

**Prüfverfahren zur Bestimmung der  
äquivalenten Schichtdicke von  
Wärmedämmmaterialien in Feuerstätten**

**T 2919**

**T 2919**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-2919

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>



Amtlich anerkannte Prüfstelle für die Zulassung neuer Baustoffe,  
Bauteile und Bauarten · Forschung, Entwicklung, Prüfung,  
Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Institutsleitung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.  
Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult.  
Karl Gertis

**GB 148/1999**

**„Prüfverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke von Wärme-  
dämmmaterialien in Feuerstätten“ - Abschlußbericht**

Untersuchungen durchgeführt im Auftrag  
des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt, Berlin

Dieser Bericht umfaßt:

25 Seiten Text

1 Tabelle

10 Bilder

Stuttgart, den 29. November 1999

Sp/Wi

Bearbeiter:

Dr.-Ing. J. Sprung  
Dipl.-Ing. (FH) A. Zegowitz

Abteilungsleiter:

Dipl.-Phys. N. König

Institutsleiter:

Prof. Dr. Dr. h.c. mult.  
Dr. E.h. mult. K. Gertis

**IBP-Bericht GB 148/1999**

**Prüfverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke von  
Wärmedämmmaterialien in Feuerstätten  
Abschlußbericht**

von

Joachim Sprung, Andreas Zegowitz

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

(Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Dr. E. h. mult. Karl Gertis)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Verwendete Formelzeichen und Indizes	5
1. Aufgabenstellung	6
2. Problemanalyse	7
3. Verfahrenskonzept	7
4. Messungen von Betriebszeiten an ausgeführten Anlagen	8
5. Definition der zeitlichen und örtlichen Randbedingungen	11
6. Mathematisch-physikalische Lösung des Wärmetransportes in einem Brandschutzsystem einer Feuerstätte	12
6.1 Instationäre analytische Lösung	12
6.2 Instationäre numerische Lösung	13
7. Bedingungen zur Entwicklung des Berechnungsverfahrens	14
7.1 Bestimmung der thermischen Belastung des Wärmedämmsystems	15
7.2 Berücksichtigung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	16
7.3 Wärmedurchlaßwiderstand der Aufstellwand	16
7.4 Algorithmen für das Berechnungsverfahren	17
8. Berechnungsablauf und Ergebnisdarstellung	19
9. Validierung des Verfahrens	20
9.1 Sensitivitätsanalyse	20
9.2 Unsicherheit des Gesamtergebnisses	22
10. Empfehlungen zur Umsetzung des Berechnungsverfahrens	22
11. Zusammenfassung	23
12. Literaturverzeichnis	24

## Verwendete Formelzeichen und Indizes

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	– Konstante	-
a	– Temperaturleitfähigkeit	$\text{m}^2/\text{s}$
B	– Konstante	-
c	– spezifische Wärmekapazität	$\text{Ws}/\text{kgK}$
C	– Konstante	-
d	– Schichtdicke	m
D	– Konstante	-
E	– Konstante	-
f	– Funktion	-
F	– Konstante	-
G	– Konstante	-
H	– Konstante	-
$\dot{q}$	– Wärmestromdichte	$\text{W}/\text{m}^2$
R	– Wärmedurchlaßwiderstand	$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
t	– Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
x	– kartesische Koordinate	m
$\alpha$	– Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$\delta$	– Differenz	-
$\lambda$	– Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/\text{mK}$
	– Belastungsgrad	-
$\mu$	– Eigenwert	-
$\rho$	– Dichte	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\tau$	– Zeit	s

## Indizes

a	– außen
i	– innen
n	– natürliche Zahl
m	– gemittelt
OF	– Oberfläche
VM	– Vormauerung
W	– Wand
WD	– Wärmedämmung

## 1. Aufgabenstellung

Bisher wurden vorwiegend mineralische Faserdämmstoffe als Wärmedämmungen von häuslichen Feuerstätten gegenüber zu schützenden Baukonstruktionen (Wand, Decke, Boden) eingesetzt. Die für den Brandschutz erforderlichen Dämmschichtdicken wurden entweder für genormte Produkte, wie dem Kamineinsatz nach DIN 18 895 [1], durch die Typprüfung meßtechnisch oder im Bereich des Kachelofenbaus empirisch nach den Regeln des Kachelofen- und Luftheizungsbauerhandwerks [2] festgelegt. Zu den bekannten Mineralfaserprodukten kommen in jüngster Zeit andere mineralische Produkte, die sowohl die Eigenschaft der bisherigen Wärmedämmung als auch die Eigenschaften der Vormauerung mit Wärmedämmung aufweisen sollen. Für den Einsatz dieser Substitutionswärmedämmstoffe ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich. Eine der Zulassungskriterien ist die Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke für diese Substitutionswärmedämmstoffe auf der Vergleichsbasis der Mineralfaserprodukte.

Bezüglich der Verwendung von Substitutionswärmedämmstoffen für den Bau von offenen Kaminen/Kamineinsätzen wurde vom DIBt in Zusammenarbeit mit dem IBP ein Prüfverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke entwickelt [3]. Dieses Verfahren ist aufwendig und über einen größeren Schichtdickenbereich nicht exakt. Für den Einsatz von Substitutionswärmedämmstoffen in anderen Feuerstätten gibt es keine Prüfverfahren.

Zielstellung dieser Arbeit soll es sein, über grundsätzliche Untersuchungen zur thermischen Belastung von Aufstellflächen durch die Feuerstätten ein mathematisch - physikalisches Modell zur äquivalenten Schichtdickenbestimmung zu entwickeln und letztlich nach einer Validierung der numerischen Ergebnisse diese für eine bauaufsichtliche Bestimmung in Form einer Richtlinienvorlage aufzubereiten.

## **2. Problemanalyse**

Im Zwischenbericht [4] wurden die für verschiedene Feuerstättenarten verwendbaren Wärmedämmsysteme analysiert sowie die thermodynamischen Einflüsse der Feuerstätten auf diese Systeme beschrieben. Desweiteren wurden zwei Konzeptionen für Prüfverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicken von Wärmedämmmaterialien für Feuerstätten vorgestellt.

In einer Arbeitsberatung beim DIBt [5] wurde vereinbart, daß ein EDV-gestütztes mathematisch-physikalisches Modell zur Berechnung äquivalenter Schichtdicken zu entwickeln ist. Die dafür erforderlichen Randbedingungen sind im Rahmen experimenteller Untersuchungen an Referenz-Feuerstätten zu bestimmen. Das zu analysierende allgemeine physikalische Modell wird in Bild 1 dargestellt. Von dem Feuerraum einer Einzelfeuerstätte geht ein zeitabhängiger Wärmestrom in Richtung der zu schützenden Wand aus. Um die Oberflächentemperatur der zu schützenden Wand aufgrund bauaufsichtlicher Vorschriften, z. B. [6], nicht über die darin festgelegte Grenztemperatur von 85 °C steigen zu lassen, wird in der Regel eine Wärmedämmung vor der zu schützenden Wand erforderlich. Bei Verwendung von Wärmedämmstoffen mit geringer Speicherfähigkeit ist der Einbau einer massiven Vormauerung vor der zu schützenden Wand möglich, um thermische Belastungsspitzen zu dämpfen. Bei Feuerstätten mit Konvektionsmantel liegt die Wärmedämmung in der Regel am Konvektionsmantel an.

## **3. Verfahrenskonzept**

Zur Beschreibung der thermodynamischen Vorgänge im System „Feuerstätte - Wärmedämmung - zu schützende Wand“ ist zunächst die Definition der zeitlichen und örtlichen Randbedingungen erforderlich. Mit Hilfe dieser Randbedingungen können die wärmetechnischen Berechnungen am System vorgenommen und die Mindestschichtdicke der Wärmedämmung ermittelt werden. Für die praktische Anwendung dieses Verfahrens wird eine Richtlinienvorlage erarbeitet.



#### 4. Messungen von Betriebszeiten an ausgeführten Anlagen

Wesentlich für die wärmetechnischen Berechnungen sind die Betriebszeiten der Feuerstätten, weil diese die zeitliche Randbedingung charakterisieren, d. h. die Frage nach der Notwendigkeit der stationären oder instationären Beschreibung des Systems beantwortet wird. Da die Problematik im wesentlichen in Verbindung mit Feuerstätten nach DIN 18 895 (offene Kamine / Kamineinsätze) und DIN 18 892 (Dauerbrand-Heizeinsätze) auftritt, soll ausschließlich auf diese beiden Feuerstättenarten eingegangen werden.

Offene Kamine / Kamineinsätze der Bauart A dürfen nur gelegentlich betrieben werden [7]. Kamineinsätze der Bauart A1, d. h. Geräte, die bestimmungsgemäß nur geschlossen betrieben werden dürfen, unterliegen nach [8] nicht mehr der Definition der Einschränkung auf den gelegentlichen Betrieb. Es ergibt sich die Frage, ob damit für die Bauart A und A1 unterschiedliche Wärmedämmsysteme zu realisieren wären oder ob man nicht generell von der Möglichkeit der Dauerbeheizung ausgeht. Bei der Bauart A würde aufgrund des „nur“ gelegentlichen Betriebes die zeitliche thermische Belastung auf die zu schützende Wand geringer ausfallen als bei der Bauart A1, weil bei letzterer auch davon ausgegangen werden muß, daß die Feuerstätte als Grundheizung für einen Raum bei entsprechenden Außentemperaturen auch über mehrere Tage (eventuell mit nächtlicher Unterbrechung) betrieben werden kann. Während der „gelegentliche“ Belastungsfall bei der Sicherheitsprüfung der Kamineinsätze nach DIN 18 895 berücksichtigt wird, findet die Möglichkeit einer quasikontinuierlichen Belastung bisher keine Beachtung. Mit Sicherheit ist eine quasikontinuierliche Belastung beim Betrieb von Dauerbrand-Heizeinsätzen zu erwarten. Um das Betriebsregime von diesen Feuerstätten zu analysieren, wurden in der Heizperiode 1997/1998 Messungen an zwei ausgeführten Anlagen vorgenommen.

In einem Fall handelt es sich um einen in einem Wohnraum installierten Dauerbrand-Heizeinsatz mit einer Nennwärmeleistung von 10 kW. Als Brennstoff kam Holz zum Einsatz. In diesem Wohnraum ist zusätzlich ein Heizkörper einer Warmwasser-Zentralheizung installiert, die aber nach Aussage des Betreibers nur bei extremen winterlichen Außentemperaturen in Funktion ist. Es ist davon auszugehen, daß aufgrund des milden Winters in der Heizperiode 1997/1998 die Warmwasser-Heizung nicht in Betrieb war. Die Anlage wurde mit Temperatur-

meßstellen am Dauerbrand-Heizeinsatz ausgerüstet, um die Betriebszeiten der Feuerstätte zu erfassen sowie die Aufnahme der Außen- und Raumtemperaturen. Die Meßwerte erfaßte ein Datalogger im 5 – Minutenrhythmus: Die Registrierung erfolgte nur, wenn der Führungskanal (Meßstelle am Dauerbrand-Heizeinsatz) der Meßwerterfassung Temperaturen  $\geq 50 \text{ }^\circ\text{C}$  signalisierte, d. h. die Feuerstätte tatsächlich in Betrieb war im Zeitraum vom 20.10.1997 bis 19.03.1998. Unterbrechungen gab es durch die Überspielung der Meßdaten auf den Auswerte-PC nach jeweils ca. 4 Wochen und während einer Abwesenheit des Betreibers (7 d) und der damit verbundenen Betriebsunterbrechung der Heizung. Sonst wurde täglich geheizt. Die zusammenhängende maximale Betriebszeit wurde bei einer mittleren Außentemperatur von  $+0,13 \text{ }^\circ\text{C}$  mit 21 h registriert (Bild 2). Während dieser Zeit erfolgten 3 Brennholzaufgaben. Der Belastungsgrad nach [9] als Quotient zwischen abgegebener Wärmeleistung und maximalem Wärmebedarf läßt sich unter den Bedingungen der Auslegungstemperaturen von  $-12 \text{ }^\circ\text{C}$  für die Außentemperatur (Stuttgart) und  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  für die Norminnentemperatur eines Wohnzimmers mit  $\lambda = 0,69$  bestimmen.

