

Zur numerischen Übertragbarkeit
von Prüfungsergebnissen an
Hausschornsteinen auf Schornsteine
mit anderen lichten Querschnitten
(Schornstein-Vh III)

T 2276

T 2276

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

12.14

BAM

Bundesanstalt
für Materialforschung
und -prüfung, Berlin



Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist als Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft das technisch-wissenschaftliche Staatsinstitut der Bundesrepublik Deutschland für Werkstoffwissenschaften, Materialprüfung und Chemische Sicherheitstechnik. Dieser Komplex stellt in allen Industrieländern einen technologischen Schlüsselbereich dar, da Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe die Grundlage der gesamten Technik bilden. Die Materialforschung, die zuverlässige, normgerechte und neutrale Prüfung sowie die sicherheitstechnische Beurteilung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen sind wesentliche Voraussetzungen für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Wirtschaft im Hinblick auf die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte, Umweltschutzerfordernisse und die Notwendigkeit der sparsamen Verwendung von Rohstoffen und Energie.

Die Ursprünge der BAM reichen bis in das Jahr 1870 zurück, in dem durch Erlaß des damaligen Preußischen Ministeriums für Handel, Gewerbe und öffentliche Arbeiten die Gründung einer Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt bei der Gewerbeakademie beschlossen wurde. 1895 erfolgte die Angliederung der im Jahre 1875 eingerichteten Prüfungsstation für Baumaterialien als neue Abteilung der Versuchsanstalt. Im Jahre 1904 kam es darüber hinaus zur Zusammenlegung mit der 1877 errichteten Chemisch-Technischen Versuchsanstalt zum Königlichen Materialprüfungsamt. Dessen erster Direktor, Adolf Martens (1850 — 1914), trat u. a. als Entdecker des nach ihm benannten Martensitgefüges von Stahl und als Mitbegründer sowie Vorsitzender (1896 — 1913) des „Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik“ hervor. Das Königliche Materialprüfungsamt, das im Jahre 1907 eine selbständige Behörde geworden war, wurde nach dem Ersten Weltkrieg dem Preußischen Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung unterstellt. Es bestand als Staatliches Materialprüfungsamt (MPA) — bei ständiger Erweiterung seiner Aufgabenbereiche und Angliederung anderer Institutionen, wie z. B. der Reichs-Röntgenstelle — bis 1945.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde dem MPA die im Jahre 1889 errichtete Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) angeschlossen. Diese vereinigten Institutionen erhielten im Jahre 1954 den Status einer Bundesanstalt im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft, die seit 1956 den Namen „Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)“ trägt und ab 1. 1. 1987 „Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)“ heißt.

Die Aufgaben der BAM wurden durch einen Erlaß des Bundesministers für Wirtschaft vom 1. September 1964 letztmalig festgelegt. Danach hat die Bundesanstalt die Aufgabe, Werkstoff- und Materialforschung entsprechend ihrer Zweckbestimmung zu betreiben und die Materialprüfung sowie die Chemische Sicherheitstechnik stetig weiter zu entwickeln. Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen. Für das Land Berlin hat die Bundesanstalt die Aufgaben eines staatlichen Materialprüfungsamtes. Auf Antrag steht die BAM Industriefirmen, Wirtschaftsverbänden, Verbrauchereinrichtungen sowie privaten Antragstellern zur Verfügung. Außerdem berät sie Bundesministerien und unterstützt Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Mit Institutionen ähnlicher Zielsetzung des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstituten, arbeitet die BAM eng zusammen. Daneben ist sie in die technische Zusammenarbeit mit verschiedenen Entwicklungsländern eingebunden. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlrei-

chen Fachgremien, gesetzgebenden Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik Deutschland in internationalen und supranationalen Einrichtungen.

Aufgrund des Gesetzes über explosionsgefährliche Stoffe, des Gesetzes über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, des Waffengesetzes sowie einer Reihe weiterer gesetzlicher Regelungen und Verordnungen hat die Bundesanstalt den Status einer Bundesoberbehörde. Damit erhalten die in diesem Zusammenhang erteilten Zulassungen, Richtlinien und Auflagen bundesweit gesetzlichen Charakter. Im Rahmen der genannten Gesetze obliegen der BAM u. a. die Prüfung von Stoffen und Konstruktionen für die Zulassung explosionsgefährlicher Stoffe und Sprengzubehör, die Zulassung der Bauart von Verpackungen und die Genehmigung der Beförderung von gefährlichen Gütern ohne Schutzbehälter. Ferner läßt die Bundesanstalt Raketenmunition und Geschosse mit pyrotechnischer Wirkung im zivilen Bereich zu und prüft die Vielzahl weiterer Produkte und Gegenstände im öffentlichen Interesse.

Mit nahezu 1.200 Mitarbeitern, darunter etwa 300 Wissenschaftlern unterschiedlicher naturwissenschaftlicher und technischer Fachrichtungen, befaßt sich die BAM in mehr als 100 Laboratorien damit, die chemischen, physikalischen und technologischen Eigenschaften von Werkstoffen zu bestimmen und Zusammenhänge zwischen Stoffkennwerten und Materialverhalten beim praktischen Einsatz aufzuklären. Dadurch werden Rohstoffe und Werte erhalten, Schäden vermindert und Unfälle verhütet. Das Arbeitsgebiet schließt alle technischen Materialien ein: Metalle, anorganische nichtmetallische Stoffe, insbesondere Baustoffe und keramische Werkstoffe, organische Stoffe wie Kautschuk, Kunststoffe, Textilien, Leder, Papier, Holz, aber auch Verbundwerkstoffe, technische Fluide und Gase sowie feste, flüssige und gasförmige explosionsfähige Stoffe. Für die Untersuchung von Materialien unter den verschiedensten Beanspruchungen, z. B. mechanischer, thermischer, tribologischer, chemischer, korrosiver oder biologischer Art, werden unterschiedlichste Meß-, Prüf- und Analysetechniken einschließlich zerstörungsfreier Prüfverfahren und Computertechniken eingesetzt. Durch Forschung und Entwicklung, Prüfung und Untersuchung sowie Beratung und Information dient die BAM dem Ziel, die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft zu fördern, die technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse zu erweitern sowie die Lebensbedingungen zu sichern und zu verbessern.

