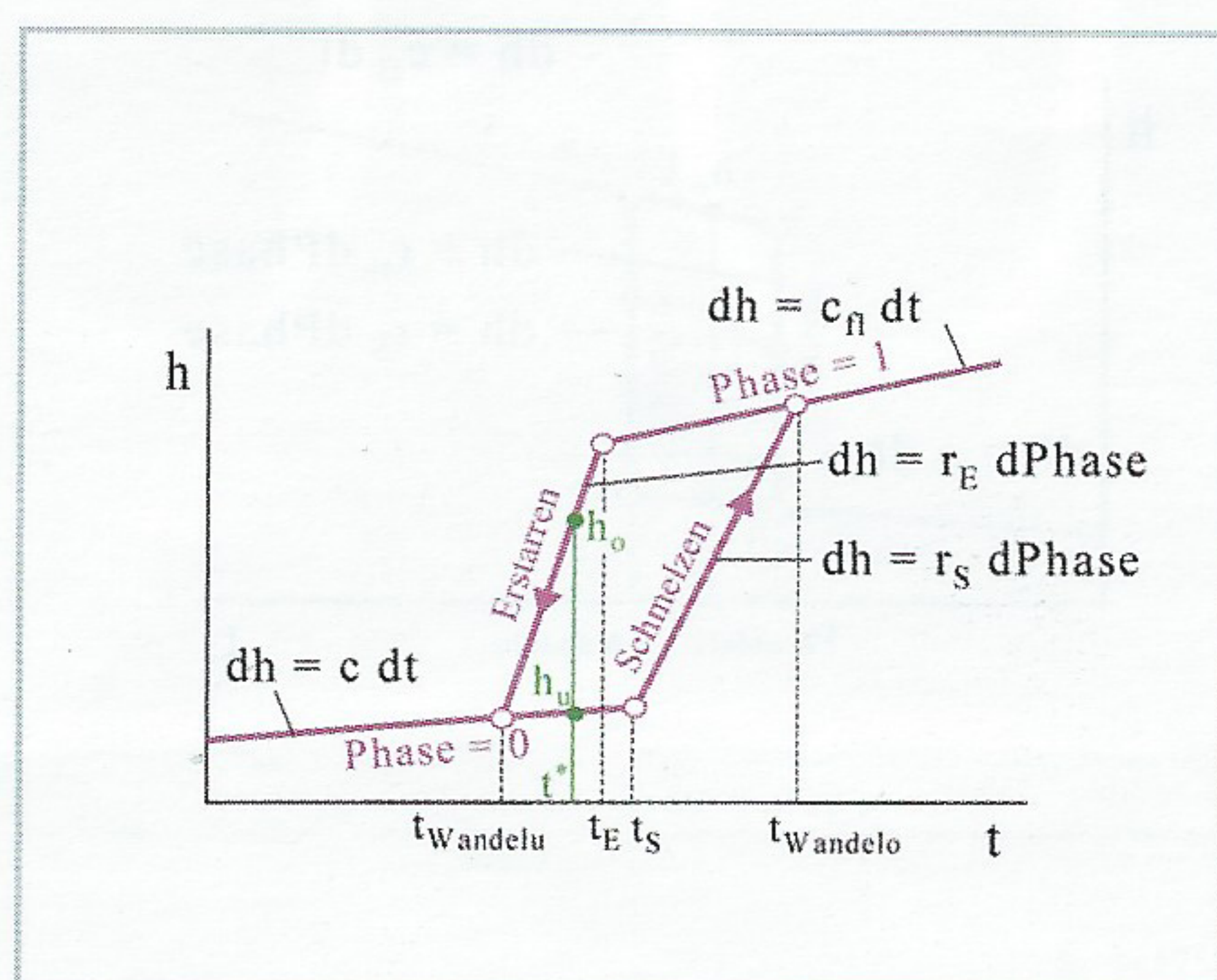


Bild 7

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

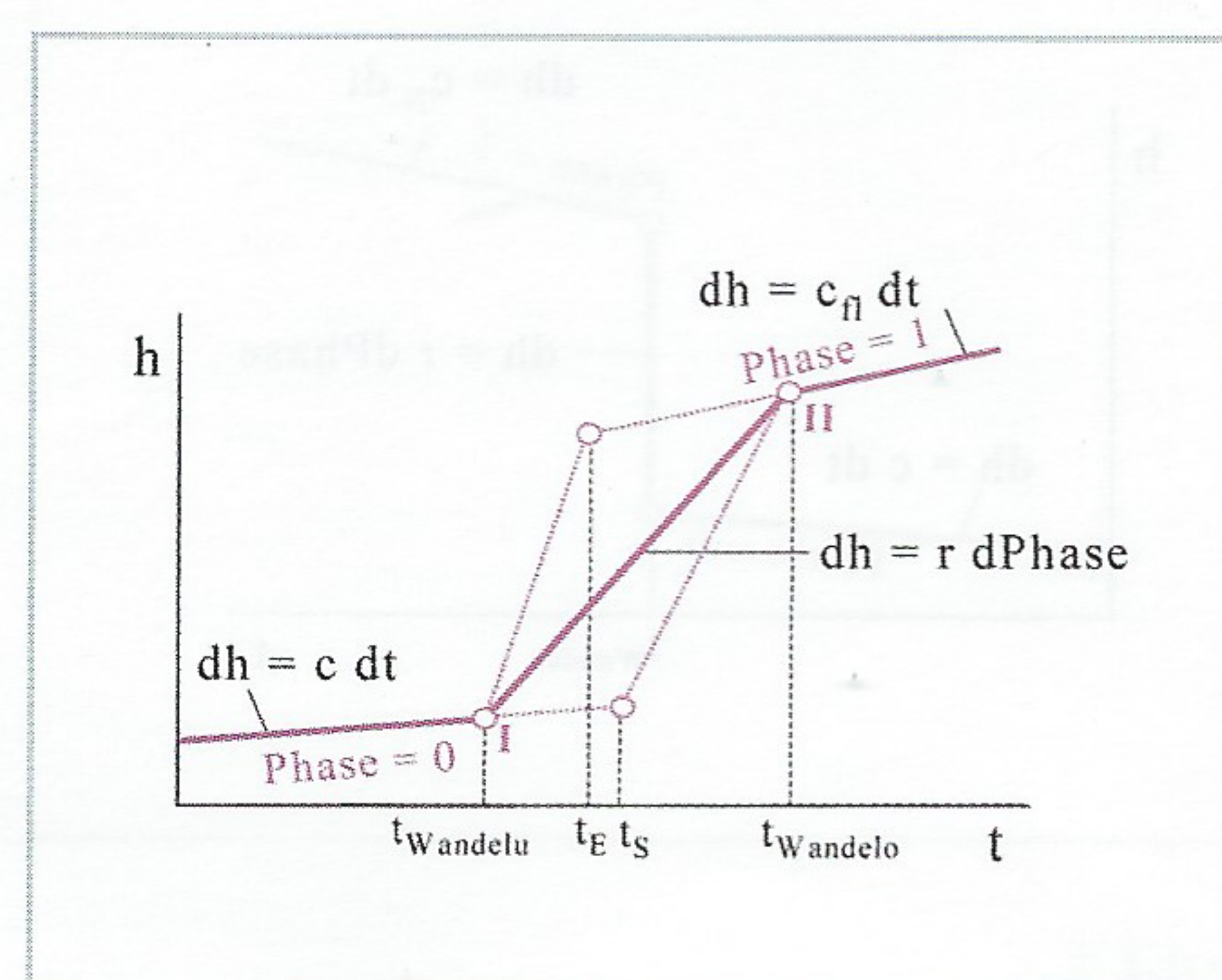


Bild 8

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

gangsbedingungen am Speicherkörper sowie die Wärmeleitvorgänge im Speichermaterial. Somit ist eine Vorausberechnung der real auftretenden Temperaturänderungsgeschwindigkeit in der Regel nicht möglich.

□ Als pragmatisch begründete Näherung wird im Weiteren der lineare Zustandsverlauf zwischen den Punkten I (t_{Wandelu} , Phase = 0) und II (t_{Wandelo} , Phase = 1) gemäß den Bildern 6 und 8 verwendet. Er bietet den Vorteil der eindeutigen Zuordnung $h(t)$.

Einheitliche Näherung für den Phasenwandel mit Hysterese

Es wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Schmelz- und Erstarrungstemperaturen existieren, sich der gesamte Prozessablauf aber innerhalb der Grenzen t_{Wandelu} sowie t_{Wandelo} vollzieht. Der Verlauf $h(t)$ nach Bild 11 stellt einen Ersatzprozess der realen Vielfalt dar. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass eine eindeutige Funktion zwischen der spezifischen Enthalpie h und der Materialtemperatur t besteht. Im Bereich $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$ sei weiterhin ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Temperatur t und dem geschmolzenen Materialanteil Phase gegeben. Somit gelten im Unterschied zum Idealprozess nach Gl. (5) die Beziehungen:

$$h = h(t);$$

$$\text{Phase} = \text{Phase}(t = t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}) \quad (9).$$

Mit der bekannten Definition für den Phasenzustand $\text{Phase}_{i,j,k}$ für das Volumelement an der Stelle i, j, k kann