Weitere Messungen wurden an einem holzbeheizten Dauerbrand-Heizeinsatz vorgenommen, der einen Büroraum und ein Wohnzimmer beheizt. Im Gebäude ist zusätzlich eine Öl-Warmluft-Heizung installiert, die in Zeiten der Abwesenheit des Betreibers den Wärmebedarf deckt. Eine Temperaturmeßstelle am Rauchgasstutzen des Heizeinsatzes signalisierte dem Führungskanal des Dataloggers ebenfalls die Überschreitung der eingestellten Grenztemperatur von  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Weitere Temperaturmeßstellen befanden sich im Büroraum und im Freien. Die Messungen erfolgten im Zeitraum vom 19.11.1997 bis 04.05.1998 mit einer Unterbrechung vom 17.12.1997 bis 07.01.1998 wegen Abwesenheit des Betreibers. Die zusammenhängende maximale Betriebszeit beträgt bei einer mittleren Außentemperatur von  $-0,73 \text{ }^\circ\text{C}$  62 h (Bild 3). Der Belastungsgrad der Heizungsanlage während dieser Zeit läßt sich mit  $\lambda = 0,76$  berechnen. Es wurde 16 mal Brennstoff aufgelegt.

Aufgrund der relativ hohen Außentemperaturen während der Heizperiode 1997/1998 können diese Ergebnisse keinesfalls repräsentativ für die Beschreibung des Betriebsregimes für Dauerbrand-Heizeinsätze im Auslegungsfall sein. Qualitativ läßt sich jedoch mit diesen Ergebnissen eindeutig feststellen, daß Dauerbrand-Heizeinsätze bei entsprechenden Außentemperaturen über Zeit-

räume betrieben werden, die im System Wärmedämmung / Aufstellwand quasi-stationäre Verhältnisse erwarten lassen.

Diese Tatsache kann durch eine weitere Untersuchung belegt werden. Bei den bisherigen Prüfungen zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke von Wärmedämmmaterialien [3] wird ein 12-Stunden-Test an einer Referenzfeuerstätte unter Nennwärmeleistungsbedingungen durchgeführt. Der Brennstoff wird diskontinuierlich, d. h. im Abstand von 1,25 h in die Feuerstätte eingebracht und brennt dort jeweils bis auf die Grundglut ab. Es werden sowohl die Temperaturen der der Feuerstätte zugewandten Wärmedämмоberfläche als auch die Oberflächentemperaturen der zu schützenden Wand gemessen. Die sich aus einer Beheizungszeit bis zu 24 Stunden ergebende Temperatur an der Oberfläche der zu schützenden Wand läßt sich über eine instationäre Berechnung (Finite-Elemente) darstellen, wenn man für die innere Randbedingung über die 12 Stunden hinaus die meßtechnisch bestimmte Oberflächentemperaturen der Wärmedämmung als Indikator der thermischen Belastung des Systems wiederholend ansetzt. In Bild 4 ist diese Situation wiedergegeben: Sie zeigt, daß in diesem Beispiel beim rechnerischen Nachweis der Beharrungszustand für die Oberflächentemperatur der zu schützenden Wand nach 21 Stunden erreicht wird. Eine weitere Rechnung wurde für ein simuliertes Betriebsregime durchgeführt, bei dem die Feuerstätte 12 Stunden beheizt, 12 Stunden abkühlte und danach wieder beheizt wurde bis zu einem Gesamtbetrachtungszeitraum von 36 Stunden. Hierfür wird in Bild 5 deutlich, daß die Temperatur der zu schützenden Wandoberfläche nach 36 Stunden etwa wieder den Wert, wie nach anfänglich zwölfstündiger Beheizung erreicht.

In Abhängigkeit der konstruktiven Ausbildung der Feuerstätte kann der Zeitraum bis zur thermischen Beharrung mehr oder weniger lang sein. Die Untersuchungen zeigen, daß ohne weiteres der Beharrungszustand bei niedrigen Außentemperaturen und entsprechend intensiver Beheizung eintritt und daher für weitere Betrachtungen vom quasistationären Zustand ausgegangen werden muß.

## 5. Definition der zeitlichen und örtlichen Grenzbedingungen

Zur vollständigen mathematischen Beschreibung physikalischer Probleme, wie in diesem Falle Wärmetransportvorgänge, sind neben der Differentialgleichung der Wärmeleitung zur Lösung auch Angaben von Grenzbedingungen in hinreichender Zahl erforderlich. Für das in Bild 1 dargestellte Schema des Brandschutzsystems einer Feuerstätte in Verbindung mit einer zu schützenden Wand sind die Angaben zu zeitlichen Grenzbedingungen und den örtlichen Grenzbedingungen an den Rändern, d. h. an der zur Feuerstätte gerichteten Oberfläche der Wärmedämmung und an der Außenseite der zu schützenden Wand erforderlich.

Bei den folgenden Betrachtungen wird die Anfangsbedingung als Temperaturverteilung im System bei Beginn der Betrachtungen als ausgeglichen und damit nicht ortsabhängig angenommen. Anders verhält es sich mit den Grenzbedingungen an den Rändern (Randbedingungen). Während die äußere Randbedingung (an der äußeren Seite der zu schützenden Wand) als zeitlich konstant entsprechend dem Newtonschen Abkühlungsgesetz angenommen werden kann, müßte die innere Randbedingung durch den diskontinuierlichen Abbrand in einer Einzelfeuerstätte (Bild 6) exakt als zeitabhängig dargestellt werden.

Erschwerend bei der Definition der inneren Randbedingung wirkt sich zusätzlich die Tatsache aus, daß neben der Zeitabhängigkeit eine Ortsabhängigkeit existiert, weil der von der Feuerstätte abgegebene Wärmestrom über die Feuerstättengeometrie hinaus unterschiedlich ist, d. h. dreidimensional sein kann. Ein Beispiel eines solchen Temperaturfeldes wird in Bild 7 dargestellt.

Da in Bezug auf die maximale thermische Belastung auch nur die Stelle mit der höchsten Temperatur interessiert, wird dieser bei den Prüfungen ermittelte Punkt für die Seiten- und Rückwand explizit betrachtet. Es geht nur die Stelle, an der die höchste Temperatur gemessen wurde, in die Berechnung ein und somit kann ein eindimensionales Modell verwendet werden. Dazu muß ergänzend erläutert werden, daß es sich exakt um eine maximale mittlere Oberflächentemperatur handelt, weil die Oberflächentemperatur bei diskontinuierlicher Beheizung der Feuerstätte immer schwingt. Auch hier muß von einem quasistationären Verhalten ausgegangen werden.

## 6. Mathematisch - physikalische Lösung des Wärmetransportes in einem Brandschutzsystem einer Feuerstätte

Die mathematisch - physikalische Lösung eines Wärmeleitproblems kann auf analytische oder numerische Weise erfolgen. Im vorliegenden Fall handelt es sich ausschließlich um Wärmeleitung. Es sollen Vor- und Nachteile verschiedener Lösungsansätze untersucht werden.

### 6.1 Instationäre analytische Lösung

Die Wärmeleitvorgänge im betrachteten Brandschutzsystem werden mathematisch durch die Lösung der Fourierschen Differentialgleichung für das eindimensionale Temperaturfeld ohne innere Wärmequelle zeitabhängig beschrieben:

$$\frac{\delta t}{\delta \tau} = a \cdot \frac{\delta^2 t}{\delta x^2}$$

mit

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Zur Lösung der Gleichung werden die Randbedingungen aus Abschnitt 5 definiert und zwar für die der Feuerstätte zugewandten Oberfläche mit

$$t = t_{OF, WD} = f(\tau)$$

(Randbedingung erster Art, zeitabhängig) und für die der Feuerstätte abgewandten Oberfläche der zu schützenden Wand mit

$$\dot{q} = \alpha \cdot (t_{OF, W, a} - t_a)$$

(Randbedingung dritter Art, Newtonsches Abkühlungsgesetz).

Die Lösung kann mit Hilfe der Laplace-Transformation [9] nach der Theorie der aus zwei Schichtdicken unterschiedlicher Stoffparameter zusammengesetzten Platte mit asymmetrischen Randbedingungen vorgenommen werden. Auf die ein-

zelenen Schritte soll hier nicht weiter eingegangen werden. Berücksichtigt werden muß allerdings, daß bei Laplace-Transformationen die temperaturabhängige Darstellung der Wärmeleitfähigkeit nicht möglich ist.

Die Lösung lautet für die Temperatur an der Oberfläche der zu schützenden Wand mit einer entsprechenden Ermittlung der Eigenwerte:

$$t_{\text{OF}, W, i} = \frac{t_{\text{OF}, \text{WD}} + t_{\text{OF}, W, a} \cdot \frac{R_{\text{WD}}}{R_{\text{W}}}}{1 + \frac{R_{\text{WD}}}{R_{\text{W}}}} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cdot$$

$$\frac{t_{\text{OF}, W, a} \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{d_{\text{WD}}}{d_{\text{W}}} \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{W}}}{a_{\text{WD}}}}\right) - t_{\text{OF}, \text{WD}} \cdot \cos \mu_n}{\mu_n \cdot \sin\left(\mu_n \cdot \frac{d_{\text{WD}}}{d_{\text{W}}} \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{W}}}{a_{\text{WD}}}}\right) \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{d_{\text{WD}}}{d_{\text{W}}} \cdot \sqrt{\frac{a_{\text{W}}}{a_{\text{WD}}}}\right) - \mu_n \cdot \frac{d_{\text{WD}}}{d_{\text{W}}} \cdot \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n}$$

$$\cdot \sin\left(\mu_n \cdot \frac{d_{\text{WD}}}{d_{\text{W}}}\right) \cdot \sin(\mu_n) \cdot e^{-\mu_n^2 a_{\text{W}} \tau / d_{\text{W}}^2}$$

## 6.2 Instationäre numerische Lösung

Zur numerischen Behandlung der instationären Wärmeleitung gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Wegen der übersichtlichen Ableitung und einfachen Darstellung in einem Rechenprogramm wird nachfolgend das Finite-Elemente-Verfahren am Beispiel des IBP-Programms „INSTWF“ [10] dargestellt. Das Programm bietet den Vorteil der Verwendbarkeit einer temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Schichtenmaterials.