Die Arbeitsergebnisse der BAM werden — soweit sie nicht vertraulicher Natur sind — in eigenen Publikationsreihen veröffentlicht:

- den „BAM-ZULASSUNGEN, die jährlich mit 4 Ausgaben erscheinen und in denen die amtlichen Zulassungen der BAM veröffentlicht werden;
- dem Jahresbericht, der die Arbeitsschwerpunkte und die wichtigsten Erträge des jeweils vorausgegangenen Jahres ausführlich dokumentiert;
- den Forschungsberichten, die in unregelmäßiger Folge die Resultate wichtiger BAM-Forschungsvorhaben präsentieren.

Für weitere Information steht gerne BAM — 7.1 „Information und Öffentlichkeitsarbeit“, Tel.: 030 / 8104 7100, zur Verfügung.

Laboratorium 2.41 - Brandschutz, Feuerschutz

Forschungsvorhaben Vh 2435

F o r s c h u n g s b e r i c h t

"Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Haus-
schornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten
(Schornstein-Vh III)"

von

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

Die vorliegende Arbeit wurde durch das Institut für Bautechnik in
Berlin gefördert.

Gesch.Z. IfBt IV 1-5-468/86

Berlin, im November 1990

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 [12], 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 [2].
- Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Lenze, Engler-Bunte-Institut der Universität (TH) Karlsruhe, Lehrstuhl und Bereich Feuerungstechnik für die Ermittlung der Abgasanalyse (Messung der CO₂- und O₂-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 zum Forschungsvorhaben:

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

(BAM-Forschungsvorhaben 2435)

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 of the research project:

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

(BAM research project 2435)

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 du projet de recherche:

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

(Projet de recherche 02435 du BAM)

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 01
2	Ziel der Untersuchungen 02
3	Grundlagen für die Berechnung der Oberflächen- temperaturen von Hausschornsteinen 03
3.1	Wärmeübertragung 03
3.2	Wärmeübergang an der inneren und äußeren Schorn- steinoberfläche 06
3.2.1	Wärmeübergang an der inneren Oberfläche durch Strahlung 06
3.2.2	Wärmeübergang an der inneren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion 07
3.2.3	Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Strahlung 09
3.2.4	Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion 09
4	Berechnung der Temperaturverteilungen im Querschnitt von Hausschornsteinen 10
5	Absicherung des numerischen Verfahrens mit Versuchs- ergebnissen 14
5.1	Schornsteine 14
5.2	Diskussion der Temperaturmessung im Schornsteinquer- schnitt 19
5.3	Ermittlung der mittleren Abgasgeschwindigkeit und der thermodynamischen Kennwerte der Schornsteinbaustoffe .. 20
5.4	Vergleich und Diskussion der berechneten und gemes- senen Oberflächentemperaturen 23
5.5	Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes $1/\Lambda$ von Hausschornsteinen 42
6	Vergleich von Berechnungen und Messungen der Ober- flächentemperaturen verschiedener Hausschornsteine 44
6.1	Vergleich von Berechnungen und Messungen der Ober- flächentemperaturen einschaliger Schornsteine 44
6.2	Vergleich von Berechnungen und Messungen der Ober- flächentemperaturen dreischaliger Schornsteine 52
7	Zusammenfassung 55

	Seite
8	Empfehlungen für die funktionstechnische Bemessung von Hausschornsteinen 56
9	Ausblick 57
10	Literaturverzeichnis 58
11	Anlagen 62
11.1	Anlage A: Listing des Rechenprogramms "TASEF-2D"
11.2	Anlage B: Darstellung des gemessenen, volumenbezogenen, prozen- tualen O ₂ - und CO ₂ -Gehaltes im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit [5] während der Heizbeanspruchung ent- sprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1]
11.3	Anlage C: Darstellung des gemessenen Abgasmassenstromes in Ab- hängigkeit von der Zeit [5], während der Heizbean- spruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1]
11.4	Anlage D: Darstellung der berechneten mittleren Abgasgeschwin- digkeit in Abhängigkeit von der Zeit in den Meßquer- schnitten 1 und 3 [5] während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1]
11.5	Anlage E: Darstellung der Temperatur-Zeitfunktionen im Meßquer- schnitt 1 während der Heizbeanspruchung entsprechend den Betriebsphasen 1 und 2 sowie der Trocknungsphase nach DIN 18 160 Teil 6 [1]

Nomenklatur

<u>Zeichen</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Einheit</u>
Q	Wärmestrom	W
A	Fläche	m ²
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
d	Dicke	m
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz	K
ϑ	Temperatur	°C
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
C _s	Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	W/(m ² K ⁴)
T	Kelvin-Temperatur	°K
ε	Emissionsgrad	-
α_v	Absorptionsgrad	-
s _{gl}	gleichwertige Schichtdicke	m
P _g	Partialdruck des Gases	bar
P	Gesamtdruck	bar
Nu	Nußelt-Zahl	-
Gr	Grashof-Zahl	-
Re	Reynolds-Zahl	-
Pr	Prandtl-Zahl	-
L	Länge	m
D, D _h	Durchmesser (D) bzw. hydraulisch gleichwertiger Durchmesser (D _h)	m
U	Umfang	m
w _m	mittlere Abgasgeschwindigkeit	m/s
γ	kinematische Viskosität	m ² /s
η	dynamische Viskosität	Ns/m ²
ψ_{rauh}	Reibungszahl für hydraulisch rauhe Strömung	-
ψ_{glatt}	Reibungszahl für hydraulisch glatte Strömung	-
H	wirksame Schornsteinhöhe	
ρ	Rohdichte	kg/m ³

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

Forschungsvorhaben Vh 2435

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" [19] 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 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).

Forschungsvorhaben Vh 2435

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 einschaligen 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 cm² 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 Forschungsvorhabens dieses Instituts [6]. Während dieser Schornsteinprü-

Forschungsvorhaben Vh 2435

fungen wurden bei der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebsphase 2 im Auftrage der BAM kontinuierliche Abgasanalysen (Messung der CO₂- und O₂-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 Wär-

Forschungsvorhaben Vh 2435

mestrom. 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).

Forschungsvorhaben Vh 2435

Der von einem fluiden Medium mit der Temperatur ϑ_g an eine Fläche A mit der Temperatur ϑ_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 ϕ_a zum einfallenden Strahlungsfluß ϕ wird als Absorptionsgrad α_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 α_v , sondern auch den größtmöglichen Emissionsgrad ϵ ($\alpha_v = \epsilon = 1$) hat.

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

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

$c_s = 10^8 \vartheta$ (ϑ = Stefan-Boltzmannsche-Konstante)

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

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

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 (CO_2) und Wasserdampf (H_2O). 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

$$\dot{Q}_S = A \epsilon_s \frac{1 + \epsilon_w}{2} \left[\epsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \alpha_v \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (3-6)$$

ist.

