

**BAM-BERICHT Nr. 22**

DER BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren  
zur Bemessung der Brandschutzbekleidung  
von Stahlstützen**

von

Dipl.- Ing. R. Rudolphi

Dr. Ing. E. Knublauch



## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung.....	1
1.1. Exkurs über das Brandverhalten von Stahl- stützen.....	1
2. Beschreibung des Gegenheizverfahrens zur Ermitt- lung der Stahltemperaturen von Stahlstützen.....	5
2.1. Versuchsanordnung eines Kleinbrandversuches mit Gegenheizung.....	6
2.2. Einige Angaben zur Meß- und Steuergenauigkeit des Gegenheizversuches.....	7
3. Überprüfung der Aussagefähigkeit von Gegenheizver- suchen für die Durchwärmung von bekleideten Stahl- stützen.....	8
4. Ermittlung der "korrigierten Brandraumtemperatur- Zeit-Kurve" für den Kleinprüfstand.....	16
5. Zusammenfassung und Folgerungen.....	19
Literatur.....	21

## Verwendete Symbole

c	spez. Wärmekapazität des Stahls
D	Bekleidungsdicke
d	Stahldicke des Prüfstücks im Gegenheizversuch
ETK	Einheitstemperaturkurve
F/U	Profilfaktor von Stützen
U/F	
S	statistische Aussagesicherheit
t	Zeit, speziell
$t_{\vartheta}$	Zeit bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von $\vartheta$ (speziell $t_{500}$ )
$\gamma$	Anteil an statistischer Gesamtheit
$\lambda$	Schlankheit
$\lambda'$	Rechengröße zur Kennzeichnung eines Bekleidungs-systems
$\sigma$	Stahlspannung
$\sigma_{zul}$	rechnerisch zulässige Stahlspannung
$\vartheta$	Stahltemperatur, speziell
$\vartheta_{krit}$	kritische Stahltemperatur
$\vartheta_{Br}$	Brandraumtemperatur

## Indizes

S	Stützenprüfung
K	Kleinprüfung
V	Versuchsergebnis

## 1. Einleitung

Wenn an Bauwerke in Stahlkonstruktionen Anforderungen hinsichtlich des baulichen Brandschutzes gestellt werden, sind in der Regel zusätzliche bauliche Schutzmaßnahmen erforderlich, um die Feuerwiderstandsfähigkeit der Stahlbauteile, insbesondere der tragenden Stützen, zu erhöhen. Der Feuerschutz kann durch eine Bekleidung der gefährdeten Bauteile mit Dämmmaterialien erreicht werden. Die Wirksamkeit von Bekleidungen wird nach den Prüfrichtlinien der DIN 4102 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen [1] - in Brandversuchen im natürlichen Maßstab untersucht. Dieses Prüfverfahren (vgl. auch [4,6]) ist sehr aufwendig und erlaubt ferner keine Differenzierung der an brandschutztechnisch ungünstigen Profilen (IPB 180 bzw. Rohrprofil 133 x 6,3) ermittelten Versuchsergebnisse. Die aufgrund der Brandversuche nach DIN 4102 erforderlichen Bekleidungsstärken sind in vielen Fällen überdimensioniert und daher unwirtschaftlich. In dem vorliegenden Bericht wird ein Prüfverfahren beschrieben, mit dem eine wirtschaftliche Bemessung der Brandschutzbekleidungen von Stahlstützen erleichtert werden kann.

### 1.1. Exkurs über das Brandverhalten von Stahlstützen

Das Verhalten von Stahlbauteilen im Brand wird vor allem durch folgende Parameter beeinflusst:

- a) Feuerbeanspruchung, dargestellt z.B. durch die Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve
- b) Art und Größe der Belastung
- c) Art und Dicke der Bekleidung
- d) Art des Stahlprofils

Das Verhalten von Stahlbauteilen im Brand wird bisher fast ausschließlich experimentell untersucht. Dabei nehmen die unter a) und b) genannten Parameter nur ganz spezielle Werte an:

Die Feuerbeanspruchung wird durch die Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102 gegeben. Wegen der Aussagefähigkeit dieser Versuche für beliebige Schadenfeuer vgl. [2]. Die Belastung entspricht der nach DIN 4114 [3] rechnerisch zulässigen. Damit liegen die zulässigen Gebrauchsspannungen fest. Wird ein Stahlbauteil infolge einer Brandbeanspruchung erwärmt, so fallen die Zugfestigkeit und die Streckgrenze ab. Werden Stähle mit der üblichen Gebrauchsspannung ausgenutzt, so erhalten bei Temperaturen über ca. 300° C Warmkriecheigenschaften eine wachsende Bedeutung. Bei der üblichen Ausnutzung der Baustähle fallen bei Temperaturen über 500° C die

Warmfestigkeit in den Bereich der Gebrauchsspannung, so daß das Bauteil versagt.

Stahlbauteile - Biegeträger und Stützen - besitzen demnach eine kritische Stahltemperatur. Diese ist jedoch keine Konstante, sondern hängt von einer Reihe von Einflußgrößen, wie der Stahlfestigkeit, der Aufwärmgeschwindigkeit, dem statischen Ausnutzungsgrad bzw. dem statischen System ab. Bei Druckgliedern ergibt sich zusätzlich eine Abhängigkeit von der Schlankheit und dem Elastizitätsmodul.

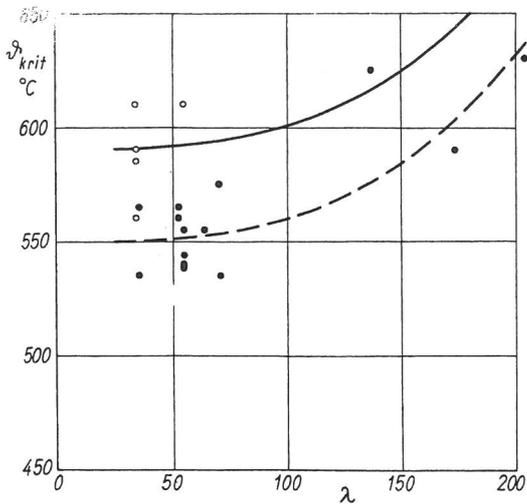
Einige Ausführungen hierüber enthält [4].

Die genaue Vorhersage der Knicktemperaturen von Stahlstützen auf theoretischem Wege aus den Stoffwerten und den idealisierten Versuchsbedingungen ist bisher nicht gelungen. Die kritische Stahltemperatur muß daher zunächst als Zielgröße einer Versuchsreihe im Stützenprüfstand angesehen werden und ihre Abhängigkeit von unabhängigen Variablen z.B. in einer Regressionsanalyse ermittelt werden.

In insgesamt 23 Stützenversuchen an mit VERMITECTA-Platten bekleideten Stahlstützen wurden vor allem Bekleidungsdicke  $D$ , Profilart (und wegen der konstanten Stützenlänge damit die Schlankheit) sowie die Belastung ( $\sigma : \sigma_{zul} = 1$ ;  $\sigma : \sigma_{zul} = 0,66$ ) variiert. Durch Zusatzuntersuchungen war die Streckgrenze des angelieferten Stahls bestimmt worden.

Frühere Betrachtungen haben gezeigt, daß die kritische Temperatur in dem durch Versuche abgesicherten Variationsbereich nicht von der Erwärmungsgeschwindigkeit des Stahls abhängt. Die Bekleidungsdicke  $D$ , die vor allen Dingen die Erwärmungsgeschwindigkeit bestimmt, scheidet daher als signifikante Variable aus. Zur Untersuchung der Abhängigkeit der kritischen Stahltemperatur von den Variablen Schlankheit  $\lambda$ , Spannungsausnutzung  $\sigma : \sigma_{zul}$  und Streckgrenze  $\sigma_{0,2}$  zu Versuchsbeginn wurde ein Regressionsprogramm mit Erfolg eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Bild 1 und Bild 2 dargestellt worden.

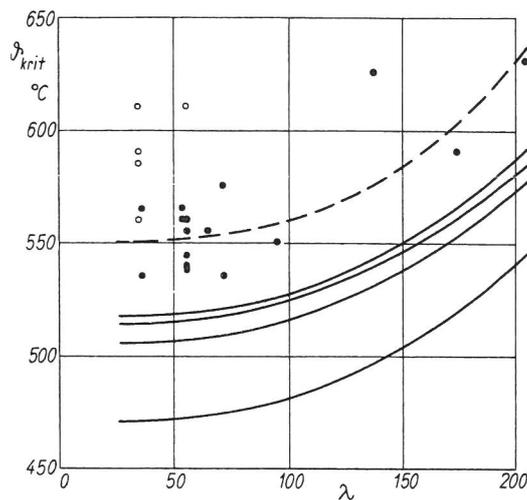
In Bild 2 sind zusätzlich einseitige Toleranzgrenzen für die kritische Stahltemperatur bei Spannungsausnutzung  $\sigma : \sigma_{zul} = 1$  berechnet worden. Von besonderer Bedeutung im vorliegenden Zusammenhang erscheint die Aussage, daß mit einer Aussagesicherheit von 95 % 95 % aller Versuche eine kritische Stahltemperatur von  $> 500^{\circ} \text{C}$  ergeben.



**Bild 1:** Kritische, d.h. zum Versagen unter Belastung führende Stahltemperatur  $\vartheta_{krit}$  bei bekleideten Stahlstützen als Funktion des Schlankheitsgrades  $\lambda$ .