Mit dem Programm „INSTWF“ wurden eine Reihe von Fallbeispielen berechnet, indem die in Verbindung mit Feuerstätten meßtechnisch ermittelten zeitabhängigen Oberflächentemperaturen der Wärmedämmung als zeitabhängige Randbedingung 1. Art verwendet wurden. Zielstellung war, die sich mit dieser Randbedingung einstellende Temperatur an der zu schützenden Wand zu berechnen und mit meßtechnisch ermittelten zu vergleichen. Wie aus dem Beispiel in Bild 8

ersichtlich ist, existiert eine gute Übereinstimmung zwischen den Rechenwerten und den gemessenen Temperaturen.

Die Berechnung ermöglicht es auch, über den simulierten fortlaufenden Betrieb der Feuerstätte durch sich wiederholende Oberflächentemperaturschwingungen an der Wärmedämmungsoberfläche die Zeit bis zur Temperaturbeharrung an der Oberfläche der zu schützenden Wand zu bestimmen (z. B. Bild 4). Auch läßt sich durch simulierten diskontinuierlichen Heizbetrieb das Temperaturmaximum bei der entsprechenden Betriebsweise darstellen (z. B. Bild 5).

Auch die hier wiedergegebenen Untersuchungsfälle zeigen, daß eine Temperaturbeharrung in relativ kurzer Zeit möglich ist, so daß die sehr aufwendige instationäre Betrachtungsweise auf eine für das Handwerk praktikablere stationäre Berechnung reduziert werden kann. Diese Vereinfachung bringt darüber hinaus eine erhöhte Sicherheit bei der Auslegung der Brandschutzsysteme mit sich.

## **7. Bedingungen zur Entwicklung des Berechnungsverfahrens**

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Betrachtungen soll ein Prüf- oder Berechnungsverfahren zur Bestimmung der erforderlichen Schichtdicke in Brandschutzsystemen in Verbindung mit Feuerstätten abgeleitet werden. Während auf die bisherigen stofflichen Prüfungen der Wärmedämmmaterialien zur Bestimmung

- der Rohdichte,
- der Kaltdruckfestigkeit,
- der Wärmeleitfähigkeit bis 700 °C,
- der Nichtbrennbarkeit,
- der Temperaturwechselbeständigkeit

und der Erfüllung der Kleberanforderung, nämlich einen dem Dämmmaterial adäquaten Ausdehnungskoeffizienten, nicht verzichtet werden kann, soll die erforderliche Dämmschichtdicke über ein Berechnungsverfahren ermittelt werden können. Damit werden Produktanforderungen und Anwendungs- bzw. Installati-

onsanforderungen getrennt. Das Berechnungsverfahren stützt sich bezüglich der erforderlichen Stoffwerte auf die oben genannten Prüfungen und deren Ergebnisse. Desweiteren soll es die jeweilige Baustellensituation hinsichtlich der thermischen Beschaffenheit der Aufstellwände berücksichtigen. Bisherige Installationsanforderungen [1, 2] beachten die tatsächlichen Wärmedurchlaßwiderstände der Aufstell- oder Anstellflächen überhaupt nicht. Vielmehr wird in ihnen prinzipiell von fiktiven Werten z. B. in der DIN 18 895 von  $R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$  (entspricht einer 10 cm dicken Mineralfaserplatte) ausgegangen. Aus der Praxis ist aber bekannt, daß der Wärmedurchlaßwiderstand bei Niedrigenergiehäusern auch höher sein kann und dadurch ein Gefahrenpotential bei der Verwendung von brennbaren Bauteilen wie z. B. Holzständern im Wandsystem existiert. Für diese Fälle reicht die unter den Bedingungen  $R = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$  ermittelte Wärmedämmschichtdicke nicht aus. Andererseits sind die Wärmedurchlaßwiderstände der überwiegenden Anzahl von Aufstellwänden unter  $2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ , so daß bei einer Dimensionierung nach [1] oder [2] in der Regel eine Überbemessung der Wärmedämmung erfolgt.

Hieraus resultiert sowohl ein höherer und nicht begründeter Mehrverbrauch an Material aber auch eine Vergrößerung des Platzbedarfs für die Feuerstätte. Beides spiegelt sich in erhöhten Baukosten wieder.

Aus den vorangegangenen Darstellungen geht hervor, daß Einzelfeuerstätten durchaus im quasistationären Betrieb arbeiten können. Aus diesen Gründen sollen die Berechnungen ebenfalls ausschließlich den stationären Fall berücksichtigen.

### **7.1 Bestimmung der thermischen Belastung des Wärmedämmsystems**

Die Quantifizierung der von der Feuerstätte ausgehenden thermischen Belastung wird bei der Feuerstättenprüfung vorgenommen. Dazu wird die Oberflächentemperatur der Wärmedämmung bei mindestens zwei unterschiedlichen Wärmedämmschichtdicken gemessen und deren numerische Größe in Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes des Gesamtaufbaus dargestellt [11].

Die Feuerstätte wird dabei unter den Bedingungen der Sicherheitsprüfung betrieben. Die großen Unterschiede der thermischen Belastungen des Dämmsy-



stems in Abhängigkeit der Konstruktionen der Feuerstätten, ohne daß eine Zuordnung z. B. zur Nennwärmeleistung möglich wird, erlauben leider auch keine pauschale Zuordnungen zu Feuerstättenarten oder einzelnen Wärmeleistungen. Vielmehr muß mit Hilfe bei der Prüfung meßtechnisch ermittelter gerätespezifischer Oberflächentemperaturen der Wärmedämmung in Abhängigkeit der zugehörigen Wärmedurchlaßwiderstände eine Regressionskurve für die Oberflächentemperatur nach der Beziehung

$$t_{\text{OFWD}} = A + BR + CR^2 + DR^3$$

ermittelt werden. Damit lassen sich maximale Oberflächentemperaturen des Wärmedämmsystems durch die thermische Belastung der Feuerstätte für die unterschiedlichsten Wärmedurchlaßwiderstände und damit auch für die unterschiedlichsten Wärmedämmsysteme einschließlich des Wärmedurchlaßwiderstandes der entsprechenden Aufstellwand berechnen. Um so mehr Stützstellen für die Regressionskurve herangezogen werden können, desto genauer kann das Berechnungsergebnis werden.

## **7.2 Berücksichtigung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung**

Für die Bemessung eines beliebigen Wärmedämmsystems ist die Kenntnis der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der zu verwendenden Wärmedämmung erforderlich, weil der Temperaturgradient in der Wärmedämmung erheblich ist. Auch hierfür wird ein Polynom der Form

$$\lambda_{\text{WD}} = E + Ft + Gt^2 + Ht^3$$

verwendet, das sich aus den bei der Baustoffprüfung ermittelten temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ableiten läßt.

## **7.3 Wärmedurchlaßwiderstand der Aufstellwand**

Die Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes der tatsächlich auf der Baustelle vorliegenden Aufstellwand bereitet in der Regel keine Schwierigkeiten, wenn es sich um einen Neubau handelt und damit die planungstechnischen

Unterlagen die notwendigen Angaben beinhalten. Schwieriger wird es im Altbaubereich für den Fall, daß keine Unterlagen vorhanden sind. Eine Auflistung üblicher Wandaufbauten mit den entsprechenden Wärmedurchlaßwiderständen hilft hier weiter (Tabelle 1). Als Bezugswert gilt ein bei 10 °C ermittelter Wert. Eine temperaturabhängige Darstellung der Wärmeleitfähigkeit erübrigt sich, weil die Temperaturen unter 85 °C liegen müssen und damit kein erheblicher Einfluß auf das System zu verzeichnen ist. Berücksichtigt werden soll auch die Art der Aufstellwand, nämlich ob es sich um eine Innen- oder Außenwand handelt. Der Unterschied zwischen beiden geht über die Größe des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten ein.

Ist ein Wärmedämmsystem an einer Außenwand zu bemessen, so wird bezüglich der Außentemperatur ein Wert von 20 °C angenommen. Diese Voraussetzung gibt auch genügend Sicherheit für den sommerlichen Beheizungsfall (offener Kamin), bei dem mehr visuelle anstatt heizungstechnische Aufgaben erfüllt werden. Bei Innenwänden werden ebenfalls 20 °C für den gegenüberliegenden Raum angenommen.

#### 7.4 Algorithmen für das Berechnungsverfahren

Für die Beschreibung der stationären eindimensionalen Wärmeleitung im System Wärmedämmung / Aufstellwand soll eine analytische Lösung verwendet werden. Grundlage bildet das Fouriersche Erfahrungsgesetz der Wärmeleitung

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\delta t}{\delta x},$$

das sich unter Einbeziehung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit beschreibenden Polynoms aus Abschnitt 7.2 in die Form

$$\dot{q} = - (E + Ft + Gt^2 + Ht^3) \cdot \frac{\delta t}{\delta x}$$

bringen läßt.

Das Ordnen der Variablen ergibt

$$\dot{q}\delta x = -E\delta t - F t\delta t - G t^2\delta t - H t^3\delta t.$$

Die Integration in den Grenzen  $(x_n; t_n)$  und  $(x; t)$  liefert mit

$$\dot{q} \int_{x_n}^x \delta x = -E \int_{t_n}^t \delta t - F \int_{t_n}^t t \delta t - G \int_{t_n}^t t^2 \delta t - H \int_{t_n}^t t^3 \delta t$$

$$\dot{q} \cdot (x - x_n) = -E \cdot (t - t_n) - \frac{F}{2} \cdot (t^2 - t_n^2) - \frac{G}{3} \cdot (t^3 - t_n^3) - \frac{H}{4} \cdot (t^4 - t_n^4).$$

Die Auflösung der Gleichung vierten Grades ergibt nach Einsetzen der stoffspezifischen Koeffizienten die nicht lineare Funktion für den Temperaturverlauf in der Schicht

$$t = f(x).$$

Der spezifische Wärmestrom bestimmt sich zu

$$\dot{q} = \lambda_{m, n} \frac{\delta t_n}{d_n}$$

mit  $\lambda_{m, n}$  - mittlere Wärmeleitfähigkeit der Schicht,

$\frac{\delta t_n}{d_n}$  - Temperaturgradient

und der Maßgabe, daß bei mehrschaligen Wänden im vorausgesetzten stationären Fall der Wärmestrom in jeder parallelen Schicht gleich groß ist. Im vorliegenden Fall ist von einer mehrschaligen Wand (Wärmedämmung, eventuell Vormauerung VM und Aufstellwand W) auszugehen.

An der der Feuerstätte zugewandten Oberfläche der Wärmedämmung wird die Temperatur aufgrund der Meßergebnisse aus den Prüfungen mit unterschiedlichem Wärmedurchlaßwiderstand vorgegeben. Damit liegt auf dieser Seite eine Randbedingung 1. Art vor, während an der gegenüberliegenden Oberfläche

durch Berücksichtigung des Wärmeübergangs eine Randbedingung 3. Art (Newtonsches Abkühlungsgesetz) vorliegt.

