

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

# **Forschungsbericht 180**

## **Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**

von Dipl.-Ing. Ernst Klement  
Dipl.-Ing. Günter Wieser

122 Seiten, 60 Abbildungen, 18 Tabellen

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon (030) 8104-1      Telex 183 261 bamb d  
Telefax (030) 811 20 29      Teletex 2 627-308 372 = bamb

Copyright © 1991 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 101110, 2850 Bremerhaven 1  
Telefon (0471) 460 93-95

## Vorwort

Die Autoren bedanken sich besonders bei

- Herrn Ulf Wickström Ph. D., M. Sc., Swedisch Testing Institute, Division of Fire Technology, für die zur Verfügungstellung des Rechenprogramms TASEF-2 D [16], mit dem die Berechnung der Temperaturverteilung in den Schornsteinen durchgeführt wurde.
- Herrn Reg. Dir. Dr.-Ing. A. Wagner, BAM-Laboratorium 2.42 "Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz" für seine Diskussionsbereitschaft.
- Herrn Dipl.-Ing. P. Müller, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität (TH) Karlsruhe, für die Durchführung umfangreicher Zusatzmessungen im Rahmen des von diesem Institut bearbeiteten Forschungsvorhabens [6].
- Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Lenze, Engler-Bunte-Institut der Universität (TH) Karlsruhe, Lehrstuhl und Bereich Feuerungstechnik für die Ermittlung der Abgasanalyse (Messung der CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Konzentration) und Berechnung der mittleren Abgasgeschwindigkeit.
- der amtlichen Materialprüfanstalt für Steine und Erden der Technischen Universität Clausthal für die Bestimmung der thermodynamischen Kennwerte der Schornsteinbaustoffe in Abhängigkeit von der Temperatur.

Dank schulden wir auch dem Institut für Bautechnik Berlin, das diese Arbeit durch Bereitstellung von Mitteln gefördert hat.



## Kurzfassung

Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten

Auf der Basis von Prüfungsergebnissen an vorgegebenen einschaligen Schornsteinen mit unterschiedlich lichten Querschnitten wurden die Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von dem lichten Querschnitt und jeweils gleichbleibender Wanddicke der Formstücke mit Hilfe des Computer-Programms "TASEF-2D" (Temperature Analysis of Structure Exposed to Fire - two Dimension) unter der Voraussetzung stationärer Randbedingungen berechnet. Die Untersuchungen erfolgten deswegen an einschaligen Schornsteinen, weil nur dort Bedenken hinsichtlich der zulässigen Temperatur von höchstens 100 °C auf den freien Außenflächen der Schornsteine auftreten.

Die Durchführung der Schornsteinprüfungen erfolgte in der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe im Rahmen des Forschungsvorhabens:

"Experimentelle Ermittlung der Abhängigkeit zwischen Oberflächentemperatur und lichtem Querschnitt bei Prüfung an Hausschornsteinen nach DIN 18 160 Teil 6 - insbesondere bei einschaligen Schornsteinen - hinsichtlich deren Übertragbarkeit auf andere lichte Querschnitte bei gleicher Wanddicke".

Darüber hinaus wurden mit dem Programm "TASEF-2D" die Oberflächentemperaturen weiterer ein- und dreischaliger Hausschornsteine berechnet und mit den entsprechenden Meßergebnissen verglichen. Neben den Wärmeübergangskoeffizienten liefert das Programm die sich auf Grund der berechneten stationären Temperaturverteilung ergebenden Wärmeströme.

Es zeigte sich, daß die Rechenergebnisse innerhalb des durch die Meßunsicherheit bestimmten Intervalls liegen, d.h. für die funktionstechnische Bemessung von Hausschornsteinen jeder Bauart kann das Programm "TASEF-2D" mit Erfolg eingesetzt werden.

Der Einsatz dieses Rechenverfahrens führt somit zur Verminderung von zeit- und kostenintensiven Prüfungen nach DIN 18 160 Teil 6. Es setzt die einschlägige Industrie in die Lage, schnell und flexibel auf die Anforderungen des Marktes zu reagieren.

Da die Rechnung für die funktionstechnische Bemessung jeder Schornsteinbauart bei freier Wahl der thermischen Belastung eingesetzt werden kann, ergibt sich als weiteres Anwendungsgebiet sein Einsatz bei der Sanierung bestehender Schornsteinkonstruktionen.

## Abstract

Transmission of test results on chimneys by a numerical method to varied cross-section of chimneys

Test results based on varied one-layered chimneys of wall equal in thickness and differently from cross-section. The calculation of surface temperatures was carried out by the program "TASEF-2 D" (Temperature Analysis of Structure Exposed to Fire - two Dimension). This research project was therefore carried out on one-layered chimneys because for this construction doubts exists about the passings of the temperature of 100 °C permitted to thermal unexposed surface.

The test of chimneys was carried out by the testing institute: "Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe" within the scope of their research project entitled as follows:

"Determination of the interdependence of one-layered chimneys between their surface temperature, and their cross-section by testing in conformity with DIN 18 160 part 6 with the aim of transparring the test results to varied cross-sections of chimneys with the same wall thickness."

Moreover for further one-layered and three layered chimneys the surface temperatures was calculated by "TASEF-2 D" and afterwards it was compared with the measured temperatures. Besides the coefficient of heat transfer the program give the temperature distribution of heat transfer rate in the steady state condition.

The calculated temperature is in comparison with the measured one within fluctuation in measured temperature. The comparison between calculated and measured temperatures means that the program "TASEF-2 D" is right for calculation of chimneys and it allow the special industrie to react fast and flexible on market's requirements.

Therefore it is helpful for reducing costly tests in time and money according to DIN 18 160 part 6. An addition application for the

program "TASEF-2 D". An other application for the program "TASEF-2 D" is additionally the use in scope of renovation of existing chimney constructions.



## Résumé

Sur la transmissibilité numérique de résultats d'essai obtenus auprès de cheminées domestiques à des cheminées de largeur intérieure différente de celles-ci.

En se basant sur des résultats d'essai obtenus auprès de cheminées données à une paroi et à largeurs intérieures différentes, on a calculé les températures de surface dépendantes de la largeur et de l'épaisseur stable de la paroi des pièces profilées à l'aide du programme d'ordinateur "TASEF-2 D" (Temperature Analysis of Structure Exposed to Fire - two Dimension) à conditions que soient accomplies des modalités marginales stationnaires. Les études ont donc été effectuées auprès de cheminées à une paroi car il n'existait que là des doutes concernant la température admissible de 100 °C au maximum qui peut advenir aux surfaces externes libres des cheminées. On a effectué les essais sur Acier, Bois et Pierres de l'Université de Karlsruhe dans le cadre d'un projet de recherches intitulé

"Investigation expérimentale de la dépendance entre la température de surface et la largeur intérieure lors de l'essai auprès cheminées domestiques d'après DIN 18 160 partie 6 - particulièrement auprès de cheminées à une paroi à l'égard de la transmissibilité de celle-là à des autres largeurs intérieures lors d'une épaisseur égale de paroi".

En outre, on a calculé les températures de surface d'autres cheminées domestiques à une et à trois parois à l'aide du programme "TASEF-2 D" et on les a comparées à des résultats de mesure correspondants. Outre les coefficients de transfert thermique, le programme fournit les courants thermiques résultant de la répartition de température stationnaire calculée.

Il s'est avéré que les résultats calculés se trouvent à l'intérieur de l'intervalle déterminé par l'imprécision de mesure donnée, c.à.d. qu'on peut utiliser avec succès le programme "TASEF-2 D" pour le dimensionnement de cheminées domestiques de tout modèle conformément

à la fonction prévue. L'application d'une telle méthode de calcul mène ainsi à une diminution des essais exigeant du temps et des moyens d'après DIN 18 160 partie 6. Elle met l'industrie concernant ces questions en état de réagir vite et avec souplesse aux demandes du marché. Comme une telle calculation est utilisée en choisissant librement la sollicitation thermique, il en résulte comme domaine supplémentaire d'application, l'assainissement de constructions de cheminées existantes.

## Inhalt

		Seite
1	Einleitung .....	15
2	Ziel der Untersuchungen .....	17
3	Grundlagen für die Berechnung der Oberflächen- temperaturen von Hausschornsteinen .....	18
3.1	Wärmeübertragung .....	18
3.2	Wärmeübergang an der inneren und äußeren Schorn- steinoberfläche .....	20
3.2.1	Wärmeübergang an der inneren Oberfläche durch Strahlung .....	20
3.2.2	Wärmeübergang an der inneren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion .....	20
3.2.3	Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Strahlung .....	21
3.2.4	Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion .....	22
4	Berechnung der Temperaturverteilungen im Querschnitt von Hausschornsteinen .....	23
5	Absicherung des numerischen Verfahrens mit Versuchs- ergebnissen .....	25
5.1	Schornsteine .....	25
5.2	Diskussion der Temperaturmessung im Schornsteinquer- schnitt .....	30
5.3	Ermittlung der mittleren Abgasgeschwindigkeit und der thermodynamischen Kennwerte der Schornsteinbaustoffe ..	31
5.4	Vergleich und Diskussion der berechneten und gemes- senen Oberflächentemperaturen .....	33
5.5	Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes 1/ von Hausschornsteinen .....	46
6	Vergleich von Berechnungen und Messungen der Ober- flächentemperaturen verschiedener Hausschornsteine ....	47
6.1	Vergleich von Berechnungen und Messungen der Ober- flächentemperaturen einschaliger Schornsteine .....	47
6.2	Vergleich von Berechnungen und Messungen der Ober- flächentemperaturen dreischaliger Schornsteine .....	54
7	Zusammenfassung .....	57
8	Empfehlungen für die funktionstechnische Bemessung von Hausschornsteinen .....	58
9	Ausblick .....	59
10	Literaturverzeichnis .....	60

11	Anlagen .....	63
11.1	Anlage A: Listing des Rechenprogramms "TASEF-2D" .....	63
11.2	Anlage B: Darstellung des gemessenen, volumenbezogenen, prozentualen O <sub>2</sub> - und CO <sub>2</sub> -Gehaltes im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit [5] während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1]...	86
11.3	Anlage C: Darstellung des gemessenen Abgasmassenstromes in Abhängigkeit von der Zeit [5], während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1] .....	91
11.4	Anlage D: Darstellung der berechneten mittleren Abgasgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit in den Meßquerschnitten 1 und 3 [5] während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1]..	96
11.5	Anlage E: Darstellung der Temperatur-Zeitfunktionen im Meßquerschnitt 1 während der Heizbeanspruchung entsprechend den Betriebsphasen 1 und 2 sowie der Trocknungsphase nach DIN 18 160 Teil 6 [1] .....	101

## Nomenklatur

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Einheit</u>
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
A	Fläche	m <sup>2</sup>
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
d	Dicke	m
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> K)
C <sub>s</sub>	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
T	Kelvin-Temperatur	°K
$\epsilon$	Emissionsgrad	-
$\alpha_v$	Absorptionsgrad	-
s <sub>gl</sub>	gleichwertige Schichtdicke	m
P <sub>g</sub>	Partialdruck des Gases	bar
P	Gesamtdruck	bar
Nu	Nußelt-Zahl	-
Gr	Grashof-Zahl	-
Re	Reynolds-Zahl	-
Pr	Prandtl-Zahl	-
L	Länge	m
D, D <sub>h</sub>	Durchmesser (D) bzw. hydraulisch gleichwertiger Durchmesser (D <sub>h</sub> )	m
U	Umfang	m
w <sub>m</sub>	mittlere Abgasgeschwindigkeit	m/s
$\gamma$	kinematische Viskosität	m <sup>2</sup> /s
$\eta$	dynamische Viskosität	Ns/m <sup>2</sup>
$\psi_{\text{rauh}}$	Reibungszahl für hydraulisch raue Strömung	-
$\psi_{\text{glatt}}$	Reibungszahl für hydraulisch glatte Strömung	-
H	wirksame Schornsteinhöhe	
$\rho$	Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>

## Indizes

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>
L	Leitung
K	Konvektion
S	Strahlung
w	Wand
g	Gas
LK	Leitung mit Konvektion
i	Innenseite
m	Mittelwert
Th	Thermoelement

## 1 Einleitung

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat im Rahmen des von dem Institut für Bautechnik, Berlin, geförderten Forschungsvorhabens "Beurteilung der Eignung von Dämmstoffen mehrschaliger Schornsteine" [20] u.a. Prüfverfahren zur Beurteilung von Dämmstoffen dreischaliger Hausschornsteine erarbeitet, die in DIN 18 147 Teil 5 [3] ihren Niederschlag fanden. Darüber hinaus konnten im Rahmen des vorbezeichneten Forschungsvorhabens unter der Voraussetzung stationärer Randbedingungen die Grundlagen für die numerische Berechnung der Temperaturverteilung im Querschnitt dreischaliger Schornsteine aus vollwandigen Schalen gelegt werden. Die für die Absicherung der numerischen Rechnungen erforderlichen Schornsteinprüfungen nach DIN 18 160 Teil 6 [2] erfolgten im Heizversuch an 4 dreischaligen Schornsteinen aus vollwandigen Schalen mit einem jeweiligen lichten Querschnitt von  $400 \text{ cm}^2$ . Diese Schornsteine unterschieden sich lediglich durch die Variation der Dämmschicht.

Da jedoch im Hinblick auf eine funktionstechnische Bemessung der Schornsteine jeder Bauart nach DIN 4705 Teil 1 und Teil 2 [10] für die Berechnung des Wärmeverlustes von Schornsteinen die jeweilige thermische Belastung bekannt sein muß, förderte das Institut für Bautechnik das von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bearbeitete Forschungsvorhaben "Numerische Ermittlung des Wärmeverlustes und der Temperaturverteilung in den Wänden von Schornsteinen [4]".

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Erweiterung der numerischen Berechnung für beliebige Betriebstemperaturen von Schornsteinen jeder Bauart (z.B. einschalig mit Zellen, zwei- und dreischalig mit Zellen im Mantel).

Es hat sich jedoch gezeigt, daß auf der Basis der bisher erarbeiteten Ansätze eine verlässliche rechnerische Abschätzung der Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von Form und Größe des lichten Querschnitts und der Wanddicke einschaliger Schornsteine noch nicht als gesichert erscheint. Aus diesem Grunde fördert das Institut für Bautechnik, Berlin, das vorliegende Forschungsvorhaben "Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten". Dieses Forschungsvorhaben hat das Ziel, auf der Basis von Prüfungsergebnissen an vorgegebenen einschal-

ligen Schornsteinen mit unterschiedlichen lichten Querschnitten die Oberflächentemperaturen in Abhängigkeit von dem lichten Querschnitt und der Wanddicke der Formstücke mit Hilfe eines Rechenverfahrens zu berechnen; an einschaligen Schornsteinen deswegen, weil nur dort Bedenken hinsichtlich der höchstzulässigen Temperatur von 100 °C auf den freien Außenflächen der Schornsteine auftreten.



## 2 Ziel der Untersuchungen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wird auf der Basis von Prüfungsergebnissen an vorgegebenen einschaligen Schornsteinen mit unterschiedlichen lichten Querschnitten die Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von dem lichten Querschnitt und der Wanddicke der Formstücke mit Hilfe eines Rechenverfahrens berechnet. Außerdem wird durch eine Parametervariation die Übertragbarkeit des bei einem Schornstein-Querschnitts von  $400 \text{ cm}^2$  experimentell ermittelten Wärmedurchlaßwiderstandes auf andere lichte Querschnitte dargestellt. Die Absicherung der theoretischen Ergebnisse des rechnerischen Verfahrens erfolgt an Schornsteinen, die nach DIN 18160 Teil 6 [1], Abschnitt 6.1 (Betriebsphase 1 und 2) in der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (amtliche Materialprüfungsanstalt), Universität Karlsruhe, geprüft wurden. Die Durchführung dieser Prüfungen erfolgte im Rahmen eines gleichzeitig von dem Institut für Bautechnik geförderten Forschungsvorhaben dieses Instituts [6]. Während dieser Schornsteinprüfungen wurden bei der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 im Auftrage der BAM kontinuierliche Abgasanalysen (Messung der  $\text{CO}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Konzentration) vorgenommen, sowie der Verbrauch an Heizöl EL in verschiedenen Zeitabständen festgehalten. Aus diesen zusätzlichen Messungen wurde die mittlere Abgasgeschwindigkeit bestimmt. Die entsprechenden Messungen und Rechnungen erfolgten durch das "Engler-Bunte-Institut" der Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl und Bereich Feuerungstechnik [5].

Darüber hinaus wurden die thermodynamischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) der Schornsteinbaustoffe von der "Technischen Universität Clausthal, Amtliche Materialprüfungsanstalt für Steine und Erden", Clausthal-Zellerfeld, bestimmt.

### 3 Grundlagen für die Berechnung der Oberflächentemperaturen von Hausschornsteinen

#### 3.1 Wärmeübertragung

Als Wärmeübertragung wird der Vorgang bezeichnet, bei dem Wärme von einem Medium mit höherer Temperatur auf ein Medium mit niedrigerer Temperatur übergeht.

Man unterscheidet drei Wärmetransportphänomene:

- Leitung,
- Konvektion,
- Strahlung

Die Wärmeströmung durch Leitung tritt bei festen, flüssigen und gasförmigen Körpern auf und fließt von Orten höherer Temperatur zu Orten niedriger Temperatur. Man hat hierbei zwischen stationären und instationären Vorgängen zu unterscheiden. Der Unterschied besteht darin, daß eine stationäre Wärmeströmung zeitunabhängig ist, d.h. durch einen definierten Querschnitt des Körpers fließt immer derselbe Wärmestrom. Im nichtstationären Falle ändert der Körper seinen Wärmeinhalt (Enthalpie). Die Änderung des Wärmeinhalts entspricht dabei der Abweichung von der stationären Wärmeströmung.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Temperaturverteilung im Querschnitt von einschaligen Hausschornsteinen nur unter stationären Randbedingungen entsprechend der Trocknungsphase und den beiden Heizbeanspruchungen (Betriebsphase 1 und 2 [1]) numerisch berechnet. Unter dieser Voraussetzung beträgt der Wärmestrom durch eine ebene Wand

$$\dot{Q}_L = A \frac{\lambda}{\alpha} \Delta \vartheta \quad (3-1)$$

Die Wärmeübertragung durch Konvektion findet in strömenden Flüssigkeiten und Gasen statt, und ist von deren Bewegungszustand abhängig. Beim Kontakt mit einer festen Begrenzungsfläche findet ein als Wärmeübergang bezeichneter Wärmeaustausch zwischen dieser und dem strömendem Medium statt.

Die Wärmeübertragung durch Konvektion ist also maßgeblich abhängig von

- der räumlichen Lage der wärmeaustauschenden Körper (vertikale oder horizontale Oberfläche),
- der Temperaturdifferenz im Übergangsbereich,

- der Strömungsart und -geschwindigkeit des bewegten Mediums,
- der Oberflächenbeschaffenheit.

Man unterscheidet dabei zwischen erzwungener Konvektion (Bewegungszustand des Fluids wird durch äußere Kräfte bewirkt, wie z.B. Ventilatoren, Pumpen u.a.) und freier Konvektion (Bewegungszustand des Fluids kommt durch die vom Auftrieb des erwärmten Gases erzeugte natürliche Strömung zustande).

Der von einem fluiden Medium mit der Temperatur  $\vartheta_g$  an eine Fläche A mit der Temperatur  $\vartheta_w$  durch Konvektion übertragene Wärmestrom ist

$$\dot{Q}_K = A \alpha (\vartheta_g - \vartheta_w) \quad (3-2)$$

Beim Strahlungsaustausch zwischen zwei Körpern wird die Strahlungsenergie vom jeweiligen Körper im allgemeinen nicht gänzlich absorbiert, sondern zum Teil reflektiert (Transmissionsgrad = 0). Der absorbierte Strahlungsanteil führt zu einer fühlbaren Temperaturerhöhung des Körpers. Das Verhältnis des absorbierten Strahlungsflusses  $\Phi_a$  zum einfallenden Strahlungsfluß  $\Phi$  wird als Absorptionsgrad  $\alpha_v$  bezeichnet.

$$\alpha_v = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (3-3)$$

Absorbiert ein Körper den einfallenden Strahlungsfluß (Absorptionsgrad = 1), dann handelt es sich um einen schwarzen Strahler. Aus dem Kirchhoff'schen Gesetz folgt, daß ein schwarzer Strahler nicht nur den größtmöglichen Absorptionsgrad  $\alpha_v$ , sondern auch den größtmöglichen Emissionsgrad  $\varepsilon$  ( $\alpha_v = \varepsilon = 1$ ) hat.

Die zwischen der spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers und seiner Temperatur bestehende Beziehung wird durch das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz formuliert:

$$M_s = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (3-4)$$

$C_s = 10^8 \sigma$  ( $\sigma =$  Stefan-Boltzmannsche-Konstante)

Für graue Strahler, zu denen die Schornsteinbaustoffe gerechnet werden können, gilt anstatt Gleichung (3-4)

$$M_s = C_s \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (3-5)$$

Die verschiedenen Arten des Wärmetransportes treten selten allein auf, sondern sind meist in irgendeiner Weise kombiniert.

Die vorstehenden Zusammenhänge werden im folgenden für die funktions-technische Bemessung von Hausschornsteinen angewendet.

### 3.2 Wärmeübergang an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche

#### 3.2.1 Wärmeübergang an der inneren Oberfläche durch Strahlung

Unter der Voraussetzung einer vollständigen Verbrennung von Heizöl EL entstehen im wesentlichen Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Diese beiden Bestandteile des Gaskörpers stehen mit den Wänden des Schornsteinquerschnitts derart im Strahlungsaustausch, daß der dabei vom Gaskörper auf die gesamte Schornsteinwand übertragene Wärmestrom

$$\dot{Q}_s = A C_s \frac{1 + \varepsilon_w}{2} \left[ \varepsilon_g \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \alpha_v \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (3-6)$$

ist.

In dieser Gleichung gilt der Ausdruck  $\frac{1 + \varepsilon_w}{2}$  näherungsweise für einen Bereich von  $\varepsilon_w \geq 0,8$ . Die Bestimmung der Größen  $\varepsilon_g$  und  $\varepsilon_w$  geschieht auf der Grundlage der empirisch ermittelten Zusammenhänge zwischen Emissionsgrad, Temperatur und einem weiteren Parameter, der die jeweiligen Partialdrücke sowie die geometrische Form des Gaskörpers berücksichtigt. Da im vorliegenden Falle  $T_g > T_w$  ist, kann nach [7] näherungsweise  $\alpha_v = \varepsilon_w$  gesetzt werden.

Da sich bei im wesentlichen aus  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  bestehenden Gasgemischen die Gasstrahlungen gegenseitig beeinflussen, ist nach [7] die gesamte Ausstrahlung kleiner als die Summe der Ausstrahlungen des einzelnen Gases. Somit gilt

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CO}_2} - \Delta \varepsilon \quad (3-7)$$

Mit dem Korrekturglied  $\Delta \varepsilon$  wird eine Überlagerung einzelner Emissionsbanden berücksichtigt.

#### 3.2.2 Wärmeübergang an der inneren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion

Der den Wärmeübergang durch Leitung mit Konvektion charakterisierende Wärmeübergang  $\alpha_{LK}$  ist neben den Abmessungen des Schornsteins und dem Strömungswiderstand des Gases noch von dessen temperaturabhängigen physikalischen Eigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit, Viskosität u.a. abhängig. Mit Hilfe der von Nusselt [9] in die Wärmelehre eingeführten Ähnlichkeitstheorie läßt sich zeigen, daß der Wärmeübergang nicht nur von diesen Größen im einzelnen, sondern von gewissen aus ihnen gebildeten Gruppen, den dimensionslosen "Kenngrößen" abhängt. Nach W. Nusselt [9] kann man die Wärmeübergangskoeffizienten in geraden Rohren bei nicht zu großen Temperaturänderungen einheitlich in der Form

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = f(Re, Pr, L/D) \quad (3-8)$$

darstellen. Das heißt die sogenannte Nusselt-Zahl  $Nu$ , die den inneren Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , den Durchmesser  $D$  bei rundem bzw.  $D_H$  ( $D_H = 4 A/U$ ) bei rechteckigem Querschnitt und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Abgases verknüpft, ist eine Funktion der Reynolds Zahl  $Re$ , der Prandtl-Zahl  $Pr$  und dem Verhältnis von Rohrlänge  $L$  zu Durchmesser  $D$  bzw.  $D_H$ . Hierbei bildet die dimensionslose Reynoldszahl das Kriterium, ob Laminarität oder Turbulenz vorliegt. Ist

$$Re = \frac{w_m D}{\nu} \quad (3-9)$$

kleiner 2320, liegt Laminarität, sonst Turbulenz vor. Der Übergang von laminarer zur turbulenten Strömung erfolgt jedoch nicht plötzlich, sondern innerhalb eines mehr oder weniger ausgedehnten Übergangsbereiches. Wird nun die o.a. funktionale Abhängigkeit aus Versuchen bestimmt, so ist die gleiche Abhängigkeit für alle ähnlichen wärmeabgebenden Körper gültig, wenn sowohl strömungsmechanische, geometrische als auch thermische Ähnlichkeit der Vorgänge vorausgesetzt werden darf (Ähnlichkeitstheorie). Da die Ähnlichkeitstheorie über die Art der Funktion nichts aussagt, war es das Ziel zahlreicher experimenteller Untersuchungen, diese zu finden (z.B. in [7, 8]). Alle diese Erkenntnisse fanden ihren Niederschlag in der nachfolgenden Gleichung, die in DIN 4705 Teil 1 [10] Eingang gefunden hat:

$$Nu = \left( \frac{\psi_{\text{rauh}}}{\psi_{\text{glatt}}} \right)^{0,67} 0,037 (Re^{0,75} - 180) Pr^{0,42} \left[ 1 + \left( \frac{D}{H} \right)^{0,67} \right] \left( \frac{\eta_m}{\eta_i} \right)^{0,14} \quad (3-10)$$

Diese Gleichung gilt unter der Voraussetzung, daß  $\left( \frac{\psi_{\text{rauh}}}{\psi_{\text{glatt}}} \right) < 3$  und  $3000 < Re < 10000000$  ist. Die Prandtl-Zahl  $Pr$  läßt sich wie folgt berechnen:

$$Pr = \frac{\nu c \rho}{\lambda_g} \quad (3-11)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient an der Schornsteininnenseite errechnet sich dann entsprechend Gleichung (3-8)

$$\alpha_{LK} = \frac{\lambda_g Nu}{D} \quad (3-12)$$

Darüber hinaus gibt Krüger [11] für die Berechnung von  $Nu$  eine zu ausreichenden Ergebnissen führende, vereinfachte Formel an:

$$Nu = 0,0037 Re \quad (3-13)$$

### 3.2.3 Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Strahlung

Nach [7,8] wird die von der Schornsteinoberfläche emittierte Wärme von der Atmosphäre vollständig absorbiert, d.h., diese verhält sich bezüglich der Absorption wie ein schwarzer Strahler mit  $\alpha_s = 1$ . Der Emissionsgrad der Atmosphäre ist aufgrund des geringen  $CO_2$ -Gehaltes ledig-

lich vom Partialdruck des Wasserdampfes abhängig. Nehring [12] zeigt, daß infolge geringer Schwankungen des Wasserdampfdruckes in der Atmosphäre für den deutschen Bereich mit einem konstanten  $\varepsilon_g$  gerechnet werden kann. Somit folgt aus Gleichung (3-6)

$$\dot{Q}_s = A C_s \frac{1 + \varepsilon_w}{2} \left[ \varepsilon_g \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (3-14)$$

### 3.2.4 Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion

Diesen Betrachtungen wird der Wärmeübergang  $\alpha_K$  an einer senkrechten Platte bei freier Konvektion zugrundegelegt. Hierfür wird in [13,14] die folgende Beziehung angegeben:

$$\alpha_K = \frac{N_u \lambda}{H} \quad (3-15)$$

Die Berechnung der  $N_u$ -Zahl ergibt sich aus der Beziehung

$$N_u = c (G_r P_r)^m \quad (3-16)$$

Mit dem Exponent  $m$  wird die Strömungsart derart berücksichtigt, daß nach [13] beim Vorliegen einer turbulenten Strömung  $m = 1/3$  und bei einer laminaren Strömung  $m = 1/4$  einzusetzen ist. Außerdem werden in [13] Angaben über den zu wählenden Faktor  $c$  in Abhängigkeit von der Anwendungssituation gemacht. Für den vorliegenden Fall wird  $c = 0,54$  (freie Konvektion vor einer vertikalen Platte) und  $m = 0,25$  (laminare Strömung) gewählt, so daß die Gleichung (3-16) nun lautet:

$$N_u = 0,54 (G_r P_r)^{0,25} \quad (3-16a)$$

Die vorstehende Gleichung liefert für die Nachrechnung der Versuche (vgl. Abschnitt 5) zu hohe Temperaturen an den freien Außenflächen der Schornsteine, da der zur Beheizung der Schornsteine eingesetzte Brenner ("Tragbares Ölmuffelfeuer", Bauart Dr. Schmitz und Apelt, Typ TDM 1) Raumluft ansaugt. Hierdurch entsteht eine über die übliche Luftbewegung in Innenräumen hinausgehende Luftbewegung, deren Mindestwärmeübergangskoeffizient von [15] mit  $3,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  beziffert wird. Dieser Zahlenwert wird zu dem nach Gleichung (3-15) errechneten  $\alpha_K$  hinzuaddiert.

Die in Gleichung (3-16a) angegebene Grashofzahl  $G_r$  ergibt sich aus der Beziehung

$$G_r = \frac{\alpha^3 \rho A T}{\gamma^2 T} \quad (3-17)$$

#### 4 Berechnung der Temperaturverteilungen im Querschnitt von Hausschornsteinen

---

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen der in diesem Bericht beschriebenen Schornsteine (Abschn. 5 und 6) erfolgte mit dem Computer-Programm "TASEF-2D" (Temperature Analysis of Structure Exposed to Fire - two Dimension) [16]. Dieses zweidimensional rechnende Programm basiert auf der Methode der finiten Elemente. Zu der Elementierung der Geometrie können sowohl rechteckige als auch rechtwinklige Dreieckselemente verwendet werden. Das bedeutet, daß ein Querschnitt in rechteckige Elemente elementiert wird, wobei die Geometrie etwa vorhandener Ecken und Zellen durch Hinzufügung von zusätzlichen rechtwinkligen Dreieckselementen angenähert wird.

Die Elementierung der Schornsteine ist beispielsweise für die einschaligen Schornsteine mit quadratischem Querschnitt (20 cm x 20 cm) auf Bild 4-1 und rundem Querschnitt (20 cm  $\phi$ ) auf Bild 4-2 dargestellt.

Berechnungen, die mit einer feineren Elementierung der Konstruktion durchgeführt wurden, führten nur zu vernachlässigbaren Änderungen der Oberflächentemperaturen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die ursprüngliche Programmversion von den Berichtern derart modifiziert, daß der äußere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_a$  sowie der innere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_i$ , unter Berücksichtigung der Abgasgeschwindigkeit und der thermodynamischen Kennwerte des Abgases, und der innere Emissionsgrad  $\varepsilon_i$  ( $\varepsilon_i = \varepsilon_g (1 + \varepsilon_w)/2$  [7]) automatisch berechnet werden. Hierfür muß lediglich entweder der Abgasmassenstrom oder die Abgasgeschwindigkeit bekannt sein.

Bei der Anwendung von "TASEF-2D" auf die funktionstechnische Bemessung von Hausschornsteinen können folgende Einflußgrößen berücksichtigt werden:

- o Vorgabe beliebiger Temperatur-Zeitfunktionen für die Abgase,
- o Stationäre oder instationäre Temperaturrandbedingungen,
- o Abgasmassenstrom oder Abgasgeschwindigkeit
- o CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Gehalt im Abgas,
- o Beschreibung der Schornstein-Geometrie,
- o Zellen in den Wangen ein- und mehrschaliger Schornsteine,
- o Kennwerte der Schornsteinbaustoffe (Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, Enthalpie)

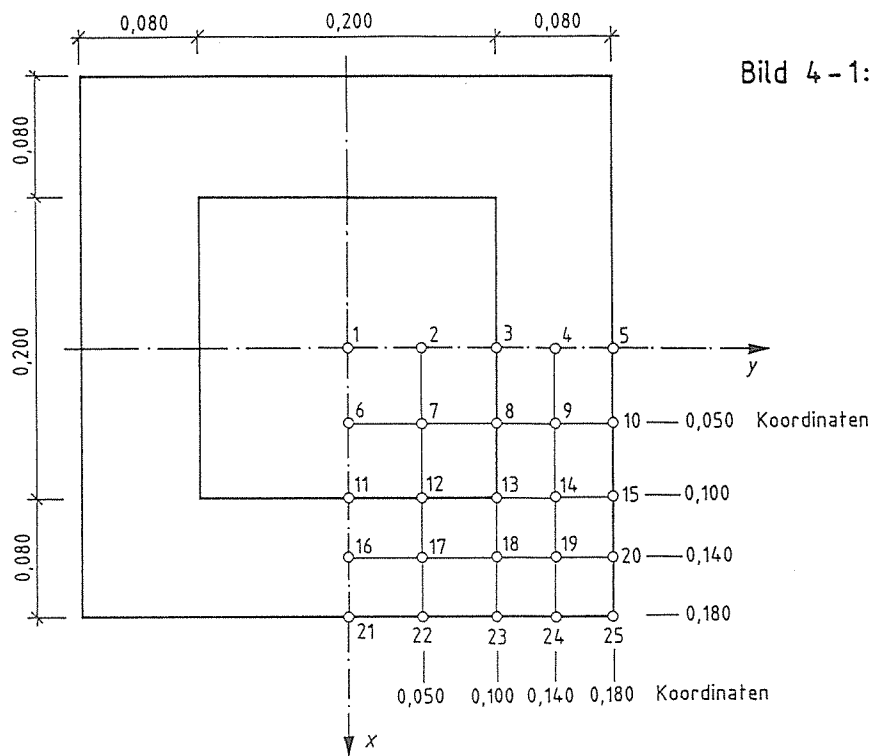


Bild 4-1: Elementierung eines Schornsteines mit einem lichten Querschnitt von 20cm x 20cm (Bilder 5-1 und 5-2)

Maße in m

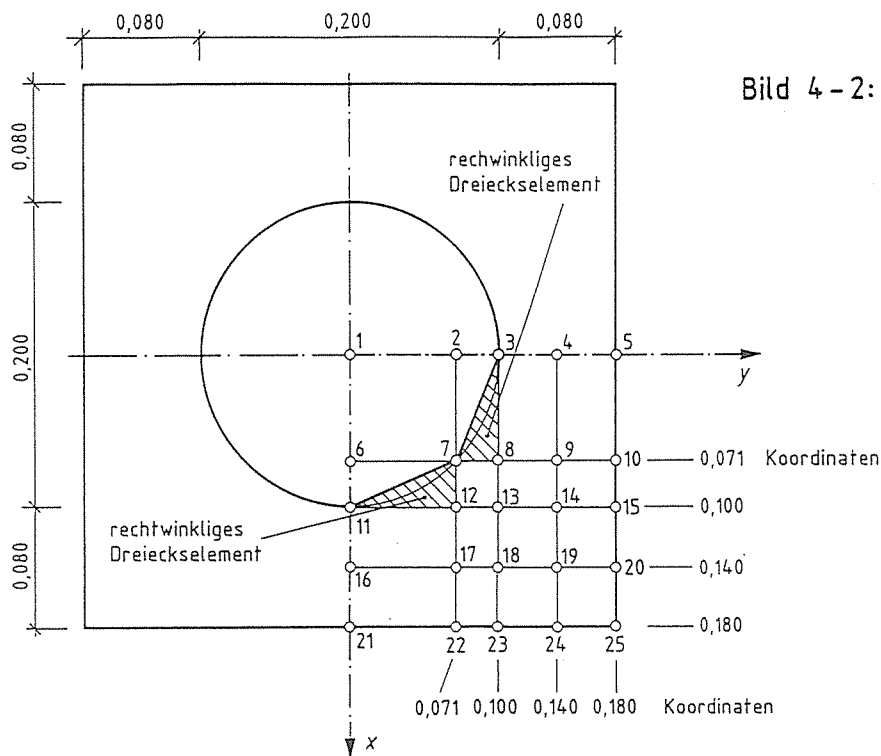


Bild 4-2: Elementierung eines Schornsteines mit rundem lichten Querschnitt von  $\phi 20$ cm (Bild 5-3)

Maße in m

Die hier als Einflußgröße angegebene spezifische Enthalpie  $e$  ergibt sich mittels der auf das Volumen bezogenen, nominellen spezifischen Wärme  $\overline{c_p \varrho}$  nach Wickström [16] aus folgender Beziehung:

$$e = \overline{c_p \varrho} T \quad (4-1)$$

Die Reihenfolge der von "TASEF-2D" benötigten Eingaben geht aus dem Listing hervor (Abschn. 11.1).



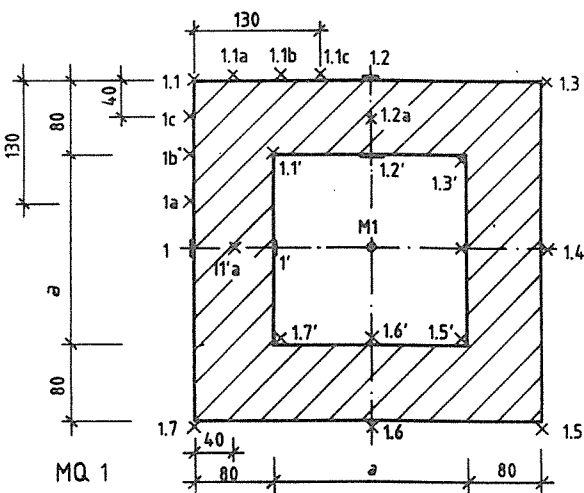
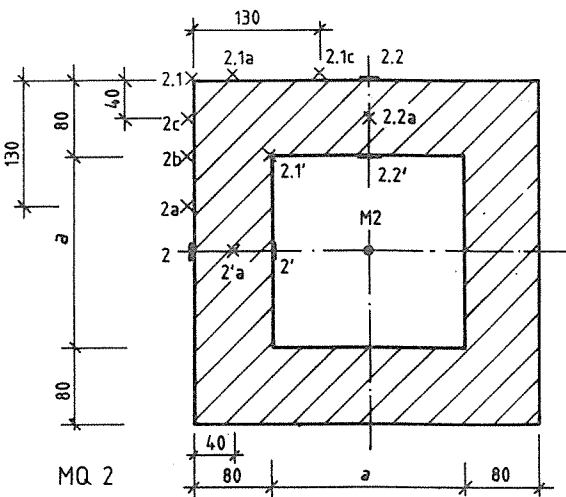
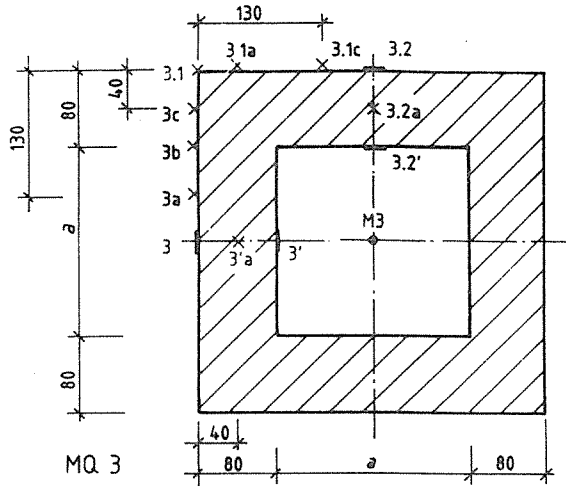
## 5 Absicherung des numerischen Verfahrens mit Versuchsergebnissen

### 5.1 Schornsteine

Zur Absicherung des numerischen Verfahrens werden nach DIN 18 160 Teil 6 [1] ausgeführte Messungen der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (amtliche Materialprüfungsanstalt), Universität (TH) Karlsruhe herangezogen. Die Durchführung der entsprechenden Prüfungen erfolgte im Rahmen eines Forschungsvorhabens dieses Instituts [6] an insgesamt 9 einschaligen Hausschornsteinen aus vollwandigen Leichtbetonformstücken, einer jeweiligen Wangendicke von 8 cm und unterschiedlichen quadratischen und runden Querschnitten. Diese Schornsteine sind auf den Bildern 5-1 bis 5-3 mit der Lage der Temperaturmeßstellen (Normmeßstellen sowie zusätzlichen, im Auftrage der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) angebrachten Temperaturmeßstellen) dargestellt. Diese Schornsteine wurden mit Ausnahme der Ausbrennbeanspruchung (Rußbrandphase) mit der aus Bild 5-4/b [1] ersichtlichen Trocknungsphase sowie der Heizbeanspruchung (Betriebsphase 1 und Betriebsphase 2) thermisch belastet.

Je 3 Schornsteine wurden in der BAM zu den Prüfserien "A", "B" und "C" zusammengefaßt und je nach Kantenlänge bzw. Durchmesser des lichten Querschnitts mit "A14" bis "C25" bezeichnet.

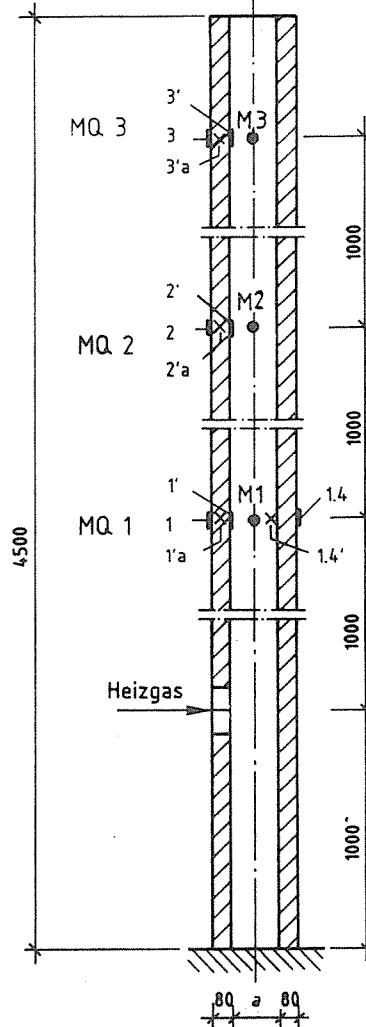
### Querschnitte M1:5 (Maße in mm)



- Thermoelemente auf der Schornsteinachse nach Norm
- ▮ Thermoelemente auf der Schornsteinoberfläche nach Norm
- × Zusatz-Thermoelemente in den Querschnitten MQ 1, MQ 2, MQ 3

MQ Meßquerschnitt

### Längsschnitt M1:20 (Maße in mm)

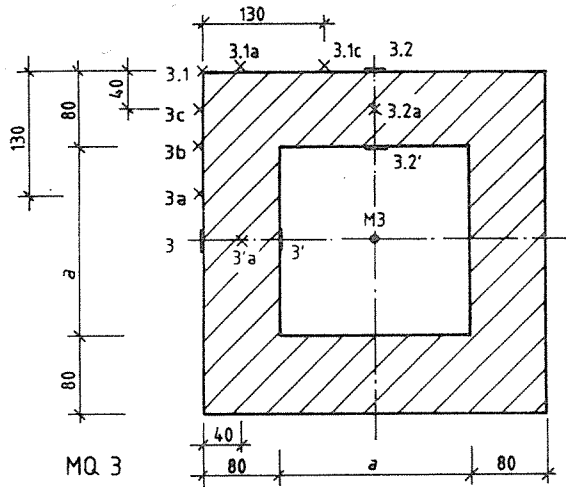


Schornsteinserie "A" (a = 140 mm, a = 200 mm, a = 260 mm)

3 Schornsteine aus Leichtbetonformstücken mit einer Wangendichte von 80 mm und einem lichten quadratischen Querschnitt mit der Kantenlänge a. Die auf den lufttrockenen Beton bezogene mittlere Rohdichte betrug für die einzelnen Schornsteine 1,50 kg/dm<sup>3</sup> (a = 140 mm), 1,40 kg/dm<sup>3</sup> (a = 200 mm) bzw. 1,50 kg/dm<sup>3</sup> (a = 260 mm).