Auswertung einer Stichprobe von 23 Stützenversuchen in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) mit Hilfe einer Regressionsanalyse.

- — — — Meßwerte und Schätzwertfunktion für eine Spannungsausnutzung  $\sigma : \sigma_{zul} = 1$
- — — — Meßwerte und Schätzwertfunktion für eine Spannungsausnutzung  $\sigma : \sigma_{zul} = 0,66$



**Bild 2:** Kritische Stahltemperaturen  $\vartheta_{krit}$  bekleideter Stahlstützen als Funktion des Schlankheitsgrades  $\lambda$ .

Mit Regressionsprogramm berechnete, einseitige untere Toleranzgrenzen der Schätzwertfunktion (— —) mit der Aussagesicherheit  $S$  und dem Anteil  $\gamma$  von der Gesamtheit.

- Meßwerte,  $\sigma : \sigma_{zul} = 1$
- Meßwerte,  $\sigma : \sigma_{zul} = 0,66$
- (1)  $S = 90\% \quad \gamma = 90\%$
- (2)  $S = 95\% \quad \gamma = 90\%$
- (3)  $S = 95\% \quad \gamma = 95\%$
- (4)  $S = 95\% \quad \gamma = 99,9\%$

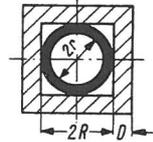
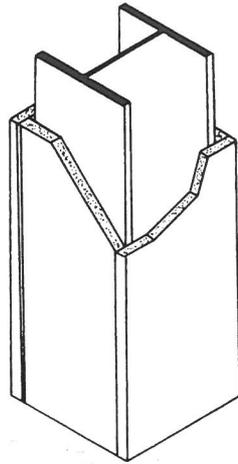
Zur Frage der kritischen Stahltemperatur bei Biegeträgern vgl. [5].

Die Feuerwiderstandsdauer von belasteten Stahlbauteilen wird also durch die Zeitdauer gegeben, nach der die Stahltemperaturen im Brandversuch für das Tragverhalten kritische Werte überschreiten.

Die Stahltemperatur-Zeit-Funktion einer Stütze wird gegeben durch die Art und die Dicke des Bekleidungs-materials. Ein weiterer sehr wichtiger Parameter ist an das Profil gebunden und darstellbar als Profilfaktor  $F/U$ . Untersuchungen (z.B. [6]) weisen nach, daß Stahlstützen durch einen einzigen Kennwert, den eben genannten Profilfaktor  $F/U$  oder dessen Kehrwert  $U/F$ , unabhängig von der Profilart - also der Profilmfamilie wie IPB- IPE- IPBv-Reihe - ausreichend beschrieben werden können. Der Profilfaktor von Stahlstützen wird nach Bild 3 berechnet. Dies bedeutet die brandschutztechnische Äquivalenz von Stahlstützen unterschiedlicher Form gemäß Bild 3, jedoch mit gleichem Profilfaktor.

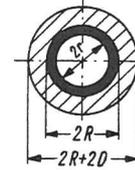
Ein Rechenverfahren zur Bestimmung der Stahlerwärmung als Funktion der Zeit ist in [7] angegeben worden.

**Bild 3:** Ermittlung von U/F für Stützen und einseitig adiabatisch gedämmte Stahlplatten mit Wärmedämmschichten konstanter Ummantlungsdicke D.



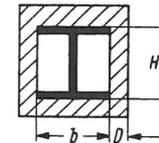
$$\frac{U}{F} = \frac{8R}{\pi(R^2 - r^2)}$$

Kastenförmige Ummantelung



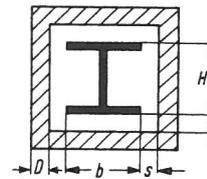
$$\frac{U}{F} = \frac{2R}{R^2 - r^2} = \frac{2R}{(R-r)(R+r)}$$

Profilfolgende Ummantelung



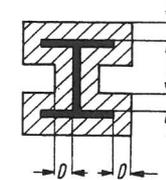
$$\frac{U}{F} = \frac{2(b+H)}{\text{Stahlquerschnitt}}$$

Kastenförmige Ummantelung



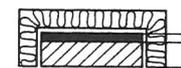
$$\frac{U}{F} = \frac{2(b+H+2s)}{\text{Stahlquerschnitt}}$$

Kastenförmige Ummantelung bei Fugenhinterlegung



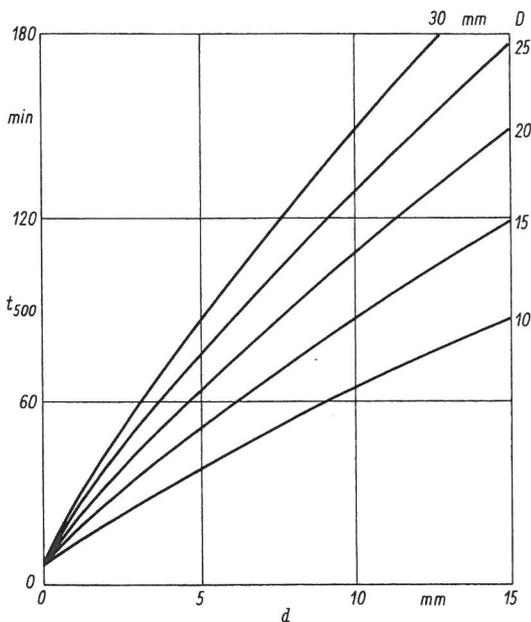
$$\frac{U}{F} = \frac{\text{Anstrichfläche}}{\text{Stahlquerschnitt} \times \text{Länge}}$$

Profilfolgende Ummantelung



$$\frac{U}{F} = \frac{1}{d}$$

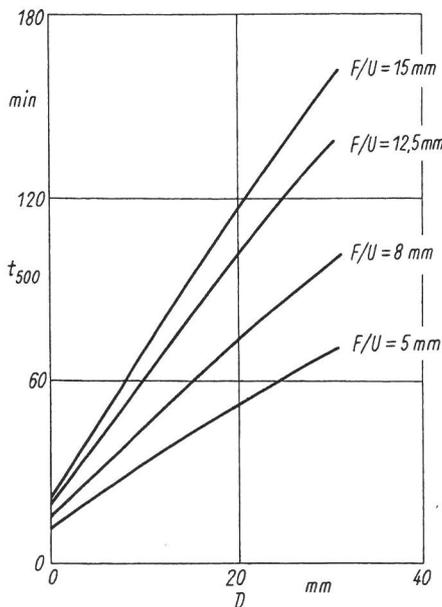
Stahlplatte



**Bild 4:** "Feuerwiderstandsdauer"  $t_{500}$  bekleideter Stahlstützen als Funktion des Profilfaktors F/U und der Bekleidungsdicke D.

Grundlage der Rechnung sind 18 Brandversuche [6]. Berechnung des Profilfaktors siehe Bild 3.

Bekleidung: kastenförmige Bekleidung aus VERMITECTA-Platten



**Bild 5:** "Feuerwiderstandsdauer"  $t_{500}$  bekleideter Stahlstützen als Funktion des Profilfaktors F/U und der Bekleidungsdicke D.

Bekleidung: kastenförmige Bekleidung aus VERMITECTA-Platten

Setzt man die Feuerwiderstandsdauer der Zeit  $t_{500}$  bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von  $500^{\circ}\text{C}$  gleich, so ergibt sich für Stahlstützen unterschiedlichen Profils mit kastenförmiger Bekleidung aus VERMITECTA-Platten die in Bild 4 dargestellte Abhängigkeit vom Profilmfaktor und der Bekleidungsstärke. Von Bedeutung für die praktische Anwendung ist, daß sich bei Darstellung der Feuerwiderstandsdauer über der Ummantelungsstärke nahezu lineare Abhängigkeiten ergeben (vgl. das durch Umzeichnen von Bild 4 zu erhaltende Bild 5).

Die beispielhaft in Bild 4 und Bild 5 dargestellten Versuchsergebnisse gelten lediglich für VERMITECTA-Platten. Jedes andere Bekleidungsmaterial, jede andere Bekleidungsart (profilfolgende Ummantelung, kastenförmige Ummantelung), ja sogar jede Befestigungstechnik können einen anderen Verlauf der dargestellten Kurven ergeben.

Für die wirtschaftliche Ausnutzung eines konkreten Bekleidungs-systems ist die Kenntnis von Kurvenscharen der dargestellten Art zwingend notwendig. Hierzu sind in der Regel eine Fülle von Einzelversuchen nach DIN 4102, Blatt 2 notwendig.

Im folgenden wird nun ein Kleinbrandprüfverfahren beschrieben, daß es gestattet, die aufwendigen Stützenversuche weitgehend zu vermeiden. Es eignet sich vor allem für die Entwicklung neuer Bekleidungs-materialien sowie für deren laufende Güteüberwachung.

## 2. Beschreibung des Gegenheizverfahrens zur Ermittlung der Stahltemperaturen von Stahlstützen

Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, eine einseitig mit dem zu untersuchenden Bekleidungs-material zu beschichtende Stahlplatte von nur 50 cm x 50 cm Kantenlänge in einem Prüfstand nach DIN 18 082, Blatt 2 [8] zu untersuchen. Die Stahlplatte ist dabei als Modell für das Stahlbauteil zu verstehen. Es handelt sich dabei nicht um ein geometrisch ähnliches Modell, wohl aber um ein hinsichtlich der Durchwärmungsvorgänge physikalisch ähnliches. Der Profilmfaktor der Stützen wird durch die Blechdicke des Stahlblechs im Kleinbrandversuch nachgebildet (vgl. Bild 3).

