

# Eine Analyse zum Einfluß von Phasenumwandlungen in einer feuchtegeschädigten Wand bei einem Brand

Dr.-Ing. R. Cerny, Dr. rer. nat. J. Toman, Dr. sc. techn. et. Dr. rer. nat. H. Venzmer

## Vorwort

Durchfeuchtungsschäden an Bauteilen nach Schadenfeuern stellen die Schadenregulierer der Gebäudeversicherung häufig vor die Frage der Kausalität der Bauteilschädigung. Zweifellos tritt während und nach einem Schadenfeuer einerseits durch die Löscharbeiten der Feuerwehren und andererseits auch durch unter Umständen unvermeidbare, schadenbedingte Unzulänglichkeiten der witterungsschützenden Bausubstanz eine mehr oder weniger umfangreiche Durchfeuchtung auf. Diese zu beseitigen ist Aufgabe der Sachversicherung. Die sich dabei ergebende Notwendigkeit, den Grad der Durchfeuchtung sachgerecht festzustellen und objektiv zu messen, löste dabei häufig Diskussionen zwischen den Vertragsparteien über die Kausalität und gleichwohl auch über die notwendigen Sanierungsschritte aus.

Mit der Anwendung dieser im folgenden Beitrag einer „Analyse zum Einfluß von Phasenumwandlungen in einer feuchtegeschädigten Wand bei einem Brand“ ausführlich dargestellten Rechenmethode unter Verwendung des Verdunstungskoeffizienten  $\Psi$ , der den Einfluß der Verdunstung auf den Wärme- und Feuchtetransport bei höheren Temperaturen ausdrückt und in jedem Fall objektiv meßbar macht, scheint den Sachverständigen ein Prüfverfahren offenzuliegen, das dazu beitragen kann, die manchmal gezwungenermaßen tolerierte „Unschärfe“ des Regulierungsergebnisses zu mildern, wenn nicht ganz zu beseitigen.

Die Redaktion

## 1. Einleitung

Bei der Untersuchung des Brandeinflusses auf Baukonstruktionen hat die Bestimmung des Temperatur- und des Feuchtefeldes eine grundlegende Bedeutung. Die Felder werden einerseits von den Differenzen der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeiten zwischen den beiden Räumen und andererseits von den Materialparametern beeinflusst.

Die Materialparameter sind aber temperatur- und feuchteabhängig. Die äußeren und inneren Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten hängen im allgemeinen Fall von der Zeit ab, weshalb die Behandlung des Problems relativ kompliziert ist.

Für die numerische Berechnung des Temperatur- und des Feuchtefeldes ist es zweckmäßig, die mathematische Modellierung nach drei Schwerpunkten zu betrachten:

- Berechnung des Temperaturfeldes für solche Bereiche, deren Materialien kein Wasser aufnehmen.
- Berechnung des Temperatur- und des Feuchtefeldes für solche Bereiche, in denen die Temperaturen im Intervall von 0 bis 100 °C liegen, in denen also keine Phasenumwandlungen vorkommen.
- Berechnung des Temperatur- und des Feuchtefeldes für erweiterte Temperaturbereiche, in denen also Phasenumwandlungen möglich sind.

Gewöhnlich muß für den Brandfall der Schwerpunkt (c) herangezogen werden. Denn in den meisten Fällen sind

Bauwerke aus kapillarporösen Baustoffen errichtet und die Temperaturen übersteigen im Brandfall mehr als deutlich die 100 °C-Grenze.

Auch bei kleineren Feuchtegehalten beeinflusst die relativ große Verdunstungswärme des Wassers die Wärmebilanz der Konstruktion nachhaltig. Dabei handelt es sich um einen für die Konstruktion günstigen Einfluß, weil die Wasserverdunstung den Fortgang des Brandes verlangsamt. D. h., die Feuerwiderstandsfähigkeit erhöht sich.

Die Verwendung des komplizierten Modells zur mathematischen Modellierung ist einerseits aufwendiger, bringt aber andererseits auch Vorteile mit sich. Die Bauphysiker streben danach, die Ergebnisse solcher Modellrechnungen in die Normung, also in die technischen Vorschriften, mit einzubeziehen.

Mit mathematischen Modellen der Transporterscheinungen im Baumaterial bei höheren Temperaturen beschäftigt sich die Bauforschung seit längerer Zeit. Eine der größten Schwierigkeiten liegt bei diesen Modellen in der Tatsache begründet, daß es in der Konstruktion zur Phasenumwandlung des Wassers in Wasserdampf kommt. Darum ist es nötig, die Anteile des flüssigen Wassers und des Wasserdampfes bei dem Feuchtetransport zu bestimmen.