Bild 5-1: Prüfschornsteine und Lage der Thermoelemente

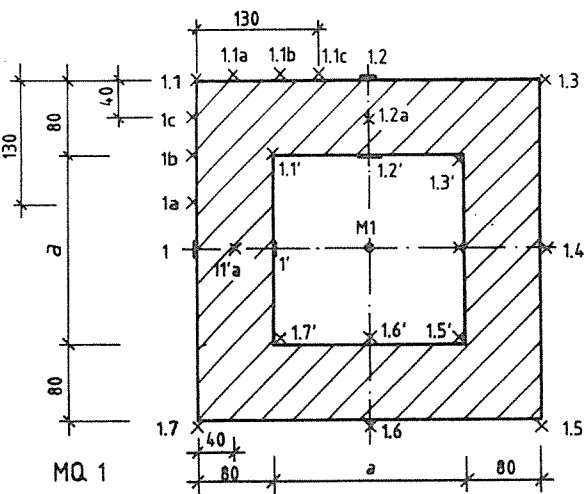
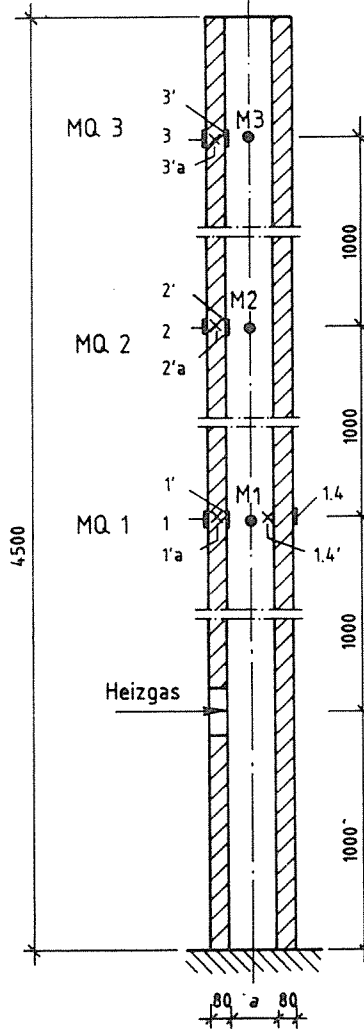
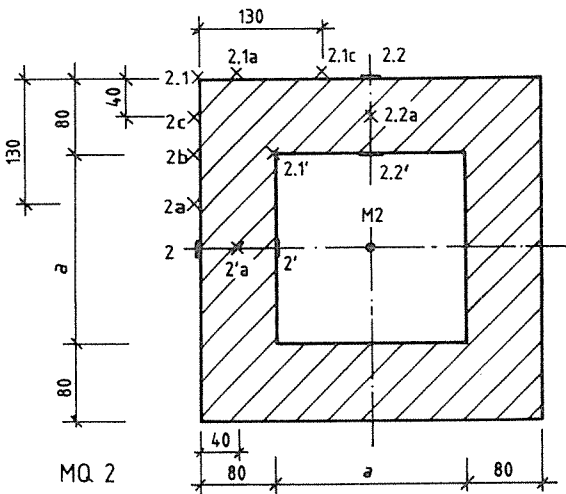
### Querschnitte M1:5 (Maße in mm)



- Thermoelemente auf der Schornsteinachse nach Norm
- || Thermoelemente auf der Schornsteinoberfläche nach Norm
- × Zusatz-Thermoelemente in den Querschnitten MQ 1, MQ 2, MQ 3

MQ Meßquerschnitt

### Längsschnitt M1:20 (Maße in mm)

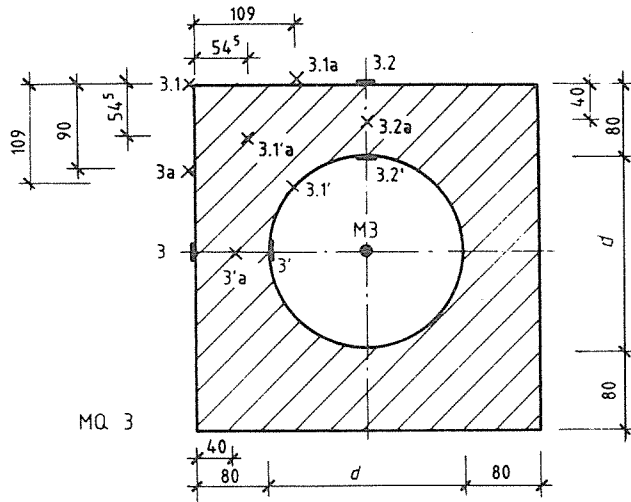


Schornsteinserie "B" ( $a = 140$  mm,  $a = 200$  mm,  $a = 260$  mm)

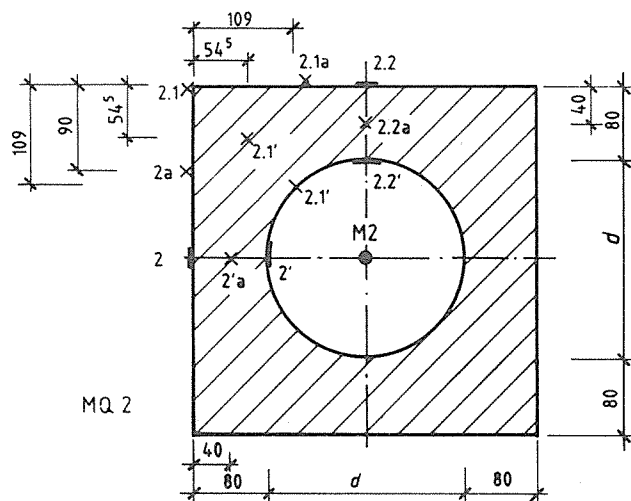
3 Schornsteine aus geschobhohen, vollwandigen Leichtbetonformstücken mit einer Wangendicke von 80 mm und einem lichten, quadratischen Querschnitt mit der Kantenlänge  $a$ . Die auf den lufttrockenen Beton bezogene mittlere Rohdichte betrug für die einzelnen Schornsteine  $1,50$  kg/dm<sup>3</sup>

Bild 5-2: Prüfschornsteine und Lage der Thermoelemente

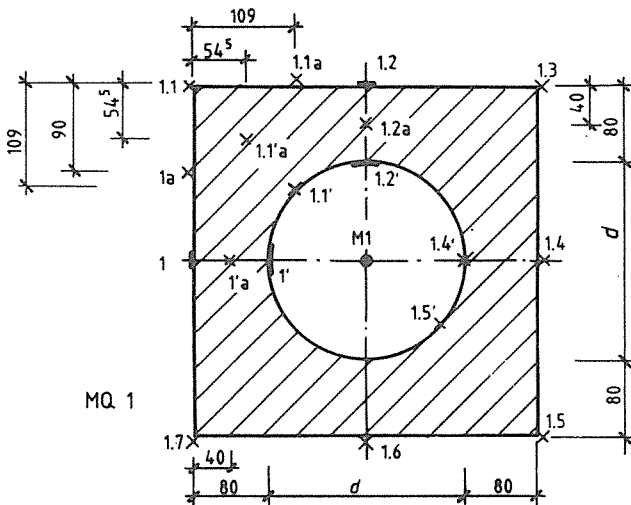
### Querschnitte M1:5 (Maße in mm)



MQ 3



MQ 2

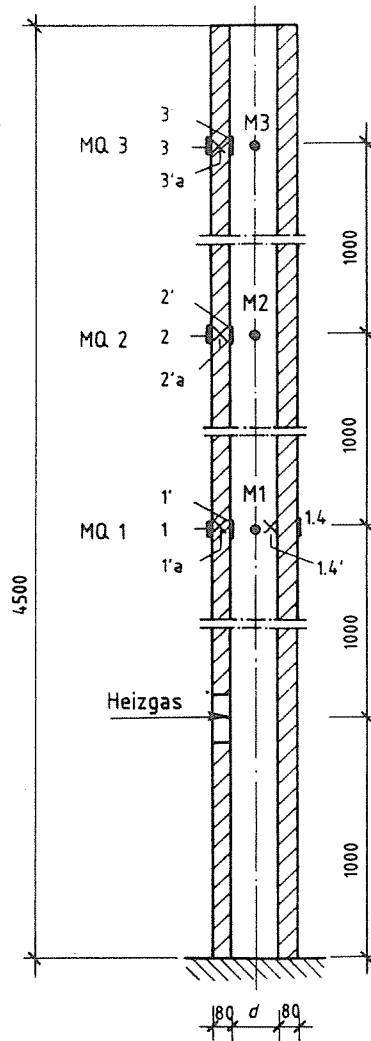


MQ 1

- Thermoelemente auf der Schornsteinachse nach Norm
- ▨ Thermoelemente auf der Schornsteinoberfläche nach Norm
- × Zusatz-Thermoelemente in den Querschnitten MQ1, MQ2, MQ3

MQ Meßquerschnitt

### Längsschnitt M 1:20 (Maße in mm)

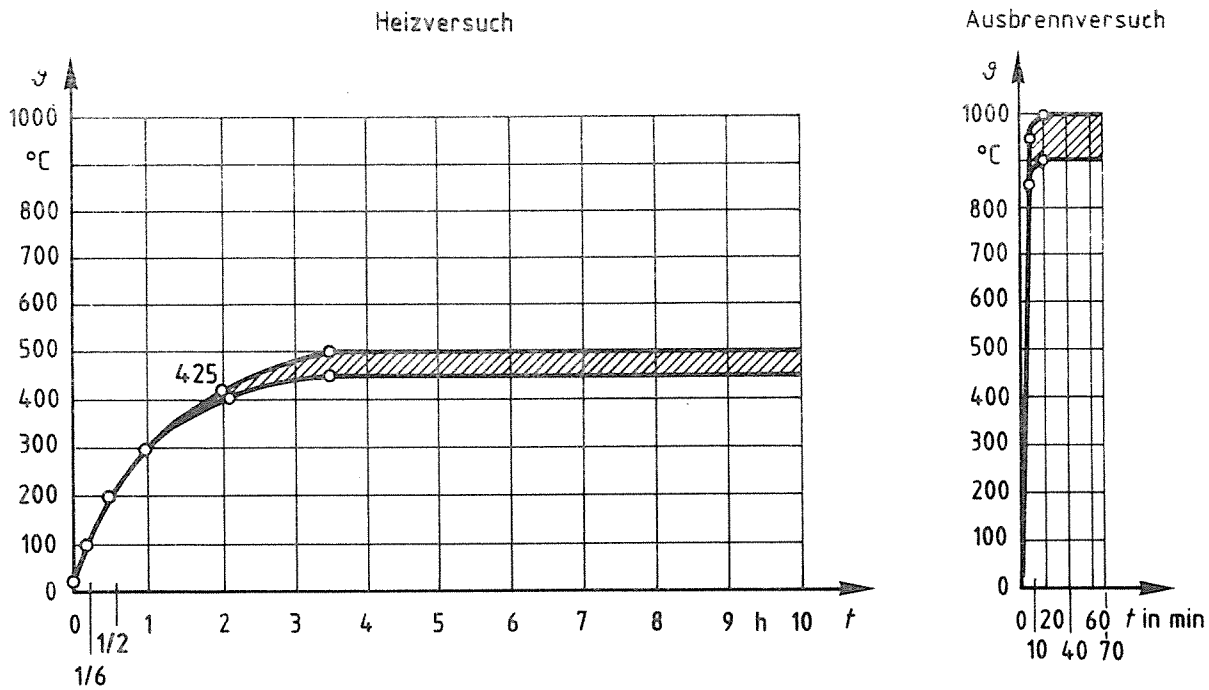


Schornsteinserie "C" ( $d = \phi 140 \text{ mm}, d = \phi 200 \text{ mm}, d = \phi 250 \text{ mm}$ )

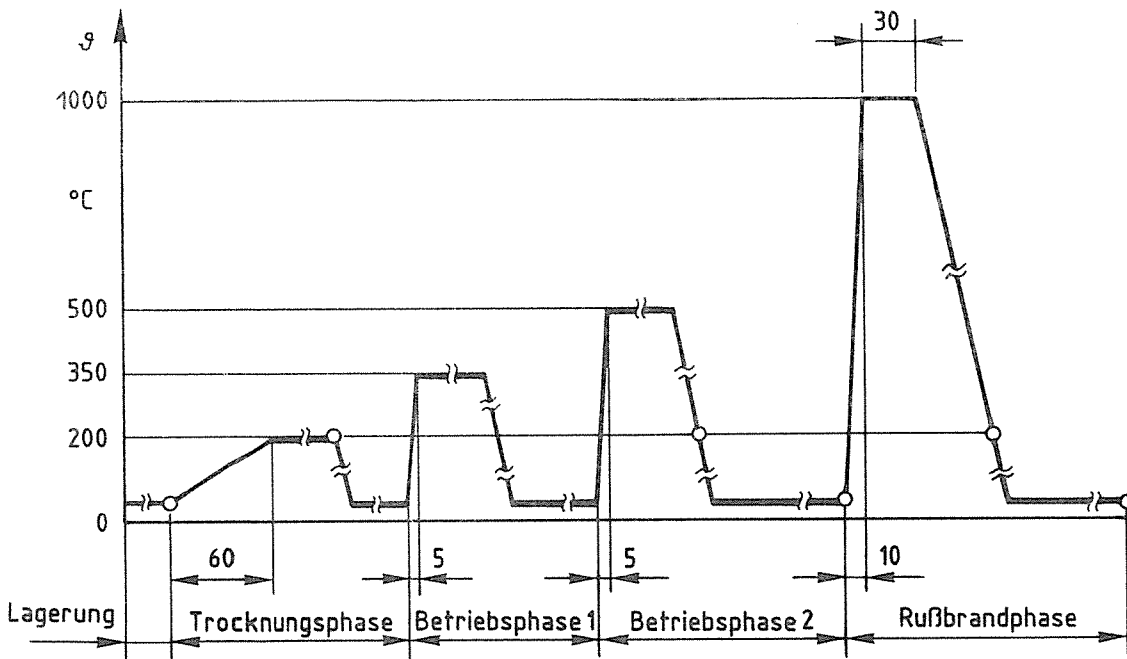
3 Schornsteine aus geschloßhohen vollwandigen Leichtbetonformstücken mit einer Wangendicke von 80mm und einem runden lichten Querschnitt mit dem Durchmesser  $d$ . Die auf den lufttrockenen Beton bezogene mittlere Rohdichte betrug  $1,51 \text{ kg/dm}^3$

Bild 5-3: Prüfschornsteine und Lage der Thermoelemente

a) Temperaturbeanspruchung während einer Schornsteinprüfung nach DIN 18 160 Teil 6, Ausgabe August 1968



b) Temperaturbeanspruchung während einer Schornsteinprüfung (Prüfschornstein A) nach DIN 18 160 Teil 6, Ausgabe Juli 1982



—//— Versuchsdauer bis der Beharrungstemperaturzustand ( $\Delta\vartheta \leq 2K/30\text{min}$ ) an allen Temperaturmeßstellen der Außenfläche im Meßquerschnitt MQ.1 erreicht ist.

○ Dichtheitsversuch

Bild 5-4: Temperaturbeanspruchung von Prüfschornsteinen nach DIN 18 160 Teil 6, Ausgabe 1968 [2] u. Ausgabe 1982 [1]

## 5.2 Diskussion der Temperaturmessung im Schornsteinquerschnitt

Zur Messung der Temperaturen des Verbrennungsgas-Luftgemisches sind nach DIN 18 160 Teil 6 [1] Mantelthermoelemente mit 3,0 mm dicken Drähten und einer wenigstens 25 mm freiliegenden Meßstelle zu verwenden. Dieses Thermoelement steht im Wärmeaustausch

- mit dem Abgas durch Konvektion<sup>1)</sup> sowie
- mit den Schornsteinwänden durch Strahlung.

Hat sich ein thermischer Gleichgewichtszustand zwischen Thermoelement und Umgebung eingestellt, gilt die Beziehung

$$\vartheta_g - \vartheta_{Th} = \frac{C_s \varepsilon_{Th}}{\alpha_{K, Th}} \left[ \left( \frac{T_{Th}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (5-1)$$

Aus dieser Gleichung kann gefolgert werden, daß die mit dem Thermoelement gemessene Temperatur des Verbrennungsgas-Luftgemisches niedriger ist, als die tatsächliche Temperatur. Mit dem Thermoelement würde man also nur unter der Voraussetzung die tatsächlich vorhandene Temperatur  $\vartheta_g$  messen, wenn die Temperatur des Thermoelementes gleich der Temperatur der Schornsteinwände wäre ( $T_{Th} = T_w$ ), so daß Gleichung (5-1) in Gleichung (5-1a) übergeht:

$$\vartheta_g - \vartheta_{Th} = 0 \quad (5-1a)$$

Für den Vergleich der numerisch berechneten mit den gemessenen Oberflächentemperaturen muß daher eine Korrektur der im Schornstein gemessenen Temperaturen vorgenommen werden.

Während davon auszugehen ist, daß  $\varepsilon_{Th}$  bei allen Schornsteinen in etwa gleich ist, werden sowohl die geometrischen als auch die thermodynamischen Einflußgrößen der einzelnen Schornsteine durch  $\alpha_K$  und  $\vartheta_w$  erfaßt. Da diese Einflußgrößen unbekannt sind, erfolgte die Abschätzung der tatsächlich vorhandenen Abgastemperatur  $\vartheta_g$  derart, daß die gemessene Abgastemperatur  $\vartheta_{Th}$  um den sich aus der Differenz der mittleren gemessenen Wandtemperatur  $\vartheta_w$ , Messg und der errechneten Wandtemperatur  $\vartheta_w$ , Rechng. ergebenden Betrag erhöht wurde. (Gleichung (5-2))

$$\vartheta_g \approx \vartheta_{Th} + (\vartheta_w, Messg - \vartheta_w, Rechng) \quad (5-2)$$

Dieser Meßfehler brauchte in [18,19,20,27] nicht berücksichtigt zu werden, da es sich hierbei jeweils um die numerische Bewertung der

---

1) Der Wärmeaustausch zwischen Thermoelement und Abgas durch Strahlung ist nach [17] vernachlässigbar.

Prüfungsergebnisse von mehrschaligen Hausschornsteinen handelte. Bei dieser Schornsteinbauart ist aufgrund der hohen Wärmedämmung der Schornsteinwände der Temperaturunterschied zwischen der Wandtemperatur ( $\vartheta_w$ ) und der an dem Thermoelement in Querschnittmitte gemessenen Temperatur relativ gering. Wird darüber hinaus der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_K$  groß gewählt [18,19,20], führt dies zu einer weiteren Verkleinerung des Temperaturunterschiedes  $\vartheta_{Th} - \vartheta_w$ , so daß letztlich der Unterschied zwischen tatsächlich vorhandener und gemessener Abgastemperatur vernachlässigbar klein ist.

### **5.3 Ermittlung der mittleren Abgasgeschwindigkeit und der thermodynamischen Kennwerte der Schornsteinbaustoffe**

Bei der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 wurden während der Schornsteinprüfungen kontinuierliche Abgasanalysen (Messung der CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Konzentration) vorgenommen (Abschn. 11.2), sowie der Verbrauch an Heizöl EL nach verschiedenen Zeitintervallen festgehalten.

Aus den Messungen der mittleren Abgaskonzentration wurde anhand einer stöchiometrischen Verbrennungsrechnung, einer Massenanalyse des verwendeten Brennstoffs, der Luftüberschuß  $n$  errechnet. Diese Berechnung lieferte unter Berücksichtigung des Brennstoffverbrauchs und der Abgastemperatur einen mittleren Abgasvolumenstrom und eine mittlere Abgasgeschwindigkeit (Abschn. 11.4).

Die für die Abgasanalyse erforderliche Entnahme der Verbrennungsprodukte erfolgte etwa 70 cm unter dem Schornsteinkopf. Hierfür wurde eine aus hitzebeständigem Stahl gefertigte kreuzförmige Absaugsonde (Bild 5-5) mit 3 verschiedenen Sondenköpfen entsprechend den verschiedenen lichten Querschnitten der Prüfschornsteine hergestellt. Die Absauglöcher waren über die vier Sondenfinger derart verteilt, daß sich ein über den gesamten Schornsteinquerschnitt homogener abgesaugter Volumenstrom ergab, der die Messung der tatsächlichen mittleren Konzentrationen erlaubte. Die Analyse (O<sub>2</sub>-, CO<sub>2</sub>-Messung) des entnommenen Abgases erfolgte in der auf Bild 5-6 schematisch dargestellten Meßeinrichtung. Hierbei wird das mit der Kreuzsonde (Bild 5-5) entnommene Abgas in einer Kühlstrecke abgekühlt, teilweise getrocknet, mittels eines Rußfilters gereinigt und in einem nachgeschalteten Trockenturm vollständig getrocknet.

Das CO<sub>2</sub>-Meßgerät ist im Prinzip ein Infrarot-Analysator, wobei die Analyse mit Hilfe der Ultrarot-Spektroskopie vorgenommen wird. Bei

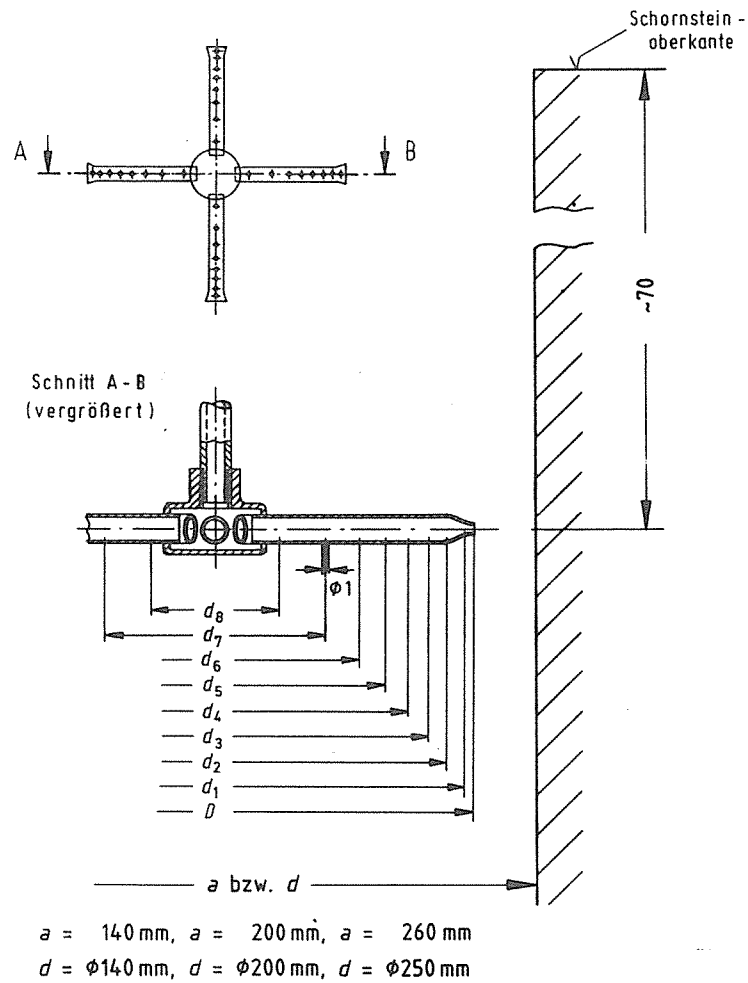


Bild 5-5: Absaugekreuz zur Entnahme der Verbrennungsprodukte aus dem Schornstein

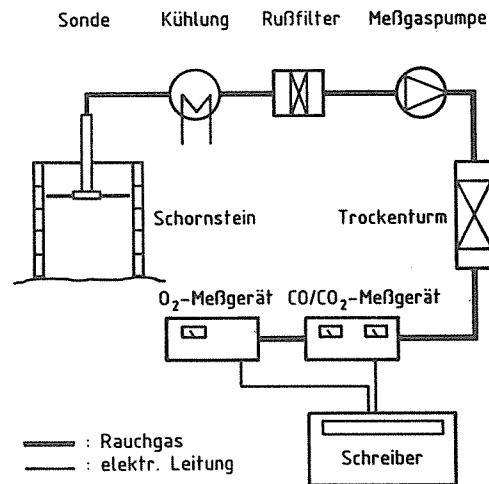


Bild 5-6: Meßaufbau (schematisch) für die Abgasanalyse ( $O_2$ -,  $CO_2$ -Messung)

dem  $O_2$ -Meßgerät handelt es sich um einen thermomagnetischen Sauerstoffanalysator, bei dem die Analyse aufgrund des Paramagnetismus des Sauerstoffs erfolgt. Die ermittelten Meßwerte wurden während des jeweiligen Versuches kontinuierlich mit einem Kompensationspunkt-drucker aufgezeichnet.



Darüber hinaus erfolgte die Messung des Verbrauchs an Heizöl EL während der Trocknungsphase und der Heizbeanspruchung entsprechend der Betriebsphase 1 nach verschiedenen Zeitintervallen. Während dieser Beanspruchungen erfolgte keine Abgasanalyse.

Außerdem wurden aus den Leichtbetonformstücken der Prüfschornsteinserien "A" bis "C" Probekörper für die Bestimmung der thermodynamischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) entnommen. Die Durchführung der entsprechenden Messungen erfolgte in der "Amtliche Materialprüfanstalt für Steine und Erden", Zehntnerstr. 2A, 3392 Clausthal-Zellerfeld.

#### 5.4 Vergleich und Diskussion der gemessenen Oberflächentemperaturen

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen erfolgte mit dem Computer-Programm "TASEF-2D" (Abschn. 4). Den Berechnungen lagen die in den Tabellen 5-1 bis 5-4 zusammengestellten Einflußgrößen zugrunde. Die Rechenergebnisse sind den Versuchsergebnissen in den Tabellen 5-5 und 5-5a gegenübergestellt. Während die in der Tabelle 5-5 zusammengestellten Rechenergebnisse unter Berücksichtigung der angenäherten tatsächlich vorhandenen Abgastemperatur (vgl. Abschn. 5.2) ermittelt wurden, sind im Vergleich dazu die in der Tabelle 5-5a angegebenen

Tabelle 5-1: Zusammenstellung der Kennwerte zur Berechnung des Wärmeübergangs an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche (Betriebsphase 2)

Kennwerte	Dimension		Schornsteinbezeichnung <sup>1)</sup>					
			A14 <sup>2)</sup>	B14 <sup>3)</sup>	C14 <sup>4)</sup>	A20 <sup>2)</sup>	B20 <sup>3)</sup>	C20 <sup>4)</sup>
Abgastemperatur	$\vartheta_g$	°C	500					
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	16,1	15,9	16,1	16,8	15,6	15,6
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,5	3,4	3,6	2,8	3,6	3,3
Luftüberschuß	n	-	4,3	4,1	4,3	5,0	3,9	3,9
Heizölverbrauch		l/min	0,038	0,045	0,036	0,046	0,045	0,045
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,036	0,037	0,028	0,050	0,035	0,038
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	3,7	4,1	3,9	2,5	1,9	2,6
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08
	außen	$\epsilon_a$	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	12,4	13,4	12,7	8,7	6,5	8,8
	außen	$\alpha_a$	8,9	8,9	8,8	8,8	8,8	8,6

1) vgl. Abschn. 5.1      3) vgl. Bild 5-2

2) vgl. Bild 5-1      4) vgl. Bild 5-3

Rechenergebnisse auf der Basis der gemessenen Abgastemperatur ermittelt worden.

Aus den im Abschnitt 5.2 dargelegten Gründen war die den gemessenen Abgastemperaturen zuzuordnende tatsächliche thermische Belastung weit höher, als dies nach DIN 18 160 Teil 6 [1] zulässig ist.

Tabelle 5-2: Zusammenstellung der Kennwerte zur Berechnung des Wärmeübergangs an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche (Betriebsphase 2)

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung <sup>1)</sup>			
		A26 <sup>2)</sup>	B26 <sup>3)</sup>	C25 <sup>4)</sup>	
Abgastemperatur	$\vartheta_g$	°C	500		
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	15,9	15,8	15,8
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,4	3,4	3,4
Luftüberschuß	n	-	4,1	4,0	4,0
Heizölverbrauch		l/min	0,044	0,047	0,048
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,039	0,040	0,038
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	1,2	1,3	1,6
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	0,10	0,09	0,09
	außen	$\epsilon_a$	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	5,0	5,0	5,8
	außen	$\alpha_a$	8,7	8,7	8,4

1) vgl. Abschn. 5.1; 2) vgl. Bild 5-1; 3) vgl. Bild 5-2; 4) vgl. Bild 5-3

Tabelle 5-3: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Leichtbetonformstücke in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta$  und die auf den trockenen Stoff bezogene Rohdichte  $\rho$ .

Temperatur	Schornsteinserie "A" <sup>1)</sup>			Schornsteinserie "B" <sup>2)</sup>			Schornsteinserie "C" <sup>3)</sup> mit		
	mit einem Querschnitt von						einem runden Querschnitt von		
	14/14	20/20	26/26	14/14	20/20	26/26	14 cm $\varnothing$	20 cm $\varnothing$	25 cm $\varnothing$
	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]			
°C	$\lambda$ [(W/mK)]								
50	0,70	0,70	0,85	0,72	0,72	0,72	0,66	0,67	0,70
250	0,68	0,61	0,73	0,65	0,65	0,64	0,63	0,66	0,66
500	0,65	0,58	0,66	0,60	0,60	0,58	0,58	0,57	0,59
750	0,61	0,63	0,69	0,60	0,60	0,58	0,59	0,57	0,59
1000	0,62	0,68	0,73	0,60	0,60	0,58	0,63	0,60	0,62
-	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]								
110	1,55	1,44	1,565	1,49	1,50	1,515	1,495	1,535	1,51

1) vgl. Bild 5-1    2) vgl. Bild 5-2    3) vgl. Bild 5-3

Tabelle 5-4: Spez. Wärmekapazität  $c_p$  der Leitbetonformstücke in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperatur	Schornsteinserie "A"1)			Schornsteinserie "B"2)			Schornsteinserie "C" 3) mit		
	mit einem Querschnitt von						einem runden Querschnitt von		
°C	14/14 [cm <sup>2</sup> ]	20/20 [cm <sup>2</sup> ]	26/26 [cm <sup>2</sup> ]	14/14 [cm <sup>2</sup> ]	20/20 [cm <sup>2</sup> ]	26/26 [cm <sup>2</sup> ]	14 cm $\phi$	20 cm $\phi$	25 cm $\phi$
	$c_p$ [J/(kgK)]								
50	960	1170	1130	1000	860	850	1060	940	980
250	1130	1210	1190	1110	970	970	1190	1150	1190
500	1210	1280	1240	1180	1000	1020	1300	1170	1240
750	1210	1290	1230	1210	1040	1040	1350	1190	1280
1000	1250	1280	1240	1260	1100	1100	1370	1210	1360

1) vgl. Bild 5-1    2) vgl. Bild 5-2    3) vgl. Bild 5-3

Aus der Tabelle 5-5 geht in Verbindung mit den Bildern in Abschn. 11.5 (Bilder E-1 bis E-6) hervor, daß bei den Schornsteinen mit einem quadratischen Querschnitt die numerisch ermittelten Oberflächentemperaturen innerhalb des durch die Meßunsicherheit bestimmten Intervalls liegen. Lediglich bei den Schornsteinen mit rundem Querschnitt ergibt die Rechnung an den Außenoberflächen höhere Temperaturen, als sich während der Versuche einstellten. Der Grund hierfür dürfte in einer Änderung der Randbedingungen in der Umgebung der Schornsteine während der Prüfung zu suchen sein. Diese Hypothese läßt sich durch den atypischen Temperatur-Zeitverlauf an den Außenflächen der Schornsteine C14 (Bild E-2), C20 (Bild E-4) und C25 (Bild E-6) erhärten. Wie aus diesen Bildern zu ersehen ist, liegt die numerisch ermittelte Temperatur-Zeitfunktion bis etwa zur 180. Versuchsminute innerhalb der Schwankungsbreite der gemessenen Temperatur-Zeitverläufe. Während etwa ab dieser Versuchszeit die rechnerische Temperatur-Zeitfunktion noch weiter ansteigt, ihren Beharrungstemperaturzustand also noch nicht erreicht hat, gehen die gemessenen plötzlich in einen konstanten Verlauf über und bekunden somit das Erreichen ihres Beharrungstemperaturzustandes. Allein ein Vergleich mit den gemessenen Temperatur-Zeitfunktionen der anderen Prüfschornsteine macht deutlich, daß dieser abrupte Übergang in den Beharrungstemperaturzustand atypisch ist.

Da während der Heizbeanspruchung (Betriebsphase 1) und der Trocknungsphase (Bild 5-4) keine Abgasanalyse durchgeführt wurde, sondern lediglich eine auf die Zeiteinheit bezogene Messung des Heizölver-

Tabelle 5-5: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen mit den berechneten Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche (Abschn. 11.5) nach Erreichen des Beharrungstemperaturzustandes (Betriebsphase 2; Bild 5-4(b))

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert <sup>2)</sup>	$w_m$	Temperaturerhöhungen an der Innenfläche <sup>3)</sup>			Temperaturerhöhungen an der Außenfläche <sup>4)</sup>			Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampf- gehalt				
			min. im Mittel	Meßwerte	Rechenwert	min. im Mittel	Meßwerte	Rechenwert							
-	°C	m/s	K	K	K	K	K	°C	%	g/m <sup>3</sup>					
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A 14	502	3,70	356	410	384	375	E-1	90	108	101	106	E-2	24	77	24,6
B 14	503	540	355	414	379	380	"	94	105	100	104	"	21	40	20,4
C 14	505	570	380	352	369	364	"	65	68	66	85	"	18	67	16,8
A 20	502	555	2,50	374	390	382	E-3	97	112	105	107	E-4	22	60	21,6
B 20	505	570	1,85	334	406	376	"	96	117	111	110	"	19	39	17,8
C 20	504	580	2,54	346	384	373	"	65	67	66	93	"	20	58	19,0
A 26	503	600	1,15	391	418	408	E-5	131	137	134	127	E-6	24	62	24,6
B 26	507	590	1,30	393	438	406	"	110	122	115	119	"	19	40	17,8
C 25	504	590	1,55	332	407	367	"	65	78	69	96	"	20	64	19,0

1) vgl. Abschnitt 5.1 und Bilder 5-1 bis 5-3

2) Mit Korrektur der Meßwerte (vgl. Abschn. 5.2)

3) Meßstellen 1; 1.2; 1.4; 1.6

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

Tabelle 5-5a: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen mit den berechneten Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche (Abschn. 11.5) nach Erreichen des Beharrungstemperaturzustandes (Betriebsphase 2; Bild 5-4(b))

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert <sup>2)</sup>	m/s	Temperaturerhöhungen an der Innenfläche <sup>3)</sup>			Temperaturerhöhungen an der Außenfläche <sup>4)</sup>			Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampf- gehalt			
			min. im Mittel	Meßwerte	Rechenwert	min. im Mittel	Meßwerte	Rechenwert						
-	°C		K	K	K	K	K	°C	%	g/m <sup>3</sup>				
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A 14	502	500	3,70	356	410	384	341	90	108	101	98	24	77	24,6
B 14	503	500	4,05	355	414	379	349	94	105	100	97	21	40	20,4
C 14	505	500	3,80	352	376	369	315	65	68	66	75	18	67	16,8
A 20	502	500	2,50	374	390	382	337	97	112	105	98	22	60	21,6
B 20	505	500	1,85	334	406	376	320	96	117	111	96	19	39	17,8
C 20	504	500	2,54	346	384	373	309	65	67	66	80	20	58	19,0
A 26	503	500	1,15	391	418	408	311	131	137	134	103	24	62	24,6
B 26	507	500	1,30	393	438	406	320	110	122	115	99	19	40	17,8
C 25	504	500	1,55	332	407	367	295	65	78	69	79	20	64	19,0

1) vgl. Abschnitt 5.1 und Bilder 5-1 bis 5-3

2) Ohne Korrektur der Meßwerte

3) Meßstellen 1; 1.2; 1.4; 1.6

(vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

brauchs erfolgte, wird der mutmaßliche Abgasmassenstrom für die vorge-  
nannten Beanspruchungsarten abgeschätzt.

Da die thermische Belastung der Prüfschornsteine sowohl während der  
Heizbeanspruchung (Betriebsphase 1) als auch der Trocknungsphase mit  
demselben Brennstofftyp (Heizöl EL) und unter den gleichen versuchs-  
technischen Randbedingungen erfolgte, wird hier entsprechend den in  
den Tabellen 5-1 und 5-2 angegebenen Luftüberschuß ein mittlerer  
Luftüberschuß von  $n = 4,1$  gewählt. Unter dieser Voraussetzung  
lassen sich sowohl der  $CO_2$ - und  $O_2$ -Gehalt im Abgas als auch der Ab-  
gasmassenstrom abschätzen.

Zwischen dem tatsächlichen Kohlendioxid-Gehalt ( $CO_2$ ) und dem maximal  
möglichen Kohlendioxid-Gehalt ( $CO_{2max}$ ) im Abgas besteht die Beziehung

$$CO_2 = \frac{CO_{2max}}{1 + (n-1) \frac{L_{mintr}}{V_{mintr}}} \quad (5-3)$$

In vorstehender Gleichung ist  $L_{mintr}$  der trockene Luftmindestbedarf  
für die Erzeugung des trockenen Verbrennungsgasvolumens ( $V_{mintr}$ ).  
Diese beiden Größen werden für Heizöl EL in [17] mit  $11,19688 \text{ m}^3/\text{kg}$   
Heizöl ( $L_{mintr}$ ) und  $10,4445 \text{ m}^3/\text{kg}$  Heizöl ( $V_{mintr}$ ) beziffert.  $CO_{2max}$   
beträgt für Heizöl EL  $15,3 \text{ Vol-\%}$  [17].

Da die trockene Verbrennungsluft aus etwa  $21 \text{ Vol-\%}$  Sauerstoff und  
etwa  $79 \text{ Vol-\%}$  Stickstoff besteht, ergibt sich der Sauerstoffgehalt im  
Abgas aus der Beziehung

$$\frac{O_2}{21 - O_2} = \frac{L_{mintr}}{V_{mintr}} \quad (5-4)$$

Unter Zugrundelegung der Ausführungen in [20] ergibt sich das feuchte  
Abgasvolumen  $V_n$  in  $\text{m}^3$  Abgas/kg Heizöl aus Gleichung (5-4):

$$V_n = V_{mintr} + L_{mintr} [(n-1) + \varphi_{fL} 1,243 \cdot 10^{-3}] + 11,1111 H_2 10^{-2} \quad (5-5)$$

Die während der Schornsteinprüfungen im Prüfraum gemessenen klima-  
tischen Bedingungen, die relative Luftfeuchtigkeit ( $\varphi$ ) und der Was-  
serdampfgehalt ( $\psi_L$ ) der Raumluft gehen aus den Tabellen 5-8 und 5-11  
hervor.

Das Abgasvolumen ist temperaturabhängig und ergibt sich für eine  
bestimmte Temperatur  $\vartheta$  aus der Beziehung:

$$V_\vartheta = V_n \frac{273 + \vartheta}{273} \quad (5-6)$$

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Abgas-Rohdichte  $\rho$  und der  
Abgas-Temperatur  $\vartheta$  ist auf Bild 5-7 dargestellt.

Der aus den vorstehenden Überlegungen ermittelte Abgasmassenstrom geht u.a. aus den Tabellen 5-6 und 5-7 (Betriebsphase 1) sowie den Tabellen 5-9 und 5-10 (Trocknungsphase) hervor. Die mit diesen Einflußgrößen (Tabellen 5-6, 5-7, 5-9, 5-10) ermittelten Oberflächentemperaturen sind den Versuchsergebnissen in den Tabellen 5-8 und 5-8a (Betriebsphase 1) sowie 5-11 und 5-11a (Trocknungsphase) gegenübergestellt. Während die in den Tabellen 5-8 und 5-11 rechnerisch ermittelten Oberflächentemperaturen entsprechend den Ausführungen in Abschn. 5.2 korrigiert wurden, basierten die in den Tabellen 5-11 und 5-11a angegebenen Rechenergebnisse auf den unkorrigierten Abgastemperaturen.