In dieser Gleichung gilt der Ausdruck $\frac{1 + \epsilon_w}{2}$ näherungsweise für einen Bereich von $\epsilon_w \geq 0,8$. Die Bestimmung der Größen ϵ_g und ϵ_w geschieht auf der Grundlage der empirisch ermittelten Zusammenhänge zwischen Emissionsgrad, Temperatur und einen 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 $\alpha_v = \epsilon_w$ gesetzt werden.

Da sich bei im wesentlichen aus CO_2 und H_2O bestehenden Gasgemischen die Gasstrahlungen gegenseitig beeinflussen, ist nach [7] die gesamte Ausstrahlung kleiner als die Summe der Ausstrahlungen des einzelnen Gases. Somit gilt

$$\epsilon_g = \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \epsilon_{\text{CO}_2} - \Delta\epsilon \quad (3-7)$$

Mit dem Korrekturglied $\Delta\epsilon$ 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 α_{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 α , den Durchmesser D bei rundem bzw. D_h ($D_h = 4 A/U$) bei rechteckigem Querschnitt und die Wärmeleitfähigkeit λ 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

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

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 $3000 < Re < 10\,000\,000$ ist. Die Prandtl-Zahl Pr läßt sich wie folgt berechnen:

$$Pr = \frac{\gamma c_s}{\lambda_g} \quad (3-11)$$

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 $\alpha_V = 1$. Der Emissionsgrad der Atmosphäre ist aufgrund des geringen CO₂-Gehaltes lediglich vom Partialdruck des Wasserdampfes abhängig. Nehring [12] zeigt, daß infolge geringer Schwankungen des Wasserdampfdruckes in der Atmosphäre für den deutschen Bereich mit einem konstanten ϵ_g gerechnet werden kann. Somit folgt aus Gleichung (3-6)

$$\dot{Q}_S = A c_s \frac{1 + \epsilon_w}{2} \left[\epsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (3-14)$$

3.2.4 Wärmeübergang an der äußeren Oberfläche durch Leitung mit Konvektion

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

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

Die Berechnung der Nu-Zahl ergibt sich aus der Beziehung

$$Nu = c (Gr + Pr)^m \quad (3-16)$$

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:

$$Nu = 0,54 (Gr + Pr)^{0,25} \quad (3-16a)$$

Forschungsvorhaben Vh 2435

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 α_K hinzuaddiert.

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

$$Gr = \frac{d^3 \rho \Delta T}{\gamma^2 T} \quad (3-17)$$

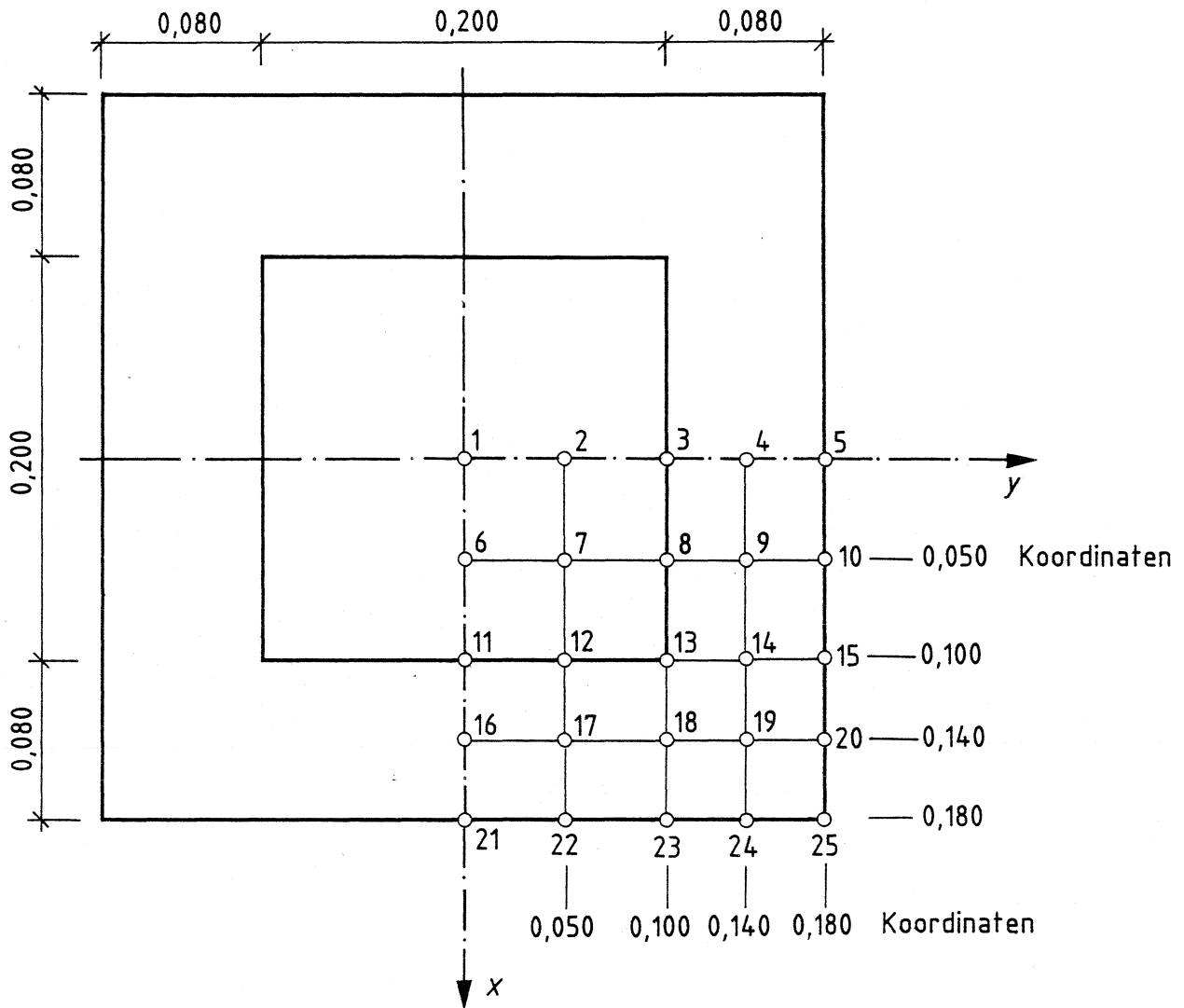
4 Berechnung der Temperaturverteilungen im Querschnitt von Hausschornsteinen

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 zweidimensionale rechnerische 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 ϕ) auf Bild 4-2 dargestellt.