Erste Modelle setzen voraus, daß bei der Temperatur von 100 °C die gesamte Feuchte aus der Konstruktion verdunstet und bei höheren Temperaturen nur das trockene Material zu beachten ist.

Eine qualitative Verbesserung brachte das Grundmodell von Lykov [2], an dem das Problem der Phasenumwandlungen durch die Einführung eines

Koeffizienten  $\varepsilon$  für die Phasenumwandlung Wasser-Dampf für die Berechnung des Temperatur- und Feuchtefeldes in der Konstruktion gelöst wurde.

Dieses Modell verwandte dann viele Jahre die sogenannte „Lykovsche Schule“ (siehe z. B. [4]). Es wird in verschiedenen Varianten noch heute verwendet.

Das Lykovsche Modell war auch Grundlage für Forschungsarbeiten im Gebiet des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransportes in Baumaterialien, womit sich die Autoren in den vergangenen Jahren befaßten (so z. B. [1], [5]).

Die bekannteste Form des Lykovschen Modells ist eindimensional wie folgt auszudrücken

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{a_{m2}}{1-\varepsilon} \nabla^2 u + \frac{a_{m2} \cdot \delta_2}{1-\varepsilon} \nabla^2 T \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \varepsilon \cdot \frac{r_{21}}{c} \frac{a_{m2}}{1-\varepsilon} \nabla^2 u + (a + \varepsilon \cdot \frac{r_{21}}{c} \frac{a_{m2} \cdot \delta_2}{1-\varepsilon}) \nabla^2 T \quad (2)$$

mit  $u$  ... Feuchtesatz in M-%  
 $T$  ... Temperatur  
 $t$  ... Zeit

$a_{m2}$  ... Diffusionskoeffizient des Wassers

$\delta_2$  ... relativer Thermodiffusionskoeffizient von Wasser

$a$  ... Temperaturleitfähigkeit

$r_{21}$  ... Verdunstungswärme des Wassers

$c$  ... spezifische Wärme des Systems

$\varepsilon$  ... Koeffizient für die Phasenumwandlung Wasser - Dampf, definiert durch

$$\varepsilon = \frac{d_i u}{du} \quad (3)$$

$d_i u$  ... Änderung der Feuchte infolge Verdunstung  
 $du$  ... Gesamtänderung der Feuchte

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k$$

Das Modell (1)-(2) ermöglicht die Berechnung des Temperatur- und des Feuchtefeldes in der Konstruktion in Abhängigkeit von Zeit und Ort unter der Voraussetzung, daß die Materialparameter  $\alpha m_2, r_{21}, c, a, \varepsilon, \delta_2$  bekannt sind.

Der Koeffizient  $\varepsilon$  ersetzt den Diffusionskoeffizienten und den relativen Thermoeffusionskoeffizienten des Wasserdampfes. Der weitere Teil dieser Arbeit befaßt sich nun vor allem mit diesem Lykovschen Koeffizienten  $\varepsilon$  und mit seiner Anwendbarkeit in mathematischen Modellen des Wärme-, Wasser- und Wasserdampftransports in der Wand und mit den Möglichkeiten seiner experimentellen Bestimmung.

## 2. Experimentelle Bestimmung des Koeffizienten $\varepsilon$

Schon erste Betrachtungen über die Möglichkeiten der Messung des Koeffizienten  $\varepsilon$  zeigen, daß es problematisch sein wird. Der Koeffizient hängt von der Temperatur und der Feuchte ab und seine experimentelle Bestimmung direkt aus der Beziehung (3) ist von seinem Wesen her unmöglich, da es im Experiment sehr schwierig ist, mittels der Messung innerhalb der Konstruktion das Wasser im flüssigen und dampfförmigen Zustand zu unterscheiden.

Die Analyse der Messungsmöglichkeiten des Koeffizienten  $\varepsilon$  mittels indirekter Methoden zeigte, daß die Messung der Wasserabnahme bei der Trocknung der Probe in Abhängigkeit von der Temperatur und der Zeit am aussichtsreichsten ist, wobei der Transport des Wassers im flüssigen Zustand ausgeschlossen wird.