Zielstellung ist es, bei Einhaltung der Grenztemperatur von 85 °C ( $t_{OF,W,i}$ ) an der Oberfläche der zu schützenden Wand bei vorgegebenen thermodynamischen Parametern die erforderliche Schichtdicke für die vorgesehene Wärmedämmung zu ermitteln. Dazu muß das Gleichungssystem (a) oder (b) letzteres bei Berücksichtigung der wärmedurchlaßwiderstandsabhängigen Oberflächentemperatur der Wärmedämmung und der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung iterativ gelöst werden:

$$\frac{(t_{OF, WD} - t_{OF, W, i})}{\frac{d_{erf}}{\lambda_m} + \frac{d_{VM}}{\lambda_{VM}}} = \frac{(t_{OF, W, i} - t_a)}{\frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (a),$$

$$\frac{[(A + BR + CR^2 + DR^3) - t_{OF, W, i}]}{\frac{d_{erf}}{(E + Et_{WD, m} + Gt_{WD, m}^2 + Ht_{WD, m}^3)} + \frac{d_{VM}}{\lambda_{VM}}} = \frac{(t_{OF, W, i} - t_a)}{\frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{1}{t_a}} \quad (b).$$

Die Iteration benutzt einen mittleren Wärmeleitfähigkeitswert für die Wärmedämmung durch Berücksichtigung der sich ergebenden mittleren Temperatur der Wärmedämmung, die das arithmetische Mittel aus den beiden Oberflächentemperaturen darstellt.

## 8. Berechnungsablauf und Ergebnisdarstellung

Die Beschreibung der Eingaben und der Ergebnisdarstellung wird anhand der Bildschirmoberfläche (Bild 9) vorgenommen. Es erfolgt die Eingabe einiger statistischer Termini und der Konstanten für die wärmedurchlaßwiderstandsabhängige Innenoberflächentemperatur der Wärmedämmung. Letztere sind gerätespezifisch vorgegeben. Desweiteren werden die wärmedämmstoffspezifischen Konstanten, die die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit charakterisieren, eingegeben. Soll eine Vormauerung vorgesehen werden, so müssen von dieser ebenfalls die Wärmeleitfähigkeit als konstanter Wert und die vorgesehene Schichtdicke eingegeben werden. Die Charakterisierung der Aufstellwand wird

durch die Eingabe des Wärmedurchlaßwiderstandes (Bezugstemperatur 10 °C) oder der Wärmeleitfähigkeit und der Wanddicke vorgenommen. Die Entscheidung, ob es sich um eine Innen- oder Außenwand handelt, ist maßgebend für die Größe des Wärmeübergangswiderstandes an der der Feuerstätte gegenüberliegenden Wandoberfläche.

Der Start der Berechnung erfolgt durch das Anklicken der Taste „Start“. Die jetzt ablaufende Iteration wird automatisch abgebrochen, wenn die Oberflächentemperatur der zu schützenden Wand einen Wert zwischen 85,0 und 84,5 °C erreicht. Auf dem Bildschirm wird neben der Oberflächentemperatur der Wärmedämmung der exakte Wert für die Oberflächentemperatur der zu schützenden Wand angegeben. Als Ergebnisse der Berechnung werden angegeben: die erforderliche Wärmedämmschichtdicke, der Wärmestrom durch das Wärmedämmsystem und die Aufstellwand sowie der Gesamtwärmedurchgangswiderstand.

## **9. Validierung des Verfahrens**

Das Prüfverfahren nach [3] wird im Institut für Bauphysik seit 1992 angewandt und wurde 1994 bauaufsichtlich anerkannt. Aus solchen Prüfungen liegen eine Vielzahl von Ergebnissen vor, die sich für den stationären Zustand für eine Validierung eignen.

### **9.1 Sensitivitätsanalyse**

Die Genauigkeit dieses Berechnungsverfahrens wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Exakte Ermittlung der in die Berechnung eingehenden temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmmaterials;
- Homogenität des Wärmedämmmaterials;
- Exakte Kenntnis über die durch die Feuerstätte auftretende thermische Last;
- Exakte Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes der Aufstellwand.

Das Wärmedämmmaterial muß maßhaltig insbesondere bezüglich der Ebenheit der Oberflächen sein. Konkav oder konvex gekrümmte Oberflächen führen zu unterschiedlichen Dicken der Fugen zwischen dem Wärmedämmmaterial oder zwischen Wärmedämmmaterial und der Aufstellwand und damit zu veränderten Wärmetransportbedingungen. Da der Kleber in der Regel eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die Dämmplatten hat, würde das Berechnungsergebnis beeinflusst. Entscheidend für die Wärmeleitung ist auch die Homogenität des Dämmmaterials. Große Unterschiede im Porengefüge oder in der Rohdichte können aufgrund des Herstellungsverfahrens innerhalb der Platte oder innerhalb des Plattenloses auftreten. Wesentlich bei der Feuerstättenprüfung ist, daß sowohl die verwendete Wärmedämmung (evtl. auch Vormauerung) als auch die simulierte Aufstellwand thermisch exakt durch den Wärmedurchlaßwiderstand beschrieben werden können. Das setzt die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit voraus und verlangt die eindeutige Bestimmbarkeit der entsprechenden Plattendicke. Dieser Einfluß der Probenkörperdicke wurde rechnerisch untersucht: der größte Fehler mit 3 mm Meßdifferenz bei allen Tests mit unterschiedlichen Plattendicken ergibt auch einen Fehler von maximal 3 mm in der äquivalenten Schichtdicke der zu bemessenden Dämmung.

Die thermische Belastung des Brandschutzsystems wird durch die bei der Feuerstättenprüfung (Sicherheitstest) ermittelte Referenz-Oberflächentemperatur der Wärmedämmung in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit beschrieben. Da über relativ lange Zeitabschnitte bei der Prüfung, nämlich bis zur Beharrung gemessen wird, gleichen sich Belastungsschwankungen durch z. B. unterschiedliche Heizwerte des verwendeten Brennstoffes aus. Die Gesamtwärmeleistung der Feuerstätte wird bei den Prüfungen über die Meßwerverfassung von Kohlenmonoxid und -dioxid, der Abgas- und Raumtemperatur sowie den Brennstoffauflagen bestimmt, so daß von einer gleichmäßigen thermischen Belastung ausgegangen werden kann.

Die Umgebungstemperatur an der Rückseite des Prüfstandes kann gemäß Anforderungen für die Feuerstättenprüfungen zwischen 20 °C und 30 °C liegen. Beachtet man diese maximale Temperaturdifferenz von 10 K, so führt die Berechnung beispielsweise mit dem Finite-Elemente-Verfahren zu einer Schichtdickendifferenz (bei Kalziumsilikat-Dämmplatten) von 1,0 mm. Bei den praktischen Prüfungen liegen die Raumtemperaturen zwischen 21 und 25 °C.

Der Einfluß der Meßunsicherheit bei der Temperaturbestimmung mit Thermo-  
elementen verursacht bei 1 K Abweichung eine Plattendickenänderung von 0,6  
mm. Bei der meßtechnischen Bestimmung der temperaturabhängigen Wärme-  
leitfähigkeit nach dem Heißdrahtverfahren wird von einem Fehler von  $\pm 10\%$   
ausgegangen. Von einer gleichen Größenordnung des Fehlers ist bei der Einbe-  
ziehung des Wärmedurchlaßwiderstandes der Aufstellwand auszugehen.

## **9.2 Unsicherheit des Gesamtergebnisses**

Die Bestimmung der gesamten Unsicherheit bei der Ermittlung einer äquivalen-  
ten Plattendicke für die Wärmedämmung in Feuerstätten erfolgte auf der Basis  
der Veröffentlichung in DKD-3 „Ermittlung von Meßunsicherheiten“ [11] und der  
dort dargestellten Ableitungen und beträgt  $\pm \dots\%$ .

## **10. Empfehlung zur Umsetzung des Berechnungsverfahrens**

Wegen der erforderlichen Änderung der Sicherheitsprüfung bei verkleideten  
Feuerstätten (DIN 18 895, DIN 18 892) hinsichtlich der für den Berechnungs-  
algorithmus notwendigen Oberflächentemperaturen ist ein Normänderungsan-  
trag beim DIN zu stellen. Die Änderungen beziehen sich auf die Verwendung  
von normierten Aufstellwänden, bei denen die bisher anzubauende Wärmedäm-  
mung entfällt und die der Feuerstätte zugewandten Oberfläche dieser Aufstell-  
wand der Oberfläche der zu realisierenden Wärmedämmung entspricht. Die Auf-  
stellwände sollen mit Wärmestrommessern ausgemessen sein, so daß deren  
Wärmedurchlaßwiderstand bekannt ist. Es sind drei verschiedene Dicken zu  
verwenden, die einer ca. 10, 20 und 30 cm dicken Mineralfaserplatte entspre-  
chen und an der der Feuerstätte zugewandten Oberfläche Thermolemente im  
10 cm Raster anzubringen. Der Abstand dieser Mineralfaserplatten zur Feuer-  
stätte wird vom Hersteller der Feuerstätte vorgegeben und entspricht dem Ab-  
stand der Feuerstätte zur Wärmedämmung im Praxisfall.

Die Feuerstätte wird prinzipiell mit simulierter Verkleidung geprüft. Vorgesehene  
Konvektionsluftöffnungen sind nicht zu verschließen. Die Prüfung ist bis zum  
Beharrungszustand zu betreiben.

Im Ergebnis der Prüfung ist die Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Aufstellwand vom Wärmedurchlaßwiderstand graphisch aufzuzeigen und eine Regressionskurve als Polynom der Form

$$t_{\text{OF},1} = E + FR + GR^2 + HR^3$$

zu entwickeln.

Die Prüfkriterien für die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Wärmedämmstoffes werden in der bisherigen Form beibehalten, jedoch wird auf die prüftechnische Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke verzichtet. Diese Änderung ist gegebenenfalls im Sachverständigenausschuß „Wärmedämmung von Feuerstätten“ zu beraten.

Die Bemessung der Wärmedämmung erfolgt durch das Fachhandwerk auf der Basis der in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung enthaltenen Stoffdaten, des bei der Sicherheitsprüfung ermittelten Polynoms für die Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Wärmedämmung vom Wärmedurchlaßwiderstand und für den Wärmedurchlaßwiderstand der realen Aufstellwand auf der Baustelle über das Berechnungsprogramm iterativ.

Diese generelle Verfahrensweise sollte im SVA „Feuerungsanlagen“ beraten werden.