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

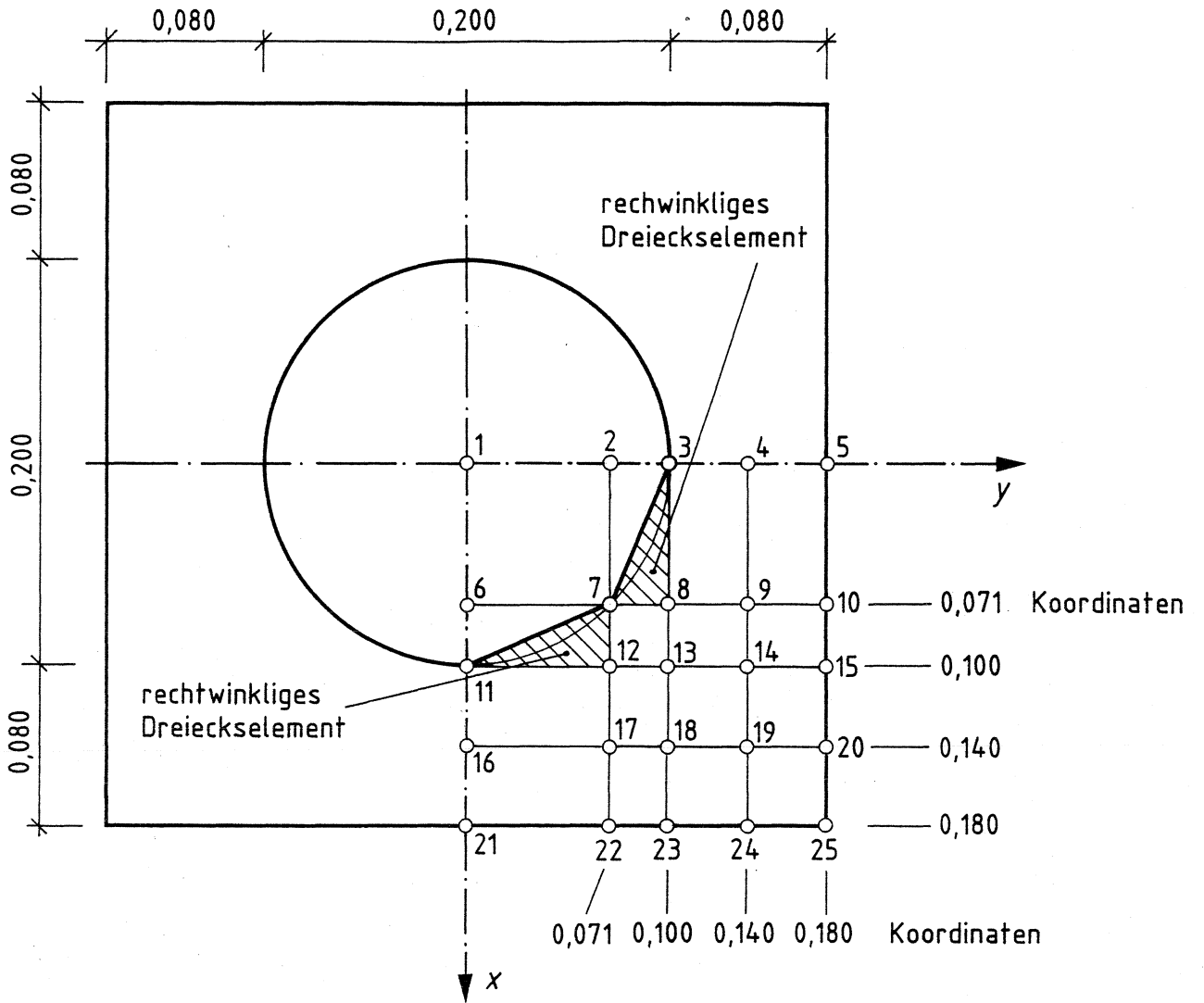
Forschungsvorhaben Vh 2435



Maße in m

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

Forschungsvorhaben Vh 2435



Maße in m

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

Forschungsvorhaben Vh 2435

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die ursprüngliche Programmversion von den Berichtern derart modifiziert, daß der äußere Wärmeübergangskoeffizient α_a sowie der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i , unter Berücksichtigung der Abgasgeschwindigkeit und der thermodynamischen Kennwerte des Abgases, und der innere Emissionsgrad ϵ_i ($\epsilon_i = \epsilon_g (1 + \epsilon_w)/2$ [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 CO₂- und H₂O-Gehalt im Abgas,
- o Beschreibung der Schornstein-Geometrie,
- o Zellen in den Wangen ein- und mehrschaliger Schornsteine,
- o Kennwerte der Schornsteinbaustoffe (Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, Enthalpie)

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

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

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

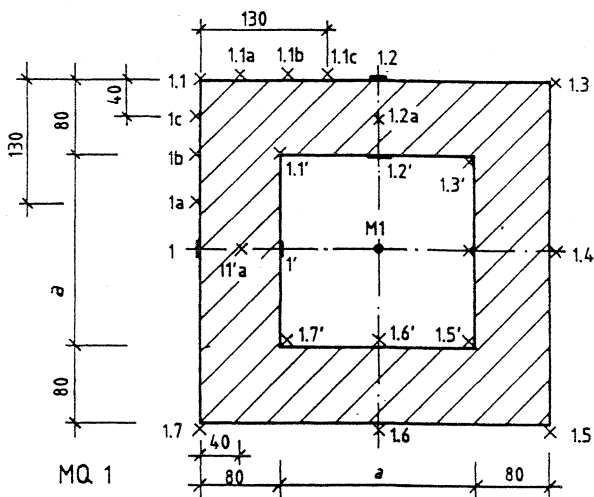
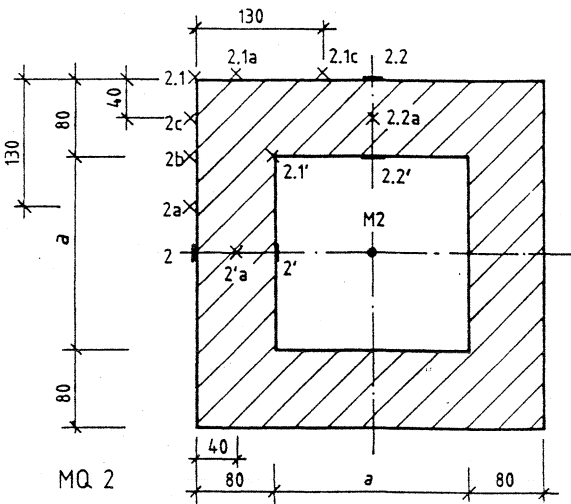
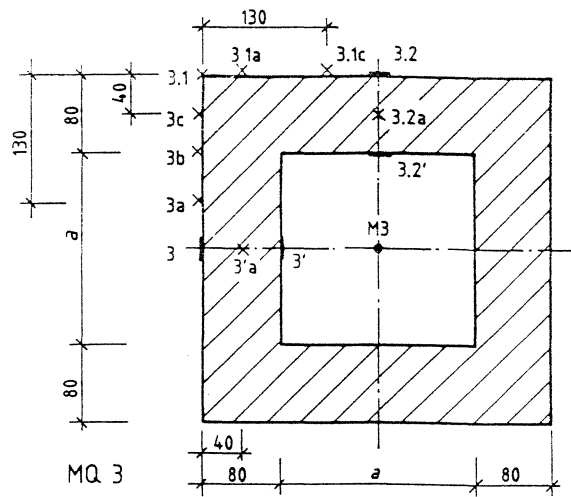
Forschungsvorhaben Vh 2435