### 2.1. Untersuchung der Trocknungsfunktionen

Für praktische Messungen wurden Proben aus Zementmörtel mit den Ausmaßen von 100 x 100 x 10 mm verwendet. Die Verdunstung war nur über die Stirnseiten von 100 x 100 mm möglich, die

anderen Wände wurden wasser- und dampfdicht ausgebildet.

Die Proben wurden nach 28 Tagen des Erhärtens unter normalen klimatischen Bedingungen mit Wasser auf verschiedene Anfangsfeuchten gesättigt. Angestrebt wurde eine konstante Feuchte im ganzen Volumen des Probekörpers.

Die Messung des Trocknungsverlaufes erfolgte im Temperaturbereich von 110 °C bis 600 °C in einem thermostatisierten Trocknungs-Ofen. Je Temperaturstufe wurden minimal 4-5 Proben mit gleicher Anfangsfeuchte untersucht, um die Reproduzierbarkeit der Messung zu verbessern. Nach der Austrocknung der Proben mußten die Massen des Porenskeletts gemessen werden, um die Feuchte in Abhängigkeit von der Zeit bei jeder gewählten Temperaturstufe berechnen zu können.

Die Beispiele der Abhängigkeit der Feuchte von Temperatur und Zeit bei der Trocknung sind in den Bildern 1-3 dargestellt. Als Anfangsfeuchten der Proben wurden dabei gewählt:

- maximale Feuchten durch Unterwasserlagerung bei Normalluftdruck (Bild 1)
- absorbierte Feuchten bei den relativen Luftfeuchten von 100 % (Bild 2) und 60 % (Bild 3).

In allen Bildern sind die Anfangsfeuchten bei höheren Temperaturen (350 °C bzw. 600 °C) fast immer größer als bei niederen Temperaturen, obwohl die Proben unter gleichen Bedingungen hergestellt und befeuchtet wurden. Die Ursache dieser Differenz ist im Freisetzen des kristallinegebundenen Wassers und in Gefügeveränderungen bzw. -zerstörungen während der Trocknung zu sehen.

### 2.2. Berechnung von $\varepsilon$ aus Experimenten

Für die Bestimmung des Koeffizienten  $\varepsilon$  aus der Beziehung (3) braucht man einerseits die gemessenen Kurven  $u_i(T, t)$ , andererseits aber auch die Kurven  $u_e(x, t)$  und  $T_e(x, t)$ , ermittelt in einer konkreten Wand unter der Bedingung, daß der Feuchtetransport nur in der Form des Transports des flüssigen Wassers durchläuft.

Die Beziehung (3) in der Differenzschreibweise dargestellt, lautet

$$\varepsilon(u, T) = \frac{\Delta u_i(u, T)}{\Delta u_i(u, T) + \Delta u_e(u, T)} \quad (4)$$

mit  $\Delta u_i$  ... Änderung der Feuchte infolge der Phasenumwandlung in den Wasserdampf  
 $\Delta u_e$  ... Änderung der Feuchte infolge des Wassertransports.

Darin sind also die Größen  $\Delta u_i$  und  $\Delta u_e$  zu bestimmen. Das Verfahren zu ihrer Bestimmung läuft wie folgt ab:

Erstens werden für den Ort  $x = x_0$  für die gewählte Zeit  $t = t_0$  aus den Kurven  $u_e(x, t), T_e(x, t)$  die Werte  $u_x = u_e(x_0, t_0)$  und  $T_x = T_e(x_0, t_0)$  ermittelt.

Zweitens ergibt sich danach aus den Kurven  $u_i(T, t)$  über  $\frac{\partial u_i}{\partial t}(u_x, T_x)$  aus der ersten Näherung über die Eulersche Interpolation

$$\Delta u_i(u_x, T_x) = \frac{\partial u_i}{\partial t}(u_x, T_x) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Drittens läßt sich die Menge des flüssigen Wassers, das während der Zeit  $\Delta t$  vom Ort  $x = x_0$  wegtransportiert wird, wie folgt bestimmen

$$m_c = j \cdot \Delta t \cdot A \quad (6)$$

mit  $j$  ... Feuchtestromdichte

$A$  ... Stirnfläche (senkrecht zum Vektor  $\nabla u$ ).

Die Feuchtestromdichte  $j_e$  berechnet sich nun wie folgt

$$j = -\zeta_s \cdot (a_{m_2} \cdot \Delta u + a_{m_2} \cdot \zeta_2 \cdot \Delta T) \quad (7)$$

mit  $\zeta_s$  ... Dichte des Porenskeletts.