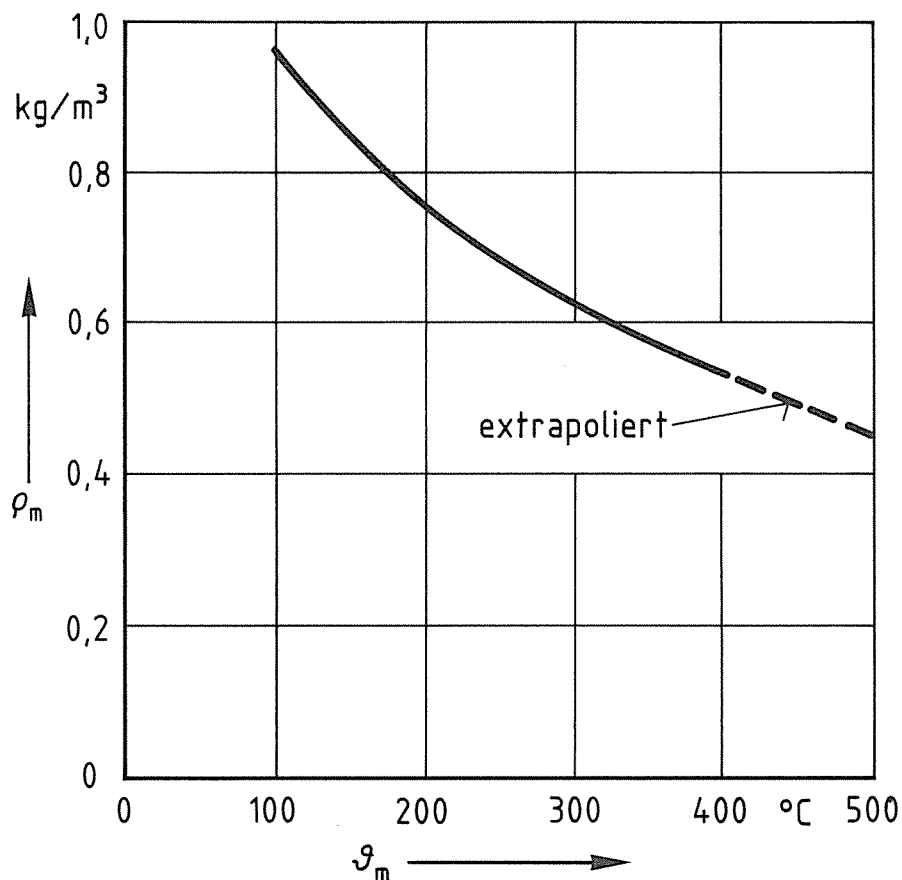


Bild 5-7: Mittlere Rohdichte  $\rho_m$  der Abgase in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur  $\theta_m$  nach [30]

**Tabelle 5-6:** Zusammenstellung der Kennwerte zur Berechnung des Wärmeübergangs an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche (Betriebsphase 1)

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung <sup>1)</sup>							
		A14 <sup>2)</sup>	B14 <sup>3)</sup>	C14 <sup>4)</sup>	A20 <sup>2)</sup>	B20 <sup>3)</sup>	C20 <sup>4)</sup>		
Abgastemperatur	$\vartheta_g$	°C	350						
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
Luftüberschuß	n	-	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	
Heizölverbrauch		l/min	0,037	0,041	0,032	0,036	0,038	0,037	
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,033	0,036	0,028	0,033	0,033	0,033	
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	2,9	3,2	3,2	1,4	1,4	1,8	
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	-	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08
	außen	$\epsilon_a$	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	W/(m <sup>2</sup> K)	12,1	13,3	13,2	6,0	6,4	7,8
	außen	$\alpha_a$		8,6	8,7	8,4	8,3	8,4	8,2

1) vgl. Abschn. 5.1      3) vgl. Bild 5-3

2) vgl. Bild 5-1      4) vgl. Bild 5-3

**Tabelle 5-7:** Zusammenstellung der Kennwerte zur Berechnung des Wärmeübergangs an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche (Betriebsphase 1)

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung <sup>1)</sup>				
		A26 <sup>2)</sup>	B26 <sup>3)</sup>	C25 <sup>4)</sup>		
Abgastemperatur	$\delta_g$	°C	350			
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,5	3,5	3,5	
Luftüberschuß	n	-	4,1	4,1	4,1	
Heizölverbrauch		l/min	0,040	0,038	0,041	
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,035	0,033	0,032	
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	0,9	0,8	1,1	
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	-	0,08	0,08	0,08
	außen	$\epsilon_a$	-	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	W/(m <sup>2</sup> K)	5,0	5,0	5,7
	außen	$\alpha_a$		8,3	8,4	8,4

1) vgl. Abschn. 5.1      3) vgl. Bild 5-2

2) vgl. Bild 5-1      4) vgl. Bild 5-3



Tabelle 5-8: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen mit den berechneten Temperaturerhöhungen über die Anfangs-temperatur im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche (Abschn. 11.5) nach Erreichen des Beharrungstemperaturzustandes (Betriebsphase 1; Bild 5-4(b))

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert <sup>2)</sup>	Temperaturerhöhungen an der Innenfläche <sup>3)</sup>						Temperaturerhöhungen an der Außenfläche <sup>4)</sup>						Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampf- gehalt
		min.	max.	im Mittel	Rechenwert	vgl. Bild	Meßwerte	min.	max.	im Mittel	Rechenwert	vgl. Bild	°C			
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A 14	349	380	3,10	235	260	252	245	E-7	65	67	66	74	E-8	20	48	19,0
B 14	353	375	3,50	231	256	243	246	"	64	69	67	72	"	17	39	15,8
C 14	351	375	4,30	212	240	229	229	"	55	58	56	58	"	18	62	16,8
A 20	350	420	1,45	249	257	252	251	E-9	66	77	71	76	E-10	21	57	20,4
B 20	354	410	1,53	206	269	247	240	"	64	69	68	75	"	17	36	15,8
C 20	350	400	1,41	211	245	229	227	"	57	60	58	62	"	21	63	20,4
A 26	351	450	0,94	247	268	260	263	E-11	86	95	90	90	E-12	22	59	21,6
B 26	353	440	0,90	251	291	264	264	"	67	72	69	83	"	15	39	15,6
C 25	350	430	1,35	227	277	255	244	"	58	69	63	68	"	20	88	19,0

1) vgl. Abschnitt 5.1 und Bilder 5-1 bis 5-3

2) Mit Korrektur der Meßwerte (vgl. Abschn. 5.2)

3) Meßstellen 1; 1.2; 1.4; 1.6

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

(vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

Tabelle 5-8a: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen mit den berechneten Temperaturerhöhungen über die Anfangs-  
temperatur im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche (Abschn. 11.5) nach Er-  
reichen des Beharrungstemperaturzustandes (Betriebsphase 1; Bild 5-4(b))

Schorn- stein 1)	Temperatur im Schorn- stein Meß-/Rechen- wert <sup>2)</sup>	m/s	Temperaturerhöhungen an der Innenfläche <sup>3)</sup>			Temperaturerhöhungen an der Außenfläche <sup>4)</sup>			Luft- tempe- ratur	relative Luft- feuch- tigkeit	Wasser- dampf- gehalt			
			min. max. im Mittel	Rechen- wert	Meßwerte	min. max. im Mittel	Rechen- wert	Meßwerte						
-	°C		K	K	K	K	K	°C	%	g/m <sup>3</sup>				
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A 14	349	350	3,10	235	260	252	222	222	65	67	66	20	48	19,0
B 14	353	350	3,50	231	256	243	226	226	64	69	67	17	39	15,8
C 14	351	350	4,30	212	240	229	211	211	55	58	56	18	62	16,8
A 20	350	350	1,45	249	257	252	195	195	66	77	71	21	57	20,4
B 20	354	350	1,53	206	269	247	194	194	64	69	68	17	36	15,8
C 20	350	350	1,91	211	245	229	191	191	57	60	58	21	63	20,4
A 26	351	350	0,94	247	268	260	184	184	86	95	90	22	59	21,6
B 26	353	350	0,90	251	291	264	191	191	67	72	69	15	39	13,6
C 25	350	350	1,35	227	277	255	183	183	58	69	63	20	88	19,0

1) vgl. Abschnitt 5.1 und Bilder 5-1 bis 5-3

2) Ohne Korrektur der Meßwerte

3) Meßstellen 1; 1.2; 1.4; 1.6

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

**Tabelle 5-9:** Zusammenstellung der Kennwerte zur Berechnung des Wärmeübergangs an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche (Trocknungsphase)

Kennwerte	Dimension		Schornsteinbezeichnung <sup>1)</sup>						
			A14 <sup>2)</sup>	B14 <sup>3)</sup>	C14 <sup>4)</sup>	A20 <sup>2)</sup>	B20 <sup>3)</sup>	C20 <sup>4)</sup>	
Abgastemperatur	$\delta_g$	°C	200						
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
Luftüberschuß	n	-	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	
Heizölverbrauch		l/min	0,019	0,020	0,016	0,020	0,022	0,021	
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,017	0,017	0,014	0,017	0,019	0,018	
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	1,2	1,2	1,2	0,5	1,6	0,8	
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	-	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09
	außen	$\epsilon_a$	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	W/(m <sup>2</sup> K)	5,9	6,1	6,4	5,0	5,0	5,0
	außen	$\alpha_a$		7,8	7,8	7,6	7,7	7,7	7,4

1) vgl. Abschn. 5.1      3) vgl. Bild 5-2

2) vgl. Bild 5-1      4) vgl. Bild 5-3

**Tabelle 5-10:** Zusammenstellung der Kennwerte zur Berechnung des Wärmeübergangs an der inneren und äußeren Schornsteinoberfläche (Trocknungsphase)

Kennwerte	Dimension		Schornsteinbezeichnung <sup>1)</sup>			
			A26 <sup>2)</sup>	B26 <sup>3)</sup>	C25 <sup>4)</sup>	
Abgastemperatur	$\delta_g$	°C	200			
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	15,8	15,8	15,8	
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,5	3,5	3,5	
Luftüberschuß	n	-	4,1	4,1	4,1	
Heizölverbrauch		l/min	0,024	0,022	0,019	
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,021	0,019	0,017	
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	0,4	0,4	0,4	
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	-	0,11	0,11	0,11
	außen	$\epsilon_a$	-	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	W/(m <sup>2</sup> K)	5,0	5,0	5,0
	außen	$\alpha_a$		7,6	7,6	7,4

1) vgl. Abschn. 5.1      3) vgl. Bild 5-2

2) vgl. Bild 5-1      4) vgl. Bild 5-3

Tabelle 5-11: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen mit den berechneten Temperaturerhöhungen über die Anfangs- temperatur im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche (Abschn. 11.5) nach Er- reichen des Beharrungstemperaturzustandes (Trocknungsphase; Bild 5-4(b))

Schorn- stein 1)	Temperatur im Schorn- stein Meß-/Rechen- wert <sup>2)</sup>	m/s	Temperaturerhöhungen an der Innenfläche <sup>3)</sup>			Temperaturerhöhungen an der Außenfläche <sup>4)</sup>			Luft- tempe- ratur	relative Luft- feuch- tigkeit	Wasser- dampf- gehalt					
			min. max. im Mittel	Meßwerte	Rechen- wert im Mittel	min. max. im Mittel	Meßwerte	Rechen- wert im Mittel								
-	°C		K	K	K	K	K	°C	%	g/m <sup>3</sup>						
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A 14	200	275	1,19	125	134	127	120	E-13	30	37	32	38	E-14	19	51	17,8
B 14	202	260	1,23	103	138	120	129	"	39	42	41	39	"	16	39	14,6
C 14	203	255	1,29	101	120	112	109	"	27	29	29	31	"	18	53	16,8
A 20	201	255	0,62	116	123	119	117	E-15	27	33	29	38	E-16	19	57	17,8
B 20	203	260	0,68	97	137	120	121	"	43	50	47	41	"	14	37	12,8
C 20	202	427	0,83	110	130	118	116	"	33	35	34	32	"	19	61	17,8
A 26	201	280	0,44	114	133	127	131	E-17	47	53	50	48	E-18	21	72	20,4
B 26	203	275	0,41	126	153	135	139	"	43	48	47	48	"	12	41	11,4
C 25	203	270	0,48	108	141	125	123	"	28	37	33	36	"	20	71	19,0

1) vgl. Abschnitt 5.1 und Bilder 5-1 bis 5-3

2) Mit Korrektur der Meßwerte (vgl. Abschn. 5.2)

3) Meßstellen 1; 1.2; 1.4; 1.6

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

Tabelle 5-11a: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen mit den berechneten Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche (Abschn. 11:5) nach Erreichen des Beharrungstemperaturzustandes (Trocknungsphase; Bild 5-4(b))

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert <sup>2)</sup>	Temperaturerhöhungen an der Innenfläche <sup>3)</sup>		Temperaturerhöhungen an der Außenfläche <sup>4)</sup>		Rechenwert	Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampfgehalt				
		min. im Mittel	max. im Mittel	min. im Mittel	max. im Mittel								
-	°C	m/s	K	K	K	K	°C	%	g/m <sup>3</sup>				
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A 14	200	1,19	125	134	127	85	30	37	32	27	19	51	17,8
B 14	200	1,23	103	138	120	86	39	42	41	28	16	39	14,6
C 14	200	1,29	101	120	112	81	27	29	29	22	18	53	16,8
A 20	200	0,62	116	123	119	86	27	33	29	28	19	57	17,8
B 20	200	0,68	97	137	120	87	43	50	47	30	14	37	12,8
C 20	200	0,83	110	130	118	80	33	35	34	23	19	61	17,8
A 26	200	0,44	114	133	127	85	47	53	50	32	21	72	20,4
B 26	200	0,41	126	153	135	93	43	48	47	33	12	41	11,4
C 25	200	0,48	108	141	125	84	28	37	33	26	20	71	19,0

1) vgl. Abschnitt 5.1 und Bilder 5-1 bis 5-3

2) Ohne Korrektur der Meßwerte

3) Meßstellen 1; 1.2; 1.4; 1.6

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

## 5.5 Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes $1/\Lambda$ von Hausschornsteinen

Durch die Modifizierung der ursprünglichen Fassung von "TASEF-2D" (vgl. Abschn. 4) wird der Wärmestrom von dem Programm direkt berechnet, so daß auch die Kenngröße  $1/\Lambda$  für jede thermische Belastung und für jede Schornsteinbauart berechnet werden kann. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfolgte die Bestimmung dieser Kenngröße für die auf Bild 5-1 bis Bild 5-3 dargestellten Schornsteine bei einer Abgas-temperatur von 200 °C (Tabelle 5-7, Spalte 3), 500 °C (Tabelle 5-7, Spalte 11) sowie einer Temperatur von 200 °C an der inneren Wand der Schornsteine (Tabelle 5-7, Spalte 7).

Tabelle 5-12: Zusammenstellung der berechneten Wärmedurchlaßwiderstände  $1/\Lambda$

Schorn- stein 1)	Temperatur im Schorn- stein °C	Verlust- wärme- strom/ Meter <sup>2</sup> ) W/m	$1/\Lambda$ m <sup>2</sup> K/W	Temperatur im Schorn- stein °C	Temperatur an der Schorn- stein inneren Wand °C	Verlust- wärme- strom/ Meter W/m	$1/\Lambda$ m <sup>2</sup> K/W	Temperatur im Schorn- stein °C	Verlust- wärme- strom/ Meter W/m	$1/\Lambda$ m <sup>2</sup> K/W	
-	°C	W/m	m <sup>2</sup> K/W	°C	°C	W/m	m <sup>2</sup> K/W	°C	m/s	W/m	m <sup>2</sup> K/W
Spalte 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
A 14	200	379	0,092	274	199	816	0,092	500	3,70	1510	0,093
B 14	200	386	0,090	274	199	815	0,092	500	4,05	1510	0,096
C 14	200	317	0,093	278	200	661	0,095	500	3,80	1200	0,097
A 20	200	492	0,100	268	200	1020	0,104	500	2,50	1820	0,109
B 20	200	495	0,098	270	200	1050	0,100	500	1,85	1790	0,103
C 20	200	391	0,106	270	200	833	0,107	500	2,54	1490	0,108
A 26	200	678	0,087	275	200	1430	0,091	500	1,15	2360	0,095
B 26	200	642	0,103	268	201	1290	0,105	500	1,30	2180	0,109
C 25	200	488	0,111	267	200	979	0,114	500	1,55	1680	0,116

1) vgl. Bilder 5-1 bis 5-3

2) Abgasgeschwindigkeit  $w = 5$  m/s (Normforderung [ $1 \geq 4$  m/s])

3) vgl. Tabelle 5-4

## 6 Vergleich von Berechnungen und Messungen der Oberflächentemperaturen verschiedener Hausschornsteine

### 6.1 Vergleich von Berechnungen und Messungen der Oberflächentemperaturen einschaliger Schornsteine

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen der auf den Bildern 6-1 bis 6-5 dargestellten Schornsteine [21] erfolgte mit dem Computer-Programm "TASEF-2D" (Abschn. 4). Den Rechnungen lagen die in der Tabelle 6-1 zusammengestellten Einflußgrößen zugrunde.

Da während der thermischen Beanspruchung dieser Schornsteine keine Abgasanalyse durchgeführt wurde, sondern lediglich eine auf die Zeiteinheit bezogene Messung des Heizölverbrauchs erfolgte, wird der Abgasmassenstrom unter Berücksichtigung der im Abschn. 5.4 dargestellten Überlegungen abgeschätzt.

In Tabelle 6-2 sind die Rechenergebnisse den aus [21] entnommenen Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

Tabelle 6-1: Zusammenstellung der für die Durchführung der Rechnung erforderlichen Kenndaten

Kennwerte	Dimension		Schornsteinbezeichnung					
			A1)	B2)	C3)	D4)	E5)	
Abgastemperatur	$\vartheta_g$	°C	500					
O <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	
CO <sub>2</sub> -Gehalt		V-%	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
Luftüberschuß	n	-	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	
Heizölverbrauch		l/min	0,038	0,051	0,047	0,048	0,054	
Abgasmassenstrom	$\dot{m}$	kg/s	0,0333	0,0448	0,0412	0,0421	0,0473	
Mittlere Abgasgeschwindigkeit	$w_m$	m/s	1,8	2,4	2,8	2,3	2,6	
Emissionsgrad	innen	$\epsilon_i$	-	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	außen	$\epsilon_a$	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	$\alpha_i$	W/(m <sup>2</sup> K)	7,0	8,9	10,3	8,4	9,4
	außen	$\alpha_a$		8,3	8,6	7,9	8,0	8,2
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	W/(mK) <sup>6)</sup>	[20]	[20]	[20]	[28]	[28]	
Spezifische Wärmekapazität	c	J/(Kg/K) <sup>6)</sup>	[20]	[20]	[20]	[25]	[25]	

1) vgl. Bild 6-1

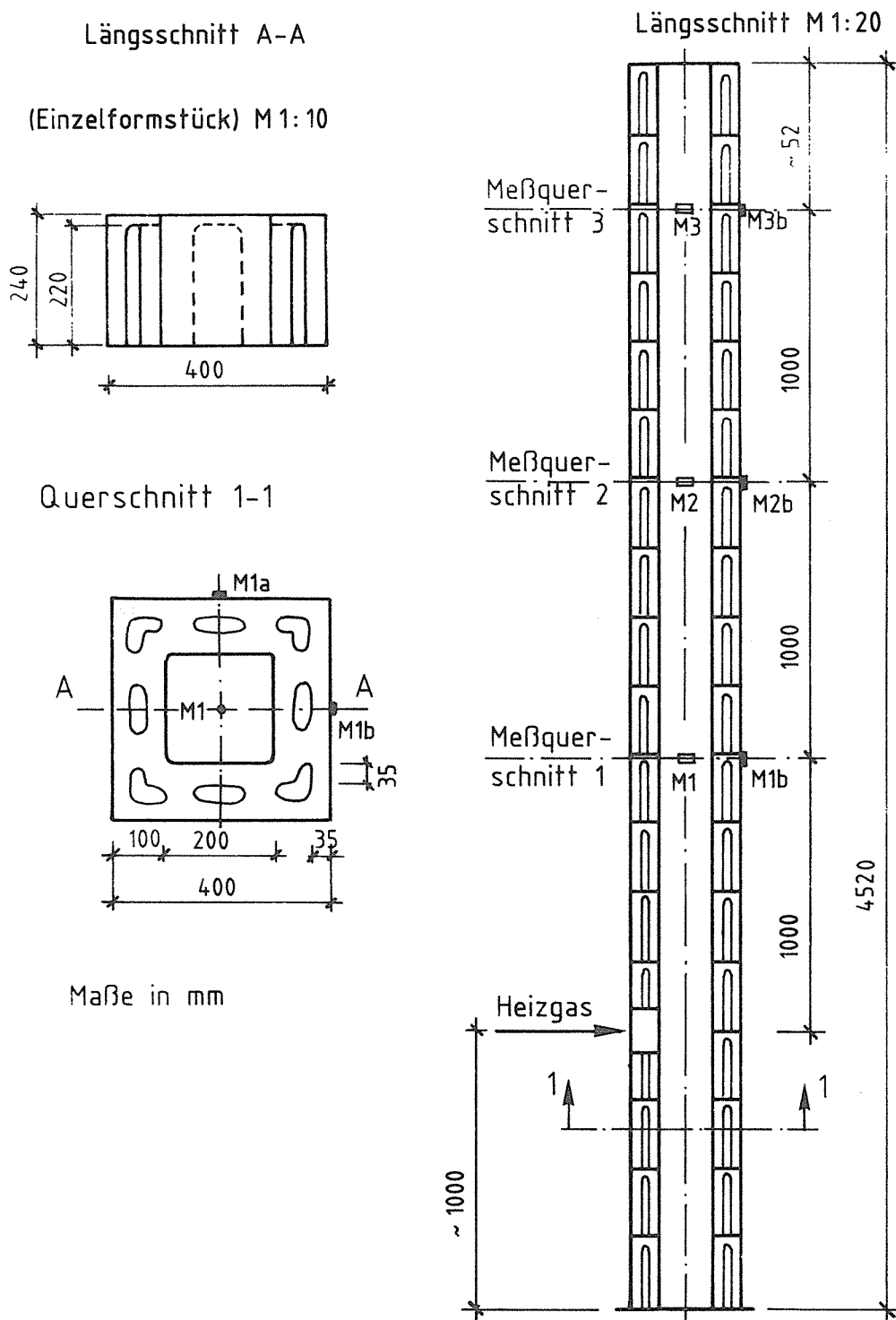
3) vgl. Bild 6-3a

5) vgl. Bild 6-5

2) vgl. Bild 6-2

4) vgl. Bild 6-4

6) vgl. Abschn. 10

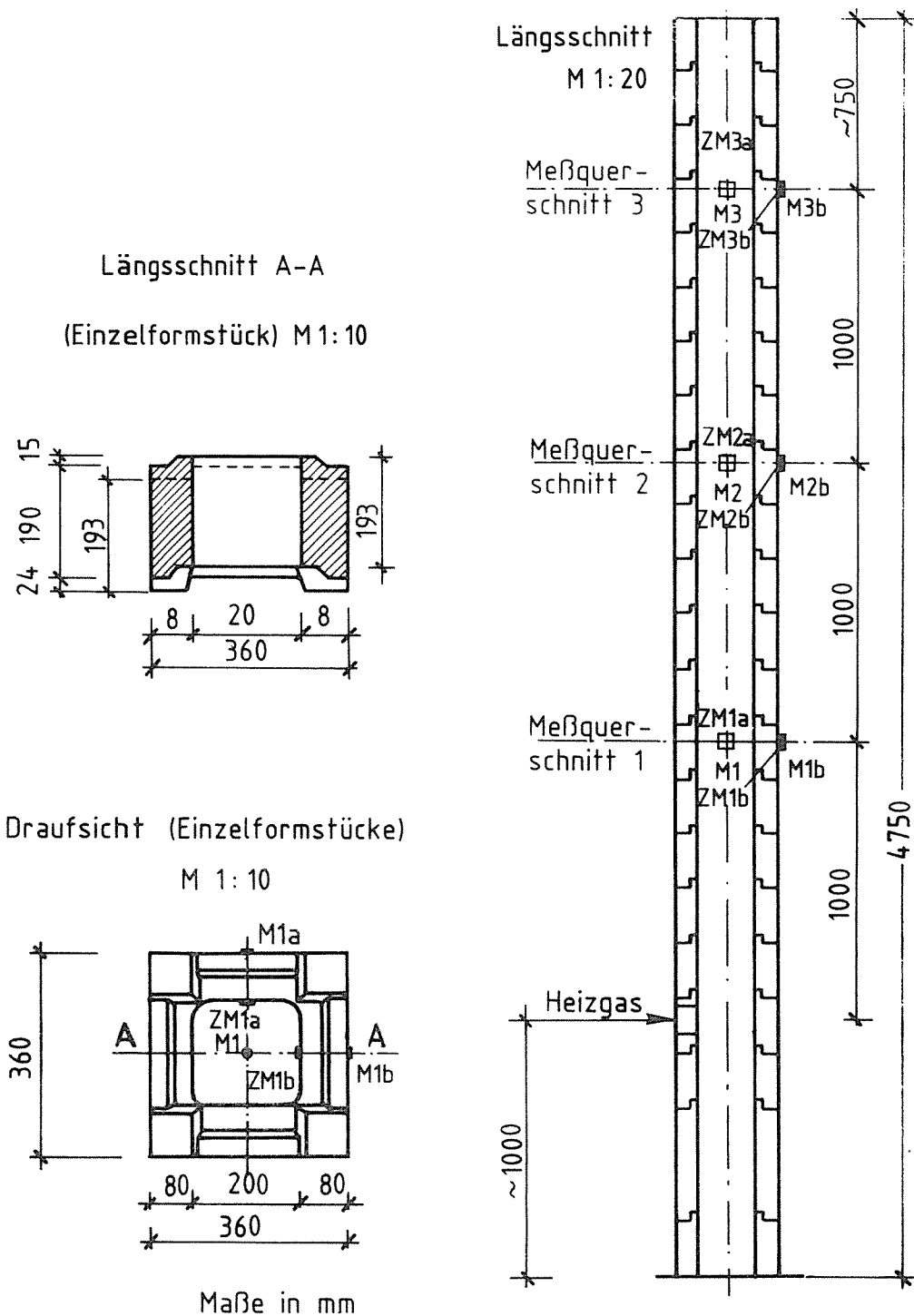


### Schornsteintyp "A"

Schornstein aus 18 Leichtbeton-Zellenformstücken nach DIN 18150 Teil 1 [22] einer mittleren Schalendicke von 37 mm, einer Höhe von etwa 240 mm und einem lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm. Die auf den lufttrockenen Beton bezogene mittlere Rohrdichte betrug 1,90 kg/dm<sup>3</sup>.

Bild 6-1: Prüfschornstein und Lage der Thermolemente [21]

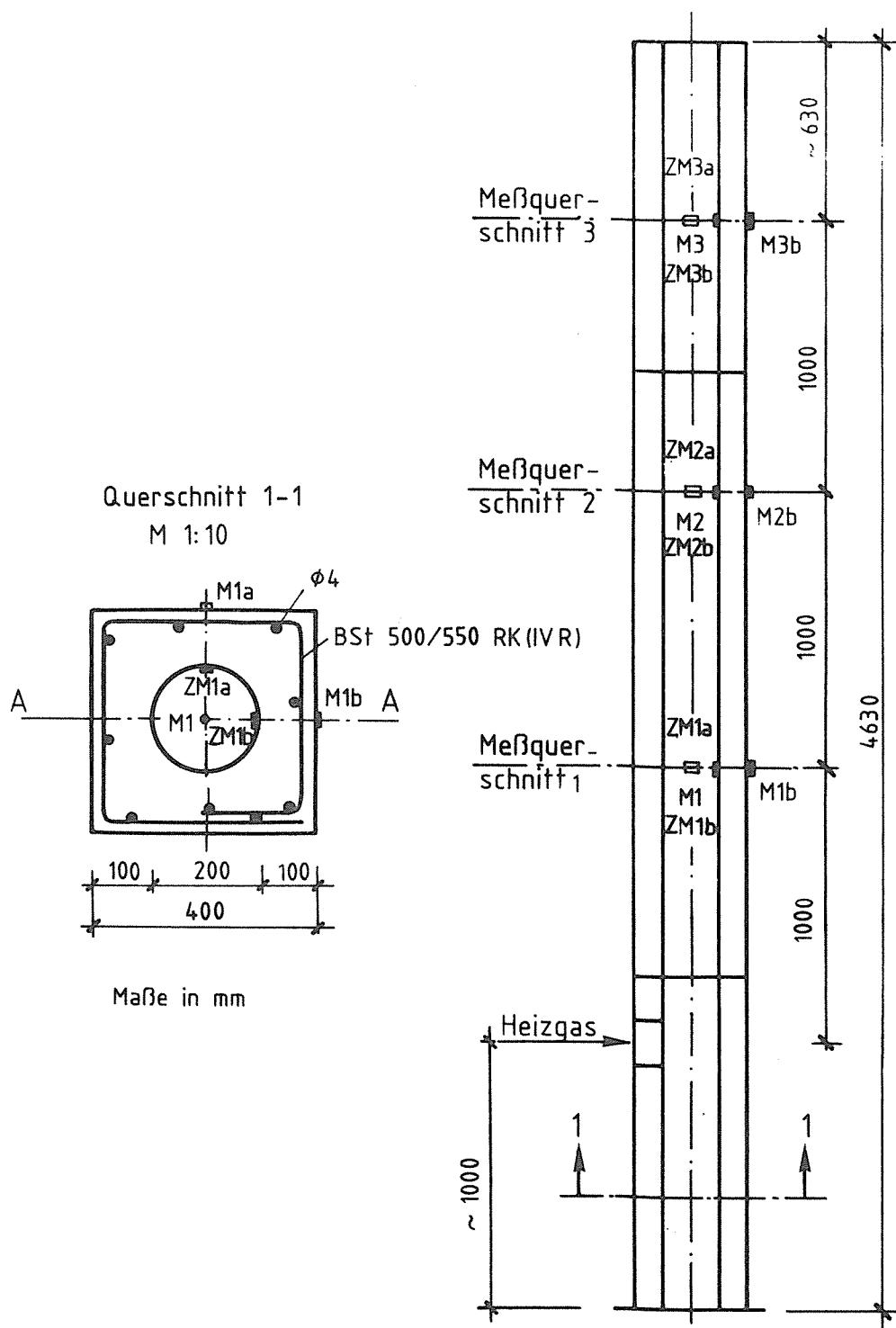




### Schornsteintyp "B"

Schornstein aus 21 vollwandigen Leichtbetonformstücken nach Zulassung, einer mittleren Wangendicke von 80 mm, einer Höhe von 193 mm und einen lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm. Die auf den lufttrockenen Beton bezogene mittlere Rohdichte betrug  $1,60 \text{ kg/dm}^3$ .

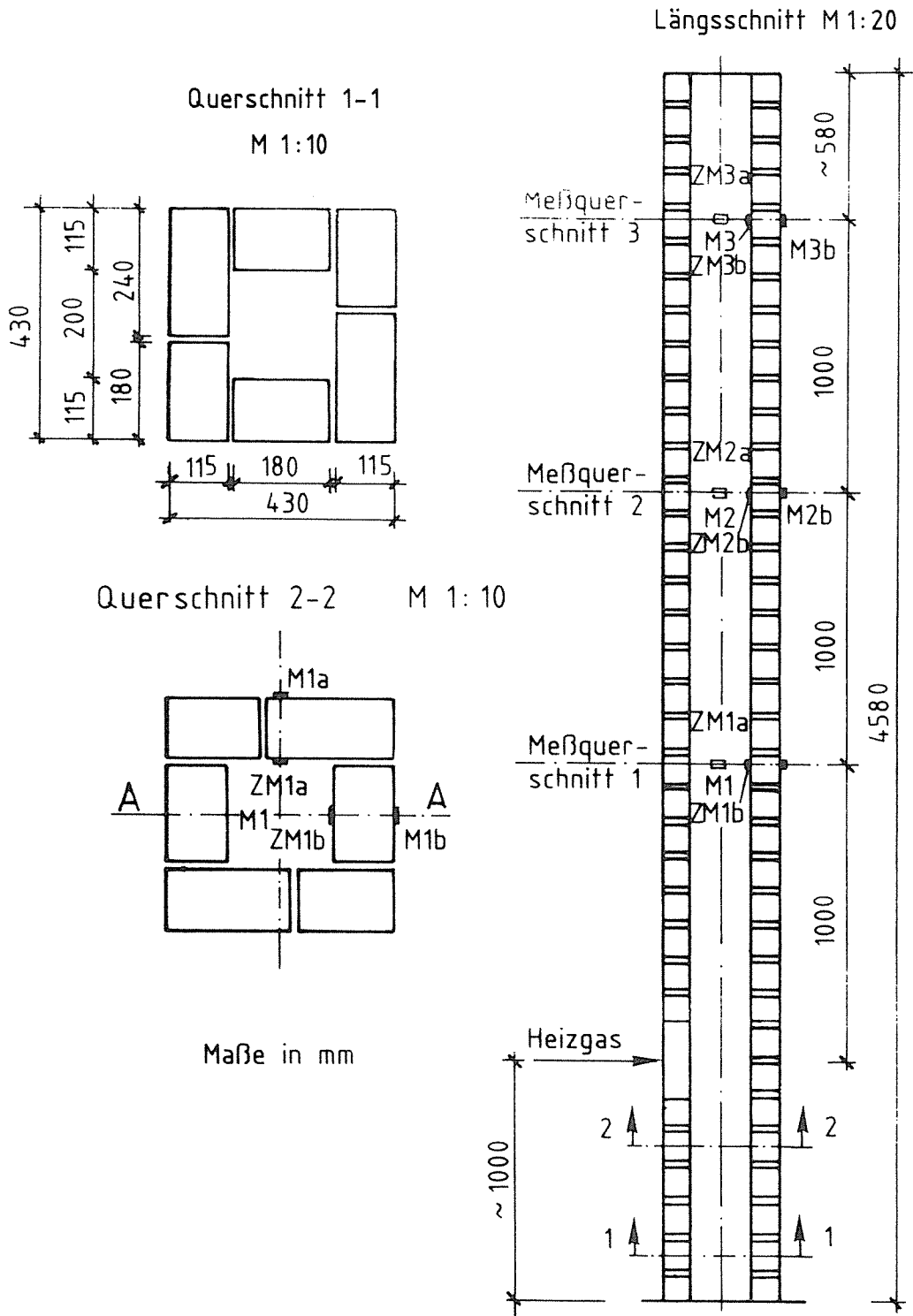
Bild 6-2: Prüfschornstein und Lage der Thermolemente [21]



### Schornsteintyp "C"

Schornstein aus geschößhohen vollwandigen Leichtbetonformstücken, einer Wangendicke von 100 mm und einem lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm. Die auf den luftgetrockenen Beton bezogene mittlere Rohdichte betrug 176 kg/dm<sup>3</sup>.

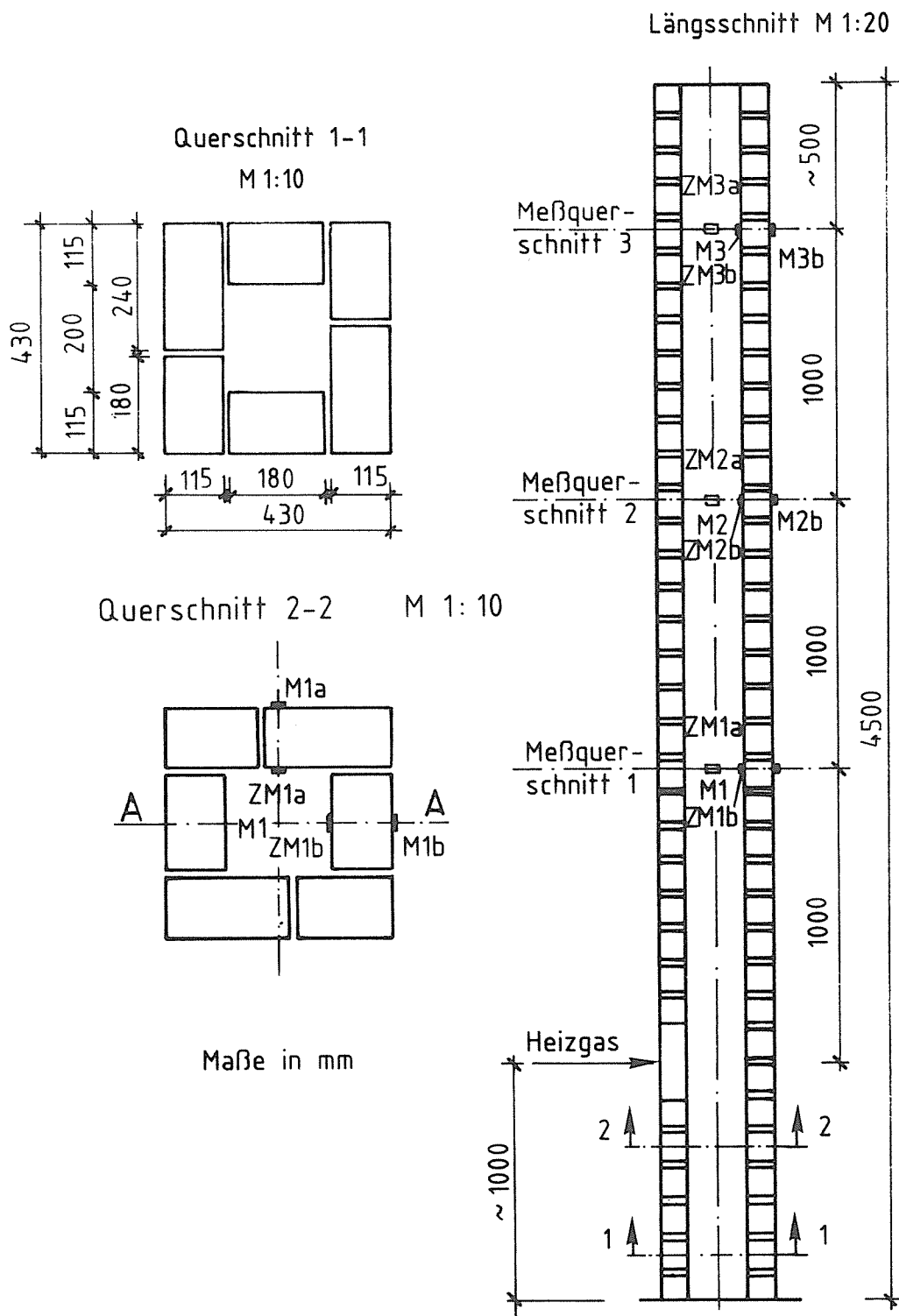
Bild 6-3: Prüfschornstein und Lage der Thermolemente [21]



Schornsteintyp "D"

Schornstein aus Ziegel DIN 105 Mz 28-1,8-2 DF [ ] (36 Steinschichten mit einem lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm.

Bild 6-4: Prüfschornstein und Lage der Thermoelemente [21]



Schornsteintyp "E"

Schornstein aus Ziegel DIN 105 Mz 28-2,2 NF [23] (54 Stein-schichten mit einem lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm.

Bild 6-5: Prüfschornstein und Lage der Thermo-elemente [21]

**Tabelle 6-2:** Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen Temperaturen [21] mit den von "TASEF-2D" berechneten Temperaturen im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. der äußeren Schornsteinoberfläche

Schornstein	Temperatur im Schornstein	Meßwerte an der Innenfläche					Meßwerte an der Außenfläche					Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampfgehalt	
		1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	8)	9)	10)				11)
	Meß-/Rechenwert <sup>2)</sup>	$w_m$	m/s	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	%	g/m <sup>3</sup>
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
A	500	570	1,8	-3)	-3)	-3)	333	121	120	120	123	22	44	21,6	
B	498	530	2,4	310	370	340	361	109	107	108	118	23	58	23,0	
C	498	640	2,8	452	452	452	445	78	82	80	102	16	42	14,6	
D	502	590	2,3	414	416	415	416	92	100	96	100	21	39	20,4	
E	499	640	2,6	418	418	418	421	144	147	146	143	18	38	16,8	
A	200	280	0,7	-3)	-3)	-3)	122	49	49	49	51	18	48	16,8	
B	202	240	0,8	95	120	108	120	55	54	54	53	22	50	21,6	
C	197	320	1,0	160	158	159	160	51	48	50	49	18	38	16,8	
D	201	260	0,8	136	136	136	145	49	53	51	46	22	37	21,6	
E	199	280	0,8	125	125	125	125	60	60	60	55	17	51	15,8	

1) vgl. Bilder 6-1 bis 6-5

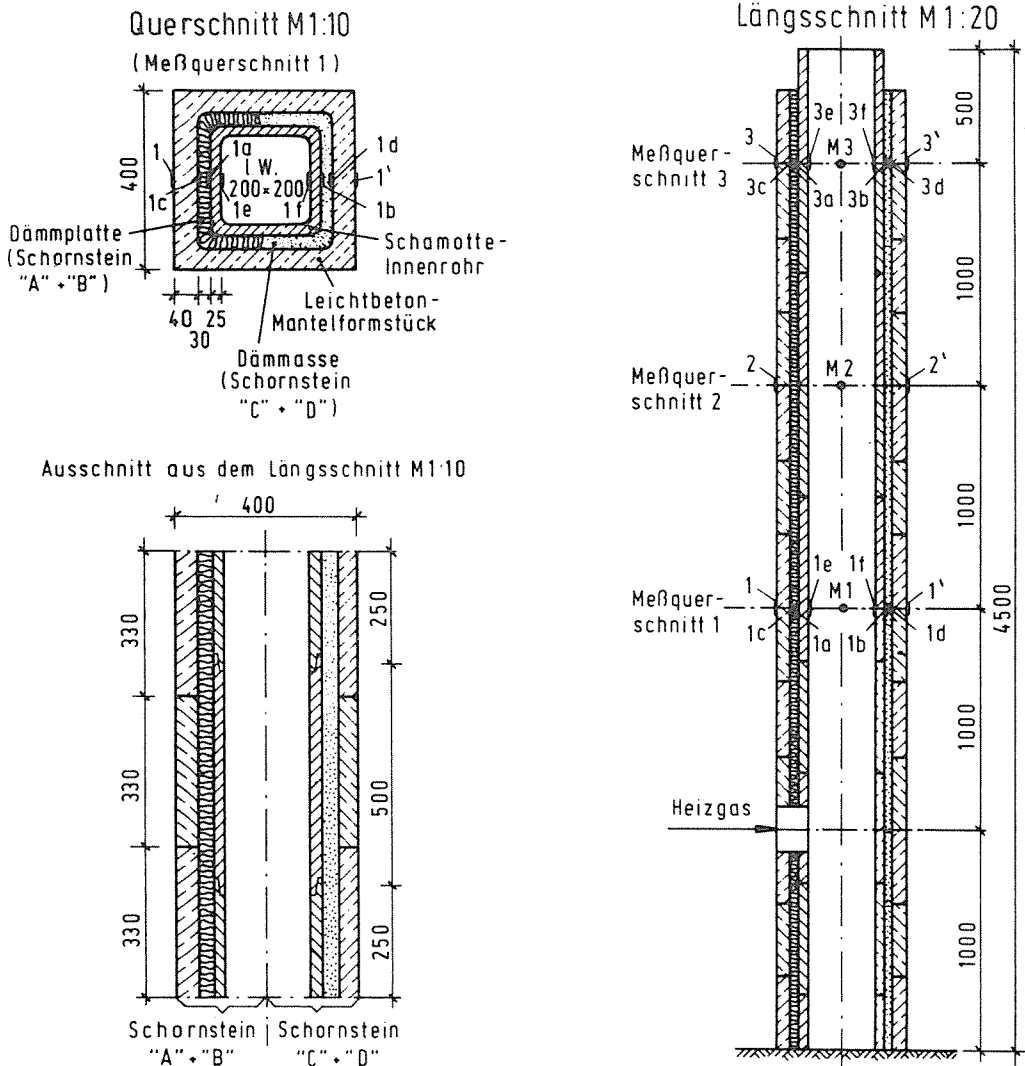
2) Korrektur der Meßwerte (vgl. Abschnitt 5.1)

3) Keine Angaben

## 6.2 Vergleich von Berechnungen und Messungen der Oberflächentemperaturen dreischaliger Schornsteine

Die sich nur durch die Variation der Dämmstoffschicht unterscheidenden vier dreischaligen Hausschornsteine hatten jeweils einen lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm, waren entsprechend Bild 6-6 aufgebaut und wurden mit einer Heizbeanspruchung entsprechend Bild 5-4(a) thermisch belastet. Die für die Berechnung erforderliche Abgasgeschwindigkeit sowie die thermodynamischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und spezifische Wärmekapazität  $c_p$ ) wurden im Rahmen des von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bearbeiteten Forschungsvorhabens [20] ermittelt. In der Tabelle 6-3 sind die in [20] angegebenen Meß- und Rechenergebnissen den mit "TASEF-2D" ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt.

Auch bei diesen dreischaligen Schornstein-Konstruktionen liegen die mit "TASEF-2D" berechneten Oberflächentemperaturen innerhalb des durch die Meßunsicherheit bestimmten Intervalls. Es wird aber auch deutlich, daß die gem. Abschn. 5.2 erforderliche Korrektur der im Schornstein gemessenen Temperatur bei den dreischaligen Schornsteinen von geringerer Bedeutung sind, als bei einschaligen Schornsteinen.



Schornstein "A" bis "D" (dreischalig) [20]:

- Innenschale:  
quadratische Formstücke aus Schamotte mit einem lichten Querschnitt von 200 mm x 200 mm, einer Wanddicke von 25 mm und einer Höhe von 500 mm. Die auf den trockenen Stoff bezogene Rohdichte betrug  $2080 \text{ kg/m}^3$
- Dämmstoffschicht (Dicke 30 mm):

Schornstein-bezeichnung	Dämmstoffschicht	Herstellungshinweise
"A"	Mineralfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von $80 \text{ kg/m}^3$	Die Mineralfaserdämmplatten wurden in 4 etwa 250 mm und 500 mm breite Streifen geschnitten und um die Innenrohre gestellt. Um den Zwischenraum voll zu schließen, wurde außerdem ein 2 cm breiter Eckstreifen eingesetzt.
"B"	Mineralfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von $180 \text{ kg/m}^3$	
"C"	Dämmmasse mit Perlit-Zuschlag	Diese Dämmmasse wurde in plastisch-gießfähiger Konsistenz (32 l Anmachwasser auf 80 l Sackinhalt) eingebracht und durch Stochern mit einem Rundstahl ( $\varnothing 8 \text{ mm}$ ) verdichtet.
"D"	Dämmmasse mit Vermiculit-Zuschlag	Diese Dämmmasse wurde in erdfuchter Konsistenz (15 l Anmachwasser auf 80 l Sackinhalt) eingebracht und nach Angabe der Herstellerfirma mit einer Holzlatte leicht angestampft.

- Außenschale:  
13 vollwandige quadratische Formstücke aus Leichtbeton mit einem lichten Querschnitt von 310 mm x 310 mm, einer Wanddicke von 40 mm und einer Höhe von 330 mm. Die auf den lufttrockenen Beton bezogene Rohdichte betrug  $1300 \text{ kg/m}^3$ .