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.

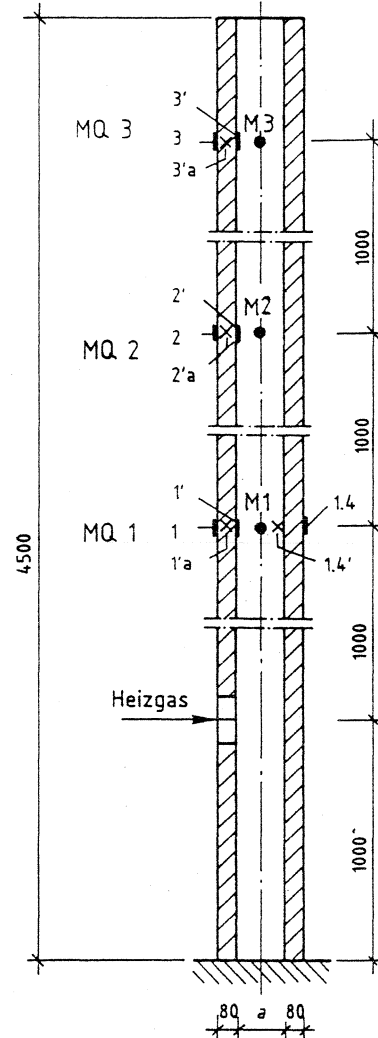
Je 3 Schornsteine wurden in der BAM zu den Prüfserien "A", "B" und "C" zusammengefaßt und je nach Kantenlänge bzw. Durchmesser des lichten Querschnitts mit "A14" bis "C25" bezeichnet.



- 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)

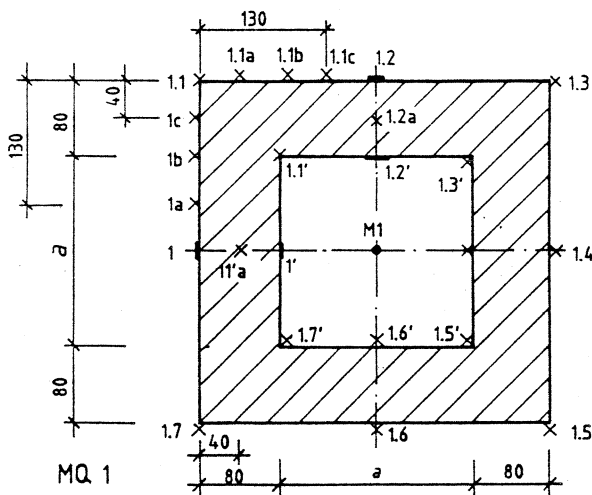
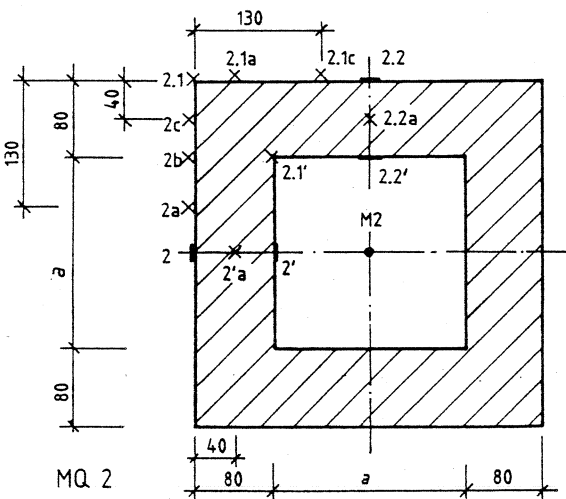
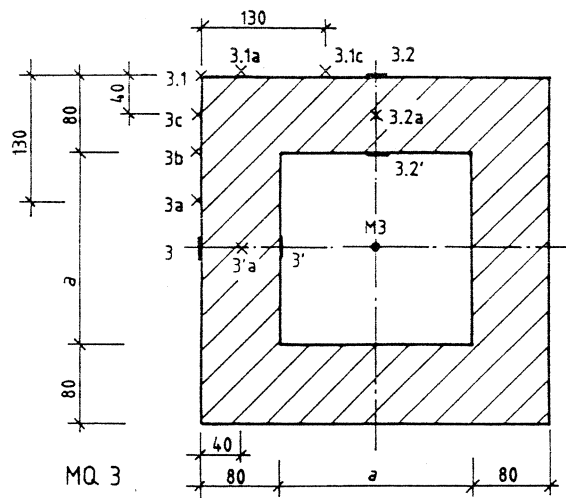


Schornsteinserie "A" (a = 140 mm, a = 200 mm, a = 260 mm)

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/dm³ (a = 140 mm), 1,40 kg/dm³ (a = 200 mm) bzw. 1,50 kg/dm³ (a = 260 mm).