## **11. Zusammenfassung**

Die Verwendung von Substitutionsmaterial für die Wärmedämmung von Feuerstätten war bisher auf den Anwendungsfall für Feuerstätten nach DIN 18 895 über eine aufwendige Prüfung zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicken (Basismaterial, Mineralfaserplatten) beschränkt. Mängel dieses Verfahrens waren die einseitige Orientierung auf eine Referenzfeuerstätte, die Verwendung lediglich einer simulierten Aufstellwand und simulierte Betriebsbedingungen, die nur den gelegentlichen Betrieb der Feuerstätte widerspiegeln. Diese Mängel und die Benutzung der aus dem Prüfverfahren resultierenden Ergebnisse für kontinuierlich betriebene Feuerstätten können im praktischen Betrieb zu einem



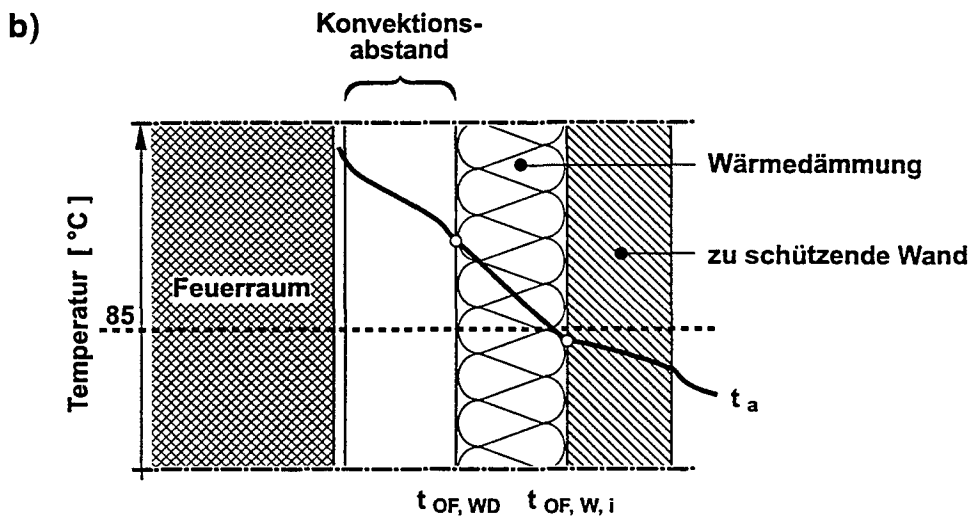
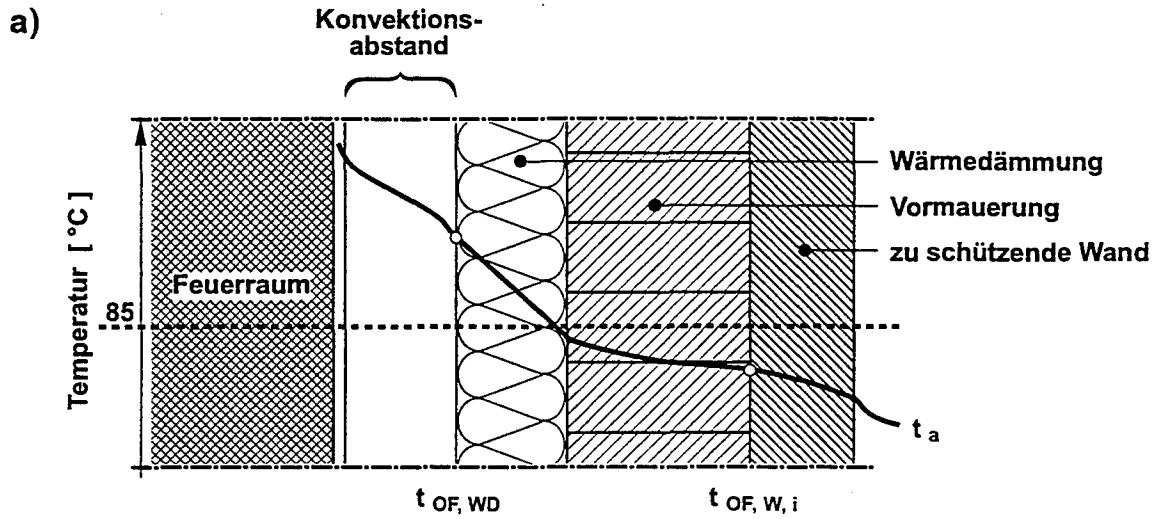
Gefährdungspotential führen. Untersuchungen an ausgeführten Anlagen zeigen, daß die in Betracht kommenden Feuerstätten durchaus bis zur thermischen Beharrung betrieben werden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Berechnung von erforderlichen Wärmedämmschichtdicken unter stationären Bedingungen durchzuführen und den tatsächlichen Wärmedurchlaßwiderstand der Aufstellwand zu berücksichtigen. Dies führt in der Praxis dazu, daß mit geringeren Wärmedämmschichtdicken gebaut werden kann als bisher oder daß bei sehr gut gedämmten Aufstellwänden mit brennbaren Bestandteilen die erforderliche Wärmedämmung unverhältnismäßig dick auszuführen wäre. Letzteres verlangt andere konstruktive Lösungen, wie beispielsweise den Ersatz der Aufstellwand durch eine aus nichtbrennbaren Werkstoffen.

Mit Hilfe des entwickelten DV-Programms kann künftig die erforderliche Dämmschichtdicke iterativ berechnet werden. Die für die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erforderlichen Prüfnachweise für den Dämmstoff beschränken sich deshalb nur noch auf die Bestimmung von Stoffwerten, Wechseltemperaturbeständigkeit und den Brauchbarkeitsnachweis für den Kleber. Somit trägt das neue Prüfverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke von Wärmedämmung an Feuerstätten zur Vereinfachung, Kostensenkung im Bauen und zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus bei.

## **12. Literaturverzeichnis**

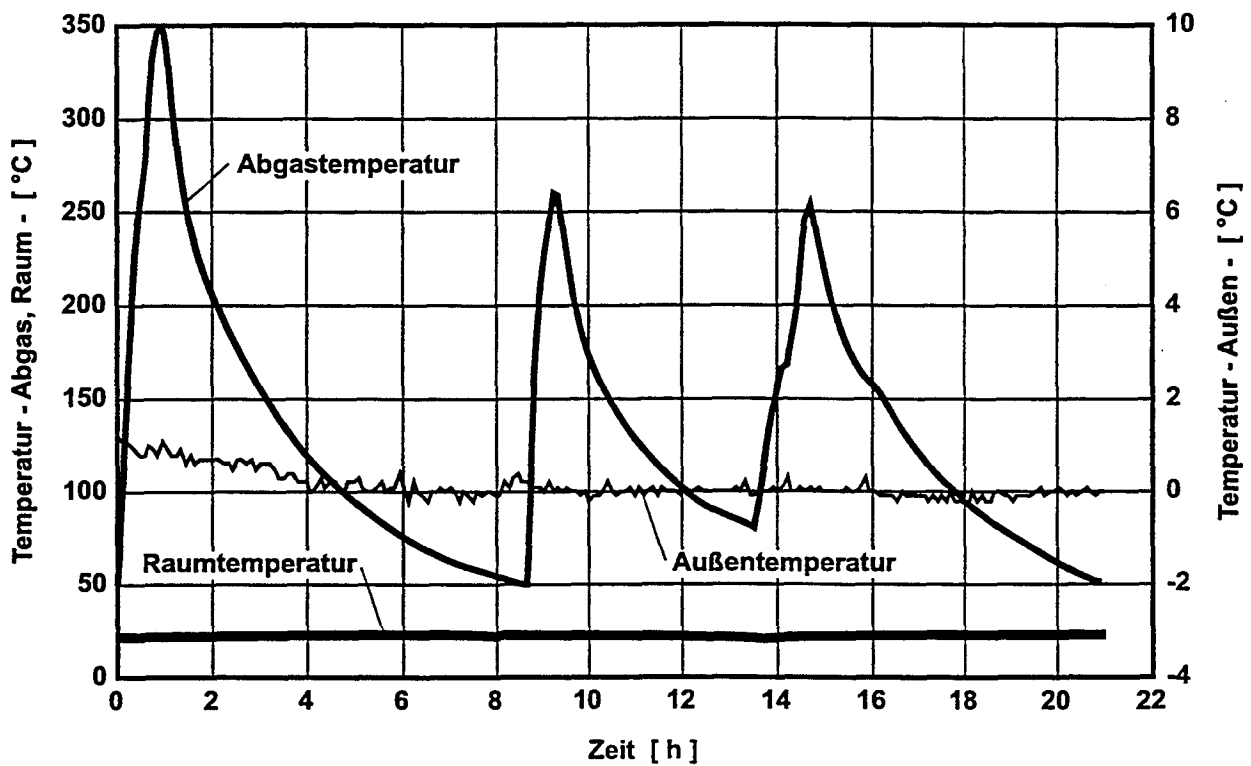
- [1] DIN 18 895, offene Kamine - Feuerstätten für feste Brennstoffe zum Betrieb mit offenem Feuerraum, August 1990, Beuth-Verlag, Berlin.
- [2] Fachregeln des Kachelofen- und Luftheizungsbauerhandwerks, Zentralverband Sanitär, Heizung und Klima, St. Augustin, April 1996.
- [3] Bestimmung der äquivalenten Schichtdicken von Substitutionsmaterialien für Vormauerungs-/Wärmedämmungs- bzw. Wärmedämmungersatz an Feuerstätten nach DIN 18 895 „Offene Kamine“, DIBt, Berlin, IBP, Stuttgart, September 1994.

- [4] Sprung, J.: Prüfverfahren zur Bestimmung der äquivalenten Schichtdicke von Wärmedämmmaterialien in Feuerstätten - Zwischenbericht; Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik GB 142/1998.
- [5] Ulusoy, T.: Protokoll zur Besprechung des Forschungsvorhabens in der Projektgruppe am 15. Oktober 1998.
- [6] Muster einer Feuerungsverordnung (M-Feu-Vo), Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU, Fassung 24. Februar 1995, geändert durch Beschluß vom 18. September 1997.
- [7] Bundes-Immissionsschutzgesetz, Verordnung über Kleinf Feuerungsanlagen - 1. BImSch V vom 15. Juli 1988, Bundesgesetzblatt Jahrgang 1988 Teil I Nr. 1059, Juli 1988, Bonn.
- [8] Bundes-Immissionsschutzgesetz, Zweite Verordnung zur Änderung der Verordnung über Kleinf Feuerungsanlagen vom 07. August 1996, Bundesgesetzblatt Jahrgang 1996 Teil I Nr. 42, August 1996, Bonn.
- [9] Tautz, Heinz: Wärmeleitung und Temperatúrausgleich, Akademie-Verlag, Berlin 1971.
- [10] Würth, Michael: Partielle Validierung und Erprobung eines Finite-Elemente-Programms zur Berechnung instationärer, dreidimensionaler Wärmetransportvorgänge, Diplomarbeit Universität Stuttgart Nr. 9606, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 1996.
- [11] Deutscher Kalibrierdienst: Ermittlung von Meßunsicherheiten, Physik.-Techn. Bundesanstalt, Braunschweig, 1991.