Das Prinzip der Gegenheizversuche für die Erprobung von Stützenbekleidungen, das von Prof. Dr.-Ing. Seekamp in Berlin entwickelt wurde, ist bereits im Jahre 1959 in [9] beschrieben worden. Das Prinzip eines derartigen Versuches kann wie folgt angegeben werden:

Da der Tragfähigkeitsverlust von Stahlstützen an eine bestimmte Stahltemperatur  $\vartheta_{St}$  gebunden ist, kann die Feuerwiderstandsdauer anhand der Durchwärmung des Stahlprofils abgeschätzt werden. Im Brandfall wird die durch Wärmedämmung in den Stahl eindringende Wärmeenergie nur in sehr geringem Maße in Längsrichtung der Stütze abgeführt. Der dadurch bei Versuchen an Stützen verursachte Wärmestau wird im Gegenheizversuch unter Beflammung einer einseitig bekleideten Stahlplatte durch eine Gegenheizung simuliert, indem nahe der unbekleideten Seite der Stahlplatte durch elektrische Heizung eine Zone mit dem Temperaturgradienten Null geschaffen wird (zwischen den Thermoelementen (3) und (6) in Bild 7). Die vom Brandraum her durch die Wärmedämmung auf die Stahlplatte gegangene Wärme kann also nicht nach außen abfließen.

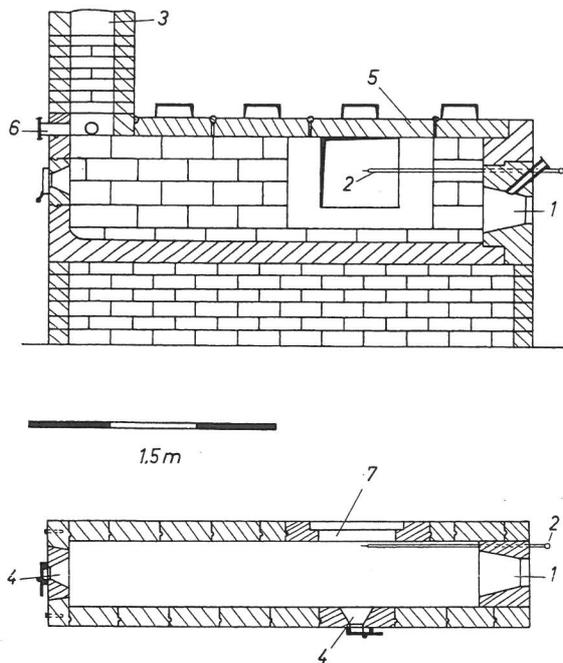
Somit ist zu erwarten, daß bei gleichen Wärmeübergangsbedingungen im Kleinbrand- wie im Großbrandversuch die Durchwärmung der jeweiligen Prüfstücke in gleicher Weise erfolgt. Durch Messung der Erwärmung der Stahlplatte im Gegenheizversuch kann also näherungsweise die Zeitdauer  $t_g$  bestimmt werden, nach welcher der Stahl einer Stütze eine Temperatur  $\vartheta$  erreichen würde.

#### 2.1. Versuchsanordnung eines Kleinbrandversuches mit Gegenheizung-----

Zur Ausführung eines Kleinbrandversuches mit Gegenheizung sind ein Prüfstand zur Erzeugung der Feuerbeanspruchung, das Gegenheizgerät sowie Einrichtungen zur Temperaturmessung und Steuerung der Gegenheizung notwendig.

Als Prüfstand wird die Versuchseinrichtung nach DIN 18 082, Blatt 2 (1969) [8] verwendet, also im wesentlichen ein waagrecht angeordneter Kanal aus feuerfesten Steinen mit lichten Abmessungen von etwa 0,4 m x 0,6 m x 2,45 m. Er wird beheizt mit einem in der Achse des Kanals wirkenden automatisch regelbaren Ölbrenner [2], so daß die Flammen nicht unmittelbar auf die in die seitliche Prüföffnung eingebauten Prüfstücke gerichtet sind. Die seitliche Öffnung zur Aufnahme der Prüfstücke und des Gegenheizgerätes hat Abmessungen von 0,45 m x 0,45 m.

Die Brandraumtemperaturen werden in 10 cm Abstand von der dem Brandraum zugewandten Seite des Prüfstücks mit einem Brandraumthermoelement gemessen und automatisch nach der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102, Blatt 2 (1970) [1] gesteuert. Einige Einzelheiten der Ofenkonstruktion sind in Bild 6 zusammengefaßt.



- 1 Brenneröffnung bzw. Ölbrenner
- 2 Thermoelement
- 3 Rauchabzug
- 4 Schaulöcher
- 5 bewegliche Deckenelemente  
(Ersatz durch Prüfstücke möglich)
- 6 Stützen für Gasanalyse und  
Druckmessung
- 7 Prüföffnung

**Bild 6:** Kleinprüfstand der Bundesanstalt für  
Materialprüfung (BAM), Berlin

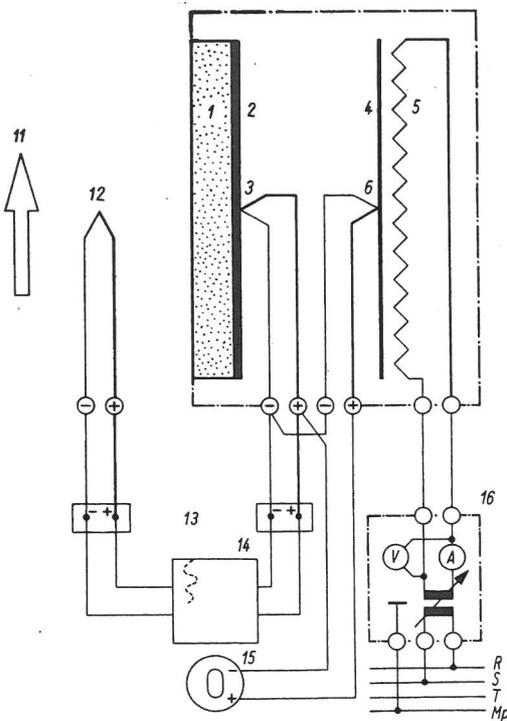
Die zu untersuchende Wärmedämmschicht - Schaumschicht- bildner, Putz- oder Plattenwerkstoff - wird auf eine quadratische Stahlplatte von 0,5 m Kantenlänge der Dicke  $d$  aufgebracht. Schema und Ansicht des verwendeten Gegenheizgerätes sind in Bild 7 dargestellt. Weitere konstruktive Einzelheiten sind in [10] beschrieben.

Hinweis: Die damals beschriebene Gerätefrontplatte ist bei der hier beschriebenen Versuchseinrichtung entfernt worden. Auf diese Weise wird die Bestimmung der Stahltemperatur des Prüfstücks verbessert. Der "Profilfaktor" gemäß Bild 3 wird nunmehr allein durch die Dicke  $d$  der Stahlplatte des Prüfstücks bestimmt.

## 2.2. Einige Angaben zur Meß- und Steuergenauigkeit des Gegenheizversuches

Der in den Prüfstand eingebaute Ölbrenner erlaubt automatisch die Steuerung der vorgegebenen Einheits- temperaturkurve in Verbindung mit der Meß- und Regel- einrichtung der Bundesanstalt für Materialprüfung (vgl. [2]). Die Regeleinrichtung erlaubt es, die vorgegebene Brandraumtemperaturkurve mit einer Abweichung von  $\pm 5$  grad vom Sollwert (kurzzeitig, d.h. für Zeiten  $< ca. 10$  sec.  $\pm 30$  grad) automatisch zu steuern.

**Bild 7:** Schema eines Gegenheizversuches und Ansicht des Gegenheizgerätes



- (1)(2) Prüfstück (Stahlplatte mit Dämmschicht),  
 (3) Thermoelement zur Messung der Stahltemperatur,  
 (4) Gegenheizplatte, (5) Rohrheizkörper,  
 (6) Thermoelement zur Messung der Gegenheiztemperatur,  
 (7) Deckel des Gerätes, (8) Wärmedämmung,  
 (9) Anschlußklemme, (10) Gehäuse,  
 (11) Richtung der Beflammung im Brandraum,  
 (12) Brandraumthermoelement, (13) Vergleichsstelle,  
 (14) Meßwertdrucker, (15) Nullgalvanometer,  
 (16) Stelltransformator