Bild 6-6: Prüfschornsteine und Lage der Thermoelemente [20]

Tabelle 6-3: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen Temperaturen [20] mit den von "IASEF-20" berechneten Temperaturen im Meßquerschnitt 1 an der inneren bzw. äußeren Schornsteinoberfläche

Schornstein 1)	Mittlere Abgas- geschw.	Temperatur im Schornstein		Temperatur an der Innenwand		Temperatur an der Außenwand		Lufttemperatur	Rel. Luftfeuchtigkeit	Wasserdampfgehalt				
		Meß- / Rechenwerte	Rechenwerte	min max.	Rechenwerte nach IASEF	Meßwerte	Rechenwerte nach IASEF							
-	m/s	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	%	g/m <sup>3</sup>				
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	2,0	495	4952) 515	445	465	441	436 453	69	75	68	70 73	18,0	75	16,7
B	1,5	495	4952) 515	435	460	447	441 459	60	66	62	64 67	21,0	73	20,3
C	1,8	493	4932) 525	440	455	426	418 447	78	102	76	77 81	24,5	66	25,1
D	1,9	496	4962) 520	440	440	426	419 440	74	77	79	81 84	22,0	75	21,6

1) vgl. Bild 6-5

2) Korrektur der Meßwerte (vgl. Abschnitt 5.2)



## 7 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Rechnungen haben gezeigt, daß das Programm "TASEF-2D" mit Erfolg für die Berechnung der Oberflächentemperaturen von Schornsteinen jeder Bauart bei freier Wahl der thermischen Belastung eingesetzt werden kann. Die Rechnungen machten deutlich, daß die tatsächliche thermische Belastung der nach DIN 18 160 Teil 6 [1] (Prüfschornstein A) geprüften Schornsteine höher ist, als nach der zitierten Norm zulässig (Abschn. 5.1). Darüber hinaus hat sich gezeigt, daß die Versuchsrandbedingungen (z.B. Abgastemperatur, Temperatur und Luftfeuchte des Prüfraumes) nicht konstant gehalten werden können. In den Fällen, in denen die Versuchsrandbedingungen keinen zu hohen Schwankungen unterworfen waren, konnte eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den berechneten Temperaturen festgestellt werden (Abschn. 11.5). Außerdem hat sich gezeigt, daß die Rechnungen auch dann zu einem in der methodischen Fehlerbreite der Versuche liegenden Ergebnis führen, wenn keine experimentell ermittelten thermodynamischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität) der jeweiligen Schornsteinbaustoffe vorliegen, sondern diese der einschlägigen Literatur entnommen werden, z.B. [24, 25, 28, 29].

Ein weiterer Vorteil der Rechnung ist der Verzicht auf die sehr zeit- und kostenintensive experimentelle Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes (DIN 18 160 Teil 6 - Prüfschornstein C - [1]). Ganz davon abgesehen, daß dieser nur bei Prüfschornsteinen mit einem runden lichten Querschnitt von 20 cm Durchmesser bzw. einem rechteckigen lichten Querschnitt von 20 cm x 20 cm gemessen werden kann, ist dieser mittels der Rechnung für jede Schornsteinkonstruktion bestimmbar.

## **8 Empfehlung für die funktionstechnische Bemessung von Hausschornsteinen**

---

Die in diesem Forschungsbericht mitgeteilten Ergebnisse gestatten folgende Schlußfolgerungen für eine baupraktische Anwendung:

- o Die bei der Prüfung von Hausschornsteinen erhaltenen Ergebnisse können mit Hilfe numerischer Verfahren (es wurde das Rechenprogramm "TASEF-2D" [16] verwendet) auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten übertragen werden.
- o Anders als die Schornsteinprüfungen nach DIN 18 160 Teil 6 (Prüfschornstein A) [1] liefern Computer-Programme reproduzierbare Ergebnisse, da sich die jeweils vorgegebenen Randbedingungen durch verfahrensbedingte Einflüsse nicht ändern.
- o Es können Schornsteine jeder Bauart für jede thermische Belastung funktionstechnisch bemessen werden, da sich aus den Prüfungsergebnissen auch der jeweilige Wärmedurchlaßwiderstand berechnen läßt. Seine experimentelle Bestimmung (DIN 18 160 Teil 6 (Prüfschornstein C) [1]) kann damit entfallen.
- o Einsparung von zeit- und kostenintensiven Versuchen nach DIN 18 160 Teil 6 [1]. Darüber hinaus wird die einschlägige Industrie in die Lage versetzt, flexibel auf die Herausforderungen des Marktes zu reagieren.
- o Im Bereich der Schornsteinsanierung lassen sich mittels der Rechnung optimale Lösungen anbieten.
- o Die Berechnung der Temperatur- und Wärmestromverteilung in definierten Querschnitten gestattet eine Aussage über die Abgasabkühlung.

## 9 Ausblick

Bei der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens hat sich gezeigt, daß mit der derzeit in DIN 18 160 Teil 6 [1] (Prüfschornstein A) festgelegten Meßtechnik für Temperaturmessungen in Prüfschornsteinen, deren wahre thermische Belastung nicht festgestellt werden kann. Die Meßergebnisse werden durch prüfverfahrensbedingte unterschiedliche Abgasgeschwindigkeiten beeinflusst, was typisch für die verschiedenen Querschnitte von Abgaskanäle ist. Es ist daher nicht zu vermeiden, daß die sich um eine Schornsteinzulassung bemühenden Antragsteller unterschiedlich und damit ungerecht bewertet werden, da die Prüfschornsteine thermisch unterschiedlich stark belastet werden.

Wie im vorliegenden Forschungsbericht gezeigt werden konnte, tritt bei der numerischen Simulation dieses Problem nicht auf. Darüber hinaus können auch Schornsteine jeder Bauart bei jeder thermischen Belastung beurteilt werden.

Ausgangsgröße ist die Abgastemperatur, die den tatsächlich im Schornstein vorliegenden Verhältnissen entspricht. Um hier zu realistischen Festlegungen zu kommen wird vorgeschlagen, in einem diesen Komplex abschließenden Forschungsvorhaben von etwa einjähriger Dauer, den Zusammenhang zwischen der mit bisheriger Meßtechnik ermittelten Abgastemperatur und ihrer tatsächlichen Größe zu klären. Um reproduzierbare Verhältnisse zu erreichen, könnten derartige Untersuchungen in einem Kleinprüfstand nach DIN 4102 Teil 8 [26] durchgeführt werden. Dieser Prüfstand kann als liegender Schornstein aufgefaßt werden, in dem alle im vorbeugenden baulichen Brandschutz üblichen Temperatur-Zeitfunktionen erzeugt werden können. Da hier im Gegensatz zu den Versuchsbedingungen bei den Schornsteinprüfungen der Brenner angeflanscht ist, kann von reproduzierbaren Versuchsbedingungen ausgegangen werden. Darüber hinaus kann in diesem Prüfstand u.a. auch eine Abgasanalyse ( $O_2$ , CO- und  $CO_2$ -Gehalt) vorgenommen werden.

## 10 Literaturverzeichnis

- [ 1] DIN 18160 Teil 6, Ausgabe Juli 1982:  
Hausschornsteine; Prüfbedingungen und Beurteilungskriterien  
für Prüfungen an Prüfschornsteinen
- [ 2] DIN 18 160 Teil 6, Ausgabe August 1968:  
Feuerungsanlagen; Prüfgrundsätze für Hausschornsteine
- [ 3] DIN 18 147 Teil 5, Ausgabe Februar 1987:  
Baustoffe und Bauteile für dreischalige Hausschornsteine;  
Dämmstoffe; Anforderungen und Prüfungen
- [ 4] Müller, R.; R. Rudolphi:  
Numerische Ermittlung des Wärmeverlustes und der Temperatur-  
verteilung in den Wänden von Schornsteinen (Schornstein-Vh II)  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),  
Fachgruppe 2.4 "Bauphysik; Bautenschutz", Berlin,  
abgeschlossen 1/1989
- [ 5] Lenze, B.:  
Bestimmung der mittleren Rauchgasgeschwindigkeit in Kaminen  
verschiedenen Querschnitts.  
Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH); Lehr-  
stuhl und Bereich Feuerungstechnik, Karlsruhe 1989
- [ 6] Müller, P.:  
Protokoll über die Temperaturmessung im Rahmen des Forschungs-  
vorhabens "Experimentelle Ermittlung der Abhängigkeit zwischen  
Oberflächentemperatur und lichtem Querschnitt bei Prüfung an  
Hausschornsteinen nach DIN 18 160 Teil 6 - insbesondere bei  
einschaligen Schornsteinen - hinsichtlich deren Übertragbar-  
keit auf andere lichte Querschnitte bei gleicher Wanddicke.
- [ 7] VDI-Wärmeatlas:  
Berechnungsblätter für den Wärmeübergang  
3. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977
- [ 8] Gregorig, R.:  
Wärmeaustausch und Wärmeaustauscher  
2. Auflage, Verlag Sauerländer, Aarau (Schweiz), 1973
- [ 9] Nusselt, W.:  
Der Wärmeübergang in Rohrleitungen  
VDI-Forschungsheft 89, 1909
- [10] DIN 4705:  
Berechnung von Schornsteinabmessungen; Begriffe, ausführliches  
Berechnungsverfahren  
- Teil 1, Ausgabe September 1979  
Näherungsverfahren für einfach belegte Schornsteine  
- Teil 2, Ausgabe September 1979
- [11] Krüger, W.:  
Über die Leistungsgrenzen von Hausschornsteinen, Dissertation  
Karlsruhe 1962
- [12] Nehring, G.:  
Über den Wärmefluß durch Außenwände und Dächer in klimatisier-  
ten Räumen infolge der periodischen Tagesgänge der bestimmenden

meteorologischen Elemente  
Gesundheits-Ingenieur 83(1962)H. 7, S. 185-216

- [13] Hohman, J.P.:  
Heat Transfer  
Mc Graw-Hill Book Company, New York (u.a.),  
6. Auflage, 1986
- [14] Gröber/Erk:  
Die Grundgesetze der Wärmeübertragung.  
Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg,  
3. Auflage, 1955
- [15] Cammerer, J.S.:  
Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie.  
Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg,  
3. Auflage, 1951
- [16] Wickström, U.:  
TASEF-2-D Computer Program for Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire.  
Lund/Schweden: Institute of Technology; Department of Structural Mechanics, Report Nr. 79-2
- [17] Brunklaus, J.H.:  
Industrieöfen; Bau und Betrieb.  
Vulkan-Verlag, 4. Auflage, Essen 1979
- [18] Klement, E., R. Rudolphi, R. Rohrmann:  
Zur numerischen Abschätzung der stationären Wärmebeanspruchung von Dämmschichten in dreischaligen Hausschornstein-Konstruktionen.  
Technik am Bau 8(1977)H. 5, S. 485-490
- [19] Klement, E., R. Rudolphi:  
Zur numerischen Abschätzung der stationären Temperaturverteilung im Querschnitt von Schornsteinen.  
In: Kongreßband "Industrieschornsteine" der 3. Internationalen Schornstein-Tagung, München, 25. und 26. Oktober 1978, S. 241-248, Essen: Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, bzw. Technische Mitteilungen 72(1979)H. 2/3/4, S. 323-330, Essen: Vulkan-Verlag Dr. W. Classen
- [20] Klement, E., R. Rudolphi, R. Müller:  
Beurteilung der Eignung von Dämmstoffen mehrschaliger Schornsteine.  
Bauforschungsbericht des Informationszentrums RAUM und BAU (IRB) der Fraunhofer Gesellschaft, Stuttgart, T752 (1980/1981), 220 Seiten
- [21] Ehlbeck, J., R. Freiseis, P. Müller:  
Vergleichende Brandversuche an Hausschornsteinen aus genormten und zugelassenen Formstücken zur Ermittlung der Oberflächentemperatur nach DIN 18 160 Teil 6 und ISO 4736.  
Univ. Fridericiana Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Baukonstruktionen. Abgeschlossen 11/86, erhältlich als Bauforschungsbericht des Informationszentrums RAUM und BAU (IRB) der Fraunhofer Gesellschaft, Stuttgart, T 1817 (1988), 32 Seiten und 105 Anlagen

- [22] DIN 18 150 Teil 1, Ausgabe September 1979:  
Baustoffe und Bauteile für Hausschornsteine; Formstücke aus  
Leichtbeton; Einschalige Schornsteine, Anforderungen
- [23] DIN 105 Teil 1, Ausgabe November 1982:  
Mauerziegel; Vollziegel und Hochlochziegel
- [24] Cammerer, J.S.:  
Tabellarium, 11. Auflage.  
Mannheim: Reihbold & Mahla, 1973
- [25] Fuchs, W.E.:  
Feuerfesttechnik, Wärme- und Schallschutz, Beschichtungen.  
2. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen, 1985
- [26] DIN 4102 Teil 8, Ausgabe Mai 1986:  
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Kleinprüfstand
- [27] Müller, R.:  
Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermi-  
scher Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen; Anwendung  
auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche von Haus-  
schornsteinen.  
Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1989
- [28] Raisch, E., W.F. Cammerer:  
Wärmeleitfähigkeit verschiedener Ziegelarten bei hohen  
Temperaturen.  
Heizung und Lüftung 8(1957)H. 6, S. 135-136
- [29] Landolt-Bornstein:  
Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie,  
Geophysik und Technik, IV. Band Technik, 4. Teil Wärmetechnik,  
6. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1967
- [30] Weber, A.B.:  
Die Berechnung von Schornsteinen für Zentralheizungen.  
Schweizerische Technische Zeitung (STZ) (1964), Nr. 48,  
S. 969-981 und Nr. 49, S. 989-997

# 11 Anlagen

## 11.1 Anlage A:

„Listing des Rechenprogramms TASEF-2D“ zur Berechnung der Temperaturen und Wärmeströme in Schornsteinen („A 20“, „C 20“) bei einer thermischen Belastung von 500°C.  
(„A 20“ Seite 1 bis 11, „C 20“ Seite 12 bis 23)

```
*****
*
*           Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire
*           -----
*           T A S E F   v 3.0   V A X
*           -----
*
*           Designed by Ulf Wickström
*           Swedish National Testing Institute (SP)
*
* TASEF is copyrighted by SP. The buyer is prohibited from
* making copies to a third party.
*
* SP is not liable for the results from TASEF, nor for their
* interpretation. The user must be aware of the limitations and
* assumptions of the model. It is the user's responsibility to
* assure that input data are appropriate and to check that the
* results are within reasonable limits.
*
*****
```

TITLE OF RUN : QUERSCHNITT 1.2/2.1 ; A20\_500

GEOMETRY  
\*\*\*\*\*

MAXIMUM COORDINATES                    XMAX=0.1800                    YMAX=0.1800  
MAXIMUM ELEMENT LENGTH                XBOX=0.1800                    YBOX=0.1800

SUBREGIONS  
NUMBER OF SUBREGIONS    1

SUBREGION DIAGONAL LIMITS

XMIN	YMIN	XMAX	YMAX	FICTITIOUS AREA
0.0000E+00	0.0000E+00	0.1000	0.1000	T

COORDINATES OF SPECIFIED X - LINES

0.4000E-01    0.1300

COORDINATES OF SPECIFIED Y - LINES

0.4000E-01    0.1300

NUMBER AND COORDINATES OF X - LINES

5 -    0.0000E+00    0.4000E-01    0.1000            0.1300            0.1800

NUMBER AND COORDINATES OF Y-LINES

5 -    0.0000E+00    0.4000E-01    0.1000            0.1300            0.1800

NUMBER OF NODES=    25                    NUMBER OF ELEMENTS=    16

COUPLED NODES  
\*\*\*\*\*

NO COUPLED NODES

MATERIAL DATA  
\*\*\*\*\*

REGION NUMBER 1

LEICHTBETON THICKNESS 1.000

Conductivity is kept constant after reaching maximum temperature

TEMP	CONDUCTIVITY	TEMP	ENTHALPY	ENT/TEMP
50.	0.7000E+00	0.	0.0000E+00	0.4720E+03
250.	0.6100E+00	50.	0.2360E+05	0.4720E+03
500.	0.5800E+00	250.	0.1197E+06	0.4788E+03
750.	0.6300E+00	500.	0.2492E+06	0.4984E+03
1000.	0.6800E+00	750.	0.3706E+06	0.4941E+03
		1000.	0.4892E+06	0.4892E+03

INITIAL DATA  
\*\*\*\*\*

INITIAL TEMPERATURE=0.200E+02  
AMBIENT TEMPERATURE=0.200E+02  
STEFAN-BOLTZMANN CONSTANT=0.567E-07  
ABSOLUTE TEMPERATURE SHIFT=0.273E+03

NODE GROUPS  
\*\*\*\*\*

NODE GROUP 1  
EMISSIVITY=0.620E-01  
CONVECTION FACTOR= 8.00  
CONVECTION POWER= 1.00  
NODES 3 8 13 12 11

NODE GROUP 2  
EMISSIVITY=0.950  
CONVECTION FACTOR= 7.80  
CONVECTION POWER= 1.00  
NODES 21 22 23 24 25 20 15 10 5

PRESCRIBED FLOW BOUNDARY  
\*\*\*\*\*

NODE GROUPS AND TYPES OF BOUNDARIES

NODE GROUP 1 FIRE BOUNDARY  
NODE GROUP 2 AMBIENT BOUNDARY

GENERATED/PREScribed HEAT  
\*\*\*\*\*

NUMBER OF GENERATED/PREScribed HEAT GROUPS = 0



VOIDS  
\*\*\*\*\*

THIS STRUCTURE HAS NO VOIDS

TIME  
\*\*\*\*

MAXIMUM TIME=10.0  
MAXIMUM TIME INCREMENT=10.0  
CRITICAL TIME INCREMENT FACTOR=.800  
MAXIMUM NUMBER OF TIME INCREMENTS= 1000  
NUMBER OF STEPS BETWEEN UPDATING OF CONDUCTION MATRIX= 1  
PRINT OUT TIMES .50 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0  
4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 10.

INTERFACE NODES  
\*\*\*\*\*

-1 - FICTITIOUS NODE  
0 - INTERFACE NODE  
1 - HOMOGENEOUS NODE

-1	-1	1	1	1
-1	-1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1
1	1	1	1	1

FIRE BOUNDARY TEMPERATURE  
\*\*\*\*\*

KONSTANTE TEMPERATUR  
TIME TEMPERATURE  
0.00 500.00  
10.10 500.00

FORM = Q

WM , M\_PUNKT , DH , H , R , DICKE  
2.500 -0.000 , 0.200 , 3.000 , 0.002 , 0.080

CO2 , H2O , EPS\_WAND  
2.800 5.200 -0.950

JANEIN = J

FAKTOR = 1.0

ALPHA\_DIN = 9.53 ALPHA\_KRUEGER = 9.64 ALPHA\_VDI = 8.49  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 9.53  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 0.50 191.22 9.53 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.056

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2\_LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 0.10 0.14 0.00 0.15 4.85  
 ALPHA\_A\_NU = 0.15 PR = 0.72 GR \* PR = 0.5E+02  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 0.50 20.00 3.65 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.056

\*\*\*\*\* TIME 0.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 4 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	217.	4	76.	5	26.
6	0.	7	0.	8	221.	9	73.	10	25.
11	217.	12	221.	13	173.	14	58.	15	23.
16	76.	17	73.	18	58.	19	35.	20	22.
21	26.	22	25.	23	23.	24	22.	25	21.

ALPHA\_DIN = 9.24 ALPHA\_KRUEGER = 9.39 ALPHA\_VDI = 8.29  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 9.24  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 1.00 239.94 9.24 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.054

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2\_LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 3.64 3.52 0.00 3.58 5.20  
 ALPHA\_A\_NU = 3.64 PR = 0.72 GR \* PR = 0.7E+08  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 1.00 37.37 7.14 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.054

\*\*\*\*\* TIME 1.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 7 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	262.	4	131.	5	52.
6	0.	7	0.	8	264.	9	127.	10	50.
11	262.	12	264.	13	206.	14	94.	15	40.
16	131.	17	127.	18	94.	19	61.	20	34.
21	52.	22	50.	23	40.	24	34.	25	27.

ALPHA\_DIN = 9.07 ALPHA\_KRUEGER = 9.25 ALPHA\_VDI = 8.19  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 9.07  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 1.50 269.16 9.07 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.052

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 4.28 4.13 0.00 4.20 5.53  
 ALPHA A\_NU = 4.28 PR = 0.71 GR \* PR = 0.1E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 1.50 54.05 7.78 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.052

\*\*\*\*\* TIME 1.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 10 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	291.	4	169.	5	74.
6	0.	7	0.	8	292.	9	164.	10	70.
11	291.	12	292.	13	230.	14	121.	15	56.
16	169.	17	164.	18	121.	19	85.	20	46.
21	74.	22	70.	23	56.	24	46.	25	33.

ALPHA\_DIN = 8.96 ALPHA\_KRUEGER = 9.15 ALPHA\_VDI = 8.11  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.96  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 2.00 290.03 8.96 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.052

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 4.60 4.43 0.00 4.51 5.77  
 ALPHA A\_NU = 4.60 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 2.00 66.14 8.10 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.052

\*\*\*\*\* TIME 2.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 13 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	312.	4	196.	5	88.
6	0.	7	0.	8	311.	9	190.	10	84.
11	312.	12	311.	13	248.	14	142.	15	67.
16	196.	17	190.	18	142.	19	103.	20	55.
21	88.	22	84.	23	67.	24	55.	25	38.

ALPHA\_DIN = 8.88 ALPHA\_KRUEGER = 9.08 ALPHA\_VDI = 8.06  
 ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.88  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 2.50 304.62 8.88 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.051

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 4.78 4.61 0.00 4.68 5.94  
 ALPHA\_A\_NU = 4.78 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 2.50 74.52 8.28 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.051

\*\*\*\*\* TIME 2.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 16 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 3

1	0.	2	0.	3	326.	4	215.	5	98.
6	0.	7	0.	8	325.	9	208.	10	94.
11	326.	12	325.	13	261.	14	158.	15	75.
16	215.	17	208.	18	158.	19	118.	20	63.
21	98.	22	94.	23	75.	24	63.	25	41.

ALPHA\_DIN = 8.83 ALPHA\_KRUEGER = 9.03 ALPHA\_VDI = 8.02  
 ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.83  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 3.00 315.03 8.83 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.051

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 4.89 4.71 0.00 4.79 6.06  
 ALPHA\_A\_NU = 4.89 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 3.00 80.33 8.39 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.051

\*\*\*\*\* TIME 3.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 19 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	336.	4	229.	5	104.
6	0.	7	0.	8	335.	9	222.	10	100.
11	336.	12	335.	13	272.	14	170.	15	81.
16	229.	17	222.	18	170.	19	129.	20	68.
21	104.	22	100.	23	81.	24	68.	25	44.

ALPHA\_DIN = 8.79 ALPHA\_KRUEGER = 9.00 ALPHA\_VDI = 8.00  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.79  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 3.50 322.45 8.79 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2 LAM , ALPHA\_2 TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 4.97 4.78 0.00 4.86 6.14  
 ALPHA\_A\_NU = 4.97 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 3.50 84.42 8.47 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 3.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 22 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	343.	4	239.	5	109.
6	0.	7	0.	8	342.	9	231.	10	105.
11	343.	12	342.	13	279.	14	179.	15	85.
16	239.	17	231.	18	179.	19	137.	20	72.
21	109.	22	105.	23	85.	24	72.	25	46.

ALPHA\_DIN = 8.76 ALPHA\_KRUEGER = 8.97 ALPHA\_VDI = 7.98  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.76  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 4.00 327.73 8.76 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2 LAM , ALPHA\_2 TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 5.02 4.83 0.00 4.91 6.20  
 ALPHA\_A\_NU = 5.02 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 4.00 87.33 8.52 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 4.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 25 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	348.	4	246.	5	112.
6	0.	7	0.	8	347.	9	238.	10	108.
11	348.	12	347.	13	285.	14	186.	15	89.
16	246.	17	238.	18	186.	19	143.	20	74.
21	112.	22	108.	23	89.	24	74.	25	47.

ALPHA\_DIN = 8.74 ALPHA\_KRUEGER = 8.96 ALPHA\_VDI = 7.97  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.74  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 4.50 331.53 , 8.74 , 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2 LAM , ALPHA\_2 TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 5.05 4.86 0.00 4.94 6.24  
 ALPHA\_A\_NU = 5.05 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 4.50 89.41 , 8.55 , 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 4.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 28 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	351.	4	251.	5	114.
6	0.	7	0.	8	350.	9	243.	10	110.
11	351.	12	350.	13	289.	14	191.	15	91.
16	251.	17	243.	18	191.	19	147.	20	76.
21	114.	22	110.	23	91.	24	76.	25	48.

ALPHA\_DIN = 8.73 ALPHA\_KRUEGER = 8.94 ALPHA\_VDI = 7.96  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.73  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 5.00 334.25 , 8.73 , 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2 LAM , ALPHA\_2 TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 5.08 4.89 0.00 4.97 6.27  
 ALPHA\_A\_NU = 5.08 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 5.00 90.90 , 8.58 , 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 5.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 31 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	354.	4	254.	5	116.
6	0.	7	0.	8	352.	9	247.	10	112.
11	354.	12	352.	13	292.	14	194.	15	92.
16	254.	17	247.	18	194.	19	150.	20	78.
21	116.	22	112.	23	92.	24	78.	25	49.

ALPHA\_DIN = 8.72 ALPHA\_KRUEGER = 8.94 ALPHA\_VDI = 7.95  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.72  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 5.50 336.20 8.72 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 5.10 4.90 0.00 4.98 6.29  
 ALPHA A\_NU = 5.10 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 5.50 91.97 8.60 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 5.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 34 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	356.	4	256.	5	117.
6	0.	7	0.	8	354.	9	249.	10	113.
11	356.	12	354.	13	294.	14	197.	15	93.
16	256.	17	249.	18	197.	19	153.	20	79.
21	117.	22	113.	23	93.	24	79.	25	49.

ALPHA\_DIN = 8.71 ALPHA\_KRUEGER = 8.93 ALPHA\_VDI = 7.95  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.71  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 6.00 337.62 8.71 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 5.11 4.92 0.00 5.00 6.30  
 ALPHA A\_NU = 5.11 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 6.00 92.73 8.61 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 6.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 37 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	357.	4	258.	5	118.
6	0.	7	0.	8	355.	9	251.	10	114.
11	357.	12	355.	13	296.	14	199.	15	94.
16	258.	17	251.	18	199.	19	155.	20	79.
21	118.	22	114.	23	94.	24	79.	25	50.

ALPHA\_DIN = 8.71 ALPHA\_KRUEGER = 8.92 ALPHA\_VDI = 7.95  
 ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.71  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 6.50 338.62 8.71 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 5.12 4.92 0.00 5.00 6.32  
 ALPHA\_A\_NU = 5.12 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 6.50 93.28 8.62 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 6.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 40 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	358.	4	259.	5	118.
6	0.	7	0.	8	356.	9	252.	10	114.
11	358.	12	356.	13	297.	14	200.	15	95.
16	259.	17	252.	18	200.	19	156.	20	80.
21	118.	22	114.	23	95.	24	80.	25	50.

ALPHA\_DIN = 8.70 ALPHA\_KRUEGER = 8.91 ALPHA\_VDI = 7.94  
 ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.70  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 10.00 341.03 8.70 0.073

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 5.14 4.94 0.00 5.02 6.34  
 ALPHA\_A\_NU = 5.14 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 10.00 94.58 8.64 0.950

WM = 2.500 M\_PUNKT = 0.050

\*\*\*\*\* TIME 10.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 57 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 11

1	0.	2	0.	3	360.	4	263.	5	119.
6	0.	7	0.	8	358.	9	255.	10	116.
11	360.	12	358.	13	300.	14	203.	15	96.
16	263.	17	255.	18	203.	19	159.	20	81.
21	119.	22	116.	23	96.	24	81.	25	50.

BERECHNUNG DES WAERMEDURCHLASSWIDERSTANDES



DI       ALPHAI   TIM   TIAIR    EPSI   ?  
0.200     8.70   341.04  500.00   0.07

DA       ALPHAA   TAM   TAAIR    EPSA   ?  
0.360     8.64    94.58   20.00    0.95

AI =       0.800  
AA =       1.440

QI =   0.182E+04  
QA =   0.177E+04  
Q\_gewichtet =  0.180E+04

WAERMEDURCHGLASSWIDERSTAND  1/..(qi) =    0.109  
WAERMEDURCHgangskoeffizient       k (qi) =    4.728

CP =   1111.250  
RHO=    0.446  
M\_PUNKT=    0.045  
T\_M2 =   464.736  
T\_M3 =   432.063

NACH SCHÜLE FÜR LUFTÜBERSCHUßZAHL VON 4  
====> DAMPF\_TAU = 33 °C  
====> SÄURE\_TAU = 127°C  
  TWAND > \* TAU ==> KEINE KONDENSATION  
TWAND\_M2 =    334.230  
TWAND\_M3 =    301.556  
  TWAND > T\_ECKE ==> ggf. genauer Rechnen!

FF

F  
F   MAXIMAL TEMPERATURES  
F   KONSTANTE TEMPERATUR  
F   XMAX=    0.180                    YMAX=    0.180  
F  
F    1    0.     2    0.     3 360.     4 263.     5 119.  
F    6    0.     7    0.     8 358.     9 255.    10 116.  
F   11 360.   12 358.   13 300.   14 203.   15  96.  
F   16 263.   17 255.   18 203.   19 159.   20  81.  
F   21 119.   22 116.   23  96.   24  81.   25  50.  
F  
F  
F   MAX-TIME   10.00                    NUMBER OF 'TIME INCREMENTS    57  
F  
F  
FF

\*\*\*\*\*

Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire

T A S E F v 3.0 V A X

Designed by Ulf Wickström  
Swedish National Testing Institute (SP)

TASEF is copyrighted by SP. The buyer is prohibited from making copies to a third party.

SP is not liable for the results from TASEF, nor for their interpretation. The user must be aware of the limitations and assumptions of the model. It is the user's responsibility to assure that input data are appropriate and to check that the results are within reasonable limits.

\*\*\*\*\*

TITLE OF RUN : QUERSCHNITT 1.2/2.2 ---- RUND ---- ; C20\_500

GEOMETRY  
\*\*\*\*\*

MAXIMUM COORDINATES XMAX=0.1800 YMAX=0.1800  
MAXIMUM ELEMENT LENGTH XBOX=0.1800 YBOX=0.1800

SUBREGIONS  
NUMBER OF SUBREGIONS 3

SUBREGION DIAGONAL LIMITS

XMIN	YMIN	XMAX	YMAX	FICTITIOUS AREA
0.0000E+00	0.0000E+00	0.7000E-01	0.7000E-01	T
0.7000E-01	0.0000E+00	0.1000	0.7000E-01	T
0.0000E+00	0.7000E-01	0.7000E-01	0.1000	T

COORDINATES OF SPECIFIED X - LINES

0.7000E-01 0.1255 0.1400

COORDINATES OF SPECIFIED Y - LINES

0.7000E-01 0.1255 0.1400

NUMBER AND COORDINATES OF X - LINES

6 - 0.0000E+00 0.7000E-01 0.1000 0.1255 0.1400  
0.1800

NUMBER AND COORDINATES OF Y-LINES

6 - 0.0000E+00 0.7000E-01 0.1000 0.1255 0.1400  
0.1800

NUMBER OF NODES= 36

NUMBER OF ELEMENTS= 25

COUPLED NODES  
\*\*\*\*\*

NO COUPLED NODES

MATERIAL DATA  
\*\*\*\*\*

REGION NUMBER 1

LEICHTBETON, RHO = 1.5 THICKNESS 1.000

Conductivity is kept constant after reaching maximum temperature

TEMP	CONDUCTIVITY	TEMP	ENTHALPY	ENT/TEMP
50.	0.6700E+00	0.	0.0000E+00	0.4000E+03
250.	0.6600E+00	50.	0.2000E+05	0.4000E+03
500.	0.5700E+00	250.	0.1225E+06	0.4900E+03
750.	0.5700E+00	500.	0.2494E+06	0.4988E+03
1000.	0.6000E+00	750.	0.3806E+06	0.5075E+03
		1000.	0.5158E+06	0.5158E+03

TRIANGULAR ELEMENTS  
\*\*\*\*\*

NODES AND REGIONS OF TRIANGULAR ELEMENTS

3	8	9	1
8	13	14	1

INITIAL DATA  
\*\*\*\*\*

INITIAL TEMPERATURE=0.200E+02  
AMBIENT TEMPERATURE=0.200E+02  
STEFAN-BOLTZMANN CONSTANT=0.567E-07  
ABSOLUTE TEMPERATURE SHIFT=0.273E+03

NODE GROUPS  
\*\*\*\*\*

NODE GROUP 1  
EMISSIVITY=0.750E-01  
CONVECTION FACTOR= 5.60  
CONVECTION POWER= 1.00  
NODES 3 8 13

NODE GROUP 2  
EMISSIVITY=0.950  
CONVECTION FACTOR= 6.00  
CONVECTION POWER= 1.00  
NODES 31 32 33 34 35 36 30 24 18 12  
6

PRESCRIBED FLOW BOUNDARY

\*\*\*\*\*

NODE GROUPS AND TYPES OF BOUNDARIES

NODE GROUP 1 FIRE BOUNDARY  
NODE GROUP 2 AMBIENT BOUNDARY

GENERATED/PREScribed HEAT  
\*\*\*\*\*

NUMBER OF GENERATED/PREScribed HEAT GROUPS = 0

VOIDS  
\*\*\*\*\*

THIS STRUCTURE HAS NO VOIDS

TIME  
\*\*\*\*

MAXIMUM TIME=10.0  
MAXIMUM TIME INCREMENT=10.0  
CRITICAL TIME INCREMENT FACTOR=.800  
MAXIMUM NUMBER OF TIME INCREMENTS= 1000  
NUMBER OF STEPS BETWEEN UPDATING OF CONDUCTION MATRIX= 1  
PRINT OUT TIMES .50 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0  
4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 10.

INTERFACE NODES  
\*\*\*\*\*

-1 - FICTITIOUS NODE  
0 - INTERFACE NODE  
1 - HOMOGENEOUS NODE

-1	-1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

FIRE BOUNDARY TEMPERATURE  
\*\*\*\*\*

KONSTANTE TEMPERATUR  
TIME TEMPERATURE  
0.00 500.00  
10.10 500.00

FORM = R

WM , M\_PUNKT , DH , H , R , DICKE  
2.540 0.000 0.200 3.000 0.002 0.080

CO2 , H2O , EPS\_WAND  
3.300 5.300 0.950

JANEIN = J

FAKTOR = 1.0

KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR  
KRITERIUM IST UNWAHR

ALPHA\_DIN = 9.44 ALPHA\_KRUEGER = 9.59 ALPHA\_VDI = 8.44  
ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 9.44  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
0.50 229.41 9.44 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.043

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
LAMINAR 2.34 2.28 0.00 2.33 4.91  
ALPHA\_A\_NU = 2.34 PR = 0.72 GR \* PR = 0.1E+08  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
0.50 22.91 5.84 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.043

\*\*\*\*\* TIME 0.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 16 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE		500.	*****	TIME INCREMENT		LIMITING		NODE		8	
1	0.	2	0.	3	216.	4	83.	5	48.	6	26.
7	0.	8	245.	9	109.	10	58.	11	40.	12	24.
13	216.	14	109.	15	65.	16	39.	17	30.	18	23.
19	83.	20	58.	21	39.	22	28.	23	24.	24	21.
25	48.	26	40.	27	30.	28	24.	29	22.	30	21.
31	26.	32	24.	33	23.	34	21.	35	21.	36	20.

ALPHA\_DIN = 9.26 ALPHA\_KRUEGER = 9.44 ALPHA\_VDI = 8.32  
ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 9.26  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
1.00 259.68 9.26 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.042

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 3.36 3.25 0.00 3.31 5.10  
 ALPHA A NU = 3.36 PR = 0.72 GR \* PR = 0.5E+08  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 1.00 32.56 6.86 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.042

\*\*\*\*\* TIME 1.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 30 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	254.	4	128.	5	85.	6	43.
7	0.	8	268.	9	145.	10	89.	11	66.	12	38.
13	254.	14	145.	15	96.	16	61.	17	49.	18	32.
19	128.	20	89.	21	61.	22	45.	23	37.	24	27.
25	85.	26	66.	27	49.	28	37.	29	31.	30	25.
31	43.	32	38.	33	32.	34	27.	35	25.	36	22.

ALPHA DIN = 9.16 ALPHA KRUEGER = 9.35 ALPHA\_VDI = 8.26  
 ALPHA\_I NU= 0.00 ALPHA\_I ROHR = 9.16  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 1.50 278.26 9.16 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.042

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 3.87 3.74 0.00 3.81 5.30  
 ALPHA A NU = 3.87 PR = 0.72 GR \* PR = 0.9E+08  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 1.50 42.50 7.37 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.042

\*\*\*\*\* TIME 1.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 44 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	275.	4	158.	5	114.	6	58.
7	0.	8	283.	9	169.	10	112.	11	87.	12	50.
13	275.	14	169.	15	119.	16	80.	17	65.	18	41.
19	158.	20	112.	21	80.	22	59.	23	50.	24	35.
25	114.	26	87.	27	65.	28	50.	29	43.	30	31.
31	58.	32	50.	33	41.	34	35.	35	31.	36	26.

ALPHA DIN = 9.09 ALPHA KRUEGER = 9.28 ALPHA\_VDI = 8.21  
 ALPHA\_I NU= 0.00 ALPHA\_I ROHR = 9.09  
 TIME , TS , BET , E STRAHL  
 2.00 291.77 9.09 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.041

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
LAMINAR 4.17 4.02 0.00 4.09 5.46  
ALPHA\_A\_NU = 4.17 PR = 0.72 GR \* PR = 0.1E+09  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
2.00 50.50 7.67 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.041

\*\*\*\*\* TIME 2.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 58 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	290.	4	179.	5	136.	6	70.
7	0.	8	295.	9	187.	10	130.	11	104.	12	59.
13	290.	14	187.	15	137.	16	97.	17	79.	18	49.
19	179.	20	130.	21	97.	22	73.	23	61.	24	41.
25	136.	26	104.	27	79.	28	61.	29	52.	30	37.
31	70.	32	59.	33	49.	34	41.	35	37.	36	29.

ALPHA\_DIN = 9.03 ALPHA\_KRUEGER = 9.24 ALPHA\_VDI = 8.17  
ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 9.03  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
2.50 302.15 9.03 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.041

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
LAMINAR 4.37 4.21 0.00 4.28 5.59  
ALPHA\_A\_NU = 4.37 PR = 0.71 GR \* PR = 0.1E+09  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
2.50 57.02 7.87 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.041

\*\*\*\*\* TIME 2.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 72 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	301.	4	195.	5	152.	6	79.
7	0.	8	305.	9	201.	10	144.	11	117.	12	66.
13	301.	14	201.	15	151.	16	110.	17	91.	18	55.
19	195.	20	144.	21	110.	22	84.	23	71.	24	47.
25	152.	26	117.	27	91.	28	71.	29	61.	30	42.
31	79.	32	66.	33	55.	34	47.	35	42.	36	31.

ALPHA\_DIN = 8.99 ALPHA\_KRUEGER = 9.20 ALPHA\_VDI = 8.14  
ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.99  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
3.00 310.17 8.99 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.041

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2 LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
LAMINAR 4.51 4.34 0.00 4.42 5.70  
ALPHA\_A\_NU = 4.51 PR = 0.71 GR \* PR = 0.1E+09  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
3.00 62.29 8.01 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.041

\*\*\*\*\* TIME 3.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 86 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	309.	4	207.	5	165.	6	86.
7	0.	8	312.	9	211.	10	156.	11	128.	12	72.
13	309.	14	211.	15	162.	16	121.	17	101.	18	61.
19	207.	20	156.	21	121.	22	94.	23	80.	24	51.
25	165.	26	128.	27	101.	28	80.	29	69.	30	46.
31	86.	32	72.	33	61.	34	51.	35	46.	36	34.

ALPHA\_DIN = 8.95 ALPHA\_KRUEGER = 9.17 ALPHA\_VDI = 8.12  
ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.95  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
3.50 316.42 8.95 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2 LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
LAMINAR 4.61 4.44 0.00 4.51 5.78  
ALPHA\_A\_NU = 4.61 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
3.50 66.46 8.11 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 3.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 100 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	315.	4	216.	5	174.	6	91.
7	0.	8	318.	9	220.	10	165.	11	137.	12	77.
13	315.	14	220.	15	172.	16	130.	17	110.	18	65.
19	216.	20	165.	21	130.	22	102.	23	87.	24	55.
25	174.	26	137.	27	110.	28	87.	29	76.	30	49.
31	91.	32	77.	33	65.	34	55.	35	49.	36	36.

ALPHA\_DIN = 8.93 ALPHA\_KRUEGER = 9.15 ALPHA\_VDI = 8.10  
ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.93



TIME , TS , BET , E STRAHL  
4.00 321.31 8.93 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
LAMINAR 4.68 4.51 0.00 4.58 5.84  
ALPHA\_A\_NU = 4.68 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
4.00 69.73 8.18 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 4.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 114 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	320.	4	223.	5	181.	6	95.
7	0.	8	323.	9	227.	10	172.	11	144.	12	81.
13	320.	14	227.	15	179.	16	137.	17	116.	18	69.
19	223.	20	172.	21	137.	22	109.	23	94.	24	58.
25	181.	26	144.	27	116.	28	94.	29	81.	30	52.
31	95.	32	81.	33	69.	34	58.	35	52.	36	37.

ALPHA\_DIN = 8.91 ALPHA\_KRUEGER = 9.13 ALPHA\_VDI = 8.09  
ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.91  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
4.50 325.14 8.91 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
LAMINAR 4.74 4.56 0.00 4.64 5.90  
ALPHA\_A\_NU = 4.74 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
TIME , TS , BET , E STRAHL  
4.50 72.34 8.24 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 4.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 128 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	324.	4	228.	5	186.	6	98.
7	0.	8	327.	9	233.	10	178.	11	149.	12	83.
13	324.	14	233.	15	185.	16	143.	17	122.	18	71.
19	228.	20	178.	21	143.	22	114.	23	98.	24	60.
25	186.	26	149.	27	122.	28	98.	29	86.	30	54.
31	98.	32	83.	33	71.	34	60.	35	54.	36	38.

ALPHA\_DIN = 8.89 ALPHA\_KRUEGER = 9.11 ALPHA\_VDI = 8.08  
 ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.89  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 5.00 328.16 8.89 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 4.78 4.60 0.00 4.68 5.94  
 ALPHA\_A\_NU = 4.78 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 5.00 74.40 8.28 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 5.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 142 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	327.	4	232.	5	190.	6	100.
7	0.	8	330.	9	237.	10	183.	11	154.	12	86.
13	327.	14	237.	15	190.	16	148.	17	126.	18	74.
19	232.	20	183.	21	148.	22	119.	23	102.	24	63.
25	190.	26	154.	27	126.	28	102.	29	89.	30	56.
31	100.	32	86.	33	74.	34	63.	35	56.	36	39.

ALPHA\_DIN = 8.88 ALPHA\_KRUEGER = 9.10 ALPHA\_VDI = 8.07  
 ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.88  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 5.50 330.54 8.88 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA 1 , ALPHA 2 LAM , ALPHA 2 TUR , ALPHA 3 , ALPHA CRAM  
 LAMINAR 4.81 4.63 0.00 4.71 5.97  
 ALPHA\_A\_NU = 4.81 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 5.50 76.04 8.31 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 5.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 156 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	329.	4	235.	5	194.	6	102.
7	0.	8	332.	9	240.	10	186.	11	157.	12	88.
13	329.	14	240.	15	194.	16	152.	17	130.	18	75.
19	235.	20	186.	21	152.	22	122.	23	106.	24	64.
25	194.	26	157.	27	130.	28	106.	29	92.	30	58.
31	102.	32	88.	33	75.	34	64.	35	58.	36	40.