Die Informationen von  $\nabla u, \nabla T$  im Punkt  $[u_x, T_x]$  kommen aus den Kurven  $u_e(x, t)$  und  $T_e(x, t)$ .

Die Änderung des flüssigen Feuchteanteils  $\Delta u_e$  läßt sich über die nachfolgende Beziehung angeben

$$\Delta u_e = \frac{\Delta m_v}{m_s} = \frac{j \cdot \Delta t \cdot A}{V \cdot \zeta_s} \quad (8)$$

Wenn man jetzt das Volumen des Elements durch die Beziehung

$$V = A \cdot b \quad (9)$$

mit  $b$  ... Dicke der Probe (für praktische Berechnungen eignet sich am besten  $b = b_i$ )

$b_i$  ... Dicke der Probe bei der Messung der Verdunstung

ausdrückt und die Beziehungen (6), (7) und (9) in (8) einsetzt, folgt

$$u_e = -(a_{m_2} \cdot \nabla u + a_{m_2} \cdot \delta_2 \cdot \nabla T) \cdot \frac{\Delta t}{b} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{-b \cdot \frac{\partial u_i}{\partial t}}{b \frac{\partial u_i}{\partial t} - a_{m_2} \cdot \nabla u - a_{m_2} \cdot \delta_2 \cdot \nabla T} \quad (11)$$

### 2.3. Diskussion

Bei der Analyse der Beziehung (11) zur Berechnung des Koeffizienten  $\varepsilon$  sind einige problematische Punkte zu finden. Die Dicke der Probe sollte möglichst ge-

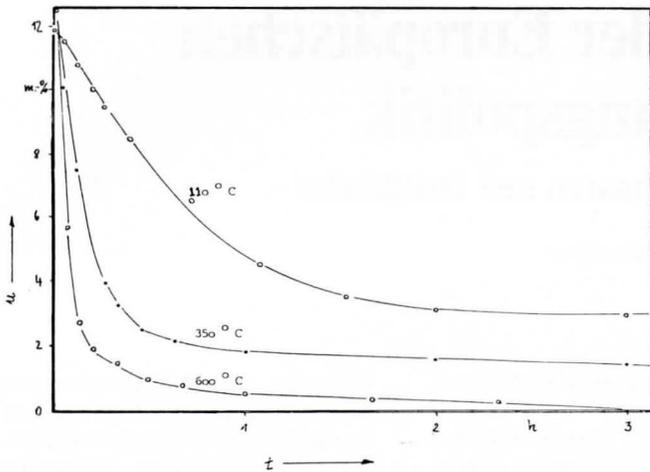


Bild 1: Abhängigkeit der Feuchtigkeit von Zementmörtelproben (100 mm x 100 mm x 10 mm) von Temperatur und Zeit. Anfangsfeuchtigkeit zwischen 12 und 14 Masseprozent, hergestellt durch Unterwasserlagerung.

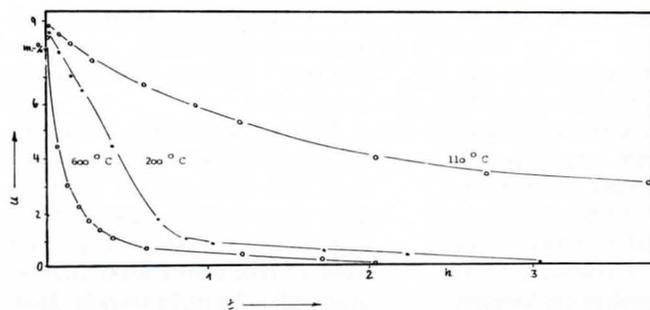


Bild 2: Abhängigkeit der Feuchtigkeit von Zementmörtelproben (100 mm x 100 mm x 10 mm) von Temperatur und Zeit. Anfangsfeuchtigkeit zwischen 8 und 9 Masseprozent, hergestellt durch Feuchteabsorption bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 Prozent.