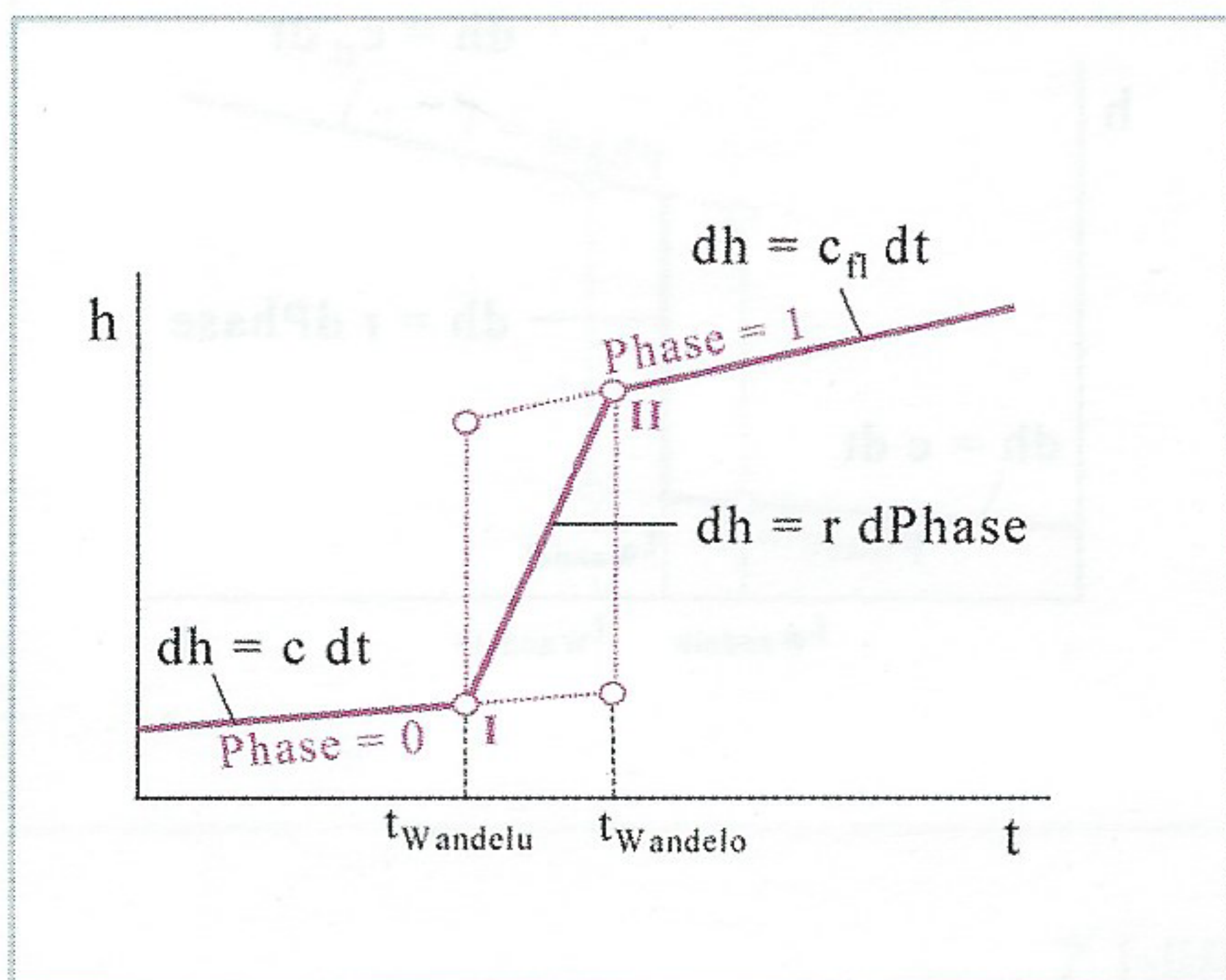


Bild 6

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

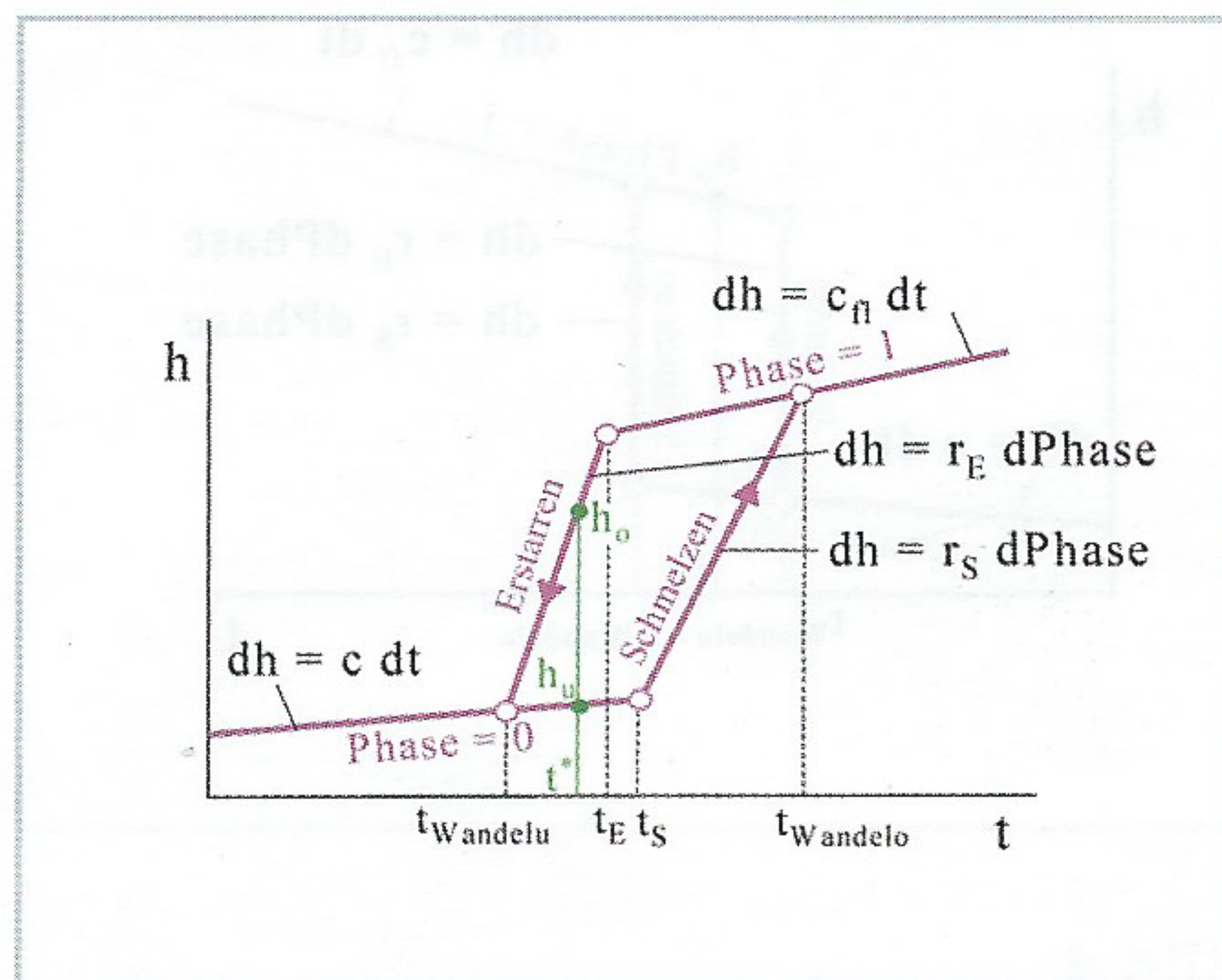


Bild 7

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

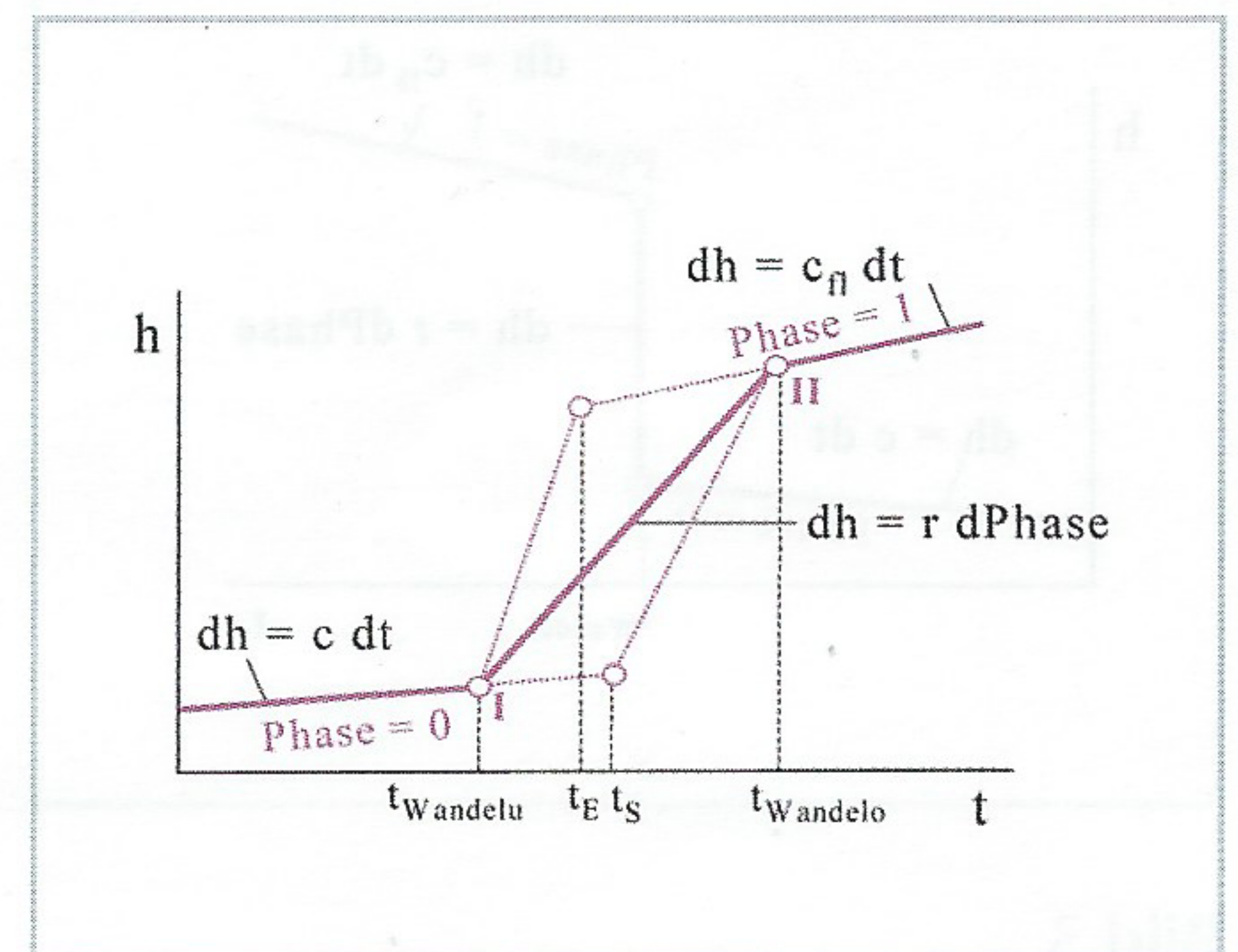


Bild 8

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

Hysterese Form B

Der Phasenwandel erfolgt bei gleichzeitiger Temperaturänderung (Bild 7). Zudem beginnt er jeweils bei unterschiedlichen Temperaturen:

- t_s Beginn des Schmelzens
- t_{Wandelo} Ende des Schmelzens
- t_E Beginn des Erstarrens
- t_{Wandelu} Ende des Erstarrens.

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

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

Stark vereinfachend würde sich analog zu Bild 6 ein linearer Ersatzverlauf für den Phasenwandel gemäß Bild 8 anbieten.

Diskussion zur Hysterese und ihrer vereinfachten Nachbildung

□ Das Hauptproblem besteht darin, dass die spezifische Enthalpie des Speichermaterials keine eindeutige Temperatur- oder Phasenfunktion mehr ist. Genau genommen stellt sie somit im Bereich zwischen Schmelzen und Erstarren keine reine Zustandsgröße dar, sondern ist eine von der Prozessführung – also eine vom Weg – abhängige Größe. Im Bereich $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$ können beispielsweise zur Temperatur t^* zwei Grenzspeicher-

zustände h_u und h_o gehören, wie die grünen Eintragungen in den Bildern 4 und 7 verdeutlichen.

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

□ Hinzu kommt, dass die realen Vorgänge in der Regel dadurch gekennzeichnet sind, dass oftmals keine definierten Eckpunkte der Zustandsverläufe existieren. Es ergeben sich beispielsweise Verläufe der spezifischen Enthalpie als Funktion der Temperatur, die dem Bild 9 qualitativ entsprechen.

gangsbedingungen am Speicherkörper sowie die Wärmeleitvorgänge im Speichermaterial. Somit ist eine Vorausberechnung der real auftretenden Temperaturänderungsgeschwindigkeit in der Regel nicht möglich.

□ Als pragmatisch begründete Näherung wird im Weiteren der lineare Zustandsverlauf zwischen den Punkten I (t_{Wandelu} , Phase = 0) und II (t_{Wandelo} , Phase = 1) gemäß den Bildern 6 und 8 verwendet. Er bietet den Vorteil der eindeutigen Zuordnung $h(t)$.