ALPHA\_DIN = 8.87 ALPHA\_KRUEGER = 9.10 ALPHA\_VDI = 8.07  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.87  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 6.00 332.43 8.87 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2\_LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 4.84 4.66 0.00 4.74 6.00  
 ALPHA\_A\_NU = 4.84 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 6.00 77.33 8.34 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 6.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 170 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE		500.	*****		TIME INCREMENT		LIMITING NODE		8		
1	0.	2	0.	3	331.	4	238.	5	196.	6	103.
7	0.	8	334.	9	243.	10	189.	11	160.	12	89.
13	331.	14	243.	15	197.	16	155.	17	133.	18	77.
19	238.	20	189.	21	155.	22	125.	23	108.	24	66.
25	196.	26	160.	27	133.	28	108.	29	95.	30	59.
31	103.	32	89.	33	77.	34	66.	35	59.	36	41.

ALPHA\_DIN = 8.86 ALPHA\_KRUEGER = 9.09 ALPHA\_VDI = 8.06  
 ALPHA\_I\_NU= 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.86  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 6.50 333.94 8.86 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2\_LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
 LAMINAR 4.86 4.68 0.00 4.76 6.02  
 ALPHA\_A\_NU = 4.86 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
 TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
 6.50 78.35 8.36 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 6.500 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 184 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE		500.	*****		TIME INCREMENT		LIMITING NODE		8		
1	0.	2	0.	3	332.	4	240.	5	198.	6	104.
7	0.	8	336.	9	245.	10	192.	11	162.	12	90.
13	332.	14	245.	15	200.	16	157.	17	135.	18	78.
19	240.	20	192.	21	157.	22	127.	23	110.	24	67.
25	198.	26	162.	27	135.	28	110.	29	96.	30	60.

31 104. 32 90. 33 78. 34 67. 35 60. 36 41.

ALPHA DIN = 8.84 ALPHA\_KRUEGER = 9.07 ALPHA\_VDI = 8.05  
ALPHA\_I\_NU = 0.00 ALPHA\_I\_ROHR = 8.84  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
10.00 338.53 8.84 0.077

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

STROEMUNG ==> ALPHA\_1 , ALPHA\_2\_LAM , ALPHA\_2\_TUR , ALPHA\_3 , ALPHA\_CRAM  
LAMINAR 4.91 4.73 0.00 4.81 6.08  
ALPHA\_A\_NU = 4.91 PR = 0.71 GR \* PR = 0.2E+09  
TIME , TS , BET , E\_STRAHL  
10.00 81.44 8.41 0.950

WM = 2.540 M\_PUNKT = 0.040

\*\*\*\*\* TIME 10.000 \*\*\*\*\* INCREMENT NUMBER 280 \*\*\*\*\*

FIRE TEMPERATURE 500. \*\*\*\*\* TIME INCREMENT LIMITING NODE 8

1	0.	2	0.	3	336.	4	246.	5	204.	6	107.
7	0.	8	341.	9	252.	10	199.	11	169.	12	94.
13	336.	14	252.	15	207.	16	164.	17	142.	18	81.
19	246.	20	199.	21	164.	22	134.	23	117.	24	70.
25	204.	26	169.	27	142.	28	117.	29	102.	30	63.
31	107.	32	94.	33	81.	34	70.	35	63.	36	43.

BERECHNUNG DES WAERMEDURCHLASSWIDERSTANDES

DI ALPHA\_I TIM TIAIR EPSI ?  
0.200 8.84 338.53 500.00 0.08

DA ALPHA\_A TAM TAAIR EPSA ?  
0.360 8.41 81.44 20.00 0.95

AI = 0.628  
AA = 1.440

QI = 0.149E+04  
QA = 0.140E+04  
Q\_gewichtet = 0.146E+04

WAERMEDURCHLASSWIDERSTAND 1/..(qi) = 0.108  
WAERMEDURCHgangskoeffizient k (qi) = 4.955

CP = 1111.250  
RHO = 0.446  
M\_PUNKT = 0.036

T\_M2 = 463.671  
T\_M3 = 430.091

NACH SCHÜLE FÜR LUFTÜBERSCHUSSZAHL VON 4  
==> DAMPF\_TAU = 33 °C  
==> SÄURE\_TAU = 127°C  
TWAND > \* TAU ==> KEINE KONDENSATION  
TWAND\_M2 = 329.141  
TWAND\_M3 = 295.561  
TWAND > T\_ECKE ==> ggf. genauer Rechnen!

```

FFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFF
F
F   MAXIMAL TEMPERATURES
F   KONSTANTE TEMPERATUR
F   XMAX= 0.180           YMAX= 0.180
F
F   1   0.   2   0.   3 336.   4 246.   5 204.   6 107.
F   7   0.   8 341.   9 252.  10 199.  11 169.  12  94.
F  13 336.  14 252.  15 207.  16 164.  17 142.  18  81.
F  19 246.  20 199.  21 164.  22 134.  23 117.  24  70.
F  25 204.  26 169.  27 142.  28 117.  29 102.  30  63.
F  31 107.  32  94.  33  81.  34  70.  35  63.  36  43.
F
F
F   MAX-TIME 10.00           NUMBER OF 'TIME INCREMENTS 280
F
F
FFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFF

```

### 11.2 Anlage B:

Darstellung des gemessenen, volumenbezogenen, prozentualen  $O_2$ - und  $CO_2$ -Gehaltes im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit [5] während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18160 Teil 6 [1]

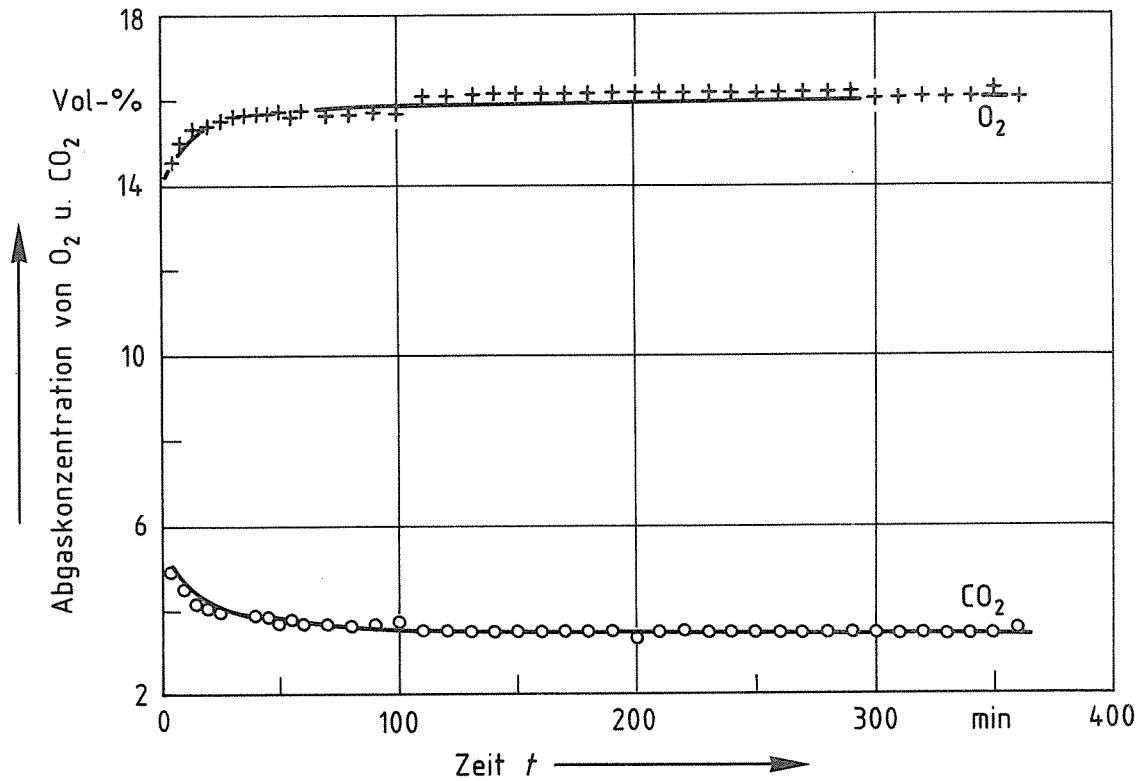


Bild B - 1: Schornstein A14; gemessener, volumenbezogener, prozentualer  $O_2$  u.  $CO_2$ -Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

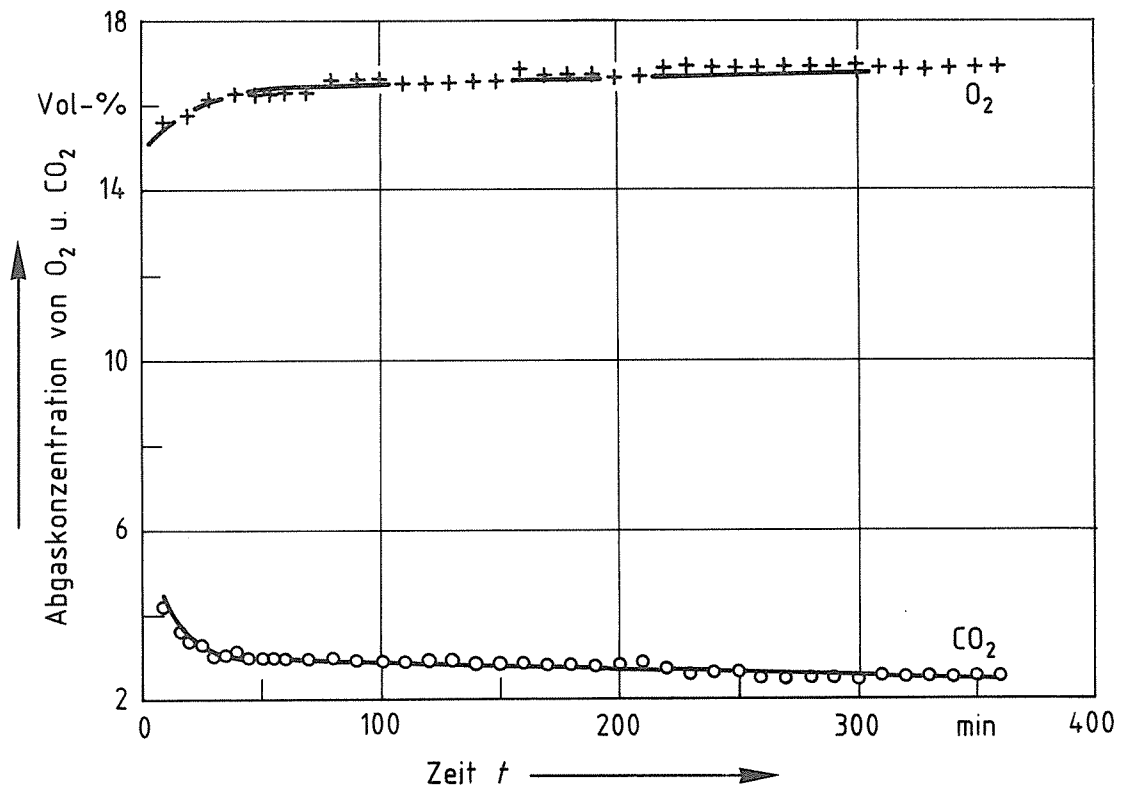


Bild B - 2: Schornstein A20; gemessener, volumenbezogener, prozentualer  $O_2$  u.  $CO_2$ -Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

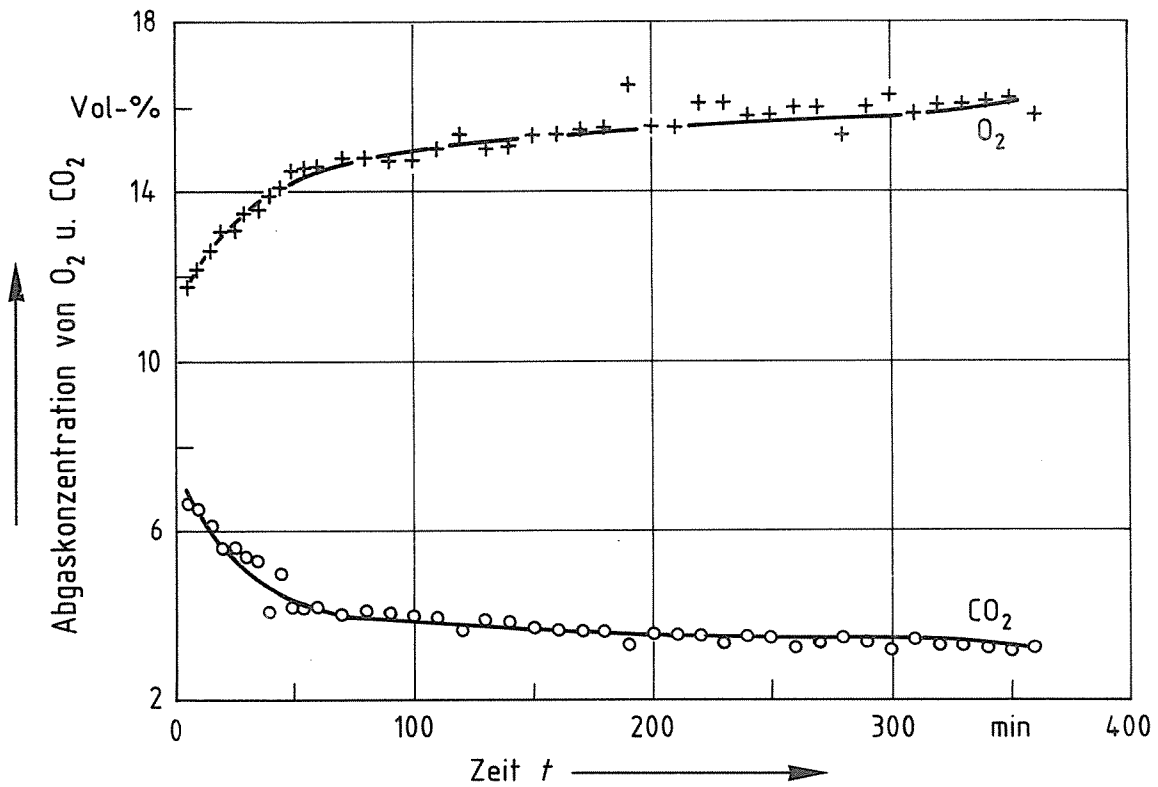


Bild B - 3: Schornstein A26; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

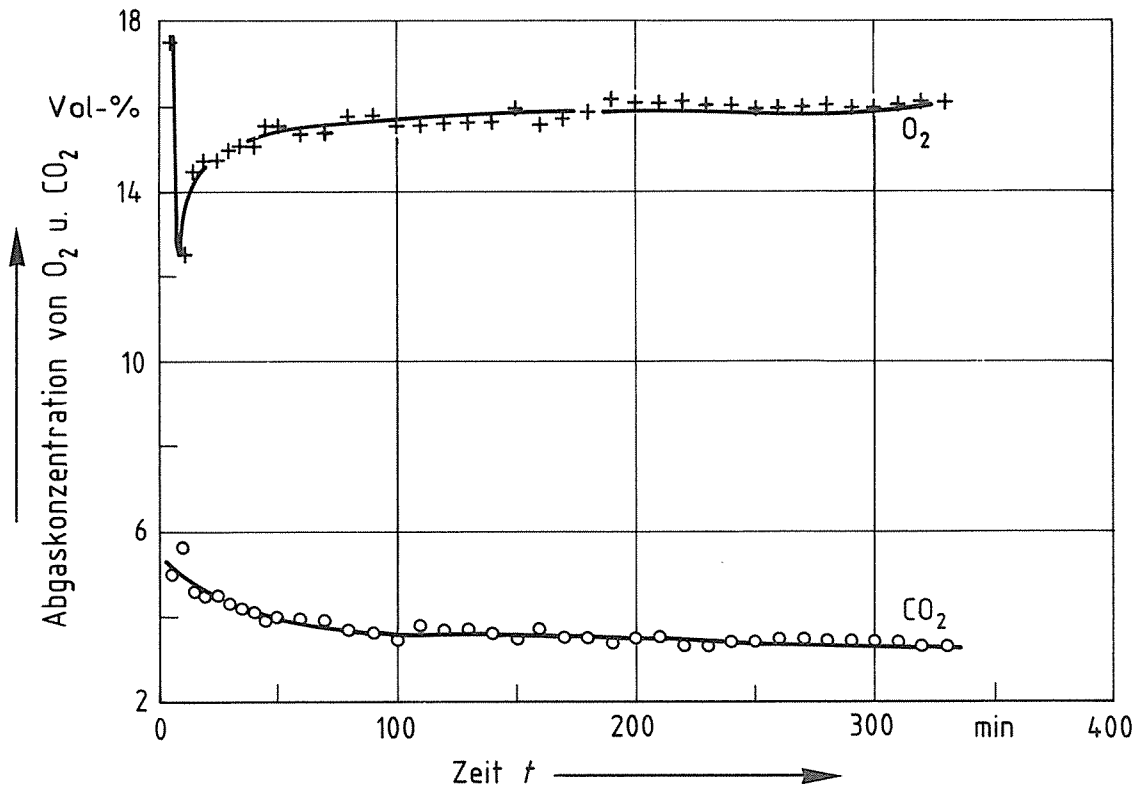


Bild B - 4: Schornstein B14; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

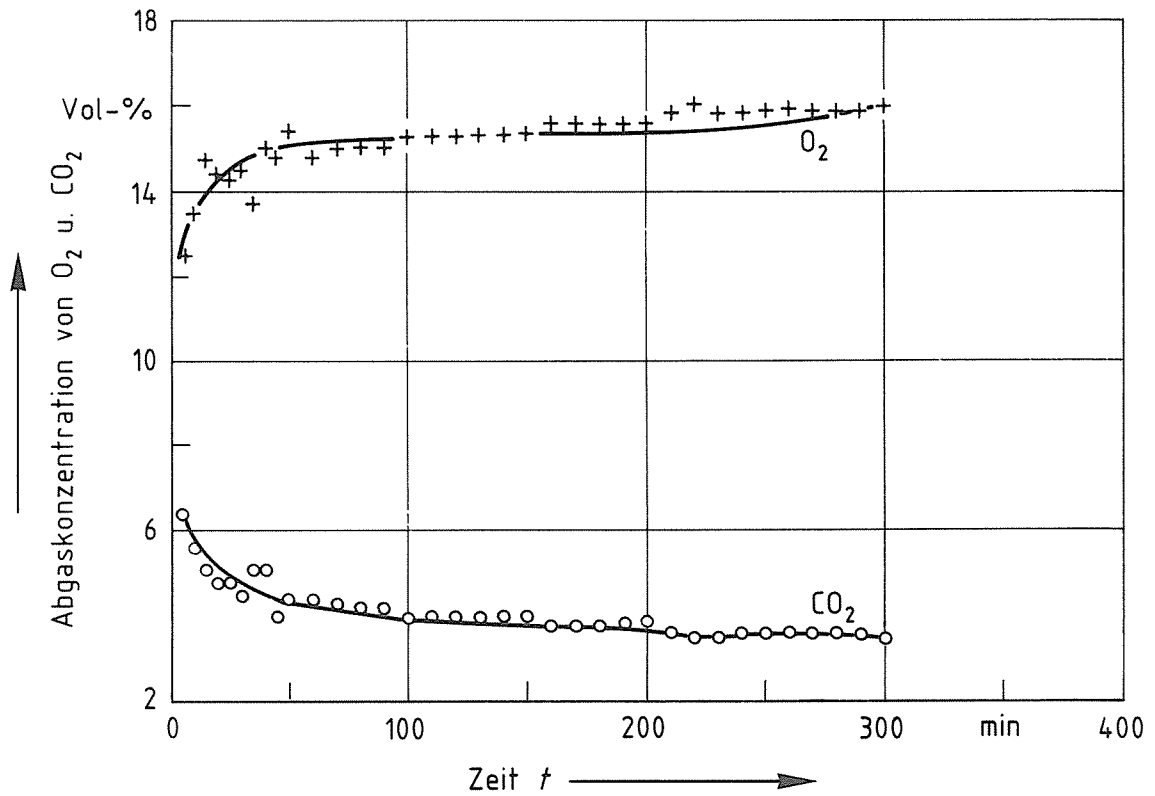


Bild B - 5: Schornstein B20; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

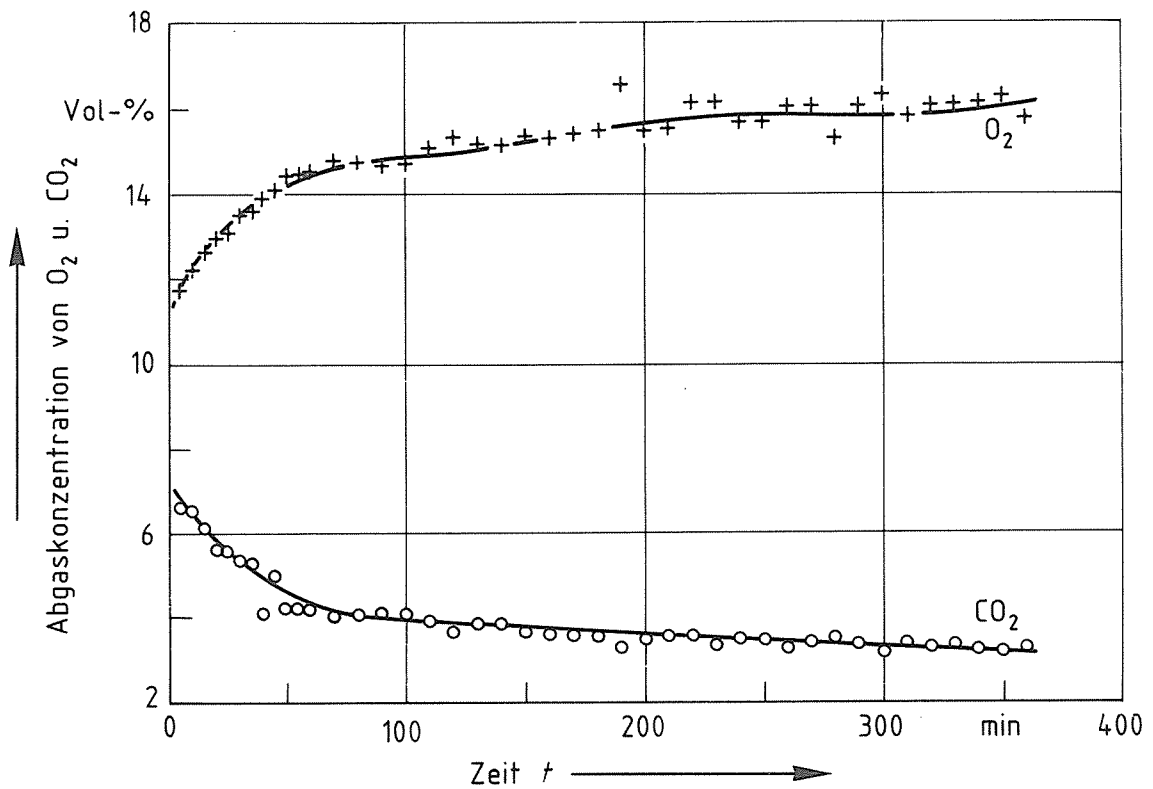


Bild B - 6: Schornstein B26; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]



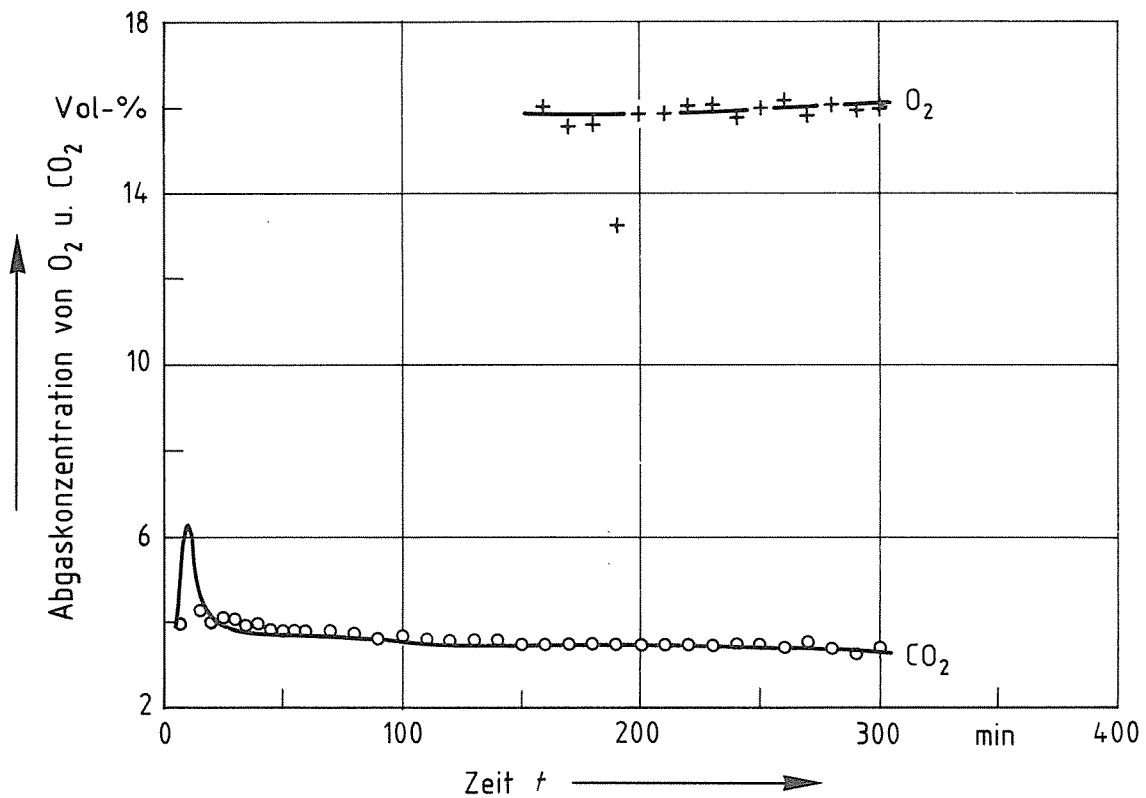


Bild B - 7: Schornstein C14; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

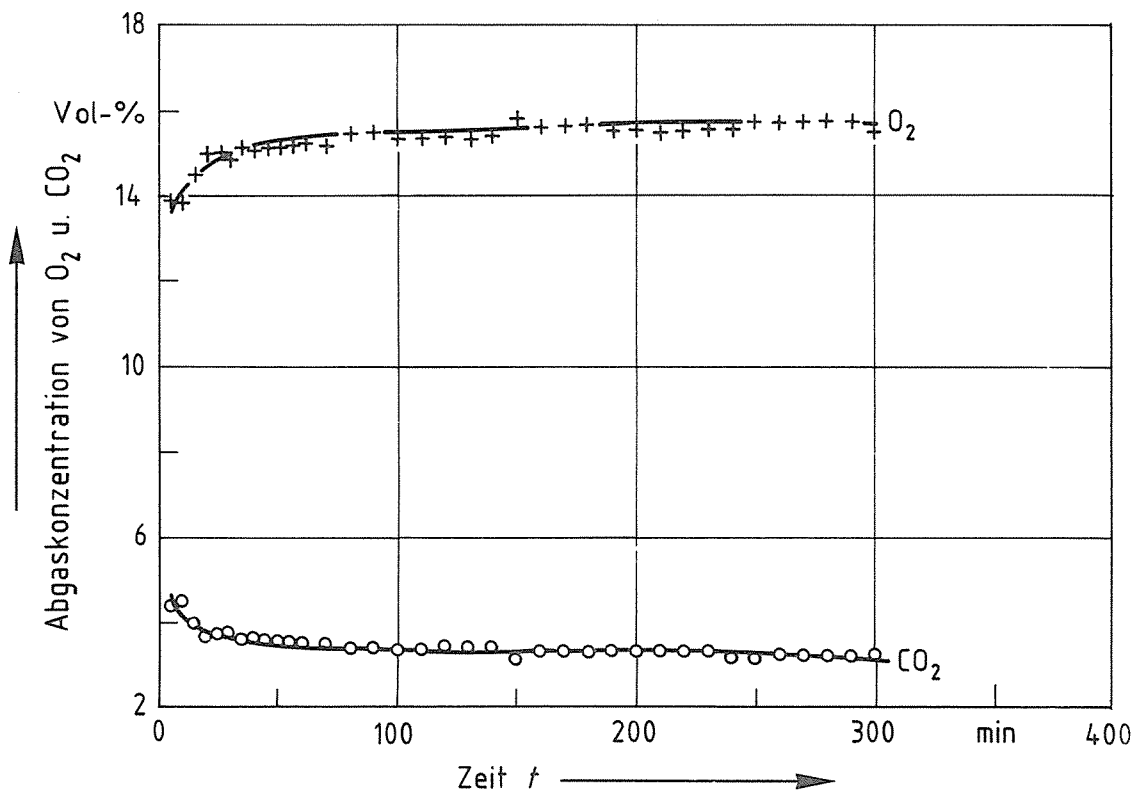


Bild B - 8: Schornstein C20; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

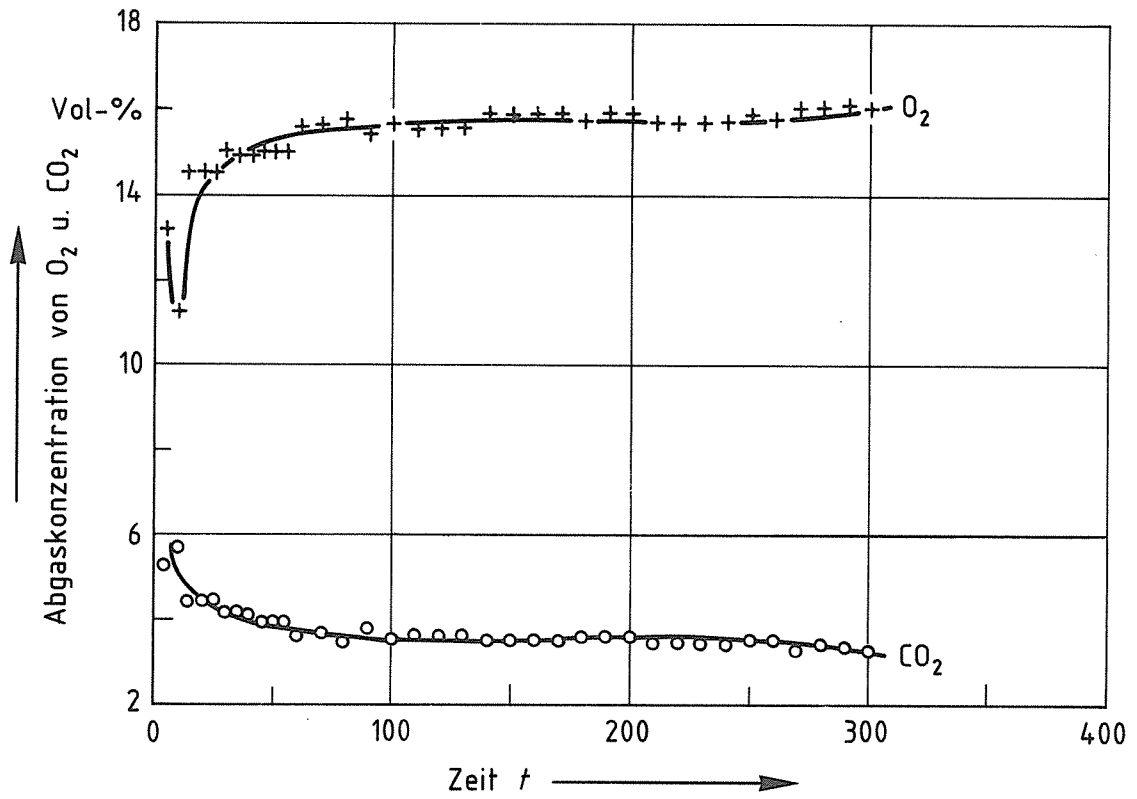


Bild B - 9: Schornstein C25; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O<sub>2</sub> u. CO<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

### 11.3 Anlage C:

Darstellung des gemessenen Abgasmassenstromes in Abhängigkeit von der Zeit [5], während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18160 Teil 6 [1]

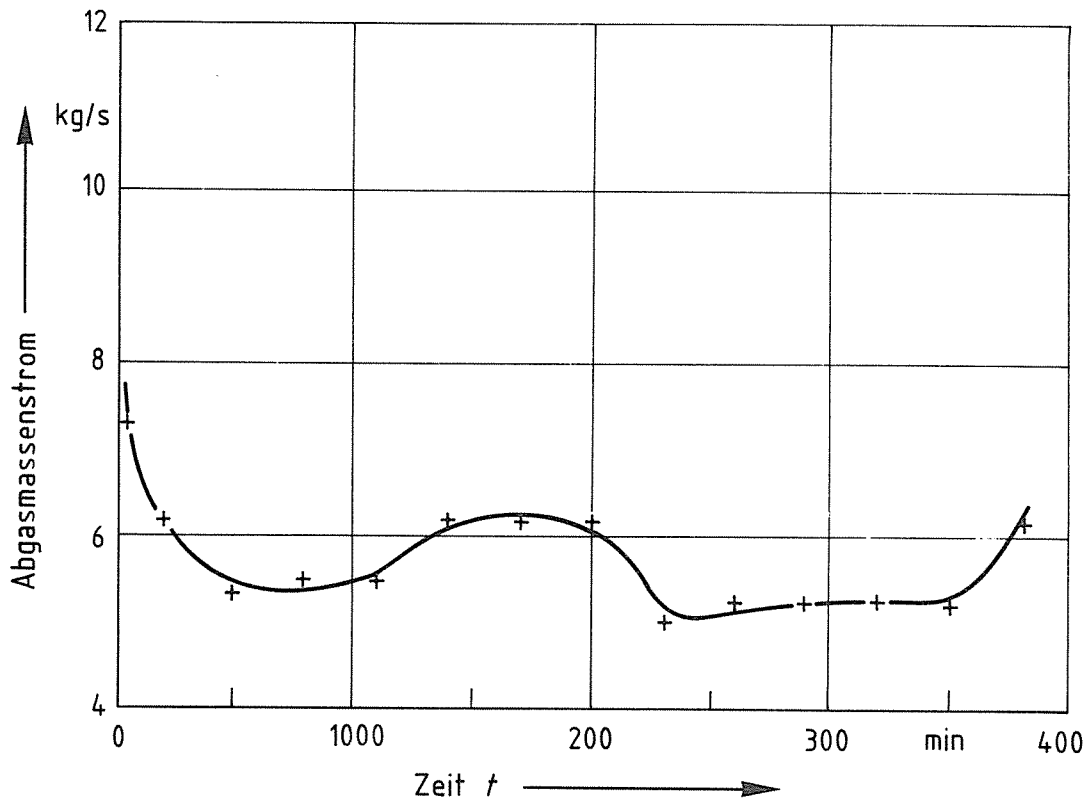


Bild C - 1: Schornstein A14; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

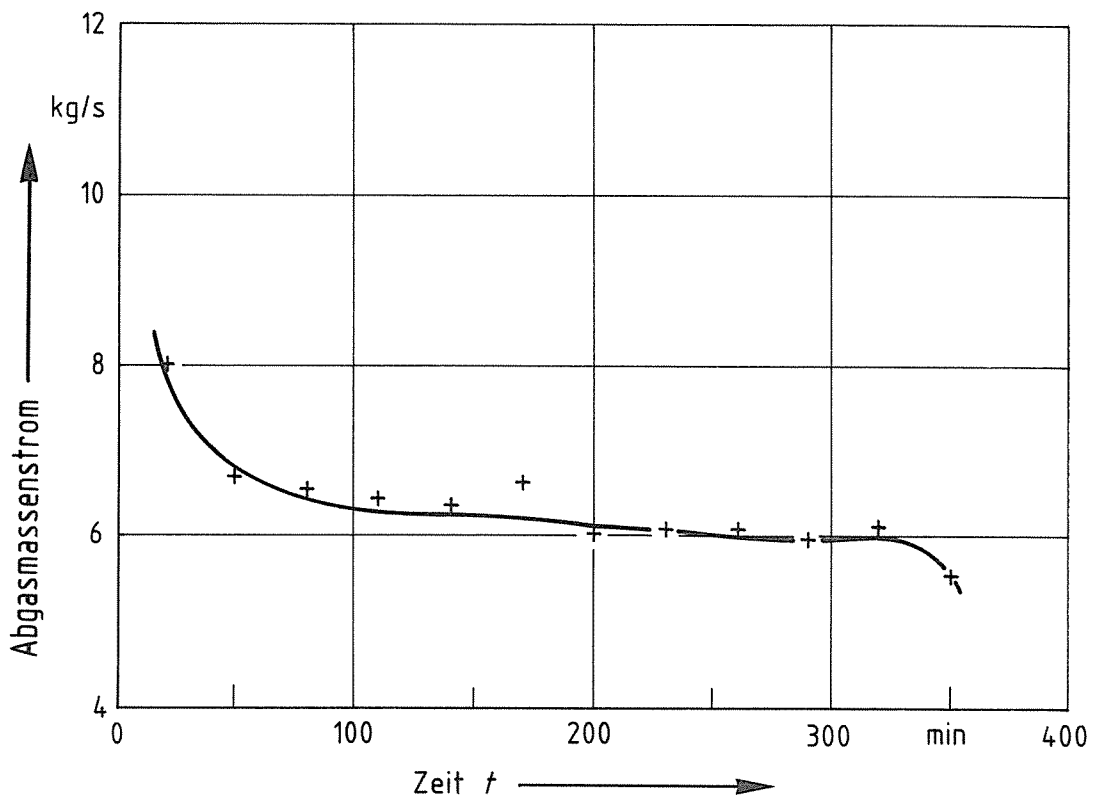


Bild C - 2: Schornstein A20; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

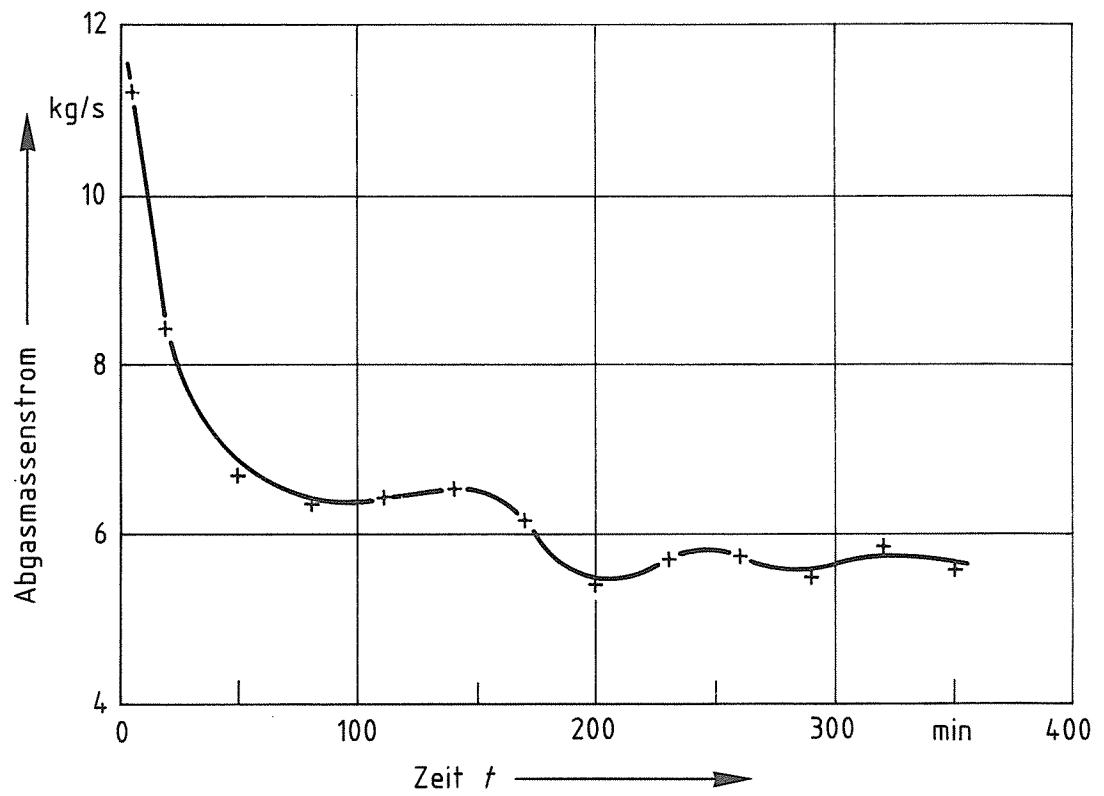


Bild C - 3: Schornstein A26; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

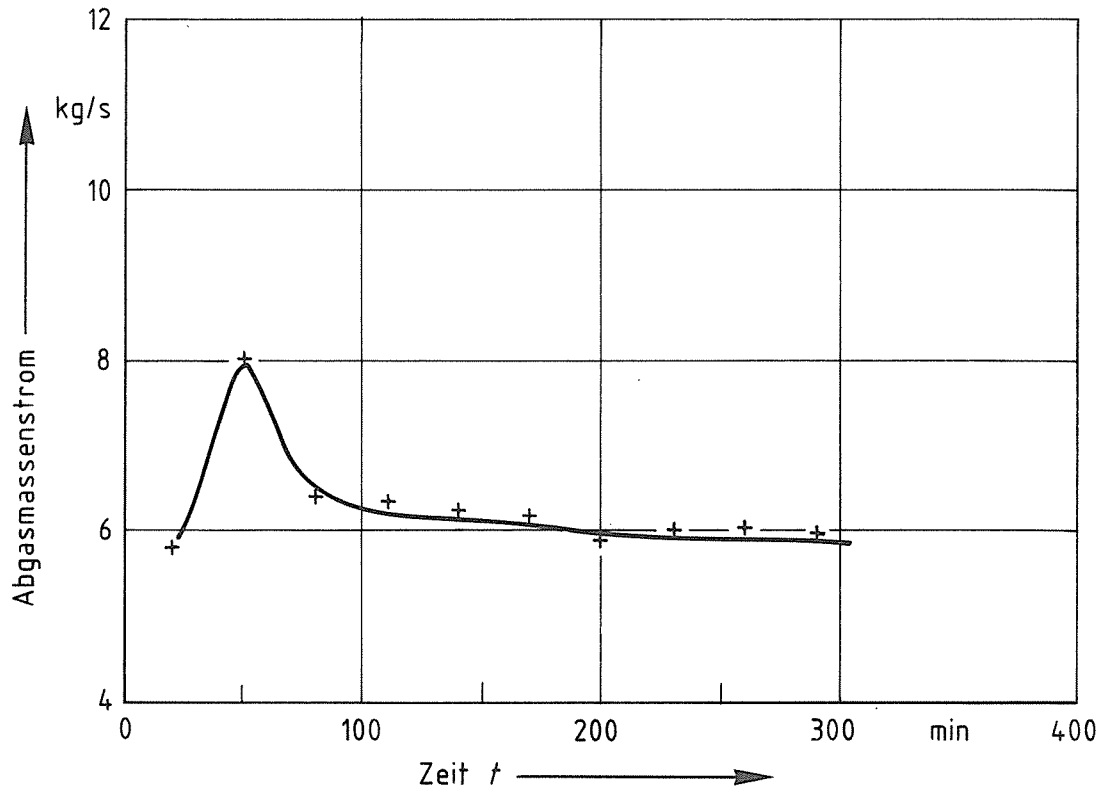


Bild C - 4: Schornstein B14; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