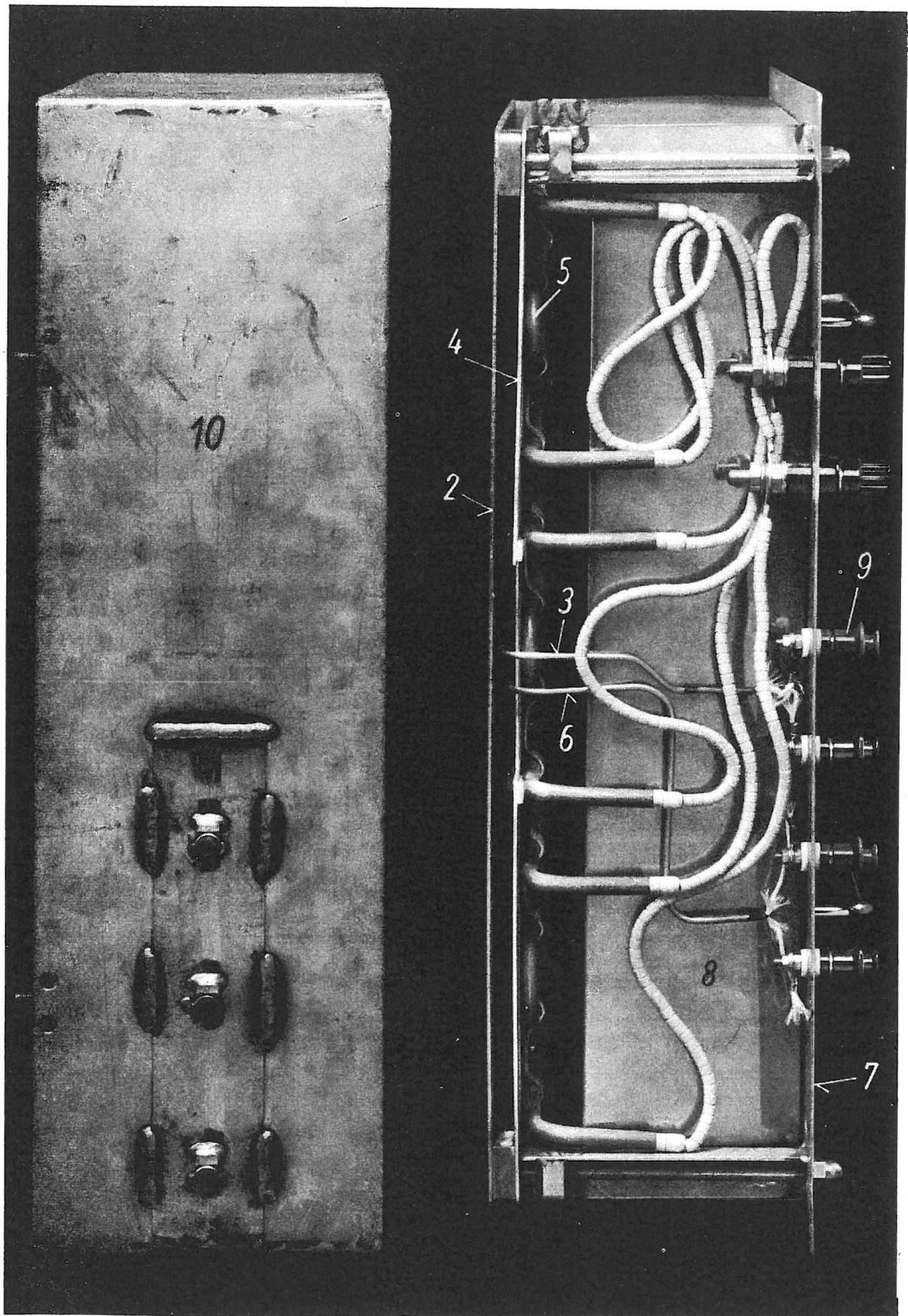
Die Temperaturdifferenzen im Gegenheizgerät zwischen der Stahlplattentemperatur und der Temperatur der Gegenheizplatte (vgl. Bild 7) sind ebenfalls  $< 5$  grd.

Die Versuchsergebnisse bei wiederholten Prüfungen möglichst identischer Prüfstücke unterliegen statistischen Streuungen. Der Wiederholstrebereich für Versuchszeiten  $t_s$  bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von  $\vartheta$  ist durch eine Standardabweichung zwischen 1 und 2 Minuten zu kennzeichnen. Aufgrund unvermeidlicher Toleranzen bei der Herstellung der Bekleidungs-materialien ergeben sich in der Regel Standardabweichungen bei den Versuchswerten von ca. 3 min (vgl. [2]).

Zur Abschätzung der Wärmeströme in Richtung der Stahlplatten ist die Temperaturverteilung auf einer  $d = 15$  mm dicken unbedeckten Stahlplatte bestimmt worden. Wegen Schwierigkeiten bei der Leitungsführung der Thermo-elemente war diese Platte jedoch nicht in ein Gegenheizgerät eingesetzt. Die nichtbeflammte Oberfläche der Stahlplatte war nicht wärmedämmend. Die bei diesem Versuch bei  $t = 30$  min gemessenen Temperaturen sind in Bild 8 maßstäblich eingetragen. Man erkennt, daß in der Umgebung der Meßstelle für die Stahltemperatur  $\vartheta_{St}$  in Plattenmitte ein ausreichend großer Bereich keinen merklichen Temperaturgradienten aufweist. Es kann daher angenommen werden, daß Wärmestromdichten in Richtung der Platten in der Umgebung der Stahltemperaturmeßstelle vernachlässigbar klein sind.

### 3. Überprüfung der Aussagefähigkeit von Gegenheizversuchen für die Durchwärmung von bekleideten Stahlstützen

Zur Überprüfung der Aussagefähigkeit von Gegenheizversuchen für die Durchwärmung und damit für die Feuerwiderstandsdauer von bekleideten Stahlstützen wurden im Stützenprüfstand der Bundesanstalt für Materialprüfung und deren Kleinprüfstand jeweils eine Serie von Brandversuchen an mit VERMITECTA-Platten bekleideten Stahlstützen bzw. -platten ausgeführt. Bei den jeweils 16 Brandversuchen wurde der



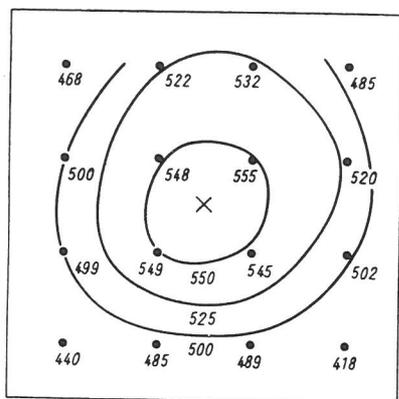


Bild 8: Temperaturverteilung in der 31. Versuchsminute auf einer allseitig unbedeckten 15 mm dicken Stahlplatte in der Prüföffnung des Kleinprüfstandes nach Bild 6

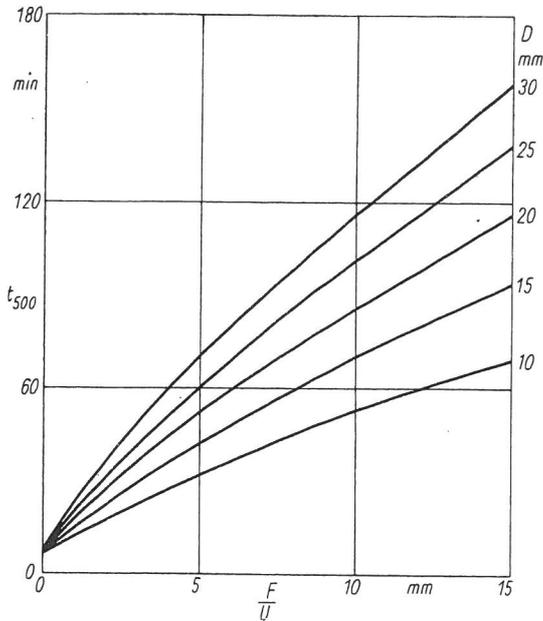
F/U-Wert, die Bekleidungsdicke  $D$  bei den Stützen bzw. die Stahlblechdicke  $d$  und die Bekleidungsdicke  $D$  bei den im Kleinprüfstand untersuchten Platten variiert und jeweils die Zeit  $t_{500}$  bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von  $500^{\circ}\text{C}$  ermittelt. Unglücklicherweise entstammen die verwendeten Bekleidungsmaterialien zwei unterschiedlichen Lieferungen.

Die Versuchsergebnisse sind in Tafel 1 zusammengestellt. Die Versuchsergebnisse an den Stützen sind mit Hilfe des Rechenprogramms aus [7] ausgewertet worden. Die berechneten Mittelwerte sind in Bild 1, die entsprechenden Werte für die Gegenheizversuche sind in Bild 9 dargestellt.

Gegenheizversuche					Stützenversuche				
Kurzzeichen	d mm	DK mm	Lieferung	$t_{500}, \text{K}$ min	Kurzzeichen	F/U mm	$D_S$ mm	Lieferung	$t_{500}, \text{S}$ min
18	15	20	1	154	A 1	14,64	20	1	105
3	8	20	1	86	A 3	7,68	20	1	69
25	12	15	2	100	A 4	9,07	15	2	63
2	10	20	1	114	A 5	9,07	20	1	76
6	10	25	1	138	A 6	9,07	25	1	93
5	12	25	1	152	A 8	11,70	25	1	115
V	3	20	2	48	A 10	3,62	20	2	44
VI	4	20	2	55,5	A 11	3,59	20	2	43
19	5	20	2	55,5	A 13	5,43	20	2	68
20	6	20	2	72	A 14	6,39	20	2	67
23	8	20	2	91	A 15	7,28	20	2	76
22	8	15	2	80	B 1	9,07	15	2	63
9	15	15	1	117,5	B 2	14,14	15	1	98
4	12	15	1	100	B 3	14,14	15	1	95
10	15	25	1	166	B 4	14,14	25	1	133
21	12	20	2	141	B 5	14,14	20	2	106

Tabelle 1: Ausgeführte Brandversuche an Stützen (vgl. [6]) und Stahlplatten, bekleidet mit VERMITECTA-Platten, Versuchsergebnisse

**Bild 9:** "Feuerwiderstandsdauer"  $t_{500}$  bekleideter Stahlplatten im Kleinprüfstand  $t_{500}$  als Funktion des "Profilfaktors"  $d$  und der Bekleidungsdicke  $D$ , ermittelt aufgrund von 16 Gegenheizversuchen nach Tafel 1 (vgl. Bild 4)



Man erkennt aus den Bildern zunächst einen qualitativ gleichartigen Verlauf der Funktionen  $t_{500} = f(F/U, D)$  und  $t_{500} = f(d, D)$ . Dabei bedeuten  $D$  die Dicke des Bekleidungsmaterials und  $d$  die Dicke der Stahlplatte.