Einheitliche Näherung für den Phasenwandel mit Hysterese

Es wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Schmelz- und Erstarrungstemperaturen existieren, sich der gesamte Prozessablauf aber innerhalb der Grenzen t_{Wandelu} sowie t_{Wandelo} vollzieht. Der Verlauf $h(t)$ nach Bild 11 stellt einen Ersatzprozess der realen Vielfalt dar. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass eine eindeutige Funktion zwischen der spezifischen Enthalpie h und der Materialtemperatur t besteht. Im Bereich $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$ sei weiterhin ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Temperatur t und dem geschmolzenen Materialanteil Phase gegeben. Somit gelten im Unterschied zum Idealprozess nach Gl. (5) die Beziehungen:

$$h = h(t);$$

$$\text{Phase} = \text{Phase}(t = t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}) \quad (9).$$

Mit der bekannten Definition für den Phasenzustand $\text{Phase}_{i,j,k}$ für das Volumenelement an der Stelle i, j, k kann

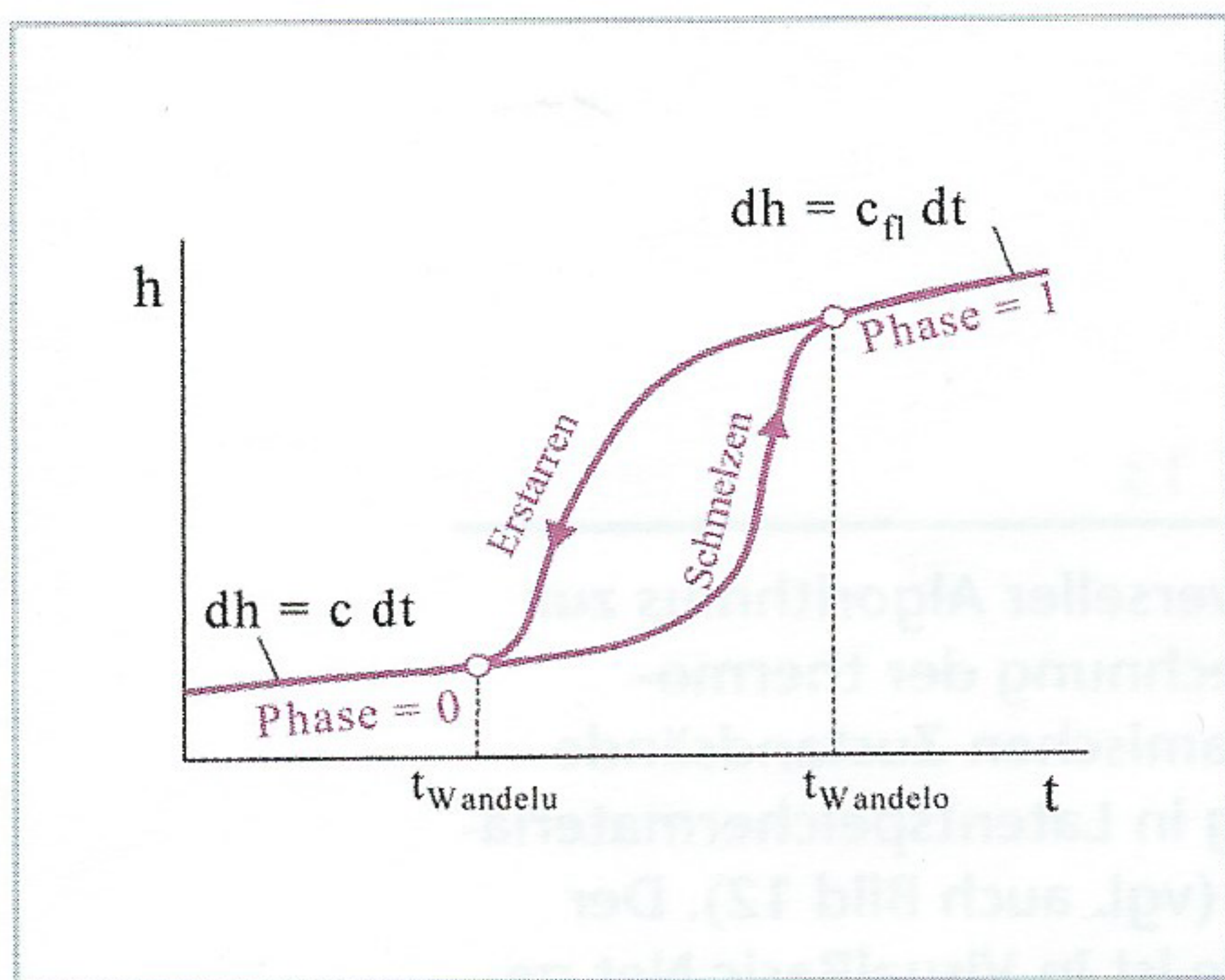


Bild 9

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

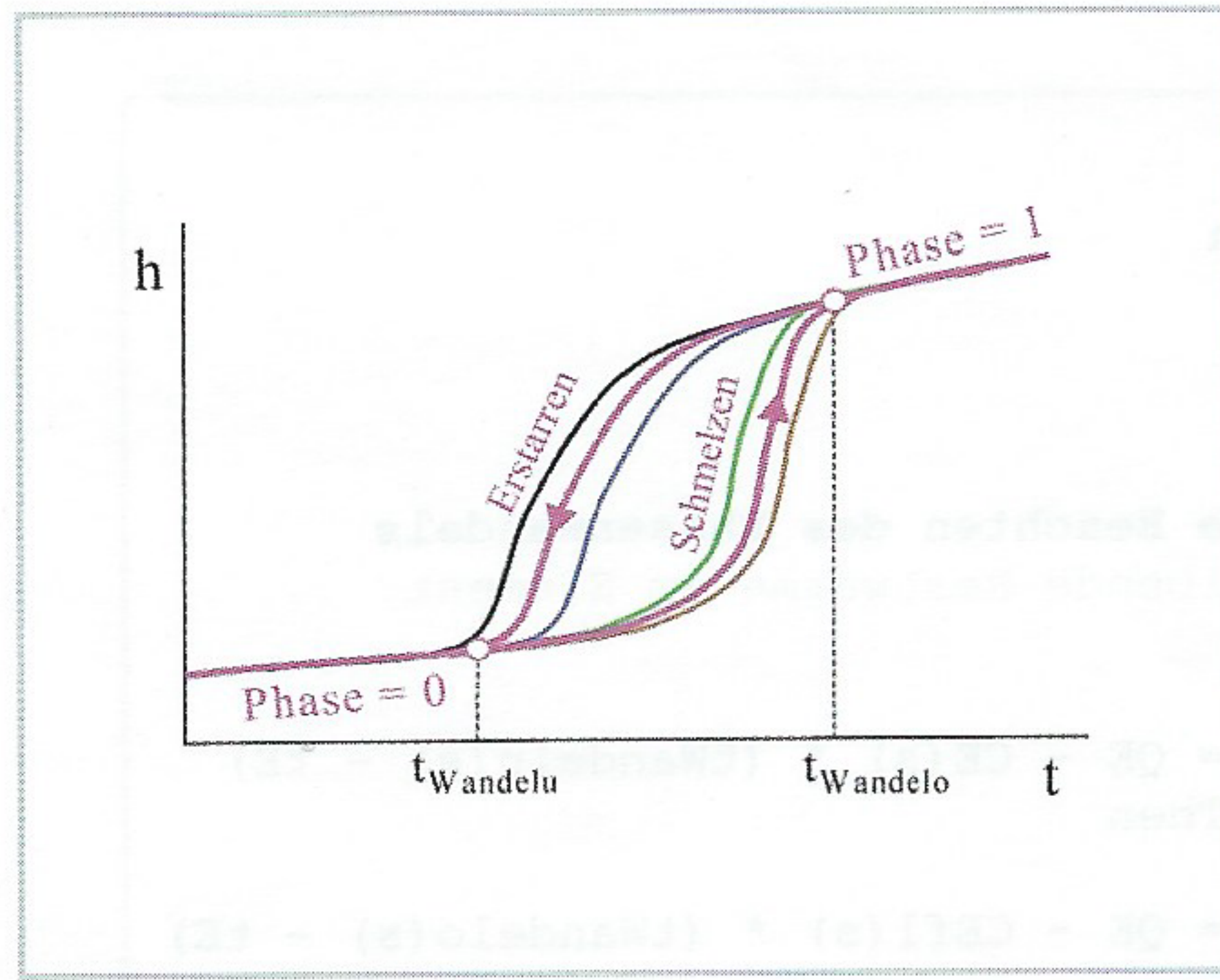


Bild 10

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

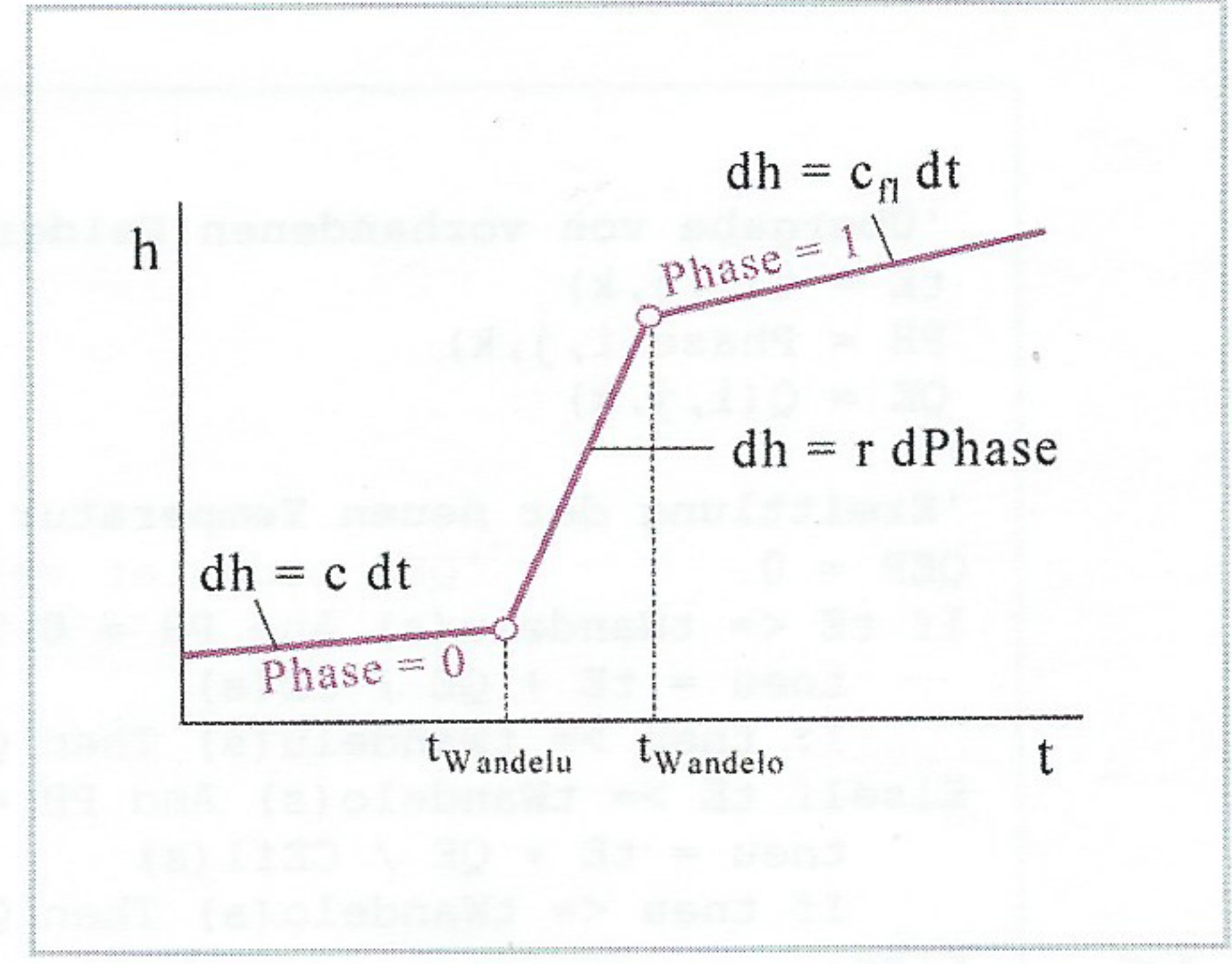


Bild 11

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

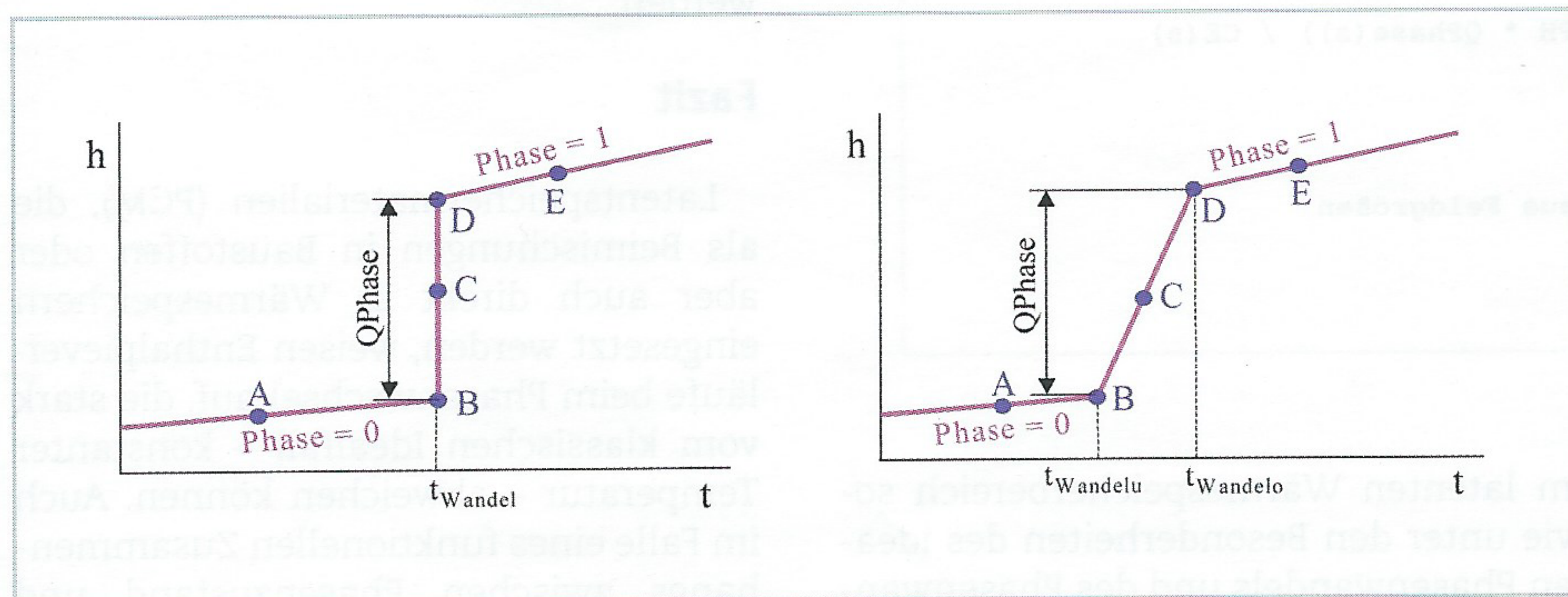


Bild 12

Links: Idealfall des Phasenwandels bei konstanter Temperatur $t_{\text{Wandel}} = t_{\text{Wandelu}} = t_{\text{Wandelo}}$. Rechts: Näherung für Phasenwandel mit veränderlicher Temperatur $t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}}$ (Hysterese). Der Algorithmus nach Bild 13 ist universell gestaltet, so dass alle Punkte A bis E Ausgangspunkte und gleichzeitig auch Endpunkte der Zustandsänderung sein können. Für die einem Volumelement V zugeführte Wärme Q kann gelten: $Q > 0$, $Q = 0$, $Q < 0$ sowie $|Q| = 0 \dots > Q_{\text{Phase}}$

dann die Zuordnung der Temperatur $t_{i,j,k}$ hergestellt werden:

$$t_{i,j,k} = t_{\text{Wandelu}} + \text{Phase}_{i,j,k} (t_{\text{Wandelo}} - t_{\text{Wandelu}}) \quad \text{für } t_{i,j,k} = t_{\text{Wandelu}} \dots t_{\text{Wandelo}} \quad (10)$$

Der im Bild 11 dargestellte, aus drei Abschnitten bestehende temperaturabhängige Verlauf der spezifischen Enthalpie

$h(t)$ könnte nach einem einheitlichen thermodynamischen Berechnungsverfahren behandelt werden, indem lediglich unterschiedliche spezifische Wärmekapazitäten Berücksichtigung fänden. Davon wird jedoch abgesehen, um weiterhin eine Analogie zum Idealfall des Phasenwandels zu wahren und um in allen Schritten des Algorithmus auch

den Phasenwandelzustand $\text{Phase}_{i,j,k}$ zu dokumentieren. Damit behält auch die Phasenumwandlungswärme bezogen auf die Elementmasse Q_{Phase} nach Gl. (2) ihre Gültigkeit.

Hinweis: Es sei in diesem Zusammenhang angemerkt, dass als Ergebnis der experimentellen Befunde häufig die spezifische Wärmekapazität c_{PCM} des La-

Gussasphalt

einschichtig 40 mm
ohne
Rohrbefestigung!