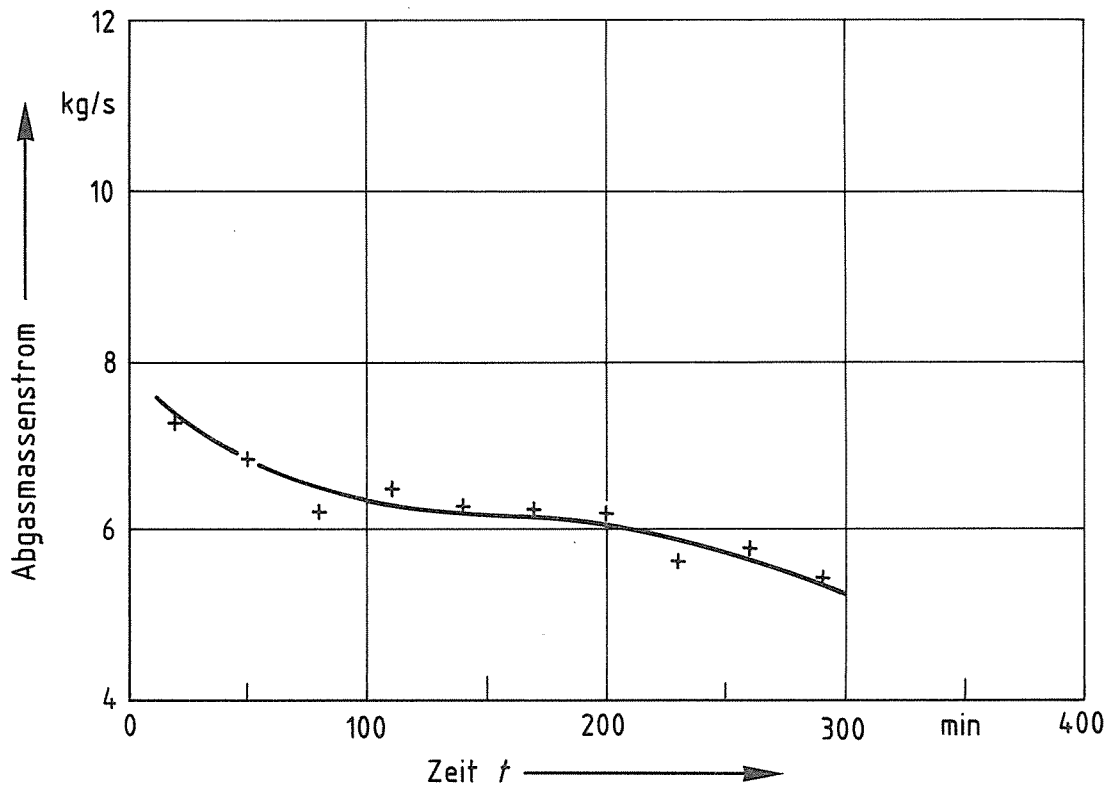


Bild C - 5: Schornstein B20; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

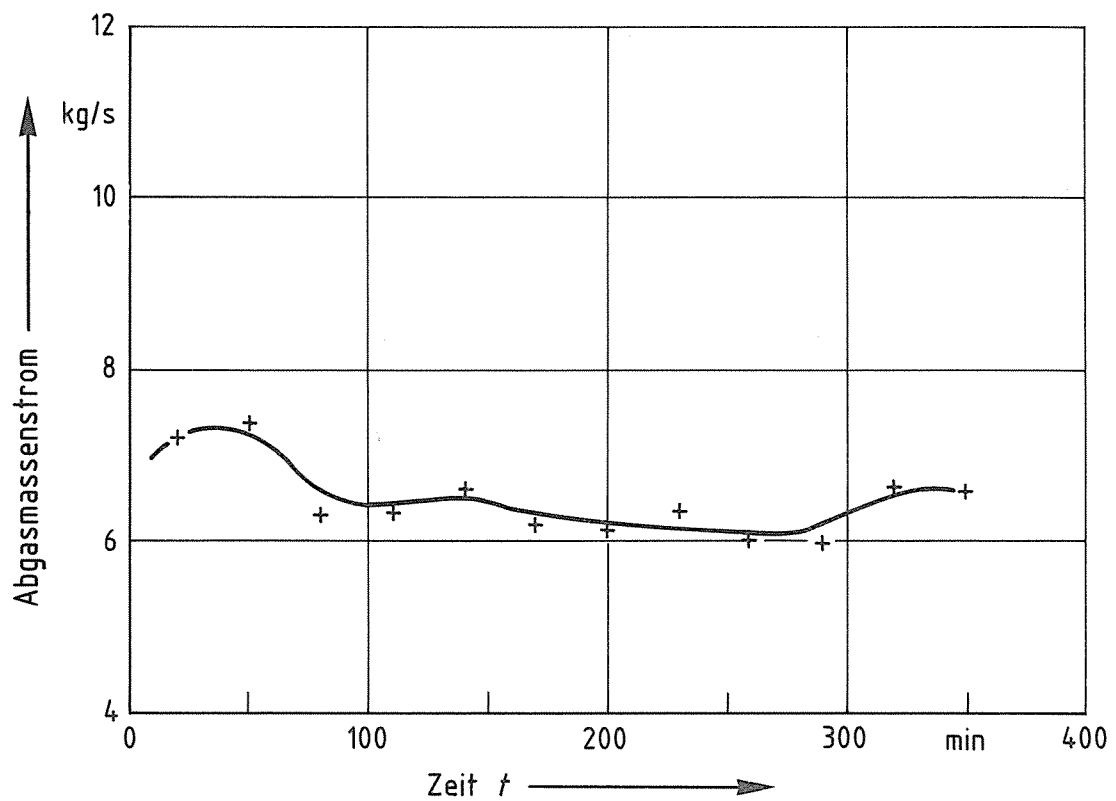


Bild C - 6: Schornstein B26; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

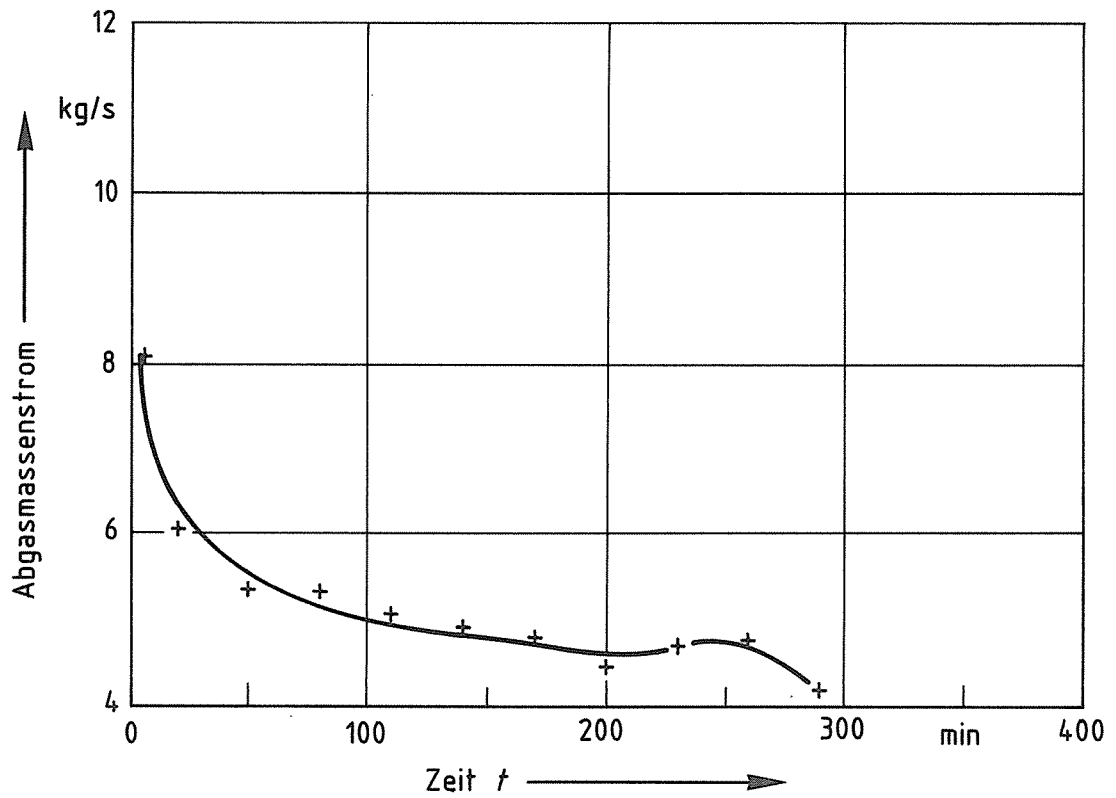


Bild C - 7: Schornstein C14; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

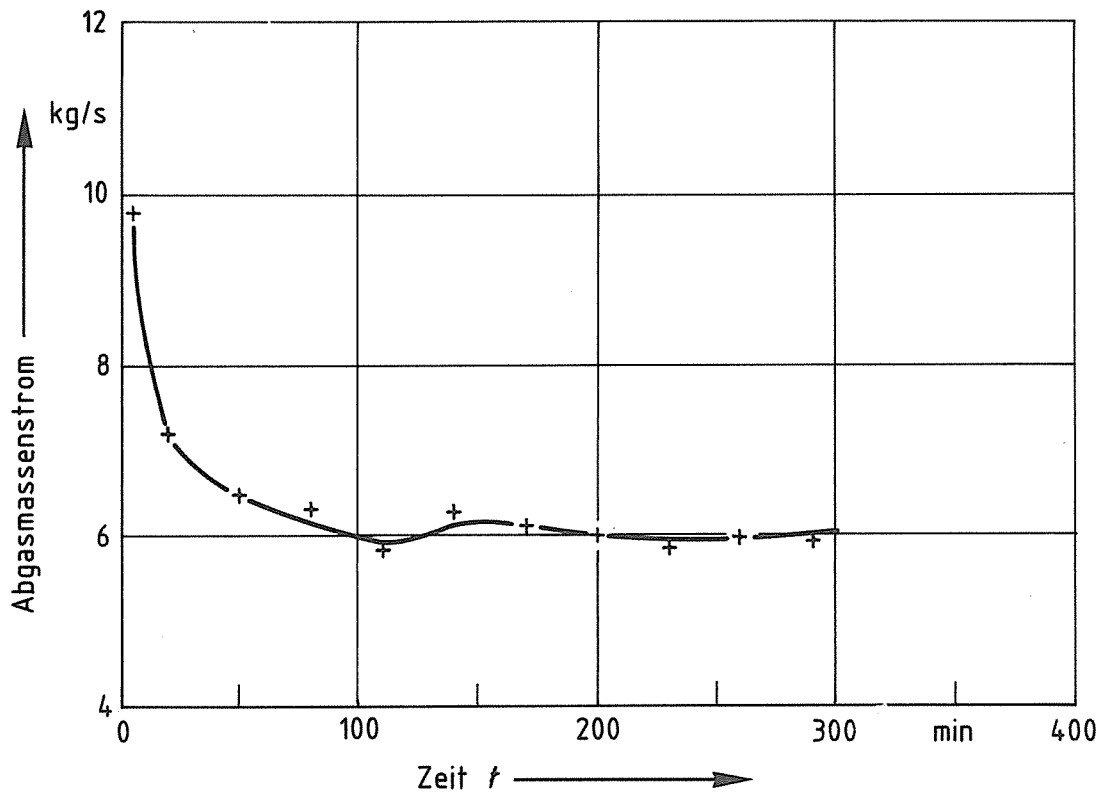


Bild C - 8: Schornstein C20, gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

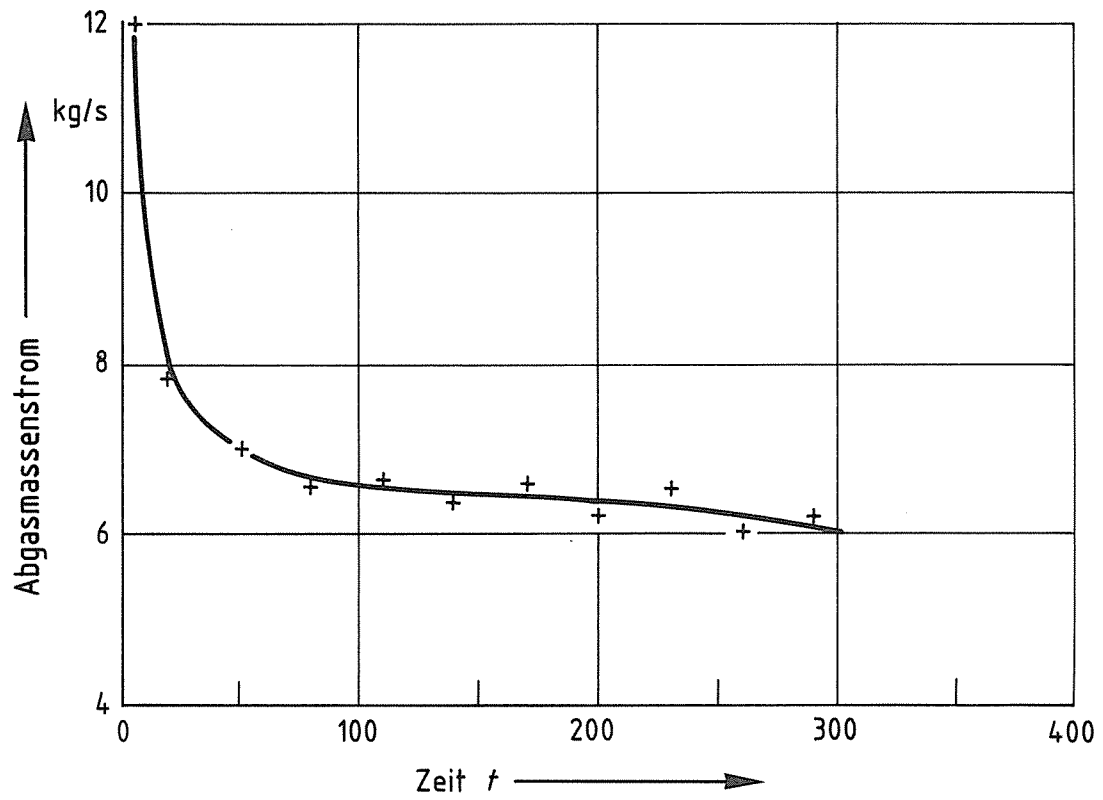


Bild C - 9: Schornstein C25; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  [5]

### 11.4 Anlage D:

Darstellung der berechneten mittleren Abgasgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Zeit in den Meßquerschnitten 1 und 3 [5] während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18160 Teil 6 [1]

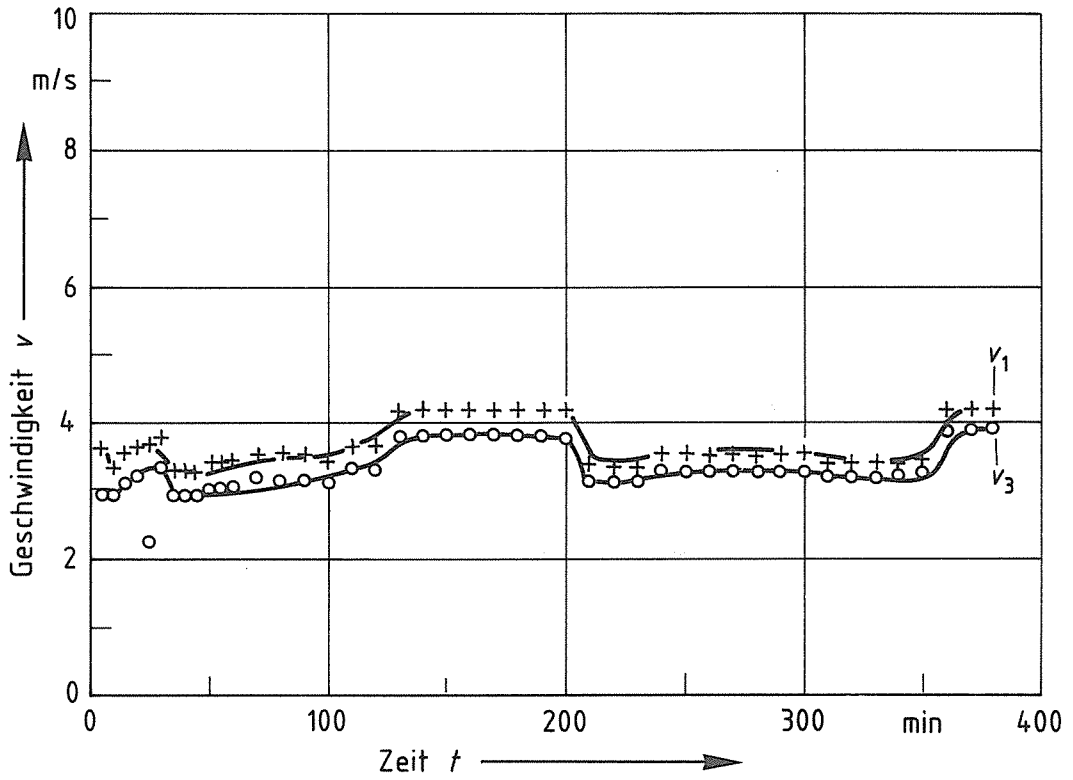


Bild D-1: Schornstein A14; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]

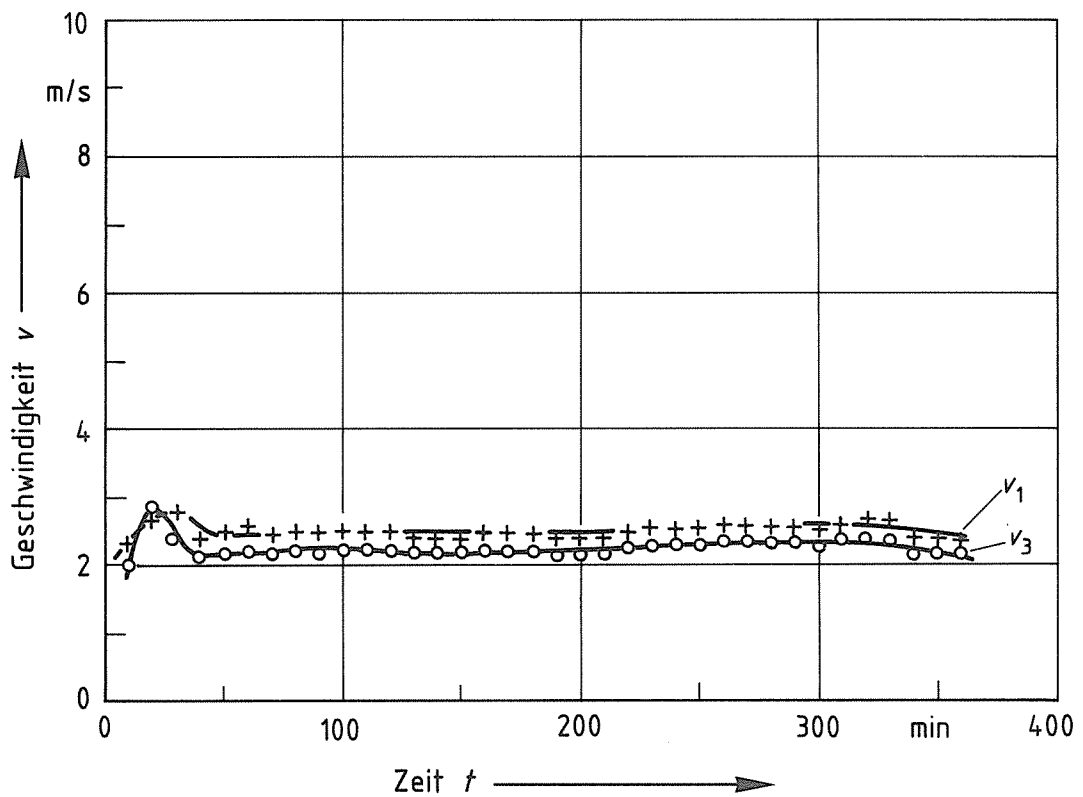


Bild D-2: Schornstein A20; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]



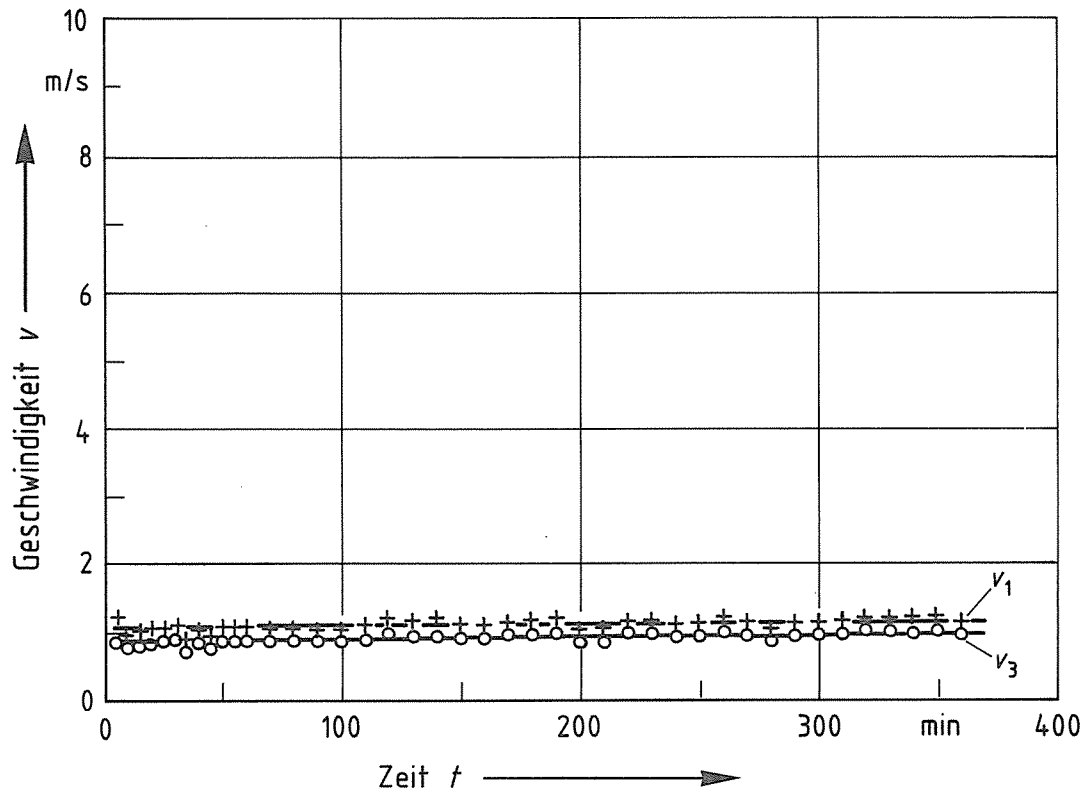


Bild D-3: Schornstein A26; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]

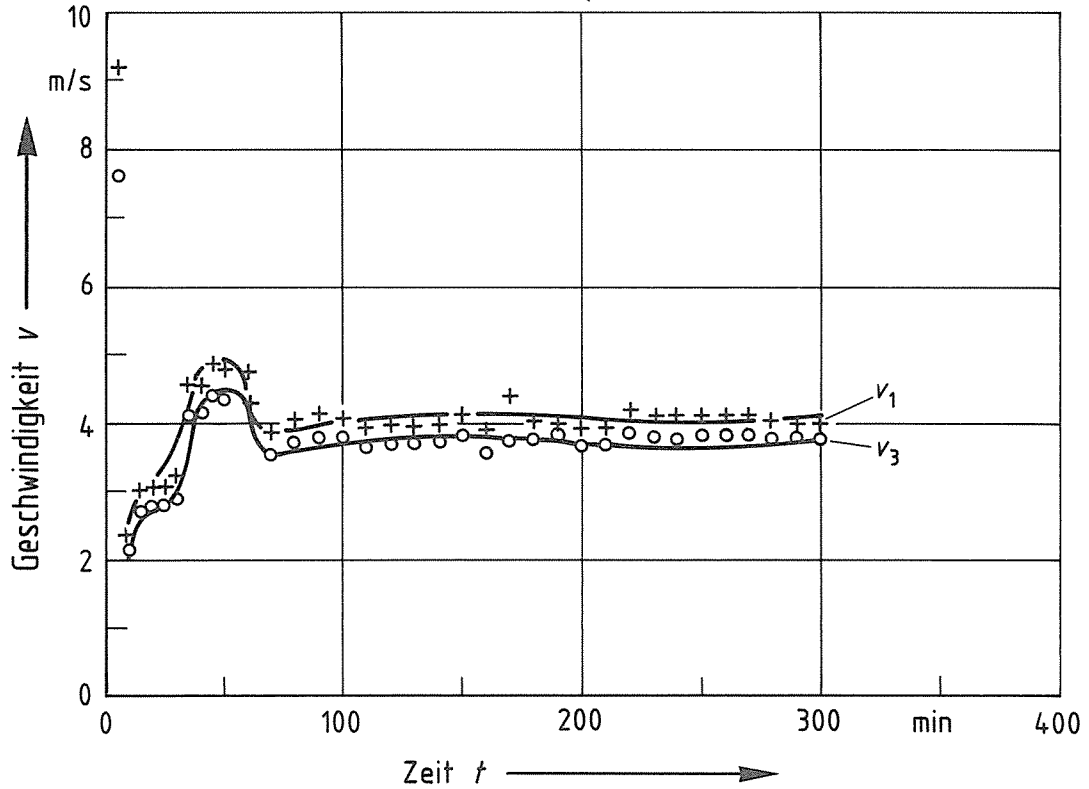


Bild D-4: Schornstein B14; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]

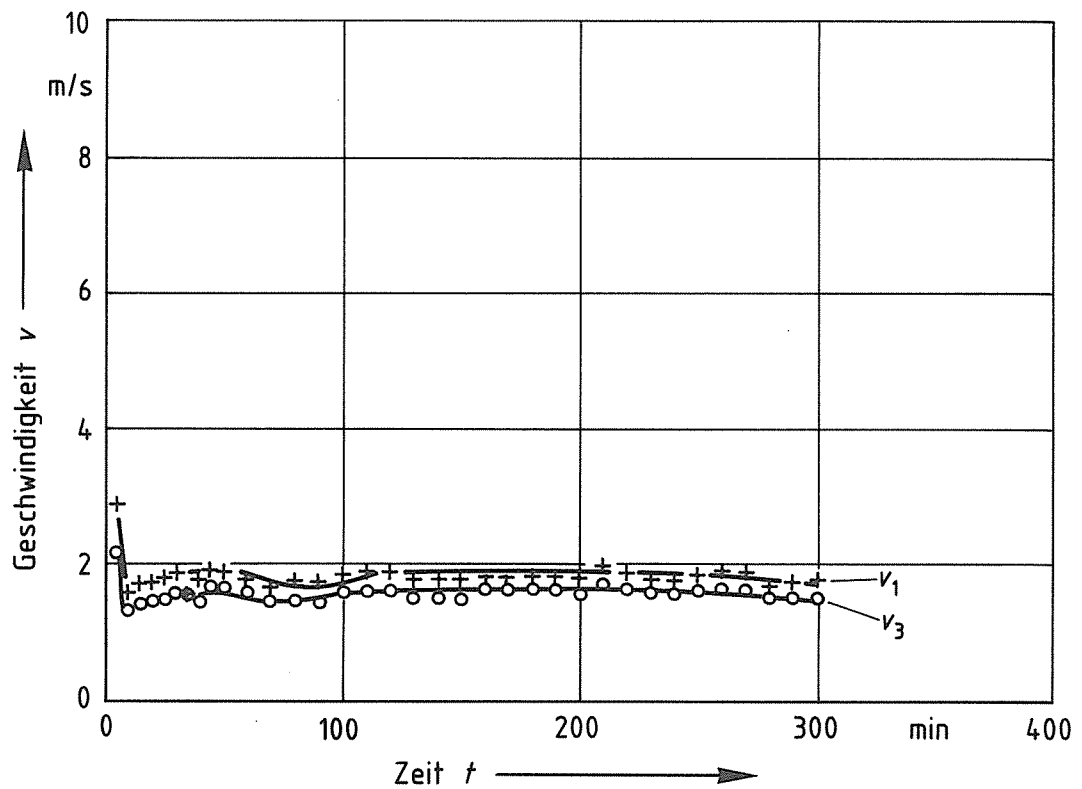


Bild D-5: Schornstein B20; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]

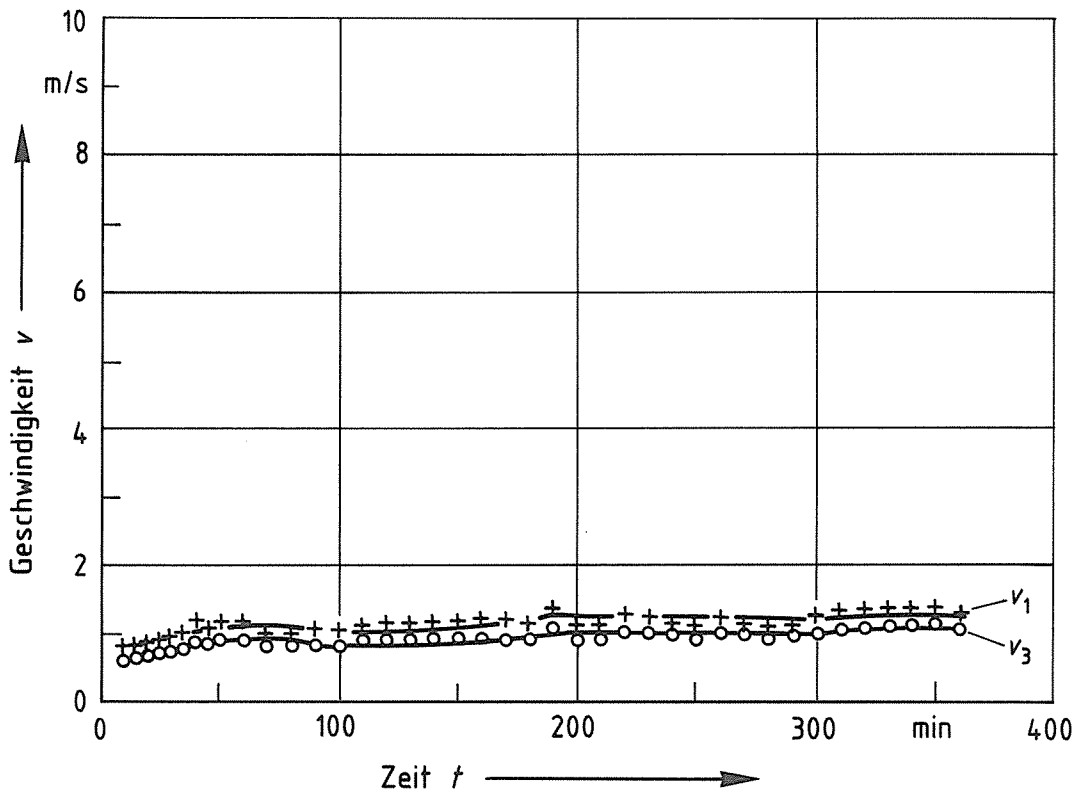


Bild D-6: Schornstein B26; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]

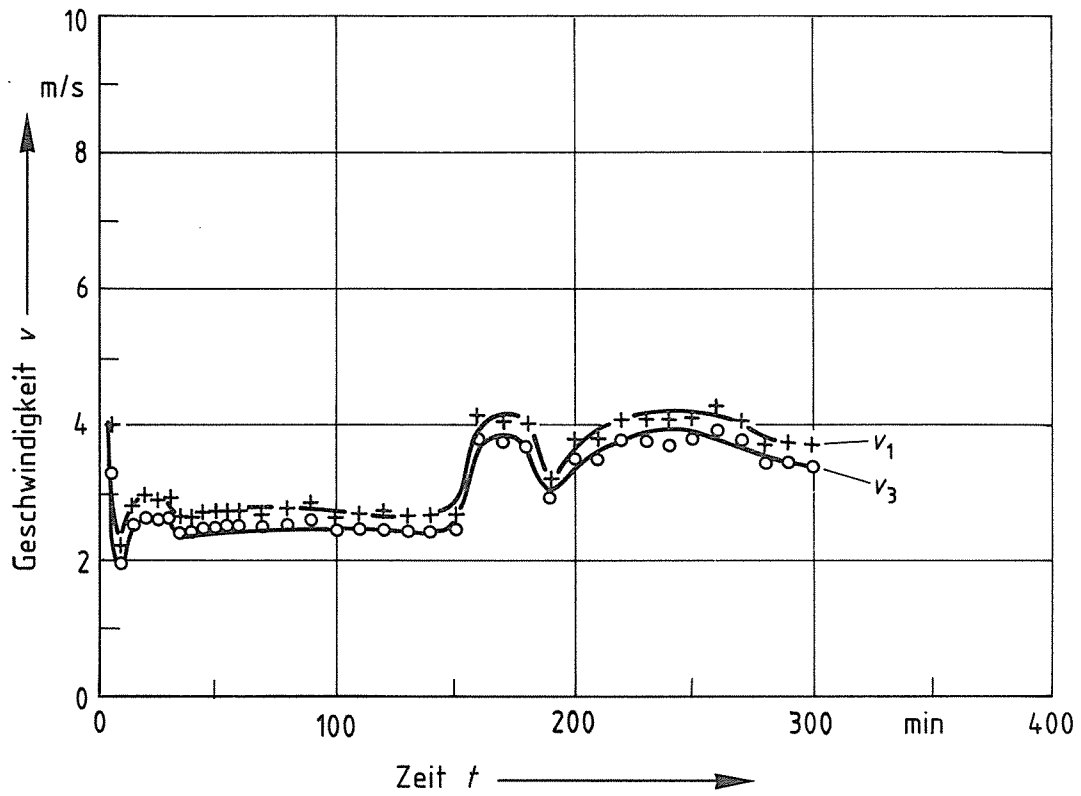


Bild D-7: Schornstein C14; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1( $v_1$ ) u. 3( $v_3$ ) [5]

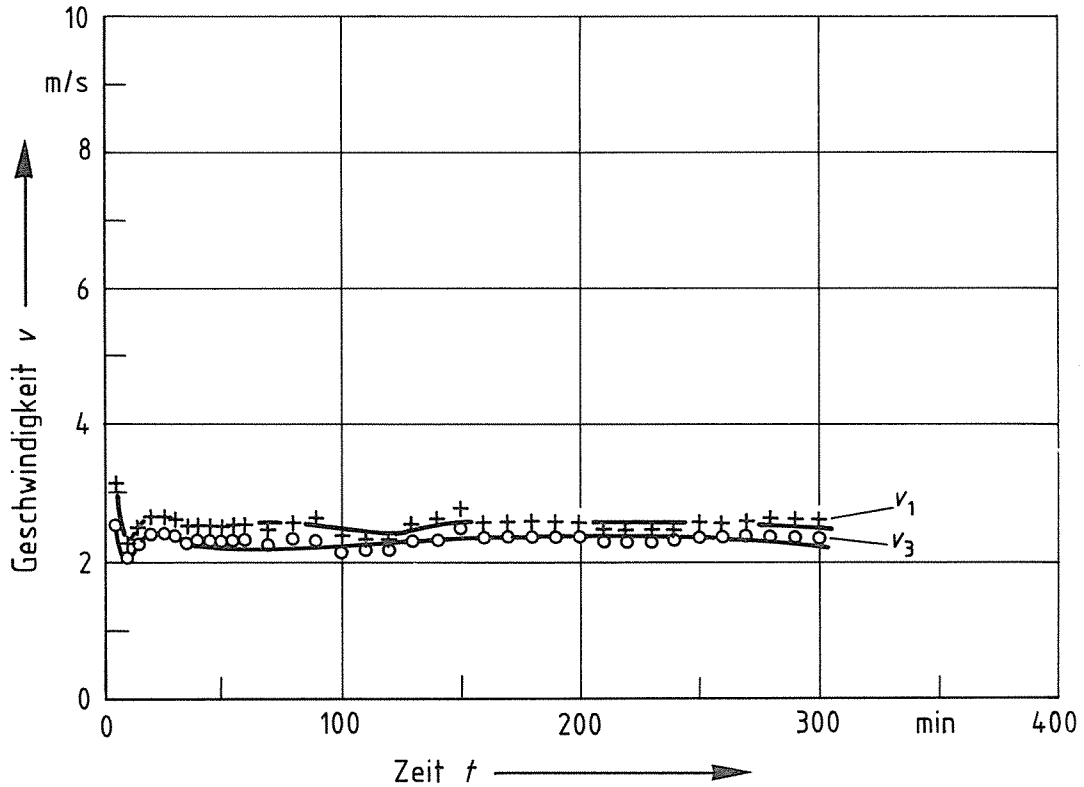


Bild D-8: Schornstein C20; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1( $v_1$ ) u. 3( $v_3$ ) [5]

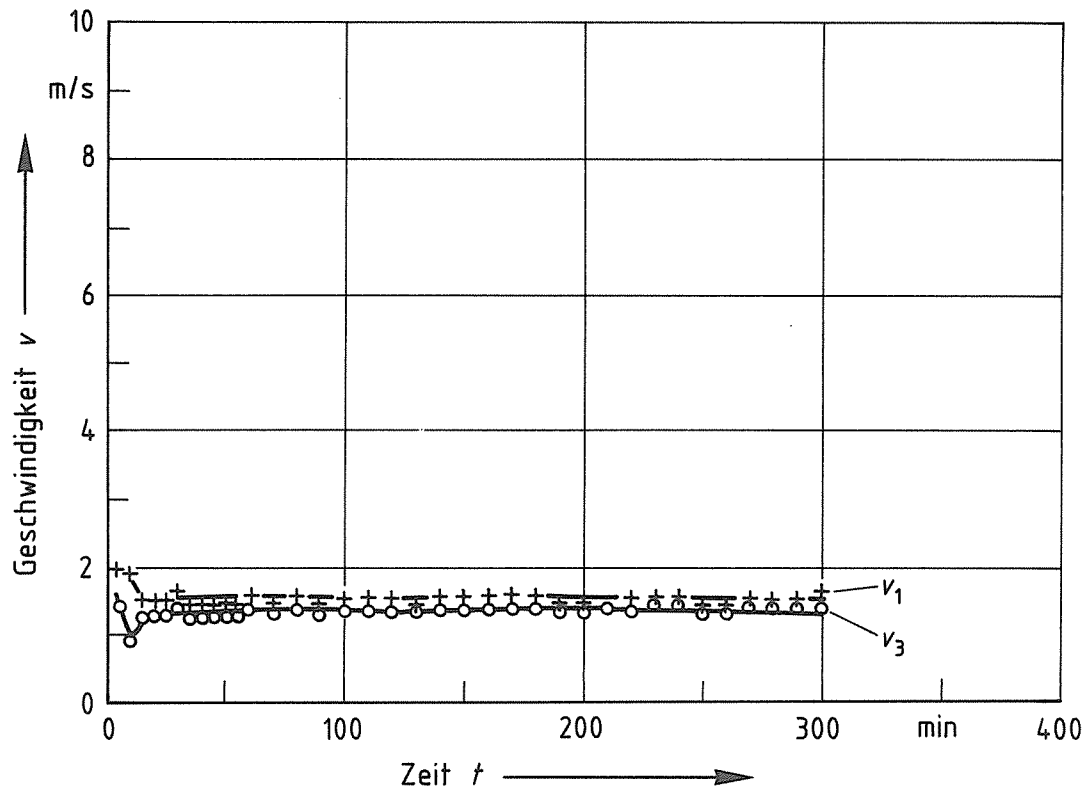


Bild D-9: Schornstein C25; berechnete Geschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in den Meßquerschnitten 1 ( $v_1$ ) u. 3 ( $v_3$ ) [5]

### 11.5 Anlage E:

Darstellung der Temperatur-Zeitfunktionen im Meßquerschnitt 1 während der Heizbeanspruchung entsprechend den Betriebsphasen 1 und 2 sowie der Trocknungsphase nach DIN 18 160 Teil 6 [1].

Auf den Bildern E-1 bis E-18 sind die auf den Schornsteinachsen gemessenen Temperatur-Zeitfunktionen als ausgezogene Kurven, die im Eckenbereich gemessenen Temperatur-Zeitfunktionen durch gestrichelte Kurven dargestellt.

Im Vergleich dazu ist der jeweils berechnete Temperatur-Zeit-Verlauf durch ein „R“ bezeichnet.