Bild 5-1: Prüfschornsteine und Lage der Thermoelemente

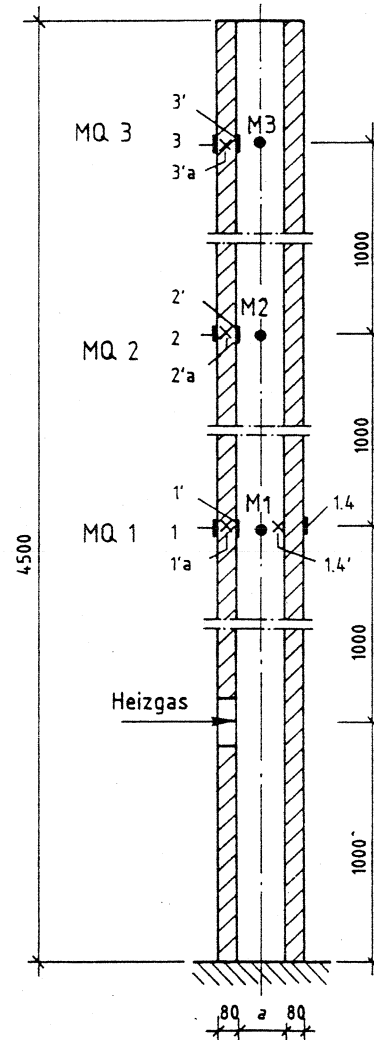
Querschnitte M1:5 (Maße in mm)



- 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

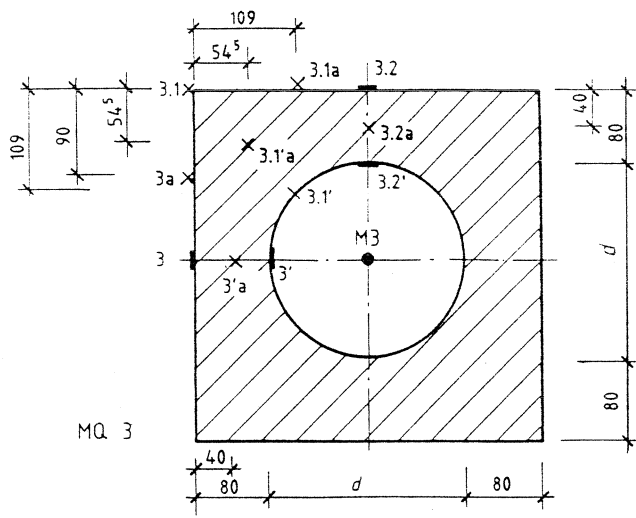
Längsschnitt M1:20
(Maße in mm)



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

3 Schornsteine aus geschobenen, vollwandigen Leichtbetonformstücken mit einer Wangendicke von 80mm 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/dm³

Bild 5-2: Prüfschornsteine und Lage der Thermoelemente

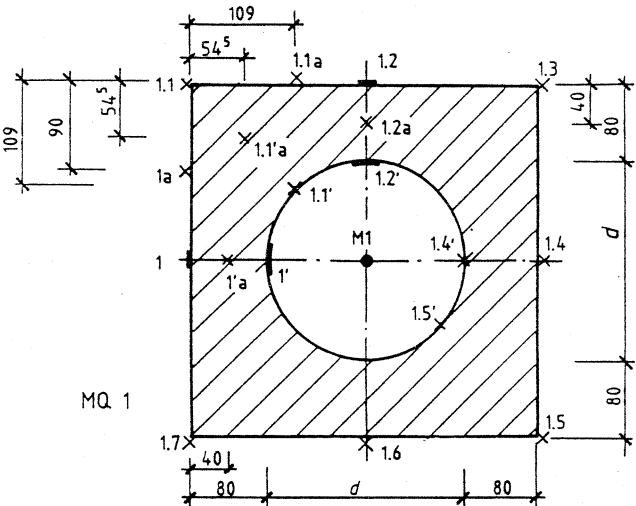
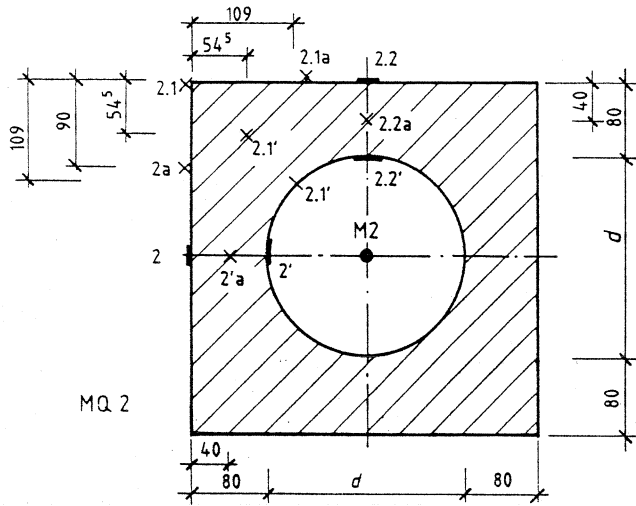
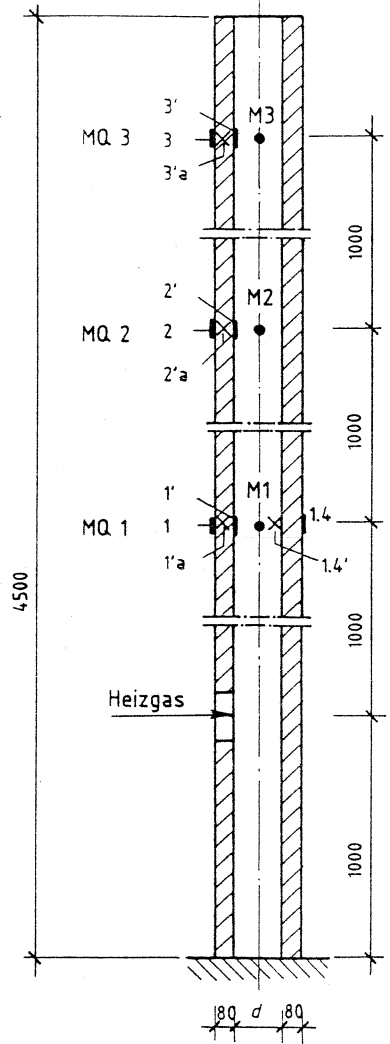


- Thermoelemente auf der Schornsteinachse nach Norm
- Thermoelemente auf der Schornsteinoberfläche nach Norm
- × Zusatz-Thermoelemente in den Querschnitten MQ1, MQ2, MQ3