Dies unterstreicht die Erwartung, daß eine Stahlstütze mit dem Profilfaktor  $F/U$  durch ein Stahlblech der Dicke  $d = F/U$  (vgl. Bild 3) modellgetreu nachgebildet werden kann.

Eine detaillierte Analyse der Versuchsergebnisse zeigt jedoch deutliche Unterschiede zwischen Stützen und Platten mit gleichem Profilfaktor, also  $d = F/U$ , und gleich dicker Bekleidung.

Gründe hierfür könnten Wärmeströme in Richtung der Stützen oder Platten sein. Wahrscheinlicher ist jedoch die Annahme, daß die Feuerbeanspruchungen in beiden Prüfständen auch bei gleichgesteuerten Temperaturkurven unterschiedlich ausfallen. Es ist bekannt, daß (z.B. [2]) trotz gleich gesteuerter Brandraumtemperaturkurven die Feuerbeanspruchung gleichartiger Bauteile in verschiedenen Prüfständen unterschiedlich sein kann.

Mit Hilfe eines in der BAM erstellten ALGOL-Programms für die mehrfache Regressionsrechnung mit Signifikanztest der einzelnen unabhängigen Variablen, wurde ein Nomogramm zur Umrechnung der Ergebnisse der Kleinprüfstände auf die Ergebnisse des Stützenprüfstandes bei der vorgegebenen VERMITECTA-Bekleidung aufgestellt. Ausgangswerte für die Rechnung waren die aus 16 Kleinbrandversuchen und 16 Stützenversuchen gewonnenen 256 Datensatzkombinationen der Art  $t_{500, s} = f(t_{500, k}, \frac{F/U}{d}, \frac{D_s}{D_k})$ . Hierbei bedeutet  $t_{500, s}$  die Zeit, bis zu der eine Stahltemperatur von  $500^\circ\text{C}$  im Stützen-

prüfstand S erreicht wird,  $t_{500, K}$  die Zeit, bis zu der eine Stahlplattentemperatur im Kleinprüfstand K von  $500^{\circ} \text{C}$  erreicht wird,  $F/U$  der  $F/U$ -Wert der Stütze,  $d$  den  $F/U$ -Wert nach Bild 3 der Platte im Kleinprüfstand,  $D_S$  die Dicke der Bekleidung im Stützenprüfstand und  $D_K$  die Dicke der Bekleidung im Kleinprüfstand. Während  $t_{500, S}$  als Zielgröße (abhängige Variable) anzusehen ist, bilden die drei anderen Größen die Einflußgrößen (unabhängige Variable). Das mit der Rechnung aufgestellte Nomogramm, das in Bild 10 darge-

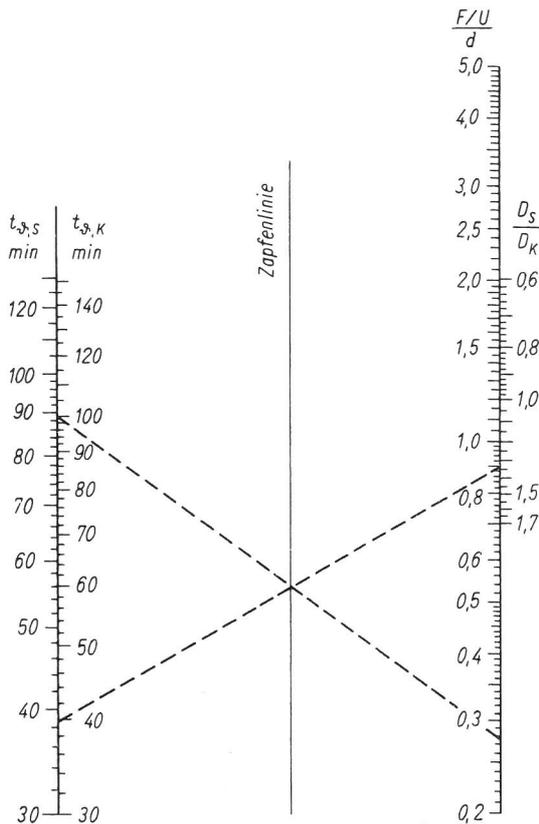


Bild 10: Nomogramm, ermittelt aus je 16 Brandversuchen an Stützen und Platten mit Bekleidungen aus VERMITECTA-Platten zur Ermittlung der Zeiten  $t_{500, S}$  von Stützen aufgrund von Gegenheizversuchen im Kleinprüfstand.

Erläuterung des Ablesebeispiels:

Gegeben sei das Ergebnis eines Gegenheizversuches an einer Stahlplatte:

$D_K = 15 \text{ mm}$ ,  $d = 12 \text{ mm}$ ,  $t_{500, K} = 100 \text{ min}$ .

Vorherzusagen ist das Ergebnis eines Stützenversuches an einer Stütze mit  $F/U = 3$ , und  $D_S = 20$ .  $F/U = 3$  und  $D_S = 20$ .  
Dann sind  $\frac{F/U}{d} = 0,275$  und  $D_S/D_K = 1,33$ .

Es werden gradlinig verbunden:

1.  $\frac{F/U}{d}$  mit  $t_{500, K}$  und
2.  $D_S/D_K$  mit dem Schnittpunkt der ersten Geraden mit der Zapfenlinie. Ablesung für  $t_{500, S}$ : 39 min

stellt ist, gestattet die Voraussage von Stützenversuchen beliebigen Stahlquerschnitts und beliebiger Bekleidungsstärke aufgrund von Kleinbrandversuchen beliebiger Stahlplattendicke und beliebiger Bekleidungsstärke. Die vorliegende Relation gilt für die Versuche an VERMITECTA-Platten. Ein sehr ähnliches Nomogramm erhält man für andere Stahltemperaturen  $\vartheta$  als  $\vartheta = 500^{\circ} \text{C}$ .

Aufgrund des gefundenen und in Bild 10 dargestellten Nomogramms ist es nunmehr möglich, das Verhalten von beliebigen Stahlstützen, bekleidet mit VERMITECTA-Platten unterschiedlicher Dicke  $D$ , mit großer Genauigkeit aus Kleinbrandversuchen vorherzusagen.

Die Gültigkeit des angegebenen Nomogramms für andere Bekleidungsmaterialien als den zunächst untersuchten wird in Tafel 2 überprüft:

Dargestellt sind die Ergebnisse von Paaren von Gegenheiz-

Zeile	Spalte Beklei- dung	Gegenheizversuch an Stahlplatte				Stahlstütze							Fehler der Vor- hersage $\Delta t_{\vartheta} =$ $t_{\vartheta, V} - t_{\vartheta, S}$
		mit		Versuchsergebnis		deren Erwärmung be- stimmt werden soll			dafür	sind	Ableseung	Ergebnis eines	
		$D_K$	d	für $\vartheta$	$t_{\vartheta, K}$	Profil	F/U	$D_S$	$\frac{F/U}{d}$	$\frac{D_S}{D_K}$	Nomogramm $t_{\vartheta, S}$	Kontrollversuchs $t_{\vartheta, V}$	
1	Asbest- zement- Bau- platten kasten- förmig	27	5	400	93	IPB 160	7,55	27	1,50	1,00	98	89	- 9
2		27	8	400	125	IPB 160	7,55	27	0,94	1,00	92	89	- 3
3		27	5	400	93	IPB 180	7,76	25	1,56	0,93	96	89	- 7
4		27	8	400	125	IPB 180	7,76	25	0,97	0,93	89	89	0
5		27	5	350	80	Rohr 159x12	8,72	25	1,57	0,93	90	87	- 3
6		27	8	350	108	Rohr 159x12	8,72	25	1,09	0,93	86	87	+ 1
7		27	5	400	93	Rohr MSH	4,23	25	0,85	0,93	61	60	- 1
8		27	8	400	125	Rohr MSH	4,23	25	0,53	0,93	59	60	+ 1
9		12	24	400	117	Vierkant 200x200	50,00	12	2,08	1,00	≈ 147	143	≈ - 4
10		15	10	400	82	IPB 160	7,55	27	0,76	1,80	80	89	+ 9
11		15	10	400	82	IPB 180	7,76	25	0,78	1,67	79	89	+ 10
12		15	10	400	82	Rohr MSH	4,23	25	0,42	1,67	51	60	+ 9
13	Spritz- asbeste profil- folgend	25	5	500	105	IPB 180	6,30	25	1,26	1,00	97	90	- 7
14		25	8	500	135	IPB 180	6,30	25	0,79	1,00	87	90	+ 3
15		30	5	400	86	Rohr 133x6,3	6,00	30	1,20	1,00	77	72	- 5
16	Mine- ralfa- ser- matte kasten- förmig	30	8	400	115	IPB 180	9,10	30	1,14	1,00	97	94	- 3
17		30	8	500	135	IPB 180	9,10	30	1,14	1,00	113	114	+ 1
18		50	8	400	153	IPB 180	9,10	30	1,14	0,60	94	94	0
19		50	8	500	176	IPB 180	9,10	30	1,14	0,60	≈ 108	114	+ 6
20	Iso- lier- putz profil- folgend	30	5	500	78	IPE 400	5,75	30	1,15	1,00	69	80	+ 11
21		30	8	500	104	IPE 400	5,75	30	0,72	1,00	65	80	+ 15
22	Dämm- schicht- bilden- de An- striche	-	5	500	31	IPB 180	6,30	-	1,26	1,00	32	33	- 1
23		-	5	500	32	Rohr 133x6,3	6,00	-	1,20	1,00	31	31	0
24		-	5	500	32	Rohr 219x18	16,60	-	3,32	1,00	65	49	- 16