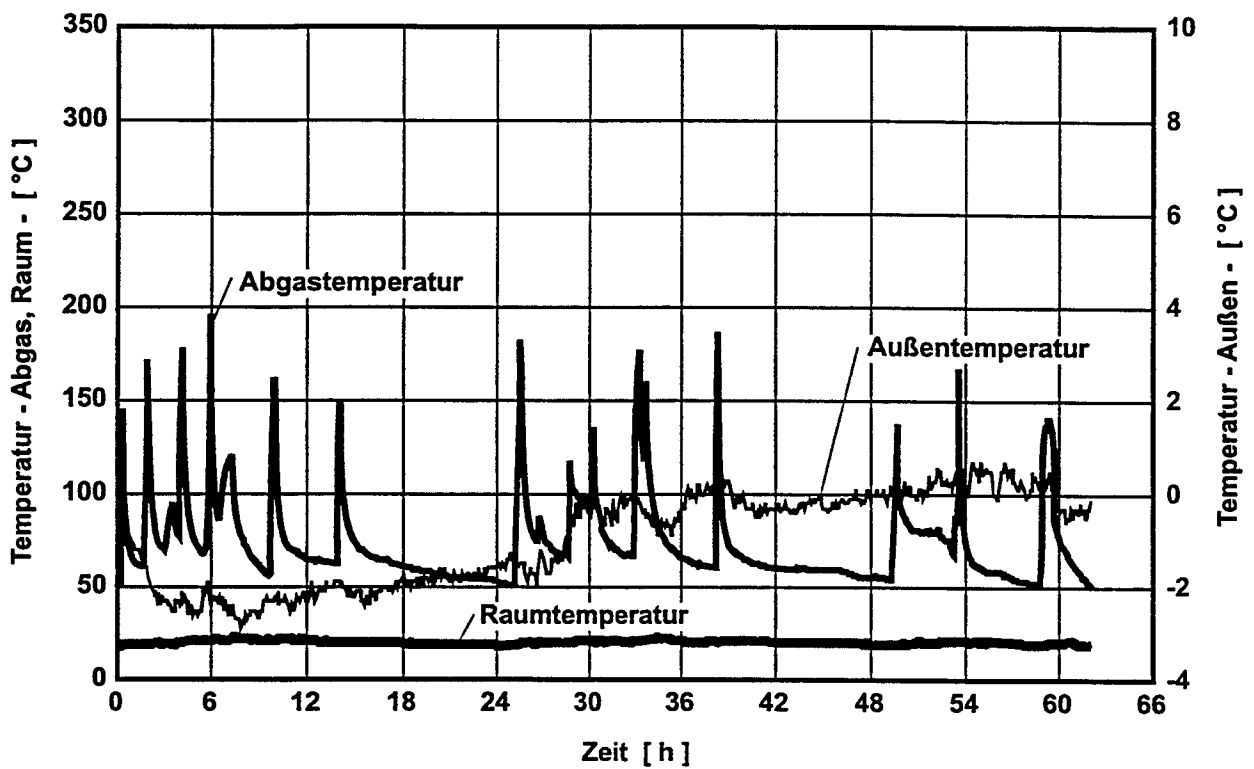


**Bild 1:** Schematische Darstellung eines Brandschutzsystems mit Angabe der Meßebenen, an denen Temperaturen gemessen werden;

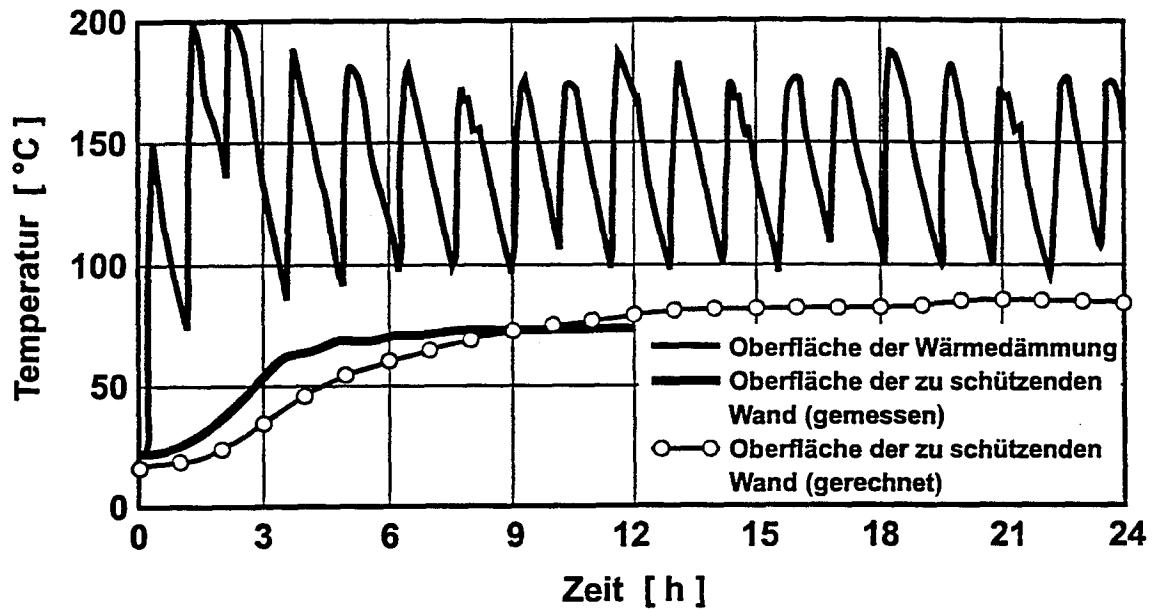
- a) mit Vormauerung,
- b) ohne Vormauerung.



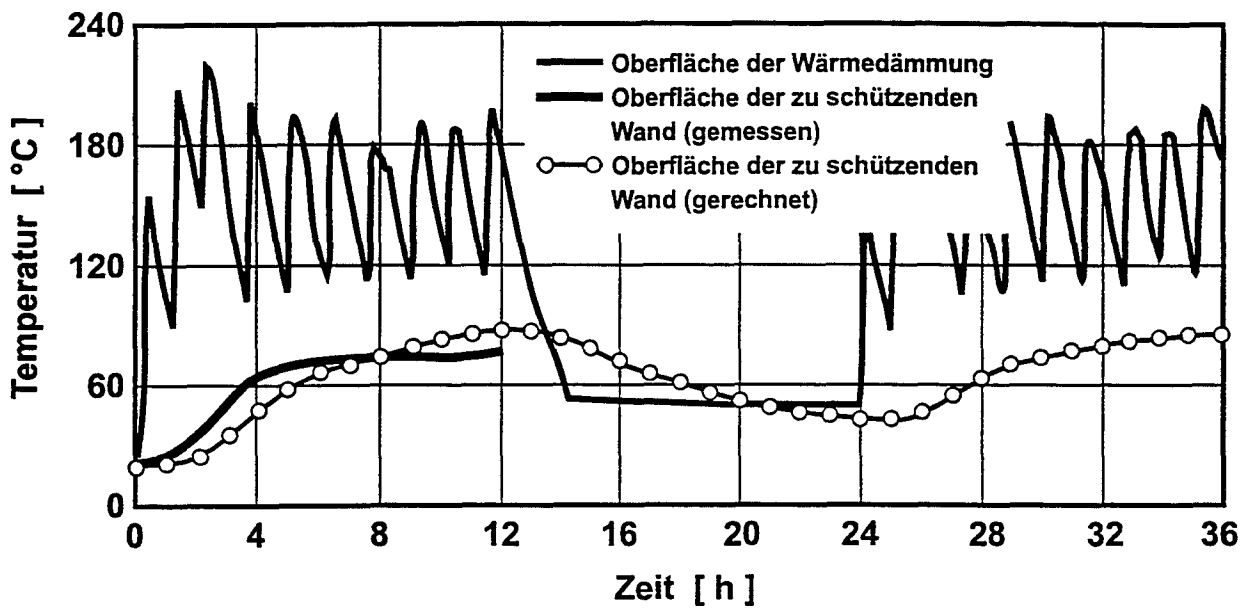
**Bild 2:** Meßtechnisch ermittelte Verläufe der Temperaturen an einem Dauerbrand-Heizeinsatz, im Aufstellraum und außen zur Ermittlung einer maximalen zusammenhängenden Betriebszeit (Anlage 1).



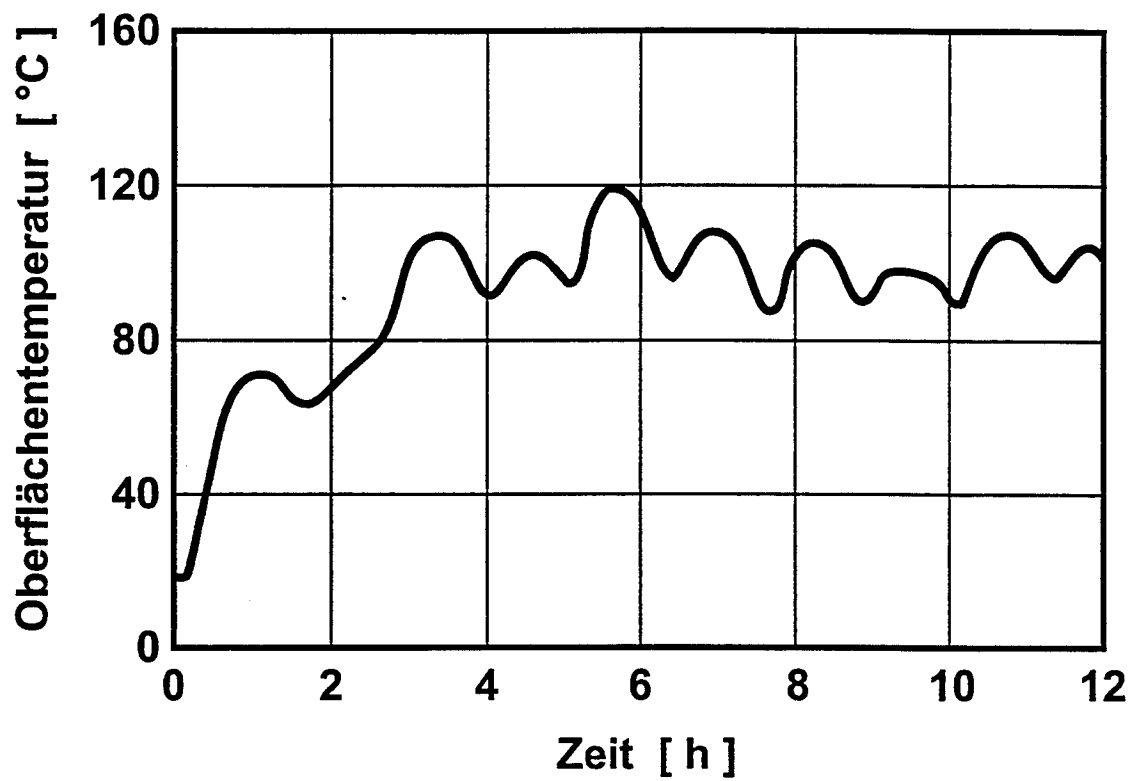
**Bild 3:** Meßtechnisch ermittelte Verläufe der Temperaturen an einem Dauerbrand-Heizeinsatz, im Aufstellraum und außen zur Ermittlung einer maximalen zusammenhängenden Betriebszeit (Anlage 2).



**Bild 4:** Darstellung des Vergleiches zwischen dem meßtechnisch und rechnerisch (Finite Elemente) ermittelten Temperaturverlauf an der Oberfläche einer zu schützenden Aufstellwand unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Temperaturschwankungen der der Feuerstätte zugewandten Oberfläche der Wärmedämmung. Die Messung wurde über 12 h durchgeführt.