MQ Meßquerschnitt

Längsschnitt M1:20

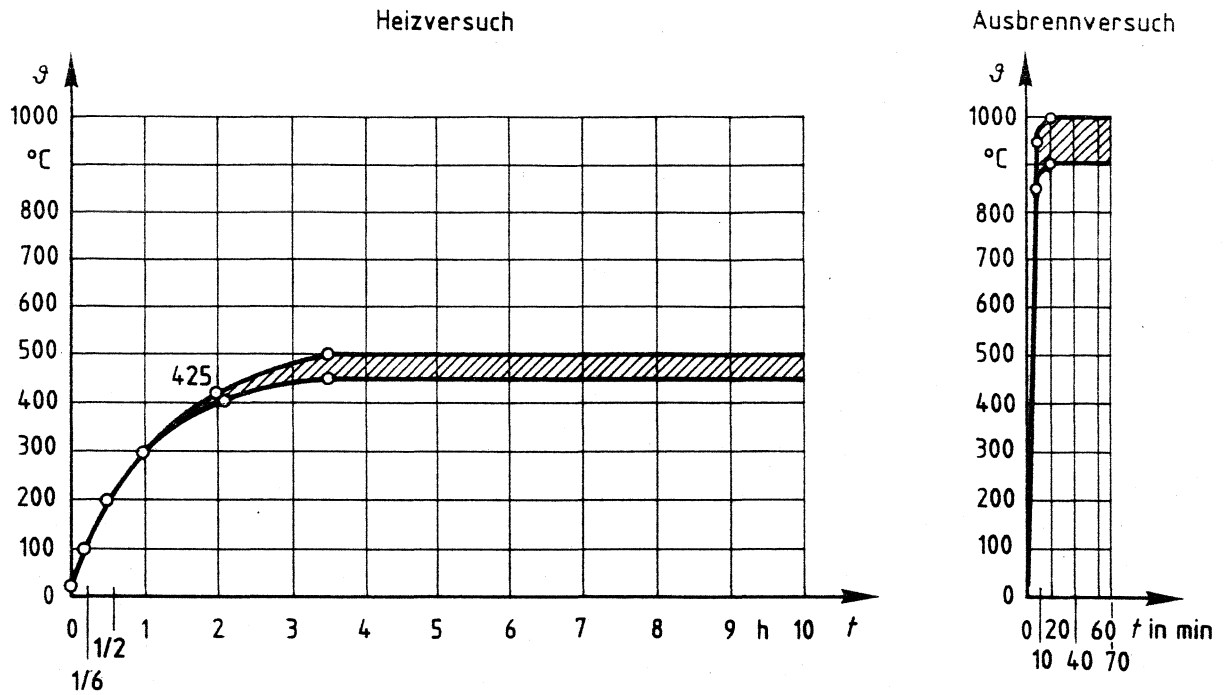
(Maße in mm)



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

3 Schornsteine aus geschößhohen 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



b) Temperaturbeanspruchung während einer Schornsteinprüfung (Prüfschornstein A) nach DIN 18160 Teil 6, Ausgabe Juli 1982 [2]

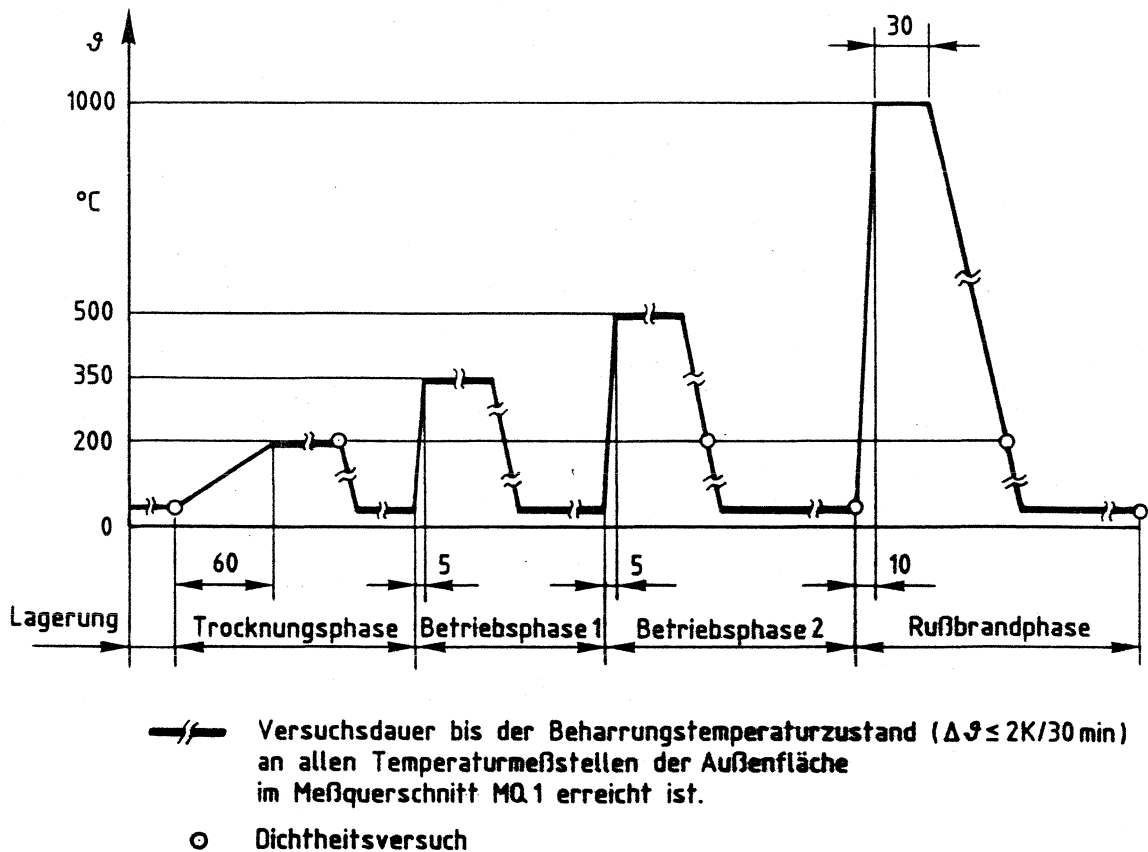


Bild 5-4: Temperaturbeanspruchung von Prüfschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6, Ausgabe 1968 [2] u. Ausgabe 1982 [1]

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 Konvektion¹⁾ sowie
- mit den Schornsteinwänden durch Strahlung.

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

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

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 ϑ_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:

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

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

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 ϵ_{Th} bei allen Schornsteinen in etwa gleich ist, werden sowohl die geometrischen als auch die thermodynamischen Einflußgrößen der einzelnen Schornsteine durch α_K und ϑ_w erfaßt. Da diese Einflußgrößen unbekannt sind, erfolgte die Abschätzung der tatsächlich vorhandenen Abgastemperatur ϑ_g derart, daß die gemessene Abgastemperatur ϑ_{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 Prüfungsergebnisse von mehrschaligen Hausschornsteinen handelte. Bei dieser Schornsteinbauart ist aufgrund der hohen Wärmedämmung der Schornsteinwände der Temperaturunterschied zwischen der Wandtemperatur (ϑ_w) und der an dem Thermoelement in Querschnittmitte gemessenen Temperatur relativ gering. Wird darüber hinaus der Wärmeübergangskoeffizient α_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 CO₂- und O₂-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_2 -, CO_2 -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_2 -Meßgerät ist im Prinzip ein Infrarot-Analysator, wobei die Analyse mit Hilfe der Ultrarot-Spektroskopie vorgenommen wird. Bei 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.