Komfort Deckenheizung/kühlung

cufix®

ökonom

wärme gedämmte
Heiz- und Kühlplatte
20 % weniger Heizkosten

cufix Werk · 59821 Arnsberg · Hammerweide · www.cufix.de · Tel. 0 29 31 / 5 30 04 - 0 · Fax 5 30 04 - 44


```

'Übergabe von vorhandenen Feldgrößen
tE = t(i,j,k)
PH = Phase(i,j,k)
QE = Q(i,j,k)

'Ermittlung der neuen Temperatur ohne Beachten des Phasenwandels
QER = 0 'QER bedeutet verbleibende Restwärme im Element
If tE <= tWandelu(s) And PH = 0 Then
    tneu = tE + QE / CE(s)
    If tneu >= tWandelu(s) Then QER = QE - CE(s) * (tWandelu(s) - tE)
ElseIf tE >= tWandelo(s) And PH = 1 Then
    tneu = tE + QE / CEfl(s)
    If tneu <= tWandelo(s) Then QER = QE - CEfl(s) * (tWandelo(s) - tE)
Else
    QER = QE
End If

'Phasenwandel im Idealfall oder mit Hysterese
If PH < 1 And QER > 0 Then
    'Aufheizfall
    If QER < (1 - PH) * QPhase(s) Then
        PH = PH + QER / QPhase(s)
        tneu = tWandelu(s) + PH * (tWandelo(s) - tWandelu(s))
    Else
        tneu = tWandelo(s) + (QER - (1 - PH) * QPhase(s)) / CEfl(s)
        PH = 1
    End If
ElseIf PH > 0 And QER < 0 Then
    'Abkühlfall
    If Math.Abs(QER) < PH * QPhase(s) Then
        PH = PH + QER / QPhase(s)
        tneu = tWandelu(s) + PH * (tWandelo(s) - tWandelu(s))
    Else
        tneu = tWandelu(s) + (QER + PH * QPhase(s)) / CE(s)
        PH = 0
    End If
End If

'Rückgabe der ermittelten Werte als neue Feldgrößen
tn(i,j,k) = tneu
Phasen(i,j,k) = PH

```

Bild 13

Universeller Algorithmus zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsänderung in Latentspeichermaterialien (vgl. auch Bild 12). Der Code ist in VisualBasic.Net geschrieben

nung (d.h. im „Rechenkern“) durch einfache Variable ersetzt, beispielsweise gilt $PH = Phase(i, j, k)$ usw., die am Schluss wieder entsprechend zurückgegeben werden.

Fazit

Latentspeichermaterialien (PCM), die als Beimischungen in Baustoffen oder aber auch direkt in Wärmespeichern eingesetzt werden, weisen Enthalpieverläufe beim Phasenwechsel auf, die stark vom klassischen Idealfall – konstanter Temperatur – abweichen können. Auch im Falle eines funktionellen Zusammenhangs zwischen Phasenzustand und Stofftemperatur besteht häufig keine Eindeutigkeit. Es nimmt beispielsweise die Richtung des wärmetechnischen Vorganges „Schmelzen“ oder „Erstarren“ auf $h = h(t)$ Einfluss, so dass eine Hysterese vorhanden ist. Schließlich kann die Temperaturänderungsgeschwindigkeit im Material noch bedeutungsvoll sein. Die Vielfalt der realen Gegebenheiten und die Tatsache, dass an verschiedenen Speicherorten und zu unterschiedlichen Zeiten auch Teilent- und Teilbeladungen auftreten, führten zu einem Näherungsmodell. Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass in einem Phasenwechselbereich $t_{Wandelu} \dots t_{Wandelo}$ stets ein definierter Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Phasenzustand besteht. Der Algorithmus ist allgemeingültig gestaltet, so dass auch der Idealfall des Phasenwandels bei einer konstanten Temperatur t_{Wandel} integriert ist. Der vorgestellte Programmbaustein hat sich bei der Simulation von praktischen Speichervorgängen in komplexen, vom Autor des Beitrages erstellten Rechenprogrammen bewährt.

tentspeichermaterials einschließlich des Phasenwandelsbereiches als Temperaturfunktion dargestellt wird. Führt man dieses Ergebnis in die numerische Berechnung ein, können mitunter relativ große Fehler entstehen. Demgegenüber stellt die Phasenwandelenthalpie r quasi eine „summarische Ergebnisgröße“ dar, deren Anteile $r \cdot Phase$ stets auf die „Summengröße“ bezieht.

Einheitlicher Algorithmus zur Ermittlung der Temperatur- und Phasenänderung

Zur rechnerischen Verfolgung der Temperaturänderung im sensiblen und

im latenten Wärmespeicherbereich sowie unter den Besonderheiten des idealen Phasenwandels und des Phasenwandels mit Hysterese ist der nachfolgende Rechenablauf entwickelt worden. Er berücksichtigt die Zustandsänderungen, die von allen real möglichen Punkten A, B, C, D, E (Bild 12) ausgehen und deren Wärmeeintrag in das Volumenelement i, j, k positiv oder negativ ist ($Q > 0, Q = 0, Q < 0$). Weiterhin finden unterschiedliche Größen des Wärmeeintrags Beachtung: $|Q| = 0 \dots > Q_{Phase}$. Damit ist es selbstverständlich auch möglich, den kompletten Phasenwandel von „fest“ bis „flüssig“ oder umgekehrt zu verfolgen. Die Berechnung beginnt stets mit einer Untersuchung der sensiblen Wärmespeicherung bis zum eventuellen Beginn des Phasenwandels. Die verbleibende Restwärme im Element steuert dann den weiteren Rechengang.

Der in Bild 13 dargestellte Berechnungsablauf berücksichtigt die Tatsache, dass der Speicherkörper aus mehreren PCM-Speicherschichten s bestehen kann.

Zur Verringerung der Zugriffszeiten sind verschiedene mit i, j, k indizierte Größen während der speziellen Berech-

Literatur

- [1] Glück, B.: Thermisch-energetischer Gebrauchswert von Wohnbauten. HLH Bd.56 (2005) Nr. 12, S. 38–41 (Teil 1); Bd. 57 (2006) Nr. 1, S. 63–70 (Teil 2), Nr. 2, S. 84–90 (Teil 3)
- [2] Schmitz, H. (Delft): Aussagen zum thermischen Verhalten von PCMs (Mitteilung im persönlichen Gespräch), Oktober 2005