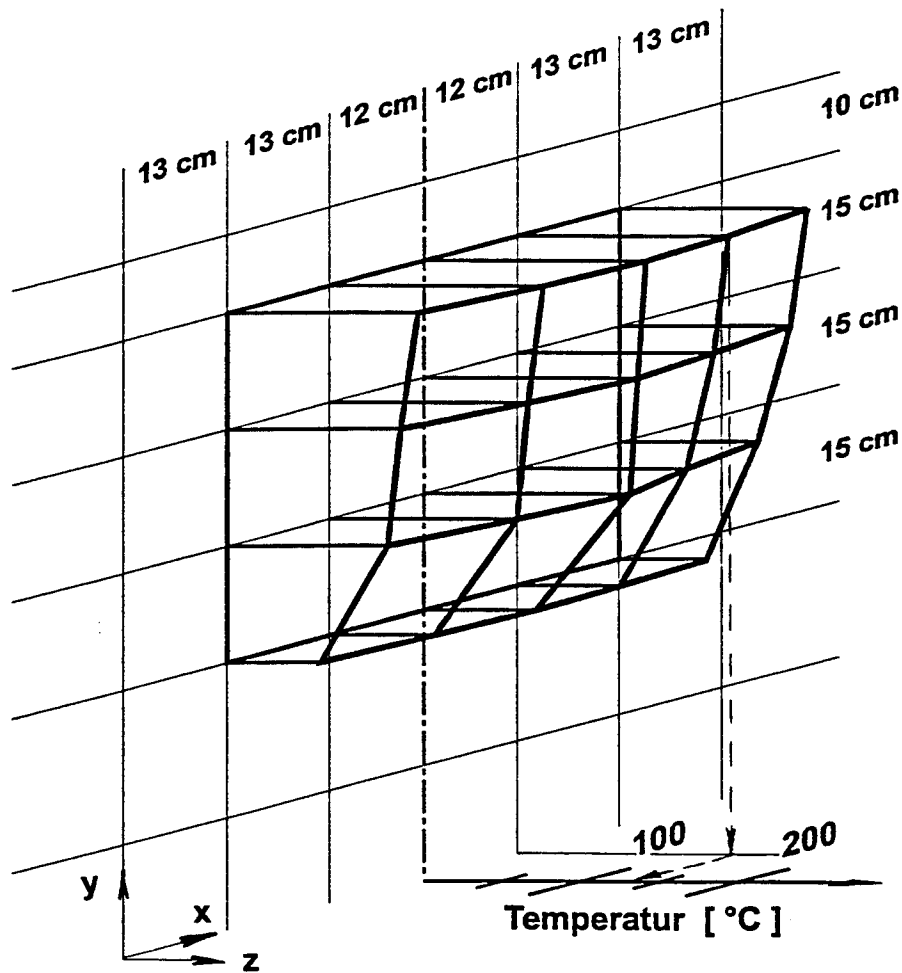


**Bild 5:** Darstellung des Vergleiches zwischen dem meßtechnisch und rechnerisch (Finite Elemente) ermittelten Temperaturverlauf an der Oberfläche einer zu schützenden Aufstellwand unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Temperaturschwankungen der der Feuerstätte zugewandten Oberfläche der Wärmedämmung bei diskontinuierlichem Betrieb (12 h Beheizung, 12 h Unterbrechung, 12 h Beheizung).

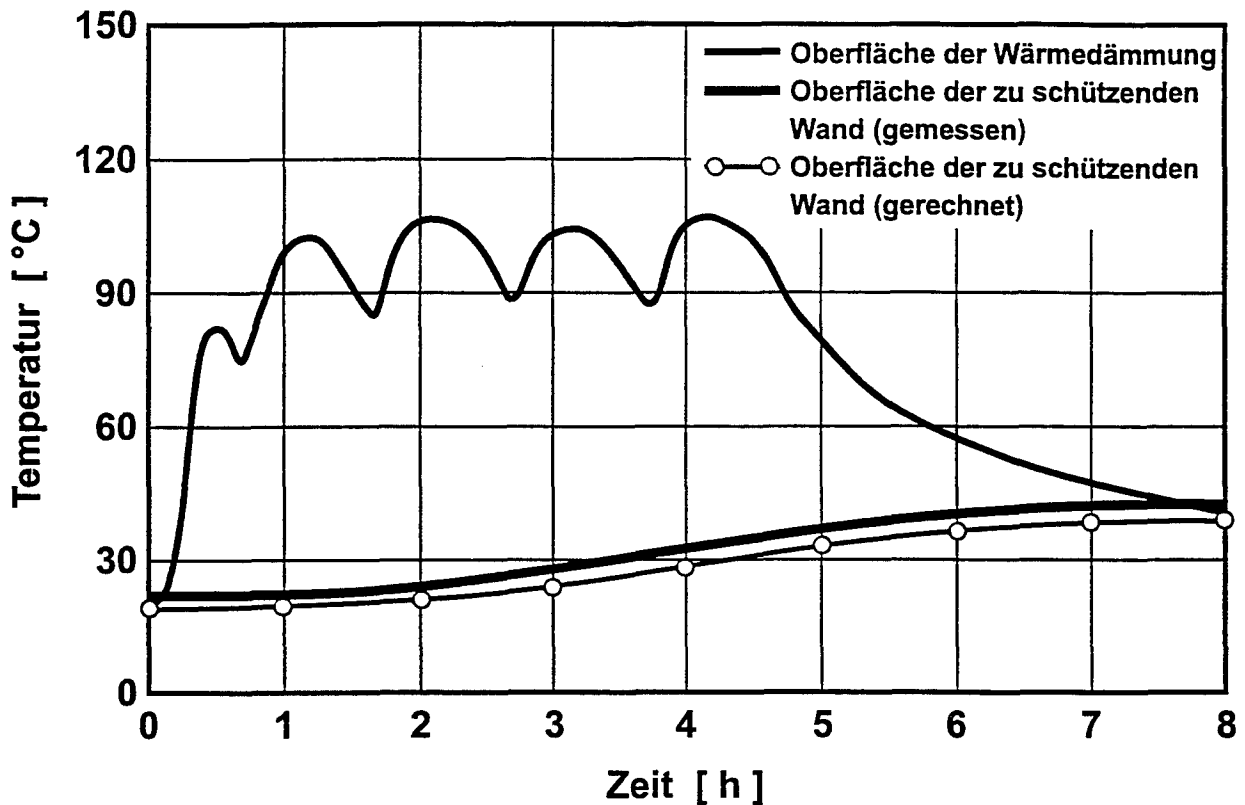


**Bild 6:** Verlauf der Temperatur der der Feuerstätte zugewandten Oberfläche des Systems Wärmedämmung/Aufstellwand als zeitabhängige innere Randbedingung (1.Art).






**Bild 7:** Darstellung des sich durch thermische Belastung auf der der Feuerstätte zugewandten Oberfläche der Wärmedämmung ausbildenden Temperaturfeldes (Rückwand). Für dieses Beispiel wurde ein Ergebnis einer Prüfung nach [3] verwendet. Die Feuerstätte befand sich im Abstand von 5 cm von der Wärmedämmung. Die Gerätemittellinie projiziert die Strich-Punkt-Linie auf die Wärmedämmung.




**Bild 8:** Darstellung des Vergleiches der meßtechnisch und der rechnerisch (Finite Elemente) ermittelten Oberflächentemperatur einer zu schützenden Wand im System Wärmedämmung/Aufstellwand unter thermischer Belastung durch eine Feuerstätte. Die thermische Belastung wird durch die Oberflächentemperatur der Wärmedämmung charakterisiert.

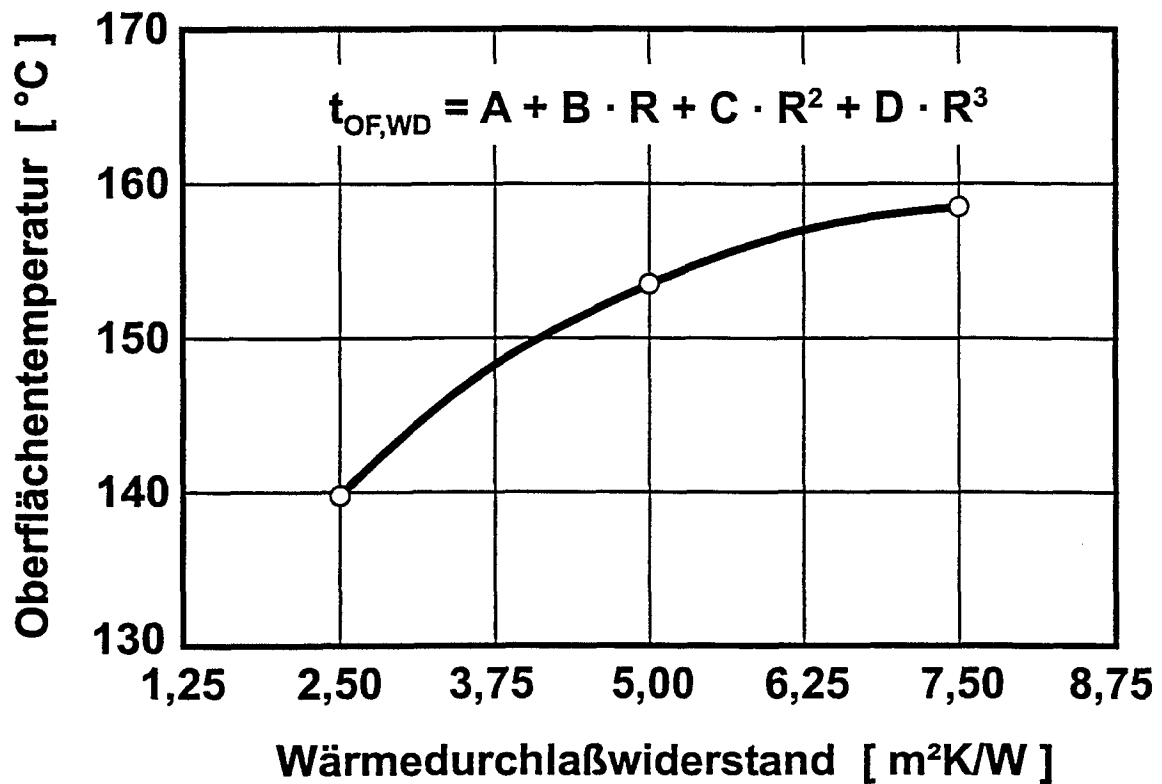
a)

		<h3>Iterative Berechnung der Schichtdicke eines Wärmedämmstoffes für Feuerstätten</h3> <p>Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Tel. 0711-970-3330 Vers. 2.0 Dez.1999</p>															
<b>Eingaben:</b>																	
Baustelle				<table border="1"> <tr><th>Einheit</th></tr> <tr><td>°C</td></tr> <tr><td>-</td></tr> <tr><td>-</td></tr> <tr><td>W/mK</td></tr> <tr><td>-</td></tr> <tr><td>W/mK</td></tr> <tr><td>m</td></tr> <tr><td>-</td></tr> <tr><td>W/mK</td></tr> <tr><td>m</td></tr> <tr><td>m²K/W</td></tr> <tr><td>-</td></tr> </table>	Einheit	°C	-	-	W/mK	-	W/mK	m	-	W/mK	m	m²K/W	-
Einheit																	
°C																	
-																	
-																	
W/mK																	
-																	
W/mK																	
m																	
-																	
W/mK																	
m																	
m²K/W																	
-																	
Feuerstättenart																	
Typ																	
Hersteller																	
Oberflächentemperatur der WD bei Prüfung in Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes des Prüfaufbaues Koeffizienten	$t_{orwo} = A+B \cdot R+C \cdot R^2+D \cdot R^3$																
	A	B	C	D													
	120	9,159	-0,471	-0,0055													
Wärmedämmung	Mineralfaserplatte																
temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der WD Koeffizienten	$\lambda_{WD} = E+F \cdot t+G \cdot t^2+H \cdot t^3$																
	E	F	G	H													
	0,03434	6,00E-05	4,00E-07	-3E-21													
Vormauerung	ja <input type="checkbox"/>	nein <input checked="" type="checkbox"/>	Art:														
Wärmeleitfähigkeit				0													
Schichtdicke				0													
Aufstellwand	Mineralfaserplatte																
Wärmedurchlaßwiderstand	Berechnet mit:		Wärmeleitfähigkeit	0													
	oder		Schichtdicke:	0													
			Tabelle:	2,5													
Innenwand	Außenwand	R = 0,13 m²K/W	T_Aufstellwand(°C)	20													

b)