Tafel 2: Überprüfung der Aussagegenauigkeit des in Bild 10 dargestellten Nomogramms für andere Bekleidungs-systeme

versuchen und Stützenversuchen. Aus den Ergebnissen (Spalte 3 und 4) der in den Spalten 1 und 2 bezeichneten Stahlplatten ist für die in den Spalten 5, 6 und 7 angegebenen Stahlstützen in Spalte 10 die aus dem Nomogramm abzulesende Versuchszeit  $t_{\vartheta, N}$ , die zur in Spalte 3 angegebenen Stahltemperatur bei der Stütze führt, angegeben. Die für das Versuchspaar Stahlplatte - Stahlstütze geltenden Werte  $\frac{F/U}{d}$  und  $D_S/D_K$  sind in Spalte 8 und 9 angegeben. Die aus dem Nomogramm aufgrund der Gegenheizversuche zu entnehmenden Versuchszeiten sind in Brandversuchen an den in Spalte 5, 6 und 7 angegebenen Stahlstützen jeweils überprüft worden. Die Ergebnisse dieser Kontrollversuche sind in Spalte 11 zusammengestellt. Die sich aus Spalte 10 und 11 ergebenden Fehler bei der Vorhersage des Stützenversuchsergebnisses durch das Nomogramm sind schließlich in Spalte 12 angegeben.

Die größte Zahl von Versuchspaaren, bestehend jeweils aus

Gegenheizversuch und Brandversuch an Stahlstützen, betreffen Bekleidungen aus Asbestzement-Bauplatten, die bei Stützen eine kastenförmige Bekleidung ergeben. Ausgewertet werden (zunächst aus Mangel an anderen Versuchsergebnissen) Werte für die Stahltemperatur von  $\vartheta = 350^{\circ} \text{C}$  und  $\vartheta = 400^{\circ} \text{C}$ . Auf diese Weise ist das linke in Bild 10 sichtbare Leiternpaar auf beliebige Stahltemperaturen (ungleich  $500^{\circ} \text{C}$ ) verallgemeinert worden. In der ersten Gruppe von Versuchspaaren (Zeile 1 bis 9) sind Vorhersagemöglichkeiten der Gegenheizversuche für Stahlstützen sehr unterschiedlichen Profils überprüft worden. Die Liste enthält Profile der IPB-Reihe, Rohre mit kreisförmigem und quadratischem Querschnitt sowie einen massiven Vierkantstahl mit 200 mm Kantenlänge. Entsprechend variieren die  $\frac{F}{U}$ -Werte zwischen 0,53 und 2,08. Das Verhältnis der Bekleidungsstärken  $D_S/D_K$  liegt in allen Fällen nahe bei 1. Spalte 12 zeigt für diese Gruppe von Versuchspaaren überraschend geringe Fehler in der Vorhersage. Sie liegen zwischen - 9 min und + 1 min und können vermutlich neben statistischen Schwankungen vor allem mit Eigenschaftsschwankungen bei der Herstellung der Asbestzementbauplatten gedeutet werden. Die Genauigkeit der Vorhersage der Stützenversuche aus Kleinbrandversuchsergebnissen für den Fall gleicher Bekleidungsstärken ( $D_S/D_K = 1$ ) unterstreichen weiterhin die Zeilen 13 bis 17 sowie 22, 23.

Bei der Vorhersage des Verhaltens einer Stahlstütze mit gegenüber dem Gegenheizversuch unterschiedlicher Bekleidungsstärke ( $D_S/D_K \neq 1$ ) ist zu beachten, daß jedes Material typische Abhängigkeiten der Feuerwiderstandsdauer von der Bekleidungsstärke  $D$  zeigt. So ist der in Bild 5 dargestellte Verlauf  $t_{500} = f(D)$  eben nur für VERMITECTA-Platten gültig. Andere Dämmmaterialien zeigen mitunter davon abweichende Kurvenverläufe (z.B. unterschiedliche Krümmungen der Kurve). Unter diesem Blickwinkel überrascht es nicht, wenn in den Zeilen 10 bis 12 bei der Vorhersage des Verhaltens von Stützen mit ca. 25 mm dicker Bekleidung aus Gegenheizversuchen mit nur 15 mm dicker Bekleidung größere Fehler beobachtet werden. Die im Nomogramm rechts stehende Leiter  $D_S/D_K$  hat eben vor allem nur für VERMITECTA-Platten Gültigkeit. Die Zeilen 18 und 19 zeigen jedoch, daß es durchaus Bekleidungsmaterialien gibt, bei denen eine Vorhersage auch bei Transformation der Bekleidungsstärke ausreichend genau ist.

Unerwartet große Fehler bei der Vorhersage der Stahlstützen-ergebnisse aus dem Nomogramm ergeben sich in den Zeilen 20 und 21 für einen speziellen Isolierputz. Diese Unterschiede können aus den Versuchsergebnissen nicht gedeutet werden. Es muß angenommen werden, daß der Putz auf die Stahlplatten mit einer anderen Rohdichte aufgebracht wurde als auf die Stützen, so daß Gegenheizversuchsergebnis und Versuchsergebnis an der Stahlstütze nicht mehr vergleichbar sind.

Besonders hingewiesen sei noch auf Zeile 24. Dabei ist der Versuch gemacht worden, aus dem Ergebnis eines Gegenheizversuches an einer nur 5 mm dicken Stahlplatte, beschichtet mit einem Dämmschichtbildner, das Verhalten einer Stahlstütze mit  $F/U = 16,6$  mm vorherzusagen. Der beobachtete große Fehler in der Vorhersage kann wie folgt gedeutet werden: Zeichnet man ein dem Bild 4 entsprechendes Diagramm für Dämmschichtbildner (vgl. [11]), so ergibt sich ein grundsätzlich anderer Verlauf. Die Kurven sind stark gekrümmt. Es ergibt sich hieraus ein entsprechender Fall, wie er bereits bei der Variation der Bekleidungsdicke angegeben wurde. Das für VERMITECTA-Platten typische Verhalten ist somit auf Dämmschichtbildner nicht übertragbar. Bei der Vorhersage des Verhaltens von mit Dämmschichtbildnern geschützten Stahlstützen aus den Ergebnissen eines Gegenheizversuches muß also grundsätzlich darauf geachtet werden, daß einerseits  $\frac{F/U}{d} \approx 1$  und andererseits die Auftragsmengen als Maß für die Bekleidungsstärken jeweils gleiche Werte annehmen.

Das Ergebnis der mit Tafel 2 vorgenommenen Überprüfung des in Bild 10 dargestellten Nomogramms ergibt somit:

Das für VERMITECTA-Platten mit Hilfe einer Regressionsanalyse aufgestellte Nomogramm hat Gültigkeit auch für andere Bekleidungsmaterialien. Es erlaubt auch für von VERMITECTA-Platten verschiedene Bekleidungsprofile eine ausreichend genaue Vorhersage von Stahlstützen beliebigen Profils (Ausnahme: dämmschichtbildende Anstriche). Bei veränderter Bekleidungsstärke  $D$  der Stützen gegenüber dem Gegenheizversuch ist ohne weitere Prüfung in einigen Fällen die Genauigkeit nur gering.

In den Ergebnissen der Zeilen 20 und 21 werden Grenzen des Verfahrens erkennbar. Immer dann, wenn die Bekleidung einer Stahlplatte nach anderen Herstellungstechniken erfolgt, als sie bei der Stütze gegeben ist, ist die Gleichartigkeit der Bekleidungen im Gegenheizversuch und an der Stahlstütze nicht hinreichend sicher. Die in Tafel 2 herausgegriffenen Beispiele zeigen, daß das in Bild 10 dargestellte Nomogramm auch für andere Stahltemperaturen als  $500^{\circ}$  C mit unverminderter Genauigkeit gültig ist.

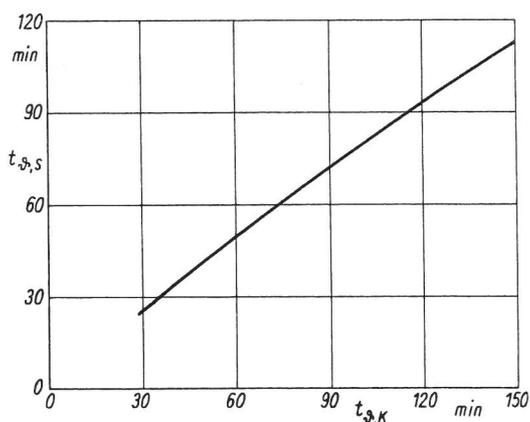
Das Ergebnis der mit Tafel 2 vorgenommenen Überprüfung des Gegenheizverfahrens muß insgesamt überraschen. Das für VERMITECTA-Platten aufgestellte Nomogramm erweist sich als anwendbar für die verschiedensten Bekleidungsmaterialien, für weitgehend alle Profile von Stahlstützen in weiten Bereichen der Bekleidungsstärke und unabhängig von der jeweiligen Stahltemperatur. Alle konkreten Eigenschaften des speziellen Bekleidungsprofils sind also aus dem Nomogramm herausgefallen, mit anderen Worten: Das Nomogramm ist von dem speziellen Bauteil unabhängig. Hier für ist nur eine Erklärung möglich:

Die Relation zwischen den Ergebnissen von Gegenheizversuchen und Stützenversuchen ergeben sich aus den Eigenschaften der beiden verwendeten Prüfstände und deren Beflammung.