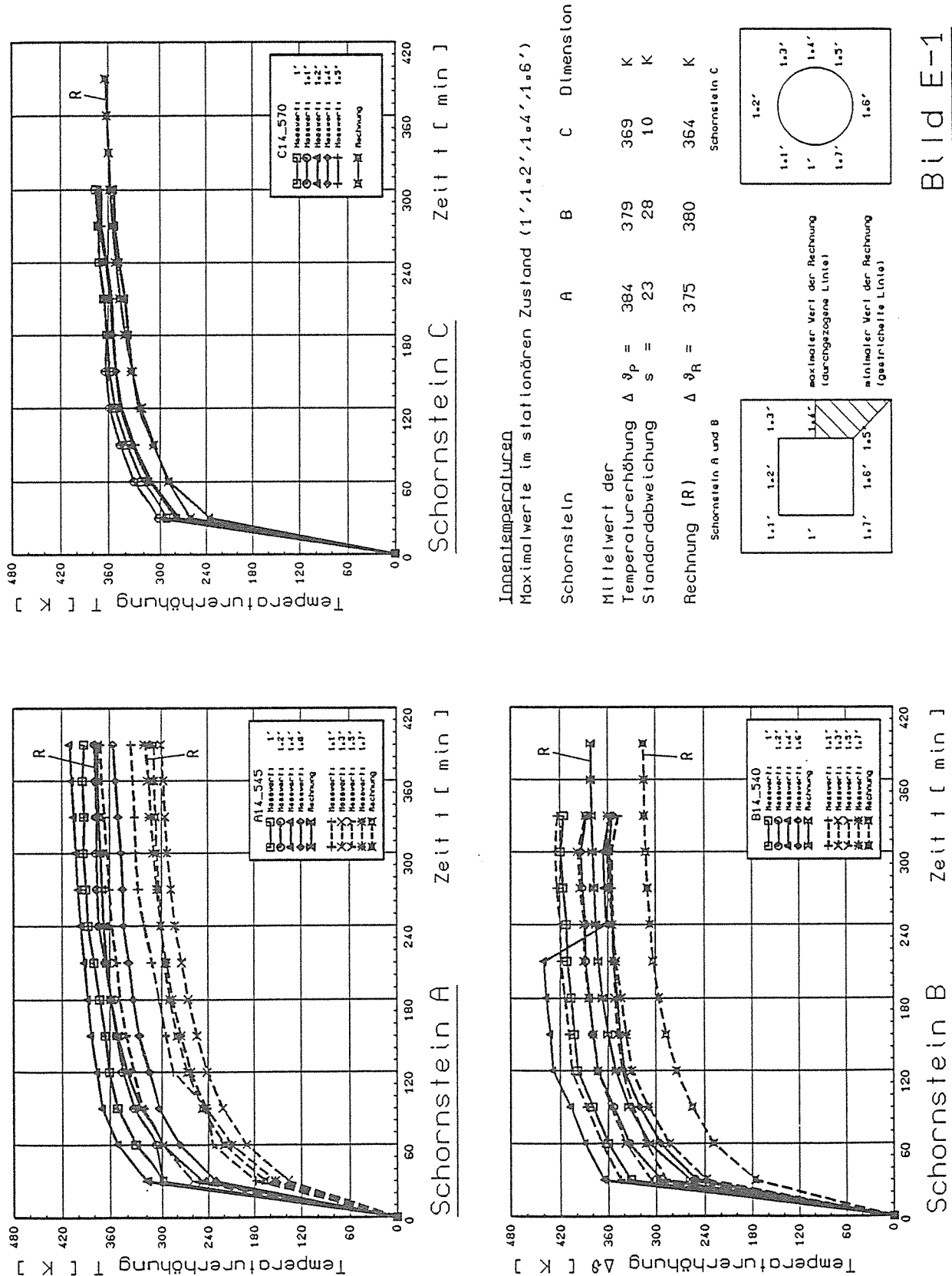
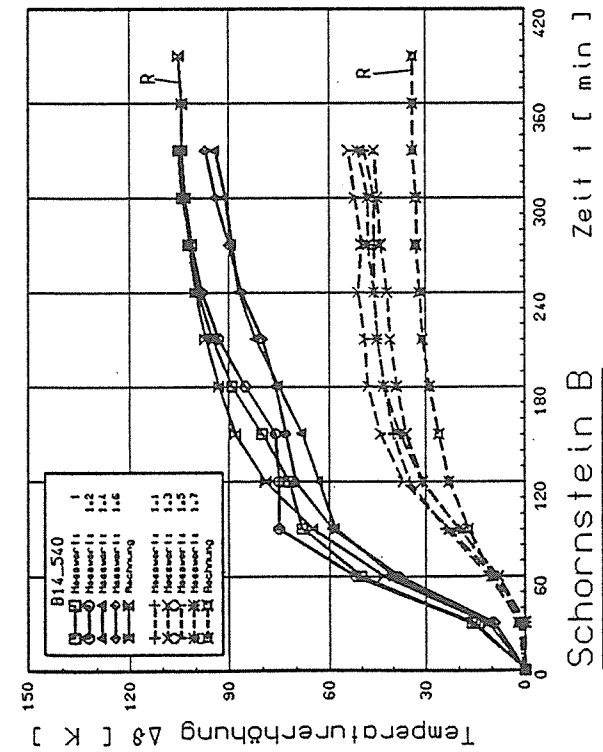
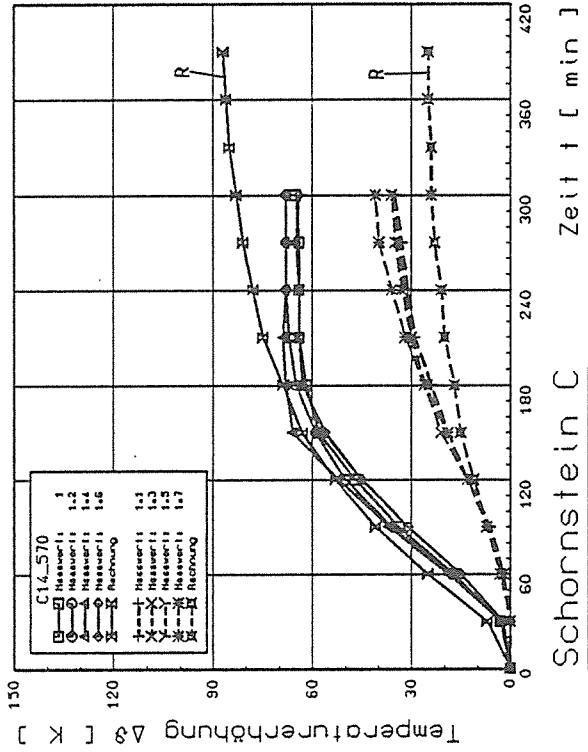
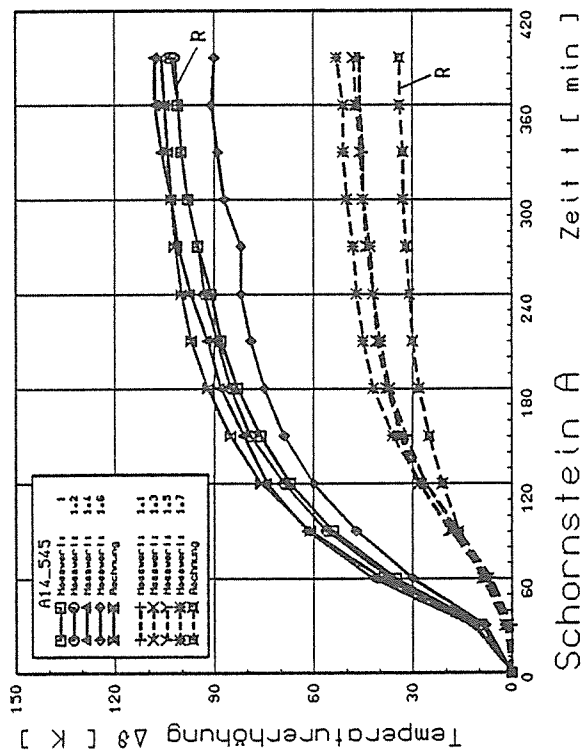


Bild E-1



**Außen Temperaturen**  
Maximalwerte im stationären Zustand (1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8)

Schornstein	A	B	C	Dimenston
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\vartheta_p = 101$	100	104	K
Standardabweichung	$s = 8$	6	2	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 106$	104	85	K

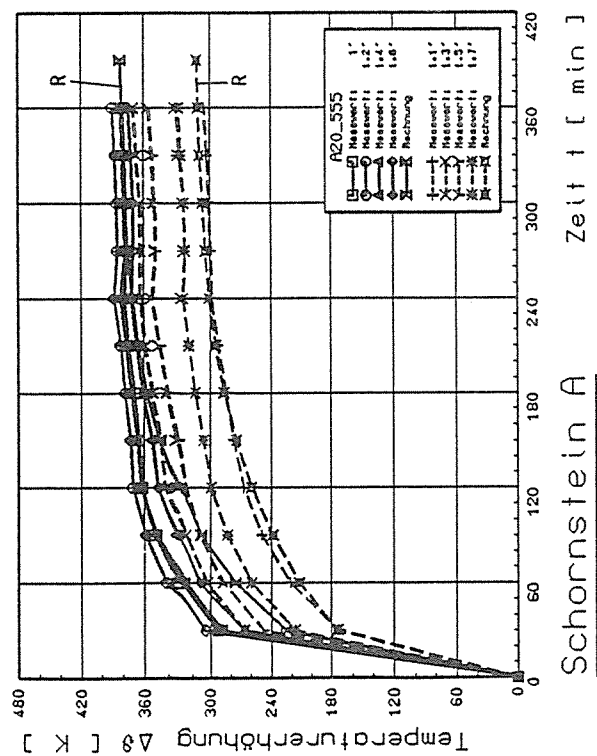
Schornstein A und B

1.1 1.2 1.3 1.4, maximaler Wert der Rechnung (durchgezogene Linie) 1.5, einzelner Wert der Rechnung (gestrichelte Linie) 1.6 1.7

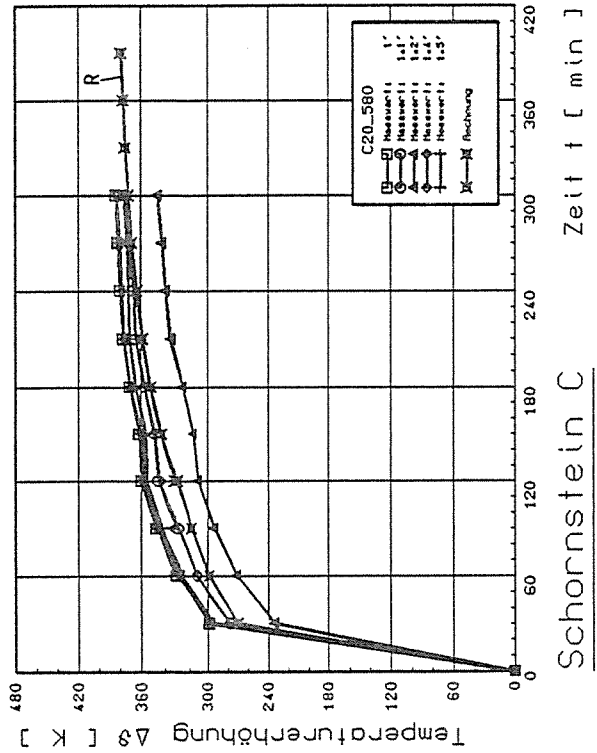
Schornstein C

1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7

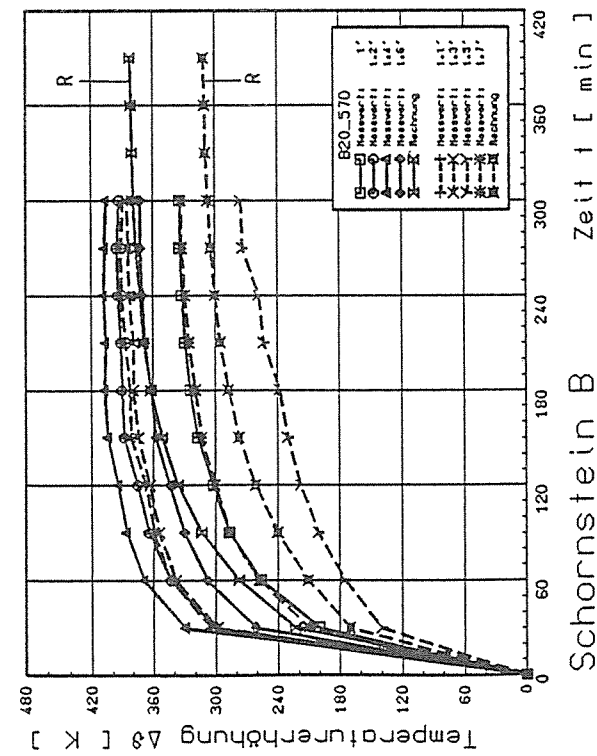
Bild E-2



Schornstein A



Schornstein C



Schornstein B

Innentemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittlere Wert der Temperaturerhöhung	382	376	373	K
Standardabweichung	7	31	15	K
Rechnung (R)	381	379	370	K

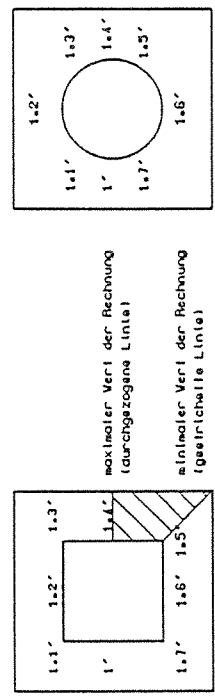
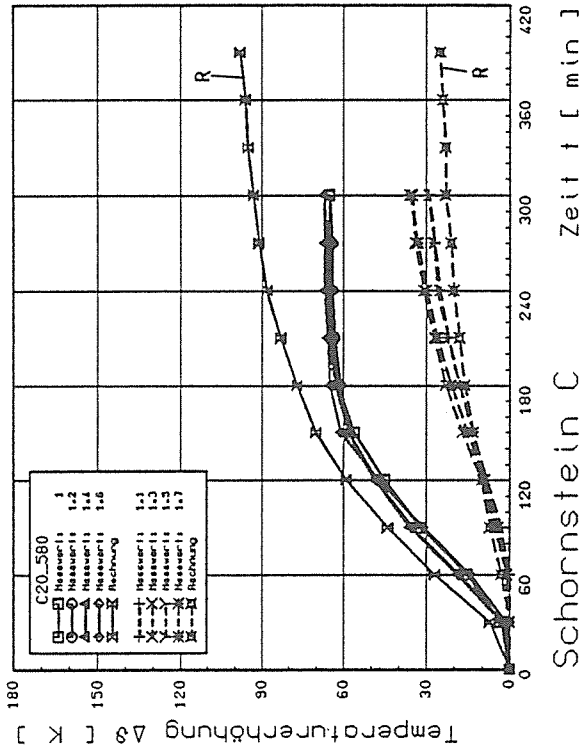
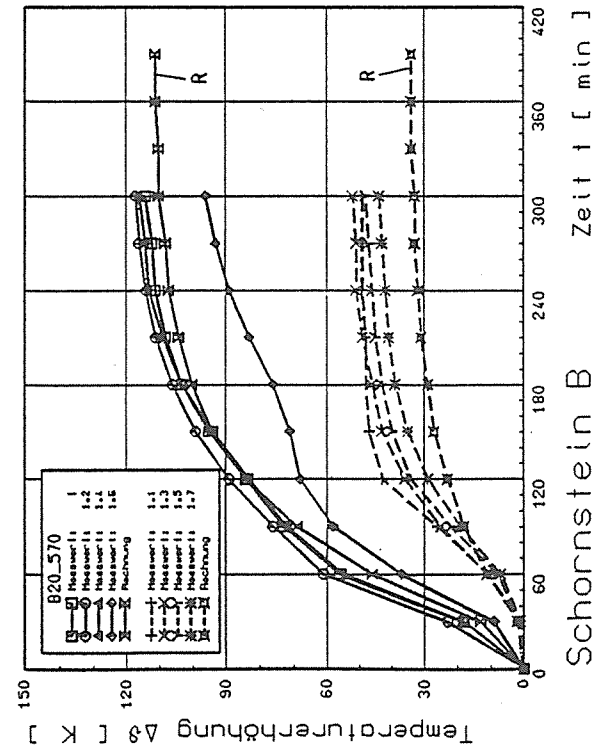
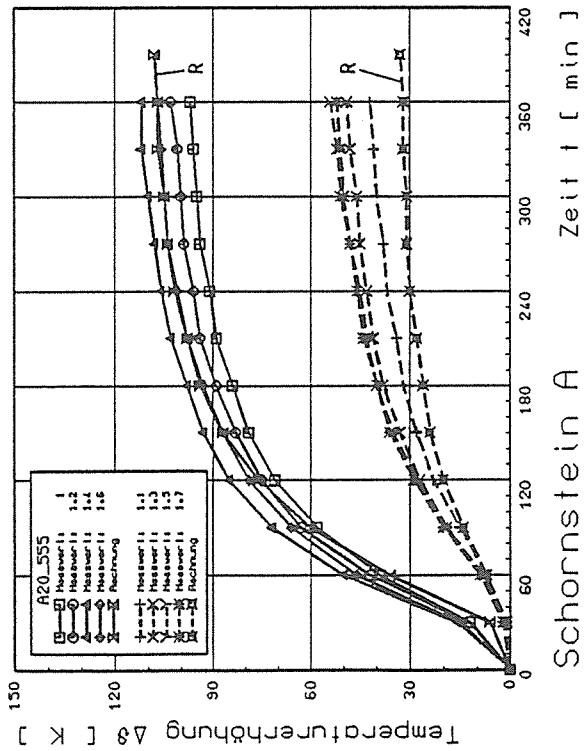


Bild E-3



Außentemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1,0;1,2;1,4;1,6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\vartheta_p = 105$	111	66	K
Standardabweichung	$s = 6$	10	1	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 107$	110	93	K

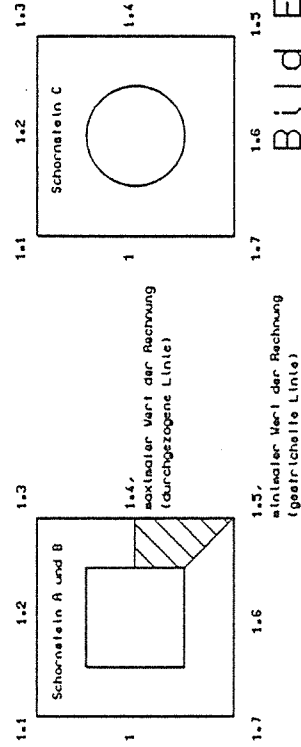
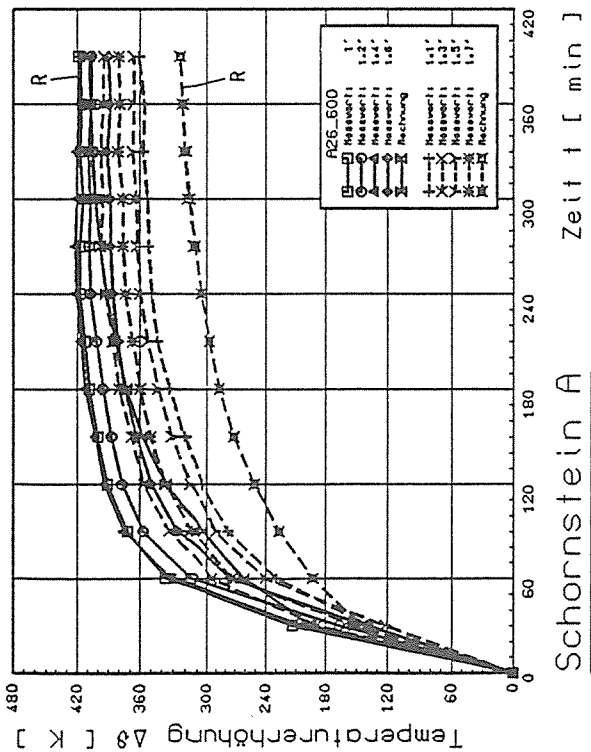
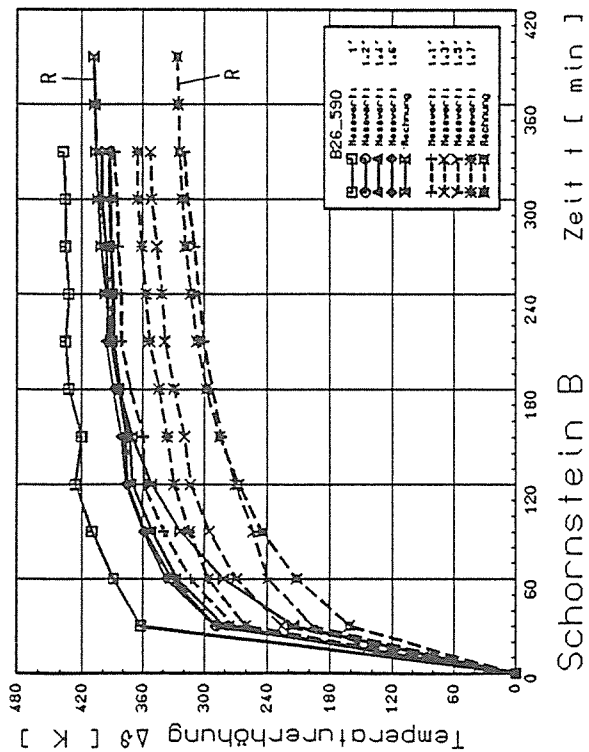


Bild E-4

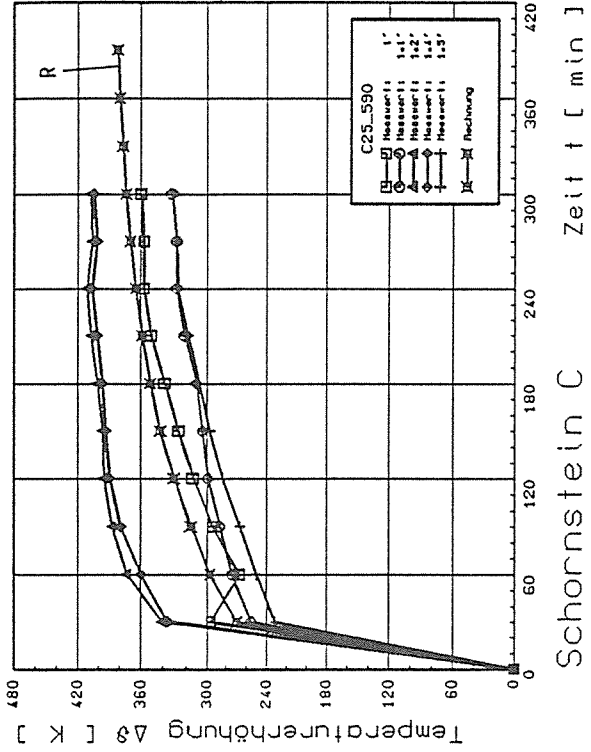




Schornstein A



Schornstein B



Schornstein C

Innentemperaturen

Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 408$	406	367	K
Standardabweichung	$s = 13$	21	37	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 407$	406	370	K

Schornstein A und B

Schornstein C

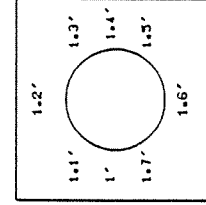
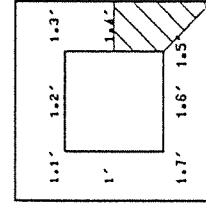
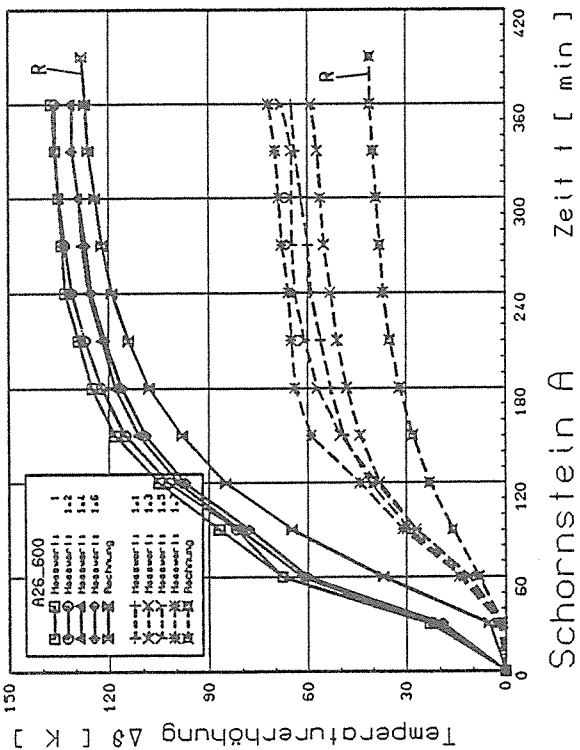
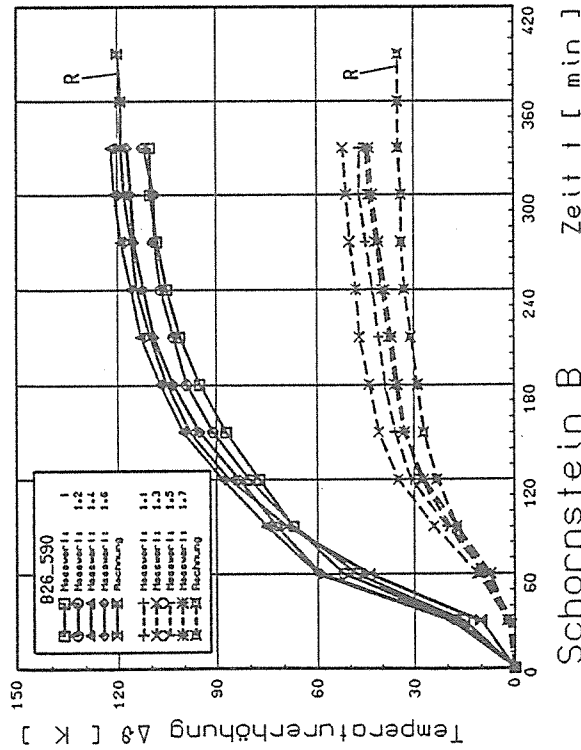


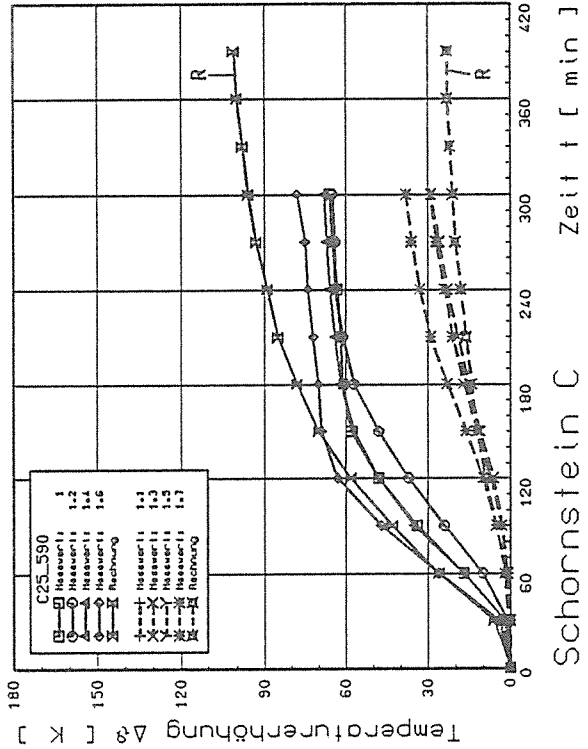
Bild E-5



Schornstein A



Schornstein B



Schornstein C

**AUSSENTEMPORATUREN**  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1.0, 1.2, 1.4, 1.6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\theta_p = 134$	115	69	K
Standardabweichung	$s = 3$	5	6	K
Rechnung (R)	$\Delta\theta_R = 127$	119	96	K

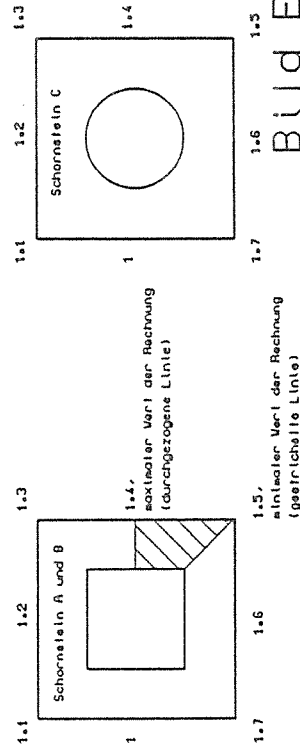
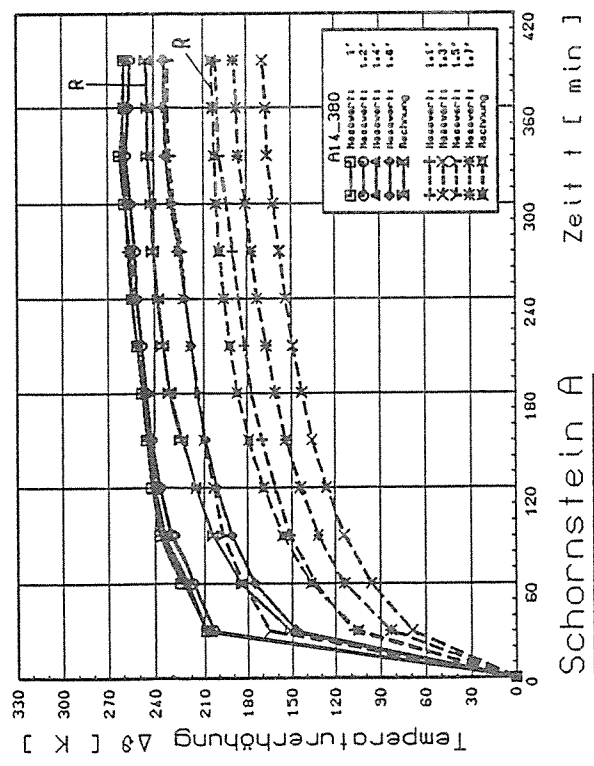
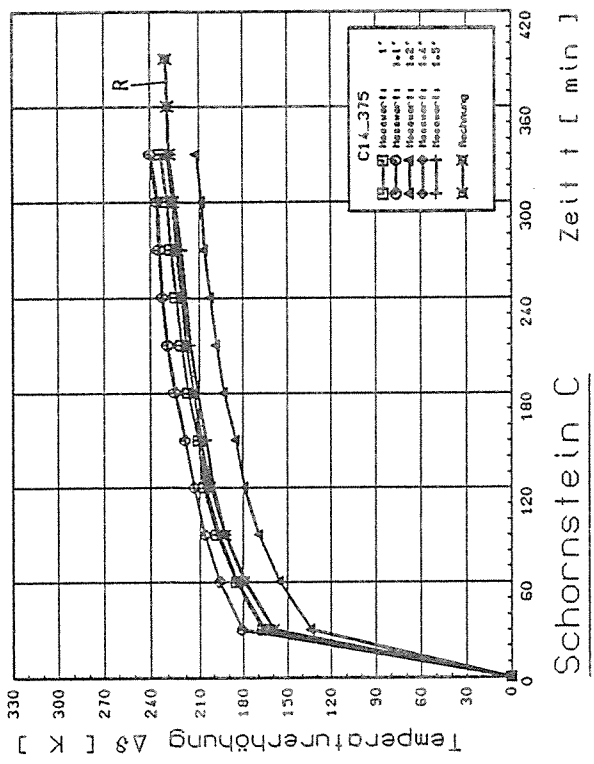


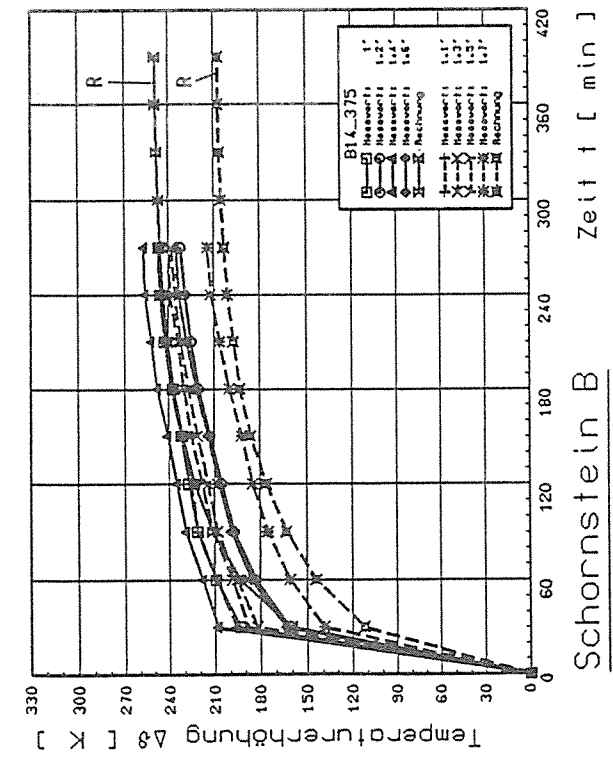
Bild E-6



Schornstein A



Schornstein C



Schornstein B

Innentemperaturen  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

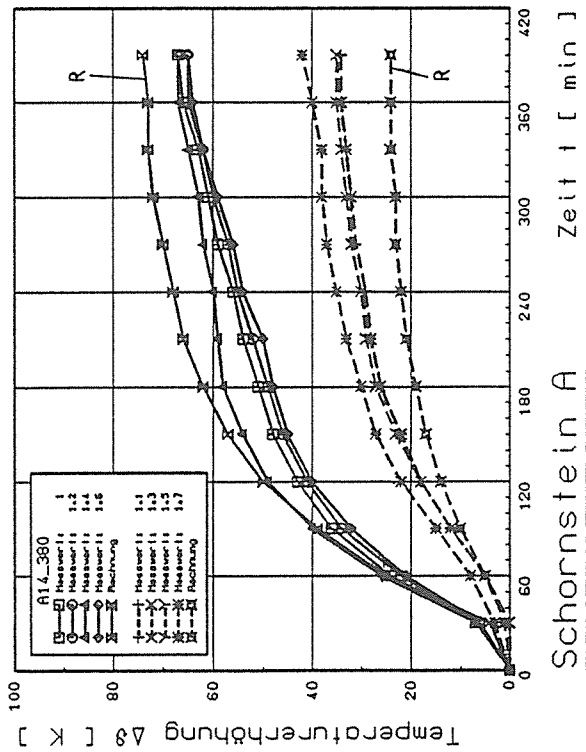
Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	Δ θ <sub>p</sub> = 252	243	229	K
Standardabweichung	s = 12	12	10	K
Rechnung (R)	Δ θ <sub>R</sub> = 245	246	229	K

Schornstein A und B

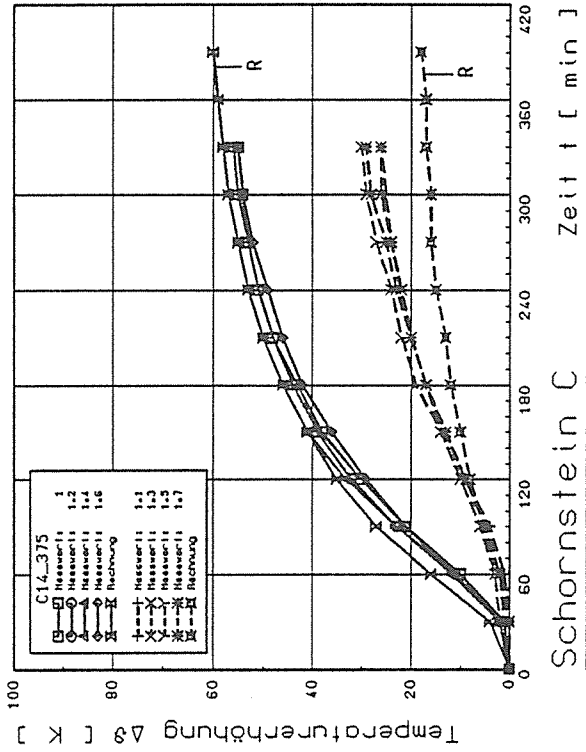
maximaler Wert der Rechnung  
(durchgezogene Linie)  
 minimaler Wert der Rechnung  
(gestrichelte Linie)

Schornstein C

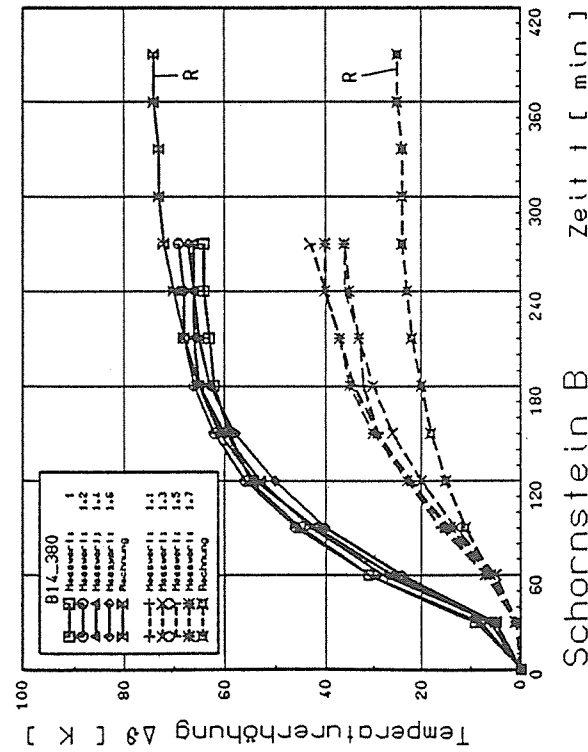
Bild E-7



Schornstein A



Schornstein C



Schornstein B

Außentemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1.0/1.2/1.4/1.6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\vartheta_p = 66$	67	56	K
Standardabweichung	$s = 1$	2	1	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 74$	72	58	K

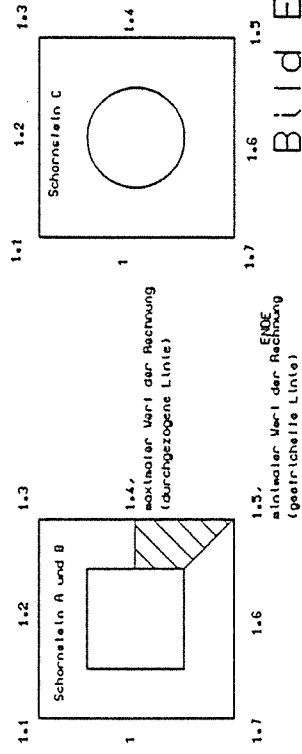
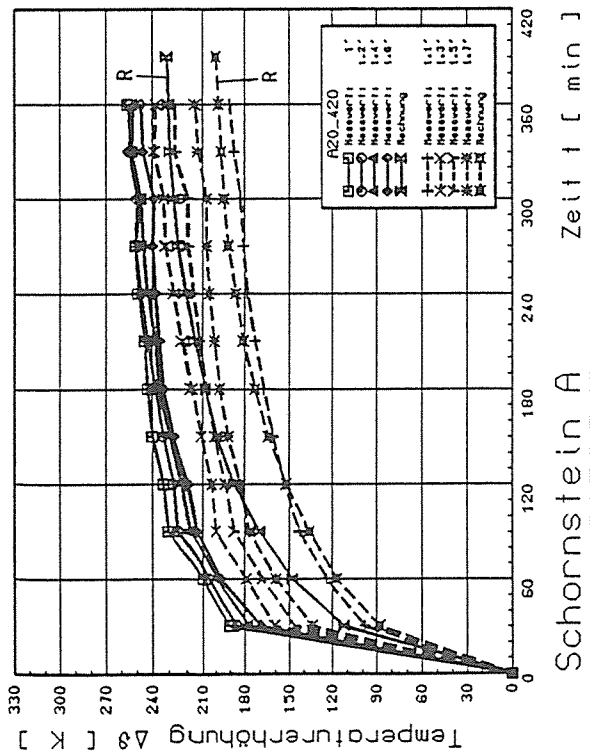
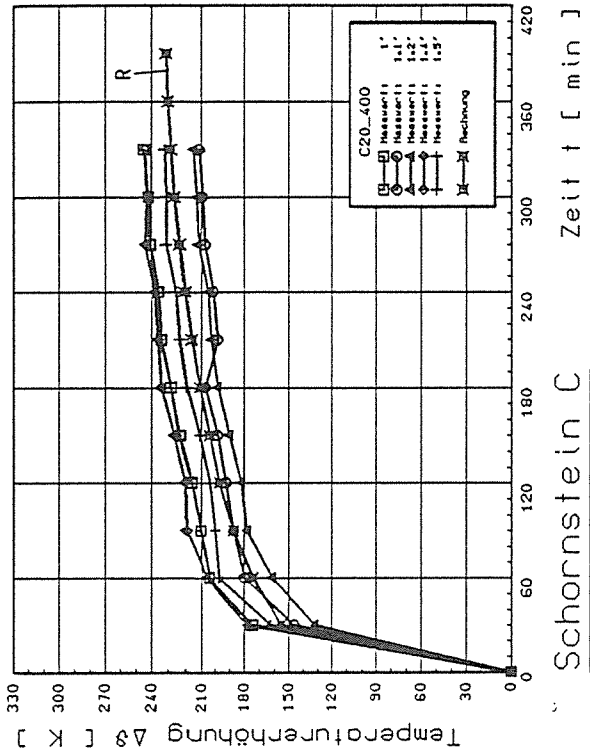


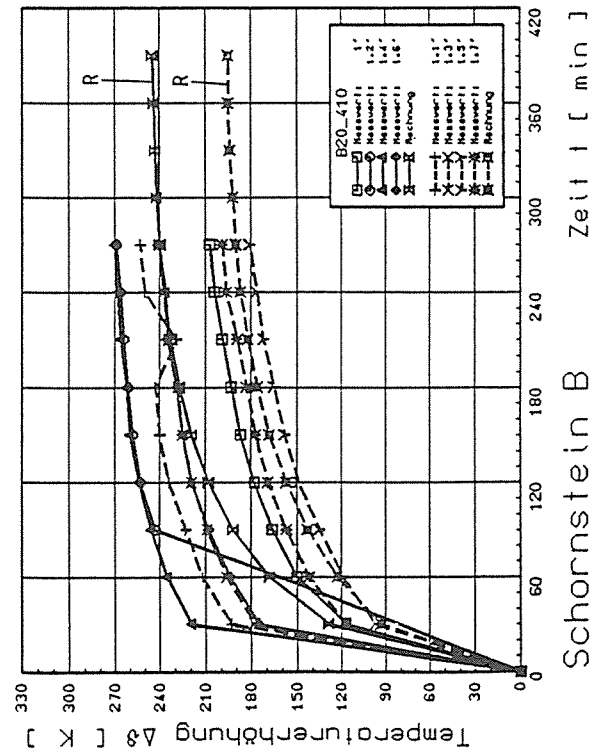
Bild E-8



Schornstein A



Schornstein C



Schornstein B

Innentemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelerwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 252$	247	229	K
Standardabweichung	$s = 4$	30	16	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 251$	240	227	K

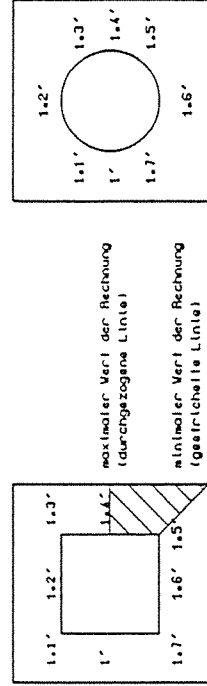
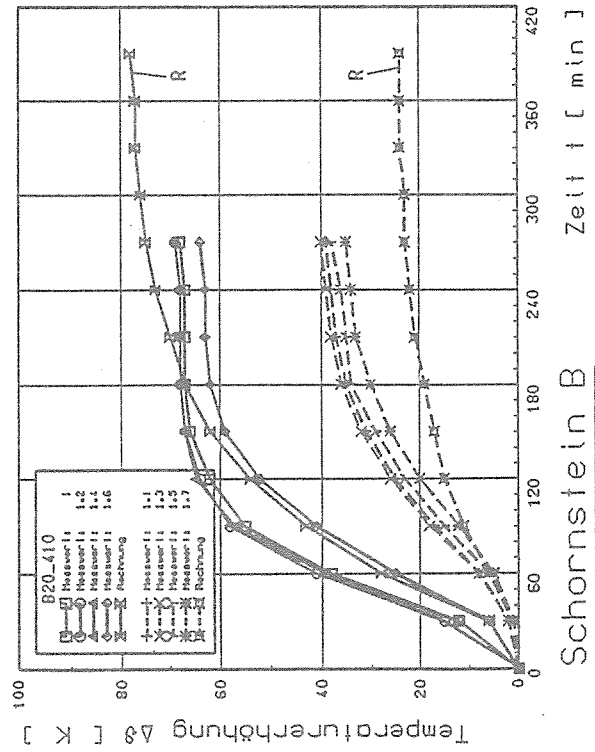
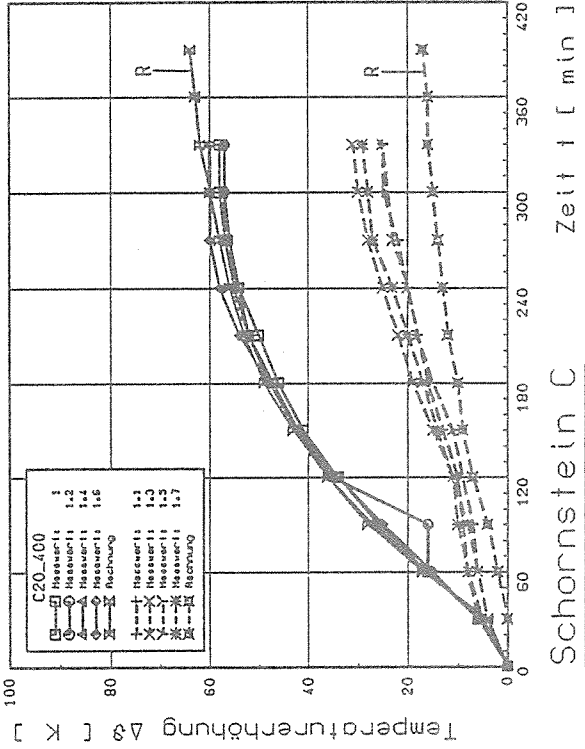
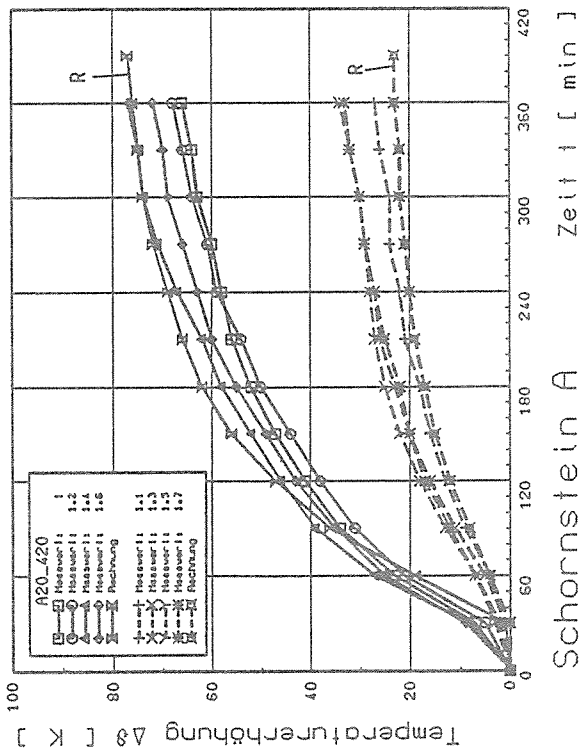


Bild E-9



Flussstemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1.1, 1.2, 1.4, 1.6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\vartheta_p = 71$	68	58	K
Standardabweichung	$s = 5$	2	1	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 76$	75	62	K