		<h3>Iterative Berechnung der Schichtdicke eines Wärmedämmstoffes für Feuerstätten</h3> <p>Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Tel. 0711-970-3330 Vers. 2.0 Dez.1999</p>												
<b>Ausgaben:</b>														
erforderliche Wärmedämmschichtdicke			0,133	<table border="1"> <tr><th>Einheit</th></tr> <tr><td>m</td></tr> <tr><td>°C</td></tr> <tr><td>°C</td></tr> <tr><td>W/m²</td></tr> <tr><td>m²K/W</td></tr> <tr><td>m²K/W</td></tr> <tr><td>m²K/W</td></tr> <tr><td>m²K/W</td></tr> <tr><td>m²K/W</td></tr> </table>	Einheit	m	°C	°C	W/m²	m²K/W	m²K/W	m²K/W	m²K/W	m²K/W
Einheit														
m														
°C														
°C														
W/m²														
m²K/W														
m²K/W														
m²K/W														
m²K/W														
m²K/W														
Oberflächentemperatur Wärmedämmung			154,6											
innere Oberflächentemperatur der zu schützenden Wand			85,0											
Wärmestrom durch das Wärmedämmsystem			24,71											
Gesamtwärmedurchgangswiderstand			5,45											
Wärmedurchlaßwiderstand	WD		2,82											
Wärmedurchlaßwiderstand	VM		0,00											
Wärmedurchlaßwiderstand	Wand		2,50											

**Bild 9:** Darstellung der Bildschirmoberfläche für das Berechnungsverfahren  
a) Eingabetabelle,  
b) Ausgabetabelle.



**Bild 10:** Schematische Darstellung der während der Feuerstättenprüfung ermittelten Abhängigkeit der Innenoberflächentemperatur der Wärmedämmschicht vom Wärmedurchlaßwiderstand des simulierten Systems Wärmedämmung/Aufstellwand.

**Tabelle 1:** Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

1. Außenwandkonstruktionen			
Nr.	Wandaufbau	Gesamtdicken <sup>1)</sup>	
		[m]	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
1.1	Außenputz 2,0 cm	0,335	2,05
	<u>Leicht-Hochlochziegel-Mauerwerk</u>	0,400	2,46
		0,525	3,28
	Innenputz 1,5 cm		
1.2	Außenputz 2,0 cm	0,335	2,05
	<u>Porenbeton-Plansteine</u>	0,400	2,46
	Innenputz 1,5 cm		
1.3	Außenputz 2,0 cm	0,335	1,39
	<u>Bimsstein-Mauerwerk</u>	0,400	1,68
		0,525	2,27
	Innenputz 1,5 cm		
1.4	Armierte Beschichtung 0,6 cm	0,345	2,39
		0,365	2,86
	<u>Polystyrol-Hartschaumplatten</u>	0,385	3,40
		0,415	4,18
	Ansatzkleber 0,4 cm	0,465	5,39
	Kalksand-Lochstein-Mauerwerk 24,0 cm		
	Innenputz 1,5 cm		

<sup>1)</sup> Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.

**Tabelle 1 (Fortsetzung 1):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

1. Außenwandkonstruktionen			
Nr.	Wandaufbau	Gesamtdicken <sup>1)</sup> [m]	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
1.5	Armierete Beschichtung 1,0 cm	0,349	2,46
	<u>Mineralfaserplatten</u>	0,369	2,96
	Ansatzkleber 0,4 cm	0,389	3,40
	Leichtbeton-Hohlblockstein-Mauerwerk 24,0 cm		
	Innenputz 1,5 cm		
1.6	Beton 7,0 cm	0,290	2,10
	<u>Polystyrol-Hartschaumplatten</u>	0,310	2,61
		0,330	3,06
	Beton 14,0 cm	0,360	3,83
		0,410	5,09
1.7	Außenputz 2,0 cm	0,357	2,46
	Leichtbeton-Hohlblockstein-Mauerwerk 24,0 cm	0,377	2,96
		0,397	3,53
	Ansatzkleber 0,5 cm	0,427	4,18
	<u>Polystyrol-Hartschaumplatten</u>	0,477	5,39
	Gipskartonplatte 1,2 cm		

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.

**Tabelle 1 (Fortsetzung 2):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

1. Außenwandkonstruktionen			
Nr.	Wandaufbau	Gesamtdicken <sup>1)</sup> [m]	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
1.8	Armierete Beschichtung 1,0 cm	0,215	4,59
	<u>Polystyrol-Hartschaumplatten</u>	0,235	5,09
	<u>Polystyrol-Hartschaumplatten</u>	0,255	5,39
	Holzrahmenkonstruktion mit Dämmung im Gefach 15,0 cm Innenbeplankung 1,5 cm		
1.9	Kalksand-Vollstein-Mauerwerk 11,5 cm	0,425	2,61
	Luftschicht 4,0 cm	0,445	3,16
	<u>Polystyrol-Hartschaumplatten</u>		
	Kalksandstein-Lochstein-Mauerwerk 17,5 cm		
	Innenputz 1,5 cm		

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.

**Tabelle 1 (Fortsetzung 3):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

1. Außenwandkonstruktionen			
Nr.	Wandaufbau	Gesamtdicken <sup>1)</sup> [m]	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
1.10	leichte Außenschale	0,4 cm	0,379
			0,399
	Luftspalt/Tragkonstruktion	4,0 cm	0,419
			0,439
	<u>Mineralfaserplatten</u>		
	Leicht-Hochlochziegel-Mauerwerk	24,0 cm	
	Innenputz	1,5 cm	
1.11	Vormauerziegel	11,5 cm	0,425
	Luftschicht	4,0 cm	0,445
	<u>Mineralfaserplatten</u>		
	Porenbeton-Planstein-Mauerwerk	17,5 cm	
	Innenputz	1,5 cm	
1.12	Vormauerziegel	11,5 cm	0,385
	<u>Perlite-Dämmung</u>		0,405
	Leichthochlochziegel-Mauerwerk	17,5 cm	0,425
			0,455
	Innenputz	1,5 cm	

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.



**Tabelle 1 (Fortsetzung 4):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

1. Außenwandkonstruktionen				
Nr.	Wandaufbau	Gesamtdicken <sup>1)</sup> [m]	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]	
1.13	Kalksand- Vollstein- Mauerwerk	11,5 cm	0,385 0,405 0,425	2,67 3,28 3,83
	<u>Polystyrol-Hart- schaumplatten</u>		0,455	4,59
	Kalksand- Lochstein- Mauerwerk	17,5 cm		
	Innenputz	1,5 cm		
1.14	Beschichtung	0,5 cm	0,300	2,39
	<u>Polystyrol- Extruderschaum</u>		0,320 0,340	2,96 3,53
	Beton	20,0 cm		
	Innenputz	1,5 cm		
1.15	Fachwerk (nur Holzanteil berücksichtigt)		0,12 0,18	0,93 1,38
1.16	Außenputz	2,0 cm	0,275	0,33
	<u>Kalksand- Vollstein- Mauerwerk</u> Innenputz	1,5 cm		

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.

**Tabelle 1 (Fortsetzung 5):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

1. Außenwandkonstruktionen				
Nr.	Wandaufbau		Gesamtdicken <sup>1)</sup> [m]	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
1.17	Außenputz	2,0 cm	0,415	0,39
	<u>Vollziegel-</u> <u>Mauerwerk</u>			
	Innenputz	1,5 cm		
1.18	Außenputz	2,0 cm	0,275	0,39
	<u>Kalksand-</u> <u>Lochstein-</u> <u>Mauerwerk</u>		0,335	0,46
	Innenputz	1,5 cm		
1.19	Außenputz	2,0 cm	0,275	0,46
	<u>Hohlblockstein-</u> <u>Mauerwerk</u>			
	Innenputz	1,5 cm		
1.20	Außenputz	2,0 cm	0,335	0,54
	<u>Hochlochziegel-</u> <u>Mauerwerk</u>		0,400	0,66
	Innenputz	1,5 cm		

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.

**Tabelle 1 (Fortsetzung 6):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

2. Innenwandkonstruktionen			
Nr.	Wandaufbau	Gesamtdicken <sup>1)</sup> [m]	Wärmedurchlaß- widerstand [m <sup>2</sup> K/W]
2.1	Innenputz 1,5 cm <u>Hochlochziegel-</u> <u>Mauerwerk</u> Innenputz 1,5 cm	0,205	0,32
2.2	Innenputz 1,5 cm <u>Kalksand-</u> <u>Vollstein-</u> <u>Mauerwerk</u> Innenputz 1,5 cm	0,145	0,12
2.3	Innenputz 1,5 cm <u>Stahlbeton</u> (schwer) Innenputz 1,5 cm	0,190	0,11
2.4	Spachtelputz 0,5 cm <u>Porenbeton-</u> <u>Mauerwerk</u> Spachtelputz 0,5 cm	0,160	0,67
2.5	Spachtelputz 0,3 cm <u>Gips-Wandbau-</u> <u>platten</u> Spachtelputz 0,3 cm	0,086	0,19
2.6	Innenputz 1,5 cm <u>Leichtbetondielen</u> Innenputz 1,5 cm	0,090	0,24

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.

**Tabelle 1 (Fortsetzung 7):**

Zusammenstellung von Wärmedurchlaßwiderständen wichtiger Außen- und Innenwandkonstruktionen für die Berechnung von Wärmedämmstoff-Schichtdicken vor Aufstellwänden von Feuerstätten

2. Innenwandkonstruktionen				
Nr.	Wandaufbau		Gesamtdicken <sup>1)</sup>	Wärmedurchlaßwiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
			[m]	
2.7	Gipskarton-Bauplatte	1,25 cm	0,161	3,24
	Holzständer mit Mineralfaserplatten ausgefacht (nur Mineralfaserplatten berücksichtigt)	12,0 cm		
	Holzwerkstoffplatte	1,6 cm		
	Gipskarton-Bauplatte	1,25 cm		
2.8	Gipskarton-Bauplatte	1,25 cm	0,145	3,12
	Holzständer mit Mineralfaserplatten ausgefacht (nur Mineralfaserplatten berücksichtigt)	12,0 cm		
	Gipskarton-Bauplatte	1,25 cm		

<sup>1)</sup>Die unterschiedlichen Gesamtdicken ergeben sich aus variablen Dicken der unter „Wandaufbau“ unterstrichenen Bauteilschicht.