Stützen mit dem Profilfaktor  $F/U$  und Stahlplatten der Dicke  $d$  sind nach den Erwartungen in Bild 3 brandschutztechnisch äquivalent, wenn  $F/U = d$  ist. Zusätzlich ist natürlich  $D_S = D_K$  einzustellen. Derartige "brandschutztechnisch äquivalente Bauteile" besitzen nur deshalb unterschiedliche Versuchszeiten  $t_{\vartheta}$ , weil die Eigenschaften der Prüfstände und der Beflammung unterschiedlich sind. Brandschutztechnisch äquivalente Bauteile im Stützenprüfstand und im Kleinprüfstand erleiden trotz gleich gesteuerter Brandraumtemperatur-Zeit-Kurven jeweils unterschiedliche Feuerbeanspruchungen. Jeweils gleiche Feuerbeanspruchung erleiden brandschutztechnisch äquivalente Bauteile in beiden Prüfständen zu unterschiedlichen Zeiten.

Diejenigen Versuchszeiten, die bei brandschutztechnisch äquivalenten Bauteilen jeweils zur gleichen, durch die Stahltemperatur  $\vartheta$  gekennzeichneten Feuerbeanspruchung führen, sind in Bild 11 dargestellt. Die auf diese Weise jeweils zusammengehörenden Versuchszeiten  $t_{\vartheta, K}$  und  $t_{\vartheta, S}$  sind in [2] "äquivalente Brenndauern" genannt worden.

Bild 11: Äquivalente Versuchsdauern im Stützenprüfstand und Kleinprüfstand. Ein Paar von Versuchszeiten  $t_K$  und  $t_S$  führen bei brandschutztechnisch äquivalenten Bauteilen zu gleichen Feuerbeanspruchungen, also zur gleichen Stahltemperatur  $\vartheta_S = \vartheta_K$



4. Ermittlung der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" für den Kleinprüfstand

Die im Abschnitt 3 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, daß brandschutztechnisch äquivalente Bauteile in verschiedenen Prüfständen bei gleich gesteuerter Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve nicht zwangsläufig eine gleiche Feuerbeanspruchung erfahren. Die Definition des Normbrandes durch die Einheits-temperatur-Kurve ist also, wie ausführlich erläutert in [2], nicht hinreichend, solange nicht gleichzeitig alle Einzelheiten der Konstruktion und der Eigenschaften der Prüfstände einschl. der Brenner und die Temperaturmeßeinrichtungen beschrieben und festgelegt sind.

In dem folgenden Abschnitt soll versucht werden, die Unterschiede in den thermischen Eigenschaften zwischen dem Stützenprüfstand und dem Kleinprüfstand durch Veränderung der Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve des Kleinprüfstandes auszugleichen. Die damit zu bestimmende "korrigierte Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve", die notwendigerweise von der Einheitstemperaturkurve verschieden ist, soll so bestimmt werden, daß die Versuchsergebnisse an brandschutztechnisch äquivalenten Bauteilen in beiden Prüfständen gleichartig ausfallen, daß also  $t_{\vartheta, K} = t_{\vartheta, S}$  ist.

Stahltemperatur  $\vartheta$  und Brandraumtemperatur  $\vartheta_{Br}$  stehen für ein bekleidetes Stahlbauteil in funktionalem Zusammenhang:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\lambda'}{D} \cdot \frac{1}{c\varrho} \cdot \frac{U}{F} (\vartheta_{Br} - \vartheta)$$

Einzelheiten hierzu sind in [2,7] erläutert. Die Rechengröße  $\lambda'$  kennzeichnet dabei nicht nur die Eigenschaft der Bekleidung, sondern auch die der Beflammung und des Brandraumes. Sie ist für jeden Prüfstand, z.B. durch Auswertung von Normbrandversuchen bestimmbar und kann daher für ein konkretes Bekleidungsmaterial als bekannt angenommen werden.

Die bei den Brandversuchen mit der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" zu erzielende Stahltemperatur-Zeit-Kurve  $\vartheta(t)$  ist durch den Normbrandversuch im Stützenprüfstand vorgegeben. Die angegebene Gleichung wird damit zur Bestimmungsgleichung für die gesuchte "korrigierte Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve"  $\vartheta_{Br}$ . Da die Rechengröße  $\lambda'$  ebenfalls von  $\vartheta_{Br}$  abhängt, kann die Gleichung nur durch ITERATION gelöst werden. Die Rechnung geht zweckmäßig von der durch Umstellen der Gleichung zu erhaltenden Gleichung aus:

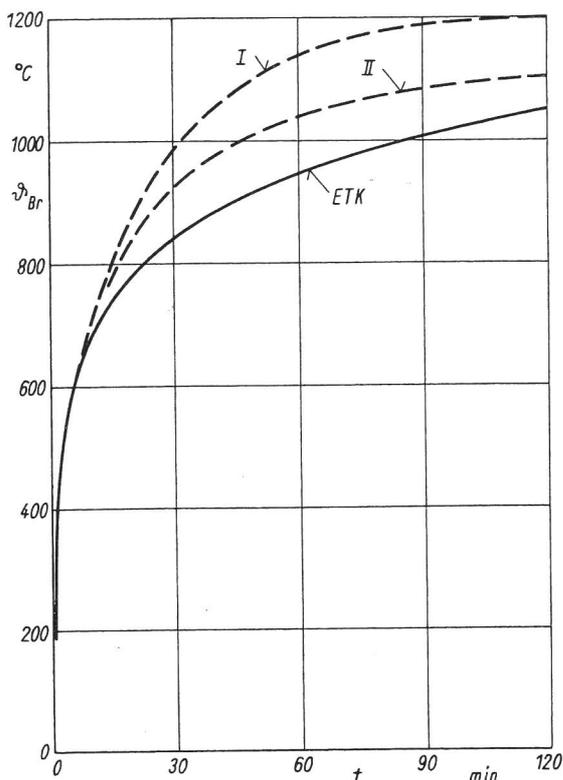
$$\vartheta_{Br} - \vartheta - \frac{D}{\lambda'} \cdot \frac{F}{U} \cdot c\varrho \cdot \frac{d\vartheta}{dt} = 0$$

Die Nullstelle dieser Gleichung wird für jeweils verschiedene Zeitpunkte  $t$  mit dem REGULA-FALSI-Verfahren bestimmt. Nach dem gegebenen Verfahren kann die "korrigierte Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" nur näherungsweise bestimmt werden. Im Gegensatz zu der Annahme in der Rechnung, in der  $\lambda'$  lediglich als Funktion von  $\frac{1}{2}(\vartheta_{Br} + \vartheta)$  angesehen wird, ist es in Wirklichkeit eine komplizierte Funktion von Brandraumtemperatur  $\vartheta_{Br}$ , Stahltemperatur  $\vartheta$  und der Zeit  $t$ . Im folgenden werden die Ergebnisse einer Näherungsrechnung zur Bestimmung der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" beschrieben:

Aus den in Tafel 1 genannten 16 Kleinbrandversuchen, bei denen die Einheitstemperaturkurve gesteuert wurde, wird die  $\lambda'$ -Funktion für VERMITECTA-Platten im Kleinprüfstand bestimmt. Diese  $\lambda'$ -Funktion enthält kennzeichnende Größen für die Feu-

erbeanspruchung im Kleinprüfstand. Aus den 16 Stützenversuchen nach Tafel 1 ist die mittlere Stahltemperatur-Zeit-Kurve einer Stahlstütze vorgegebenen Profils berechnet worden. Diese Stahltemperatur-Zeit-Kurve der Stütze ist die gewünschte Soll-Temperatur-Zeit-Kurve für die brandschutztechnisch äquivalente Stahlplatte im Kleinprüfstand. Die unter Verwendung der  $\lambda'$ -Funktion und der Stahltemperatur-Zeit-Funktion nach der o.a. Gleichung zu berechnende Brandraumtemperatur-Kurve

Bild 12: Ermittlung und Darstellung der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve". Erläuterungen im Text.



(im folgenden bezeichnet als Kurve I) ist in Bild 12 zusammen mit der Einheitstemperaturkurve dargestellt. Die Brandraumtemperaturen, die bei brandschutztechnisch äquivalenten Bauteilen im Kleinprüfstand zu steuern sind, sind zu jedem Zeitpunkt höher als die entsprechenden Werte der Einheitstemperaturkurve. Dieser Verlauf ist qualitativ bereits aus Bild 11 zu erwarten gewesen.

Zur Überprüfung der Kurve I sind Kleinbrandversuche, bei denen die angegebene Kurve gesteuert wurde, ausgeführt worden. Diese stichprobenartige Überprüfung (Stichprobenumfang  $n = 8$  Versuche) zeigte, daß im Mittel die Stahltemperaturen der Platten höher als diejenigen der brandschutztechnisch äquivalenten Stützen ausfielen. Das Ziel, im Kleinprüfstand gleiche Stahltemperatur-Zeit-Funktionen wie im Stützenprüfstand zu erhalten, wurde damit nicht erreicht, die berechnete Brandraumtemperaturkurve I liegt zu hoch. In einem zweiten Rechengang wurde die  $\lambda'$ -Funktion für die Platten aus den 8

entsprechend der Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve I gesteuerten Brandversuche berechnet und eine Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve II unter Verwendung dieser neuen  $\lambda'$ -Funktion bestimmt. Diese Kurve ist ebenfalls in Bild 12 eingetragen. Eine Überprüfung der Brandraumtemperaturkurve II zeigte, daß die Stahltemperaturen an den Platten bereits bis zu Zeiten  $\leq 80$  min mit denen der Stützen übereinstimmten. Erst für größere Zeiten ergaben sich bei der stichprobenartigen Überprüfung (Umfang der Stichprobe: 4 Versuche) Abweichungen, die darauf hindeuten, daß die berechnete Kurve II für Zeiten  $> 80$  min etwas zu niedrig berechnet wurde.

Es kann angenommen werden, daß bei Wiederholung des geschilderten Rechenganges eine immer genauere Bestimmung der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" möglich gewesen wäre. Aus Mangel an geeignetem Versuchsmaterial und wegen der deutlich werdenden Exemplarstreuungen der Einzelversuche konnte die weitere Näherung nicht fortgesetzt werden.

So kann lediglich unterstellt werden, daß die in Bild 12 dargestellte Kurve II der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" für den Kleinprüfstand für Versuchszeiten  $t \leq 90$  min sehr nahe kommt. Sie kann also, entsprechend der Definition der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve", als diejenige Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve angesehen werden, die bei der Prüfung brandschutztechnisch äquivalenter Stahlbauteile die thermischen Verhältnisse des nach der Einheitstemperaturkurve gesteuerten Stützenprüfstandes weitgehend nachbildet.

Andere, von dem hier geschilderten Verfahren abweichende Möglichkeiten der Bestimmung der "korrigierten Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve" sind in [2] skizziert worden. Es sei hier jedoch darauf hingewiesen, daß das naheliegende Verfahren, nämlich im Kleinprüfstand die Brandraumtemperaturkurve so zu steuern, daß die Stahltemperaturen des Prüfstücks zu jedem Zeitpunkt denen der brandschutztechnisch äquivalenten Stütze folgt, nicht zu dem erwarteten Erfolg führt, da die Exemplarstreuungen üblicher Bekleidungsmaterialien zu groß sind. Die "korrigierte Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve kann lediglich aufgrund der Mittelwerte einer größeren Anzahl von Brandversuchspaaren bestimmt werden.

## 5. Zusammenfassung und Folgerungen

In der vorliegenden Arbeit wird die Aussagefähigkeit von Gegenheizversuchen, ausgeführt in einem Kleinprüfstand, für die Vorhersage des Brandverhaltens bekleideter Stahlstützen beliebigen Profils untersucht. Dazu wurden die Verknüpfungen oder funktionalen Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen von je 16 Normbrandversuchen an Stützen im Stützenprüfstand und an Stahlplatten im Kleinprüfstand, jeweils verkleidet mit

VERMITECTA-Platten, mit dem Verfahren der Regressionsanalyse festgestellt und diese in dem in Bild 10 angegebenen Nomogramm zusammengefaßt. Das Nomogramm ist so ausgelegt, daß es aus dem Versuchsergebnis  $t_{\vartheta, K}$  an einer beliebigen mit VERMITECTA-Platten bekleideten Stahlplatte die Zeit  $t_{\vartheta, S}$  vorherzusagen gestattet, zu der eine vorzugebende Stahlstütze die Temperatur  $\vartheta$  (speziell  $\vartheta_{krit}$ ) erreicht.

Eine Überprüfung des Nomogramms durch Versuchspaare Stütze - Platte mit Bekleidungen aus anderen Baustoffen oder Bekleidungs-systemen zeigte dessen weitgehende Unabhängigkeit von speziellen Eigenschaften der Bekleidungen.

Damit kann die Bemessung von Bekleidungen für Stahlstützen mit hoher Genauigkeit durch eine Auswahl von Kleinbrandversuchen erfolgen.

Die Untersuchungsergebnisse lassen den Schluß zu, daß es eine "brandschutztechnische Äquivalenz" zwischen Stahlstützen und Stahlplatten dann gibt, wenn bei gleichem Bekleidungs-material  $d = F/U$  und  $D_K = D_S$  ist. Da die jeweiligen Versuchsergebnisse trotzdem nicht gleich sind, können Unterschiede in thermodynamischen Eigenschaften konstatiert werden.

Die thermischen Eigenschaften jedes Prüfstandes können als mehr oder weniger unterschiedlich angesehen werden. Hieraus folgt speziell, daß die in der vorliegenden Untersuchung enthaltenen quantitativen Ergebnisse nur für die Prüfstände in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) gelten. Für andere Institute zeigen sie nur qualitativ die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen.

Die Unterschiede in den Eigenschaften zweier Prüfstände können teilweise durch Veränderung der zu steuernden Brandraumtemperatur-Zeit-Funktion gegenüber der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102, Blatt 2 kompensiert werden, so daß an brandschutztechnisch äquivalenten Bauteilen gleiche Feuerbeanspruchungen, die sich hier aus gleichen Stahltemperatur-Zeit-Funktionen erkennen lassen, erhalten werden.

Diese Aussage läßt die ausgeführten Untersuchungen als Sonderfall eines umfassenderen Problems erscheinen:

Eine Untergruppe brandschutztechnisch äquivalenter Bauteile sind gleichartige Bauteile. Prüft man nun untereinander gleiche z.B. Stützen- oder Wandkonstruktionen in den bei verschiedenen Prüfinstituten jeweils vorhandenen Prüfständen, so sind wie in [2] anhand gezielter Auswertungen festgestellt wurde, ebenfalls Unterschiede in den Feuerbeanspruchungen zu erwarten. Hieraus folgen speziell unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern. Diese Unterschiede sind nicht mit statistischen Schwankungen zu erklären, sondern sind signifikant. Hierin wird ein Hauptgrund für Schwierigkeiten bei der Anerkennung ausländischer Prüfungszeugnisse gesehen.

Durch eine Serie von Vergleichsversuchen kann nun möglicherweise, wie am Beispiel der Gegenheiz- und Stützenversuche gezeigt, eine Relation zwischen den Versuchsergebnissen in verschiedenen Prüfständen ermittelt werden. Die Relation kann dann etwa in der Form wie Bild 11 dargestellt werden.

Die Zahl der auszuführenden Vergleichsversuche wird bestimmt durch die bei wiederholt ausgeführten Brandversuchen jeweils auftretenden Wiederholstreuungen der Versuchsausführung und die Exemplarstreuungen der Prüfstücke. Spezielle Prüfstücke für Vergleichsversuche können entwickelt werden. Einige weitere Fragen der Vergleichsversuche sind ausführlich in [2] diskutiert worden und sollen hier nicht wiederholt werden.

Bei entsprechenden Änderungen der nationalen Prüfnormen kann man, wie im Abschnitt 4 beschrieben, auch die Brandraumtemperaturkurven so bestimmen, daß die Feuerbeanspruchungen in allen vergleichbaren Brandprüfständen gleich werden. Das hier verwendete Berechnungsverfahren zur Bestimmung der korrigierten Brandraumtemperaturkurven läßt sich dazu verbessern.

#### Literatur

- [1] DIN 4102, Bl. 2, Ausgabe Febr. 1970  
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen  
Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen
- [2] Knublauch, E.: Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Bl. 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer; Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin-Dahlem, BAM-Bericht Nr. 16, August 1972
- [3] DIN 4114, Bl. 1, Juli 1952  
Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung)  
Berechnungsgrundlagen, Vorschriften
- [4] Stanke, J.: Prüfung und Beurteilung des Brandverhaltens von Stahlstützen; in: Beiträge zur Theorie des baulichen Brandschutzes, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 5, Nr. 10, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1970
- [5] Ehm, H.: Die kritische Temperatur bei hochtemperaturbeanspruchten Bau- und Betonstählen; Der Stahlbau, Heft 11, 1970, S. 339-344
- [6] Knublauch, E., Rudolphi, R., Stanke, J.: Theoretische Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlstützen, 1. Teil: Berechnung der Stahltemperatur von Stahlstützen; Untersuchungsbericht der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin-Dahlem, für die Europäische Konvention der Stahlbauverbände, September 1971, z.Z. unveröffentlicht.

- [7] Rudolphi, R., Knublauch, E.: Ein Verfahren zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauteilen; in: Beiträge zur Theorie des baulichen Brandschutzes; Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 5, Nr. 10, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1970
- [8] DIN 18 082, Bl. 2, 1969  
Feuerhemmende, einflügelige Stahltüren (T 30 - 1 - Türen), Mineralfasereinlagen, Anforderungen und Prüfung
- [9] Boué, P.: Der Feuerschutz im Stahlhochbau, insbesondere von Stahlstützen; Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau, Heft 21, 1959
- [10] Rudolphi, R., Knublauch, E.: Beschreibung und Diskussion des Gegenheizverfahrens zur näherungsweise Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer bekleideter Stahlstützen; Zeitschrift der Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes, Heft 4, 1969, S. 149-152
- [11] Knublauch, E., Rudolphi, R.: Dämmschichtbildende Brandschutzanstriche; Der Stahlbau, Heft 9, 1972, S. 273-277