Forschungsvorhaben Vh 2435

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 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.

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung ¹⁾							
		A14 ²⁾	B14 ³⁾	C14 ⁴⁾	A20 ²⁾	B20 ³⁾	C20 ⁴⁾		
Abgastemperatur	ϑ_g	°C	500						
O ₂ -Gehalt		V-%	16,1	15,9	16,1	16,8	15,6	15,6	
CO ₂ -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	ϵ_i	-	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08
	außen	ϵ_a	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	α_i	W/(m ² K)	12,4	13,4	12,7	8,7	6,5	8,8
	außen	α_a		8,9	8,9	8,8	8,8	8,8	8,6

1) vgl. Abschn. 5.1

2) vgl. Bild 5-1

3) vgl. Bild 5-2

4) vgl. Bild 5-3

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung ¹⁾			
		A26 ²⁾	B26 ³⁾	C25 ⁴⁾	
Abgastemperatur	ϑ_g	°C	500		
O ₂ -Gehalt		V-%	15,9	15,8	15,8
CO ₂ -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	ϵ_i	0,10	0,09	0,09
	außen	ϵ_a	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	α_i	5,0	5,0	5,8
	außen	α_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

Forschungsvorhaben Vh 2435

Tabelle 5-3: Wärmeleitfähigkeit λ der Leichtbetonformstücke in Abhängigkeit von der Temperatur t und die auf den trockenen Stoff bezogene Rohdichte ρ

Temperatur	Schornsteinserie "A" 1)			Schornsteinserie "B" 2)			Schornsteinserie "C" 3) mit		
	mit einem Querschnitt von								
	14/14	20/20	26/26	14/14	20/20	26/26	14 cm ϕ	20 cm ϕ	25 cm ϕ
	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]			
t °C	λ [(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
-	ρ [kg/m ³]								
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

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Temperatur	Schornsteinserie "A" ¹⁾ mit einem Querschnitt von			Schornsteinserie "B" ²⁾ mit einem Querschnitt von			Schornsteinserie "C" ³⁾ mit einem runden Querschnitt von		
	14/14 [cm ²]	20/20 [cm ²]	26/26 [cm ²]	14/14 [cm ²]	20/20 [cm ²]	26/26 [cm ²]	14 cm ø	20 cm ø	25 cm
°C	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

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 ²⁾			Temperaturerhöhungen an der Innenfläche ³⁾ Meßwerte			Rechen- wert	vgl. Bild	Temperaturerhöhungen an der Außenfläche ⁴⁾ Meßwerte			Rechen- wert	vgl. Bild	Luft- tempe- ratur	relative Luft- feuch- tigkeit	Wasser- dampf- gehalt
	°C		w _m	min.	max.	im Mittel			K	K	K					
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A 14	502	545	3,70	356	410	384	375	E-1	90	108	101	106	E-2	24	77	24,6
B 14	503	540	4,05	355	414	379	380	"	94	105	100	104	"	21	40	20,4
C 14	505	570	3,80	352	376	369	364	"	65	68	66	85	"	18	67	16,8
A 20	502	555	2,50	374	390	382	381	E-3	97	112	105	107	E-4	22	60	21,6
B 20	505	570	1,85	334	406	376	379	"	96	117	111	110	"	19	39	17,8
C 20	504	580	2,54	346	384	373	370	"	65	67	66	93	"	20	58	19,0
A 26	503	600	1,15	391	418	408	407	E-5	131	137	134	127	E-6	24	62	24,6
B 26	507	590	1,30	393	438	406	406	"	110	122	115	119	"	19	40	17,8
C 25	504	590	1,55	332	407	367	370	"	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 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

Tabelle 5-5a: 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 (Betriebsphase 2; Bild 5-4(b))

Schorn- stein 1)	Temperatur im Schorn- stein Meß-/Rechen- wert ²⁾			Temperaturerhöhungen an der Innenfläche ³⁾ Meßwerte			Rechen- wert	Temperaturerhöhungen an der Außenfläche ⁴⁾ Meßwerte			Rechen- wert	Luft- tempe- ratur	relative Luft- feuch- tigkeit	Wasser- dampf- gehalt
	min.	max.	im Mittel	min.	max.	im Mittel		min.	max.	im Mittel				
-	°C	m/s	K	K	K	K	K	°C	%	g/m ³				
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

Forschungsvorhaben Vh 2435

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 Heizölverbrauchs erfolgte, wird der mutmaßliche Abgasmassenstrom für die vorgenannten 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

Forschungsvorhaben Vh 2435

Luftüberschuß von $n = 4,1$ gewählt. Unter dieser Voraussetzung lassen sich sowohl der CO_2 - und O_2 -Gehalt im Abgas als auch der Abgasmassenstrom abschätzen.

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

$$\text{CO}_2 = \frac{c_{\text{O}_2 \text{ maxsc}}}{1 + (n-1) \frac{L_{\text{mintr}}}{V_{\text{mintr}}}} \quad (5-3)$$

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. $\text{CO}_{2\text{max}}$ beträgt für Heizöl EL $15,3 \text{ Vol-\%}$ [17].

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

$$\frac{\sigma_2}{21 - \sigma_2} = \frac{L_{\text{mintr}}}{V_{\text{mintr}}} \quad (5-4)$$

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

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

Die während der Schornsteinprüfungen im Prüfraum gemessenen klimatischen Bedingungen, die relative Luftfeuchtigkeit (φ) und der Wasserdampfgehalt (φ_L) der Raumluft gehen aus den Tabellen 5-8 und 5-11 hervor.

Forschungsvorhaben Vh 2435

Das Abgasvolumen ist temperaturabhängig und ergibt sich für eine bestimmte Temperatur ϑ aus der Beziehung:

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

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Abgas-Rohdichte ρ und der Abgas-Temperatur ϑ ist auf Bild 5-6 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 Rechenergebnissen auf den unkorrigierten Abgastemperaturen.

Forschungsvorhaben Vh 2435