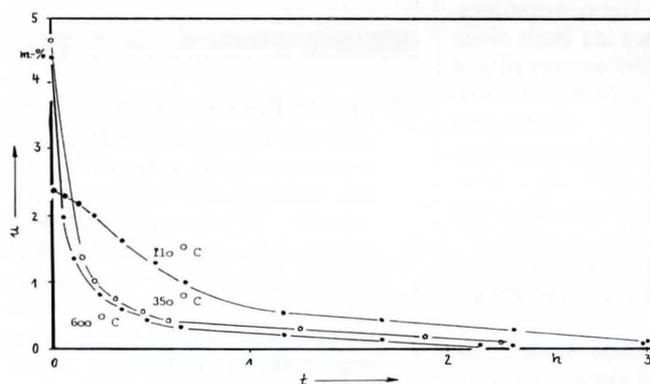


Bild 3: Abhängigkeit der Feuchtigkeit von Zementmörtelproben (100 mm x 100 mm x 10 mm) von Temperatur und Zeit. Anfangsfeuchtigkeit zwischen 4 und 4,5 Masseprozent, hergestellt durch Feuchteabsorption bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 Prozent.

ring sein, damit es in der Probe möglich ist, den Transport des flüssigen Wassers mit der hinreichenden Genauigkeit zu vernachlässigen. Diese Anforderung bringt aber praktische Probleme bei der Probenerzeugung mit sich. Es ist also nötig, diese zwei Anforderungen möglichst gut untereinander zu verbinden.

Ein weiteres Problem stellt die Notwendigkeit der Berechnung der Feuchtestromdichte  $j$  dar. Die Koeffizienten  $a_{m2}$  und  $\delta_2$  müssen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte bekannt sein. Die Funktionen  $a_{m2}(u, T)$  und  $\delta_2(u, T)$  wurden aber bisher für die meisten Baumaterialien noch nicht gemessen.

Das wichtigste Problem ist aber die Abhängigkeit des Koeffizienten  $\varepsilon$  von  $\nabla u$  und  $\nabla T$ . Diese Ausdrücke sind eigentlich von den Randbedingungen für die gewählte Wand abhängig. Besonders diese Tatsache begrenzt nun deutlich die Möglichkeiten, den Koeffizienten  $\varepsilon$  als eine objektiv meßbare Größe, als mathematisches Modell des Wärme-, Wasser-

und Wasserdampftransportes in der Wand heranzuziehen. Der Koeffizient  $\varepsilon$  ist nur für den Bereich anzuwenden, für den die Anfangs- und Randbedingungen gelten.

### 3. Schlußfolgerungen

Die Analyse der Möglichkeiten des von Lykov eingeführten Koeffizienten  $\varepsilon$  zeigte, daß dieser Koeffizient keine objektiv meßbare physikalische Größe und seine Anwendung in den Transportgleichungen des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransportes problematisch ist.

Experimentelle Ergebnisse zeigen aber, daß es möglich wäre, eine andere Größe einzuführen, die auch den Einfluß der Verdunstung auf den Wärme- und Feuchtetransport bei höheren Temperaturen ausdrückt und objektiv meßbar wäre.

Diese Größe ist der Verdunstungskoeffizient  $\Psi$ , der wie folgt definiert ist [5].

$$\Psi(u, T) = \frac{\partial u_i(T, t)}{\partial t} \quad (12)$$

mit  $u_i(T, t)$ ... System der Entfeuchtungskurven aus dem Punkt 2.1.

Dieser Koeffizient könnte den Diffusionskoeffizienten und den relativen Thermodiffusionskoeffizienten des Wasserdampfes besser entsprechen als der Koeffizient  $\varepsilon$ .

### 4. Literatur:

- [1] Cerny, R.: Feuchte und Wärmetransport bei dem Brand. Ein Modell mit der beweglichen Grenze. (tsch.) Stavebnicky casopis 37 (1989), 89-99
- [2] Lykov, A. V.: Teplo- i massoobmen v processach suski. Gosenergoizdat, Moskau 1956
- [3] Lykov, A. V., Michajlov, J. A.: Teoria teplo- i massopernosa. Gosenergoizdat, Moskau-Leningrad, 1963
- [4] Lykov, A. V., Smolskij, B. M. (eds.): Teplo i massopereenos. Gosenergoizdat, Moskau-Leningrad, 1963
- [5] Toman, J., Kutman, O., Cerny, R., Svec, J.: Die Lösung des Temperatur- und Feuchtefeldes bei der Brandbeanspruchung der Baukonstruktion (tsch.). Forschungsbericht VUPS, Prag 1987

Dr.-Ing. R. Cerny, TU Prag,  
HS-Dozent Dr.rer.nat. J. Toman, TU Prag,  
HS-Dozent Dr.sc.techn. et. Dr.rer.nat.  
H. Venzmar, TH Wismar



Erinnern Sie sich noch an FUNKI?  
(Siehe letzte Seite).