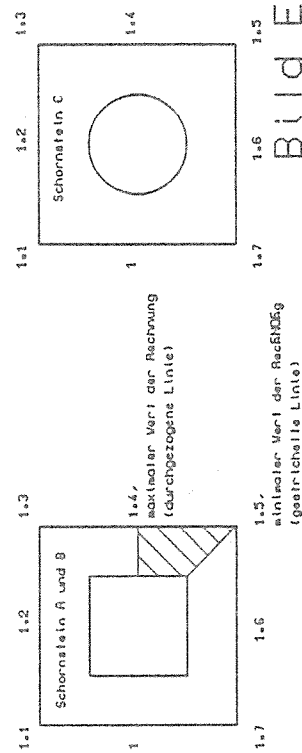
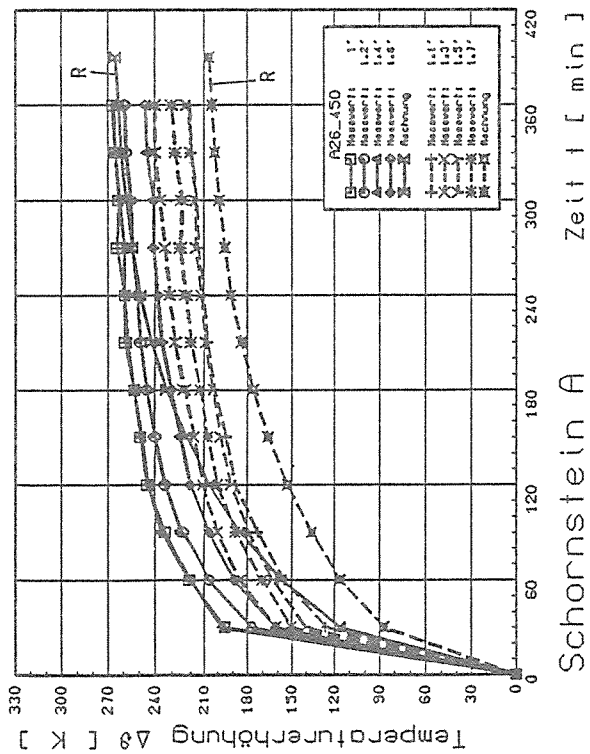
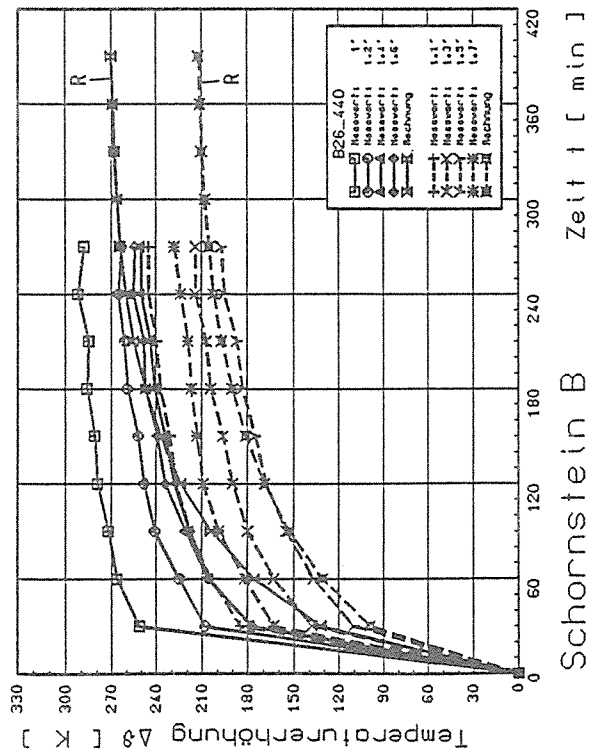


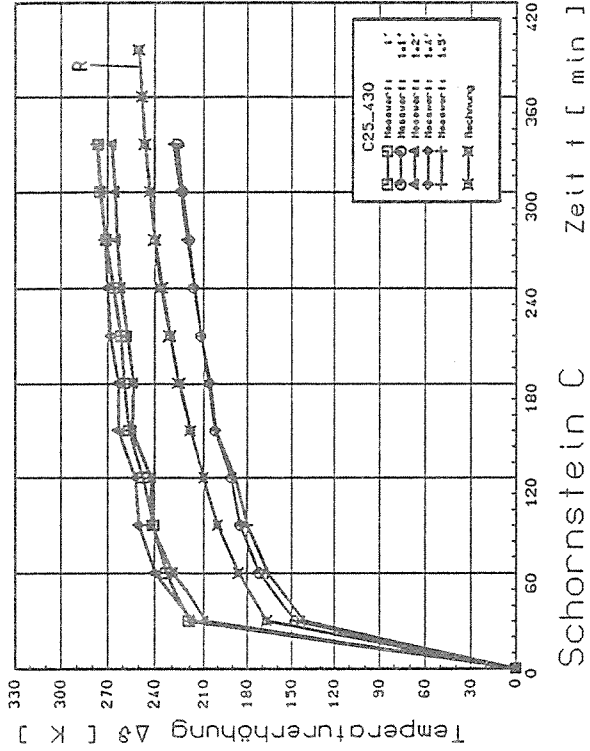
Bild E-10



Schornstein A



Schornstein B



Schornstein C

Innentemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittellwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 260$	264	255	K
Standardabweichung	$s = 10$	17	25	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 263$	264	244	K

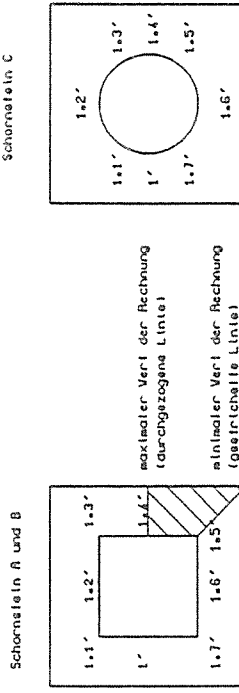
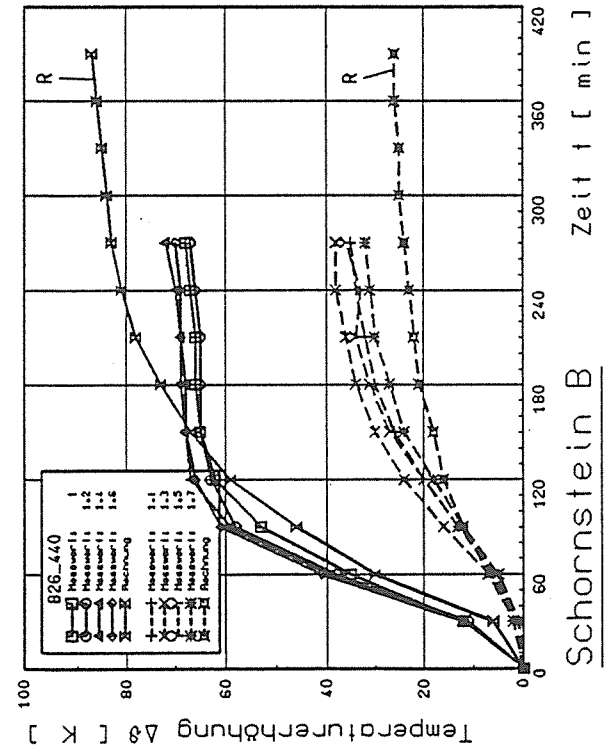
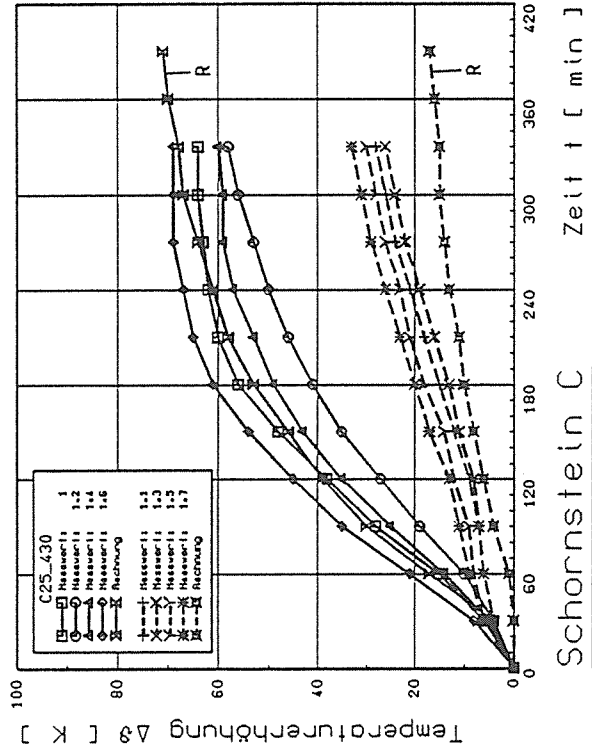
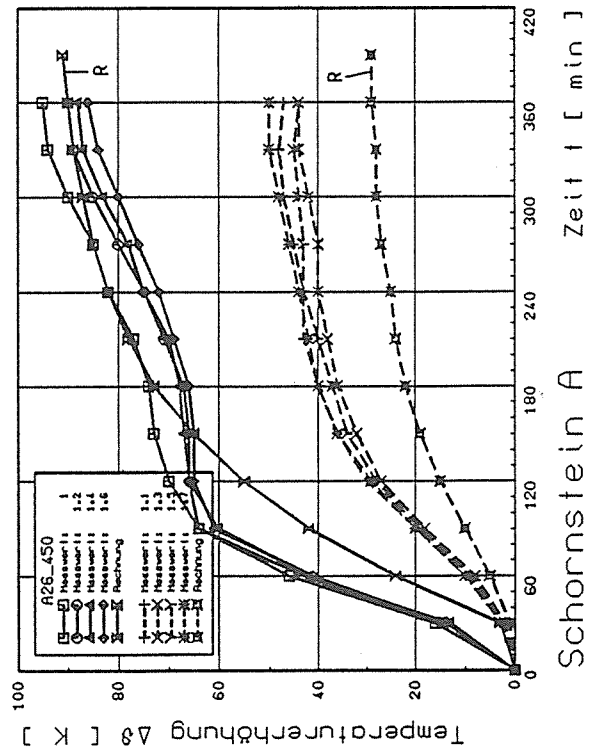


Bild E-11



**Aussetemperaturen**  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1,0,1,2,1,0,4,1,0,6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\vartheta_p = 90$	69	63	K
Standardabweichung	$s = 4$	2	5	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 90$	83	68	K

Schornstein A und B

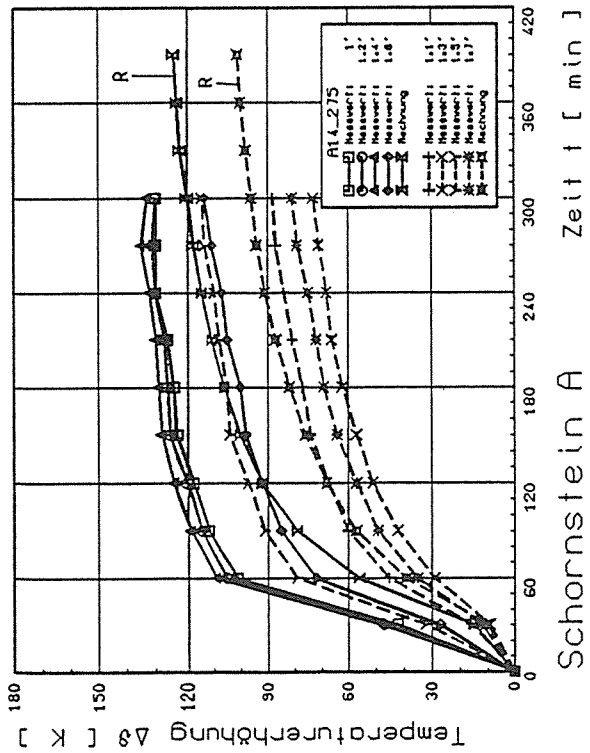
1.4, maximaler Wert der Rechnung (durchgezogene Linie)

Schornstein C

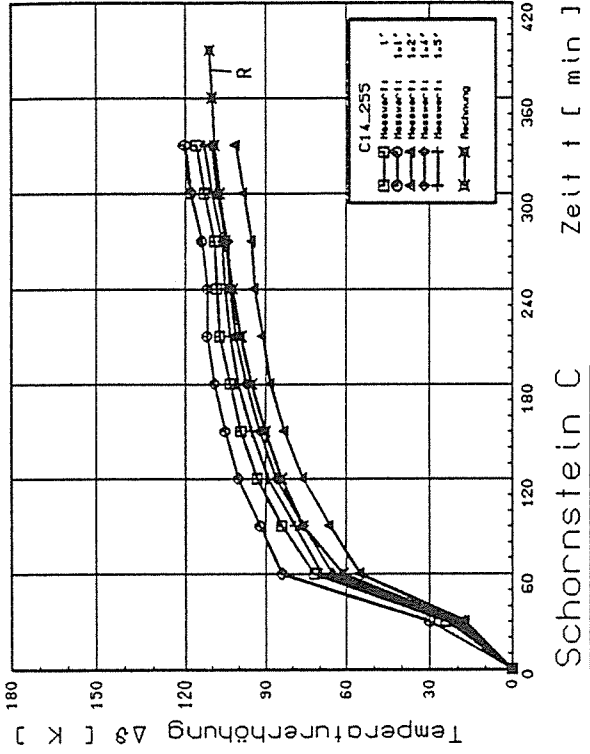
1.5, minimaler Wert der Rechnung (gezeichnete Linie)

Bild E-12

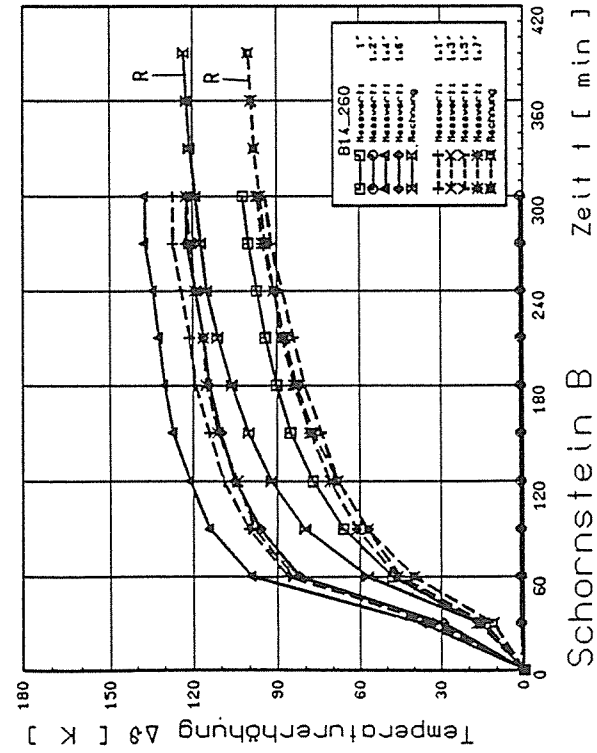




Schornstein A



Schornstein C



Schornstein B

Innentemperaturen  
Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

Schornstein	A	B	C	Dimenston
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_P = 127$	120	112	K
Standardabweichung	$s = 9$	18	7	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 120$	129	109	K

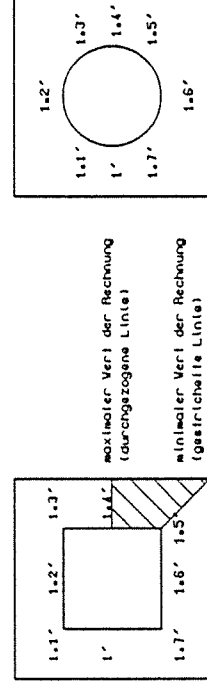
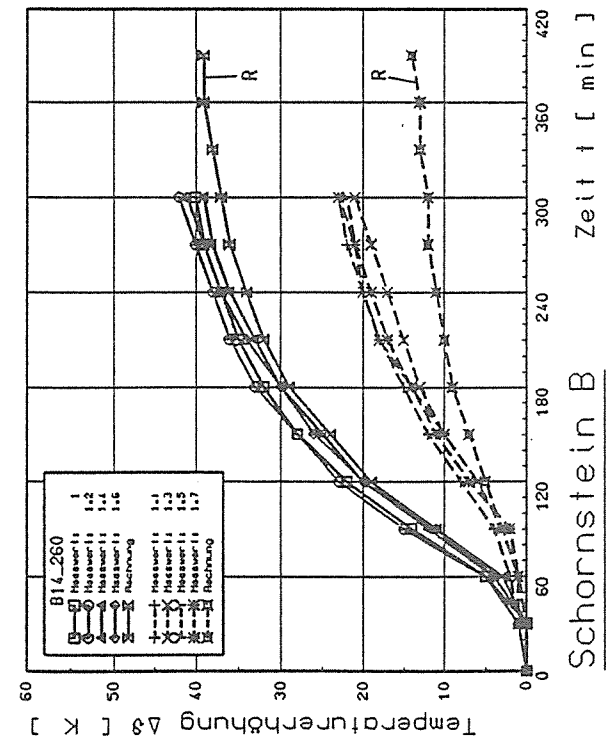
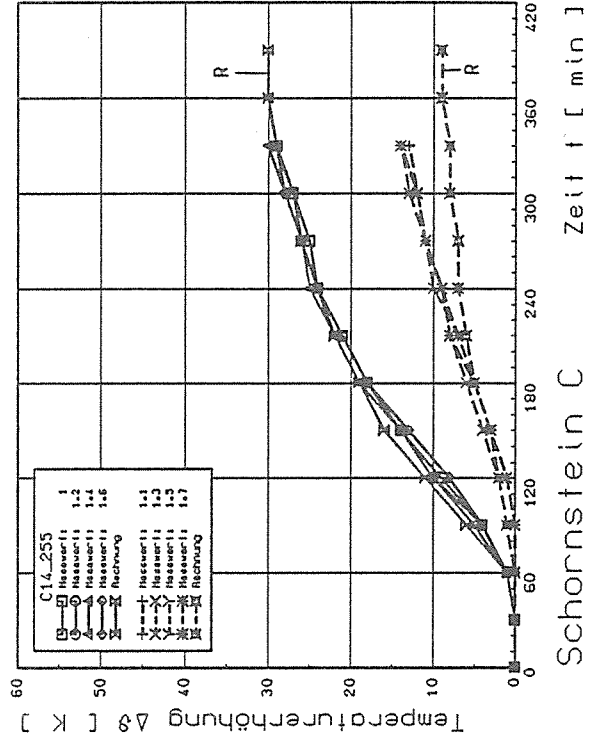
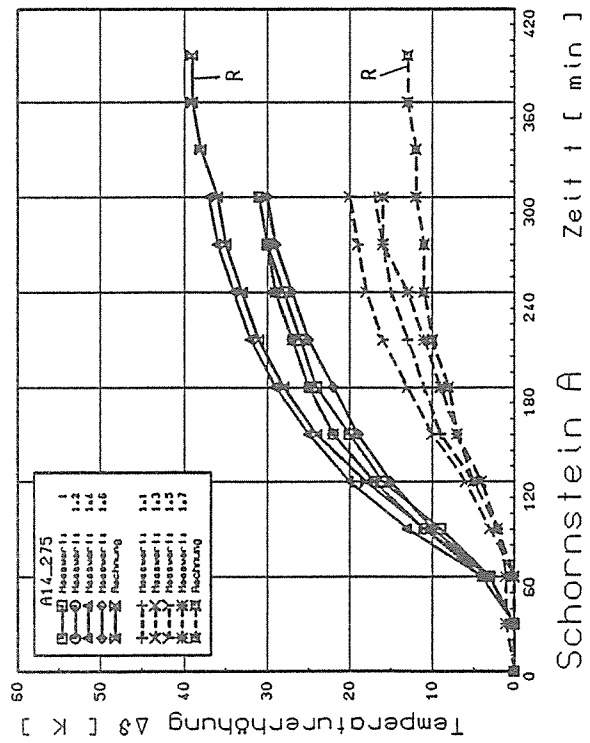


Bild E-13



**Außentemperaturen**  
Maximalwerte im stationären Zustand (1.0, 1.2, 1.4, 1.6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\theta_p = 32$	41	29	K
Standardabweichung	s = 3	1	1	K
Rechnung (R)	$\Delta\theta_R = 38$	39	31	K

Schornstein A und B

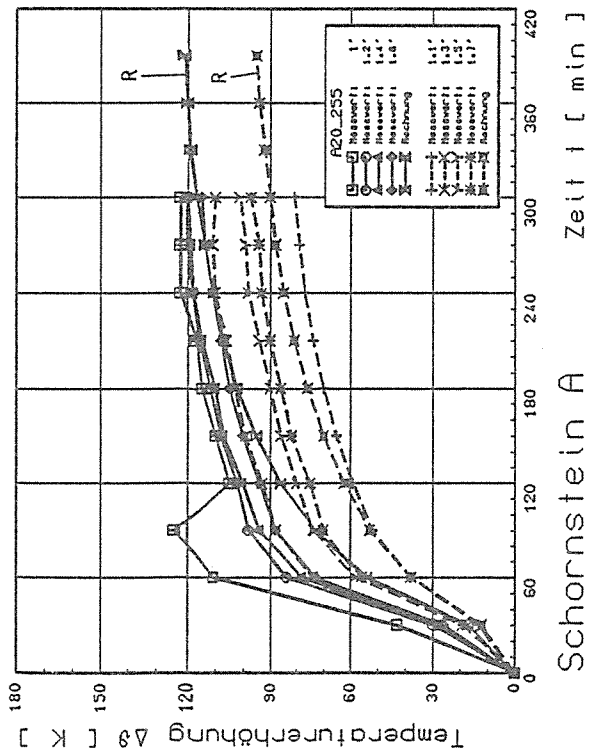
1.1 1.2 1.3 1.4, maximaler Wert der Rechnung (durchgezogene Linie)

Schornstein C

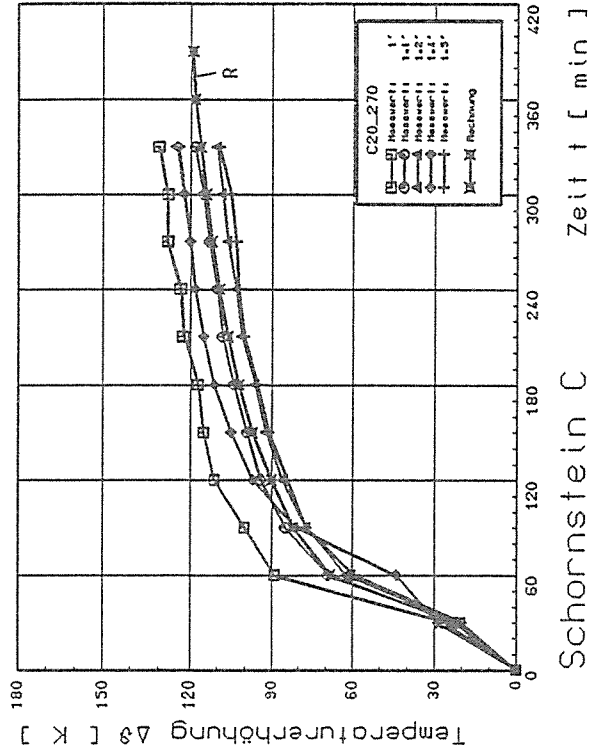
1.1 1.2 1.3 1.4

1.5, minimaler Wert der Rechnung (gegrichtete Linie)

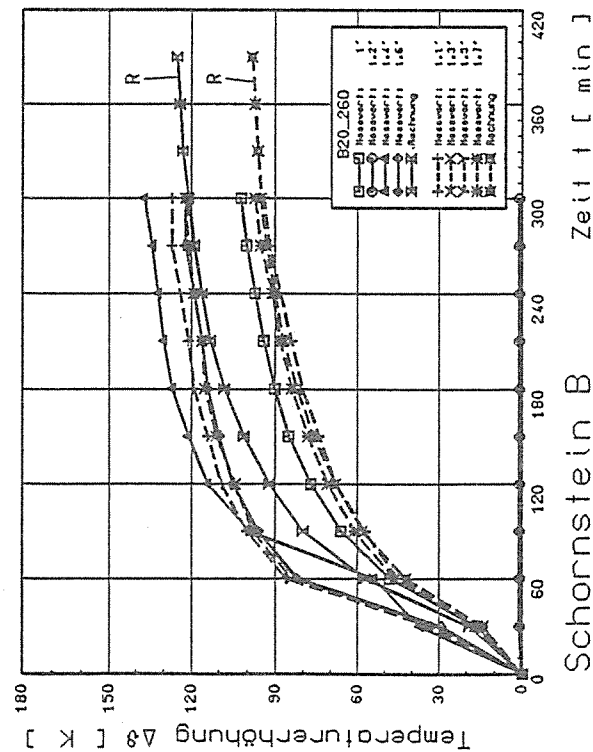
Bild E-14



Schornstein A



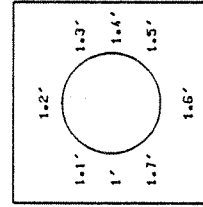
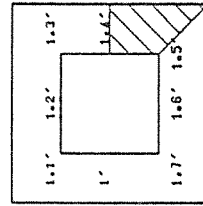
Schornstein C



Schornstein B

Innentemperaturen  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.2', 1.4', 1.6')

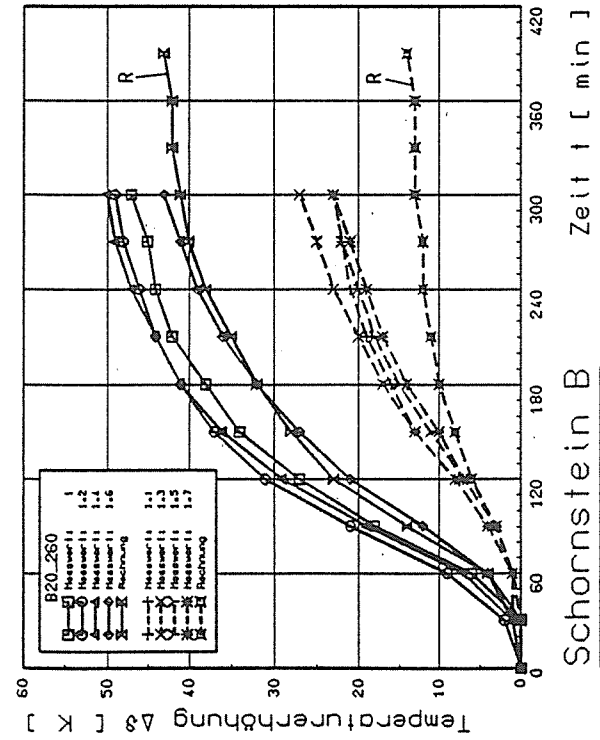
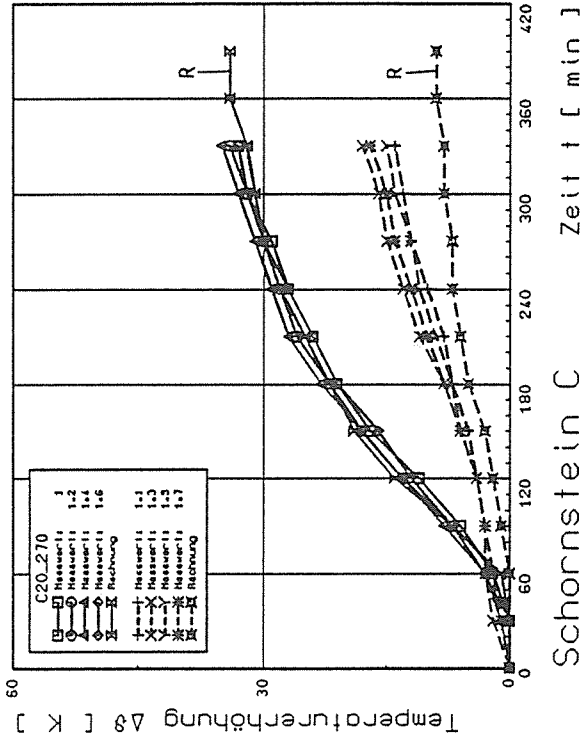
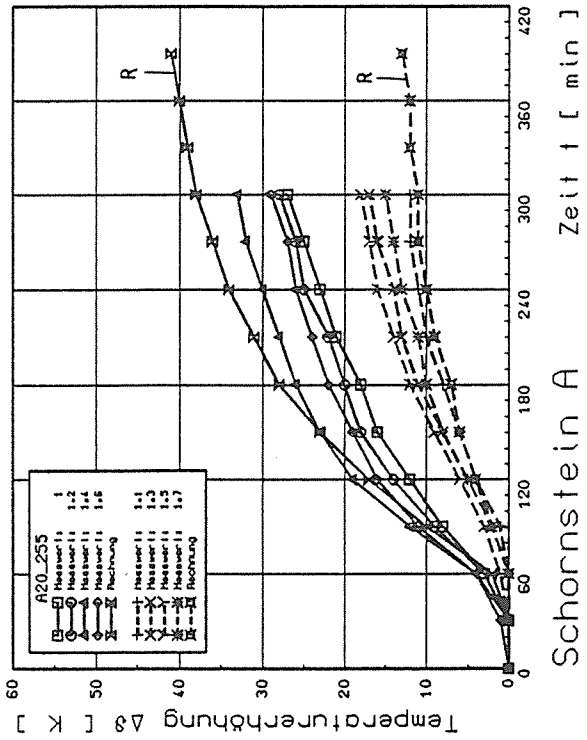
Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung:	119	120	118	K
Standardabweichung:	3	18	9	K
Rechnung (R)	117	121	116	K



maximaler Verl der Rechnung  
 (durchgezogene Linie)

minimaler Verl der Rechnung  
 (gestrichelte Linie)

Bild E-15



**Aussetemtemperaturen**  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1,0,1,2,1,4,1,6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta\vartheta_p = 29$	47	34	K
Standardabweichung	$s = 3$	3	1	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 38$	41	32	K

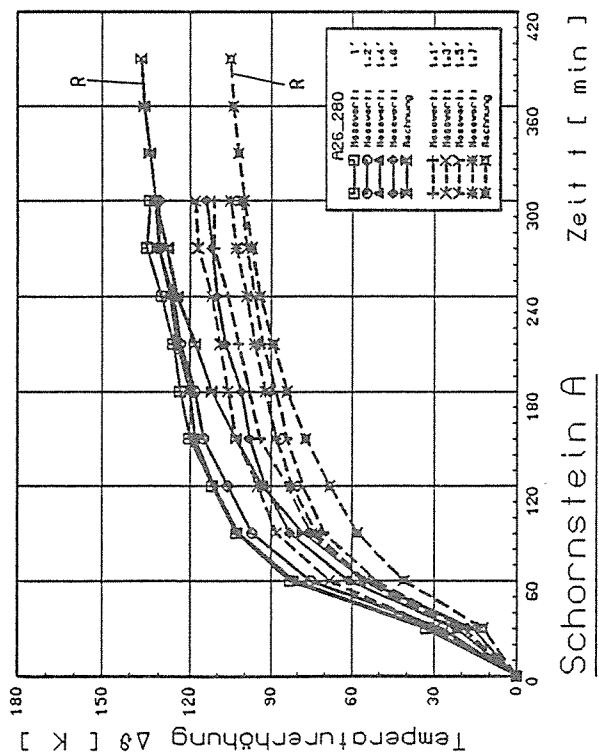
Schornstein A und B

1.4, maximaler Wert der Rechnung (durchgezogene Linie)

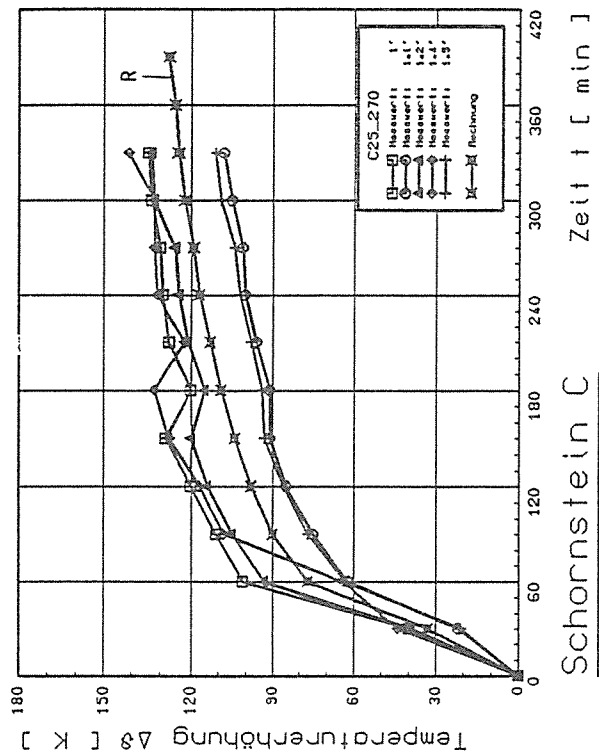
Schornstein C

1.4, minimaler Wert der Rechnung (gestrichelte Linie)

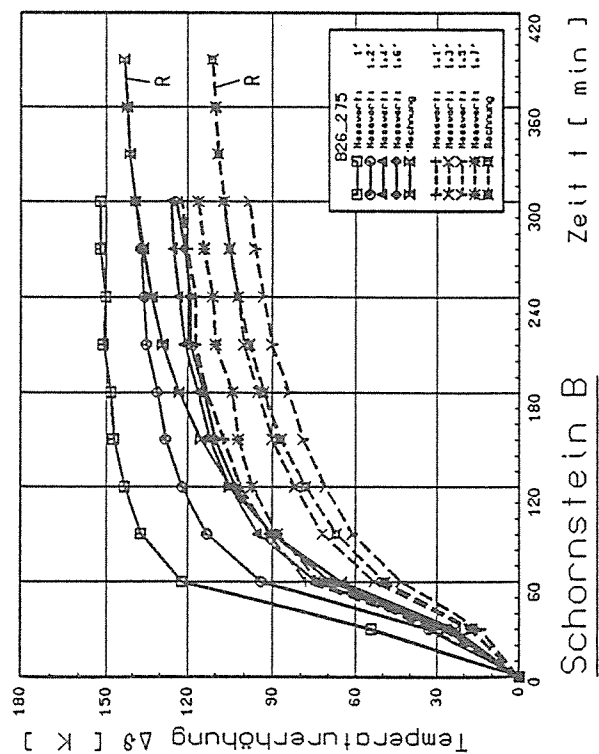
**Bild E-16**



Schornstein A



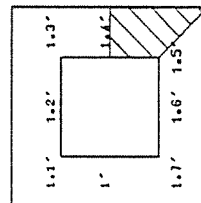
Schornstein C



Schornstein B

Innentemperaturen  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1', 1.1', 1.2', 1.4', 1.6')

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	127	135	125	K
Standardabweichung	9	13	15	K
Rechnung (R)	131	139	123	K



maximaler Verl der Rechnung  
(durchgezogene Linie)

minimaler Verl der Rechnung  
(gestrichelte Linie)

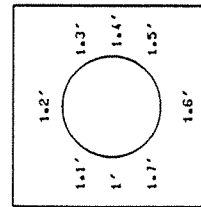
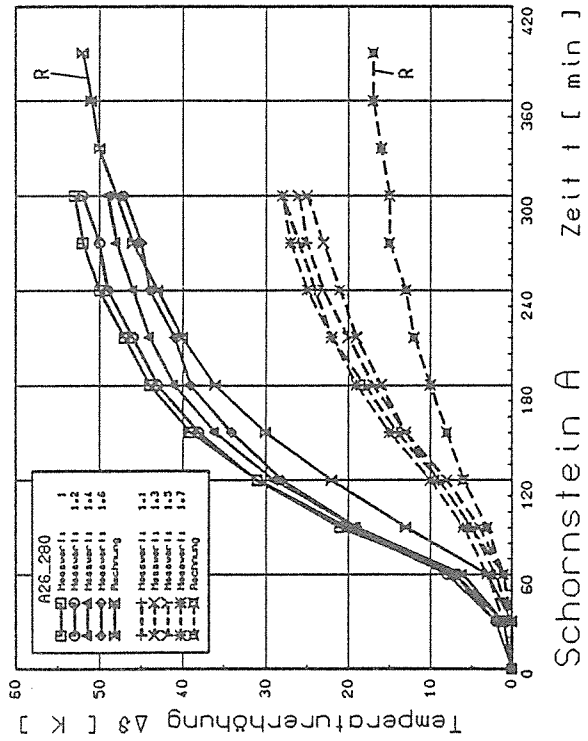
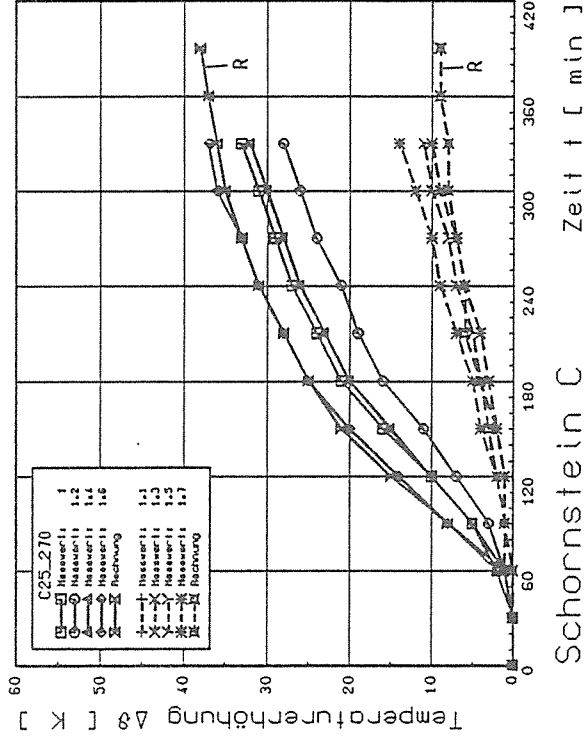


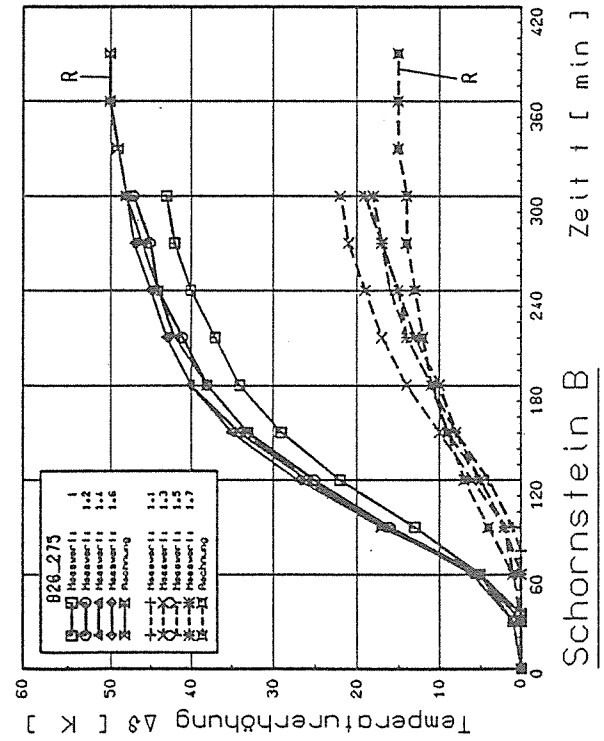
Bild E-17



Schornstein A



Schornstein C



Schornstein B

**Aussetemperaturen**  
 Maximalwerte im stationären Zustand (1,0,1,2,1,4,1,6)

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturenhöhen	$\Delta\vartheta_p = 50$	47	33	K
Standardabweichung	$s = 3$	2	4	K
Rechnung (R)	$\Delta\vartheta_R = 48$	48	36	K

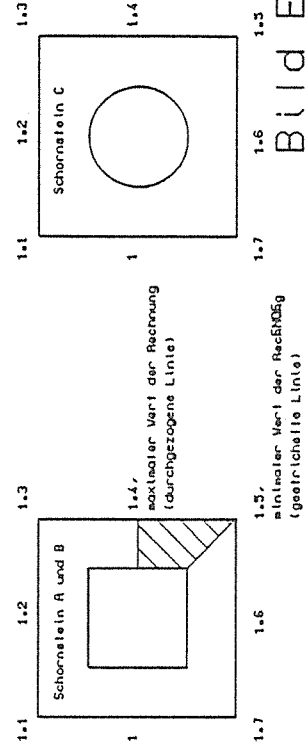


Bild E-18

## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/1968  
**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/1970 (vergriffen)  
G. Andreae  
**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**
- Nr. 3/1970  
J. Ziebs  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**
- Nr. 4/1970 (vergriffen)  
A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren**
- Nr. 5/1971  
N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**
- Nr. 6/1971  
P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**
- Nr. 7/1971  
H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution – Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**
- Nr. 8/1971  
H. Veith  
**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**
- Nr. 9/1971  
K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**
- Nr. 10/1972  
D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**
- Nr. 11/1972  
H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütewerte beim Brennschneiden**
- Nr. 12/1972  
H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**
- Nr. 13/1972  
K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen  $760$  und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**
- Nr. 14/1972  
E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**
- Nr. 15/1972  
H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**
- Nr. 16/1972  
E. Knublauch  
**Über Ausführung und Assagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**
- Nr. 17/1972  
P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**
- Nr. 18/1973  
W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**
- Nr. 19/1973  
K. Kaffanke, H. Czichos
- Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**
- Nr. 20/1973  
R. Rudolphi  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**
- Nr. 21/1973  
D. Klaffke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**
- Nr. 22/1973  
R. Rudolphi, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**
- Nr. 23/1973  
W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**
- Nr. 24/1973  
J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**
- Nr. 25/1973  
E. Knublauch  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**
- Nr. 26/1974  
P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM – Eigenschaften und erste Anwendungen**
- Nr. 27/1974  
H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 28/1974  
H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**
- Nr. 29/1974  
P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schallenfall**
- Nr. 30/1974 (vergriffen)  
H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**
- Nr. 31/1975  
G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**
- Nr. 32/1975  
R. Rudolphi, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**
- Nr. 33/1975  
A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**
- Nr. 34/1976 (vergriffen)  
H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff Nr. 35/1976**  
E. Limberger  
**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**
- Nr. 36/1976 (vergriffen)  
J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**
- Nr. 37/1976  
W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**
- Nr. 38/1976  
K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**
- Nr. 39/1976  
K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**
- Nr. 40/1976  
H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**
- Nr. 41/1976  
B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**
- Nr. 42/1976  
S. Dietlen  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**
- Nr. 43/1976  
W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**
- Nr. 44/1976  
W. Matthees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**
- Nr. 45/1976  
W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**
- Nr. 46/1977 (vergriffen)  
G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**
- Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**
- Nr. 48/1977  
U. Holzlöhner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**
- Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**
- Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**
- Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**
- Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**
- Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**
- Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**
- Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilenn**
- Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**

- Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing  
Nr. 58/1979  
W. Struck  
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmeterik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
- Nr. 64/1980  
W. Rücker  
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
- Nr. 67/1980  
W. Matthees  
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.  
Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Goniometers
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschülern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
- Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Maulzsch  
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
- Nr. 78/1981  
W. Rücker  
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches  
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen  
- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
H. Czichos  
Technische Materialforschung und -prüfung  
- Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ -  
Materials Research and Testing  
- Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research” -
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimelwitz  
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
Untersuchungen der Störerschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren  
- Stretch- und Erholungsvermögen -
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiera  
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
Korrosion von Stahlradiatoren
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
Wasserstoff als Energieträger
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Andex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen



- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementaruntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**Materials Technologies and Techno-Economic Development**  
**A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung. Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I**
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K.E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennomch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I**  
**Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I**
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II**  
**Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II**
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit**  
**Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**  
**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II**  
**Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II**
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreae, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogunke, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**  
**Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung**  
**Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbständlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987  
W. Schön, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugruddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D Zeichenprogramm für Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitreutz, R. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht -**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**

- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungs-materialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission.**  
Teil B: Textilien
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitzkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rücker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvulation der seismischen Basiseregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, H. Krause, H. Wiggenhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatz-temperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179 / ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180 / ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies: Research and Development Trends and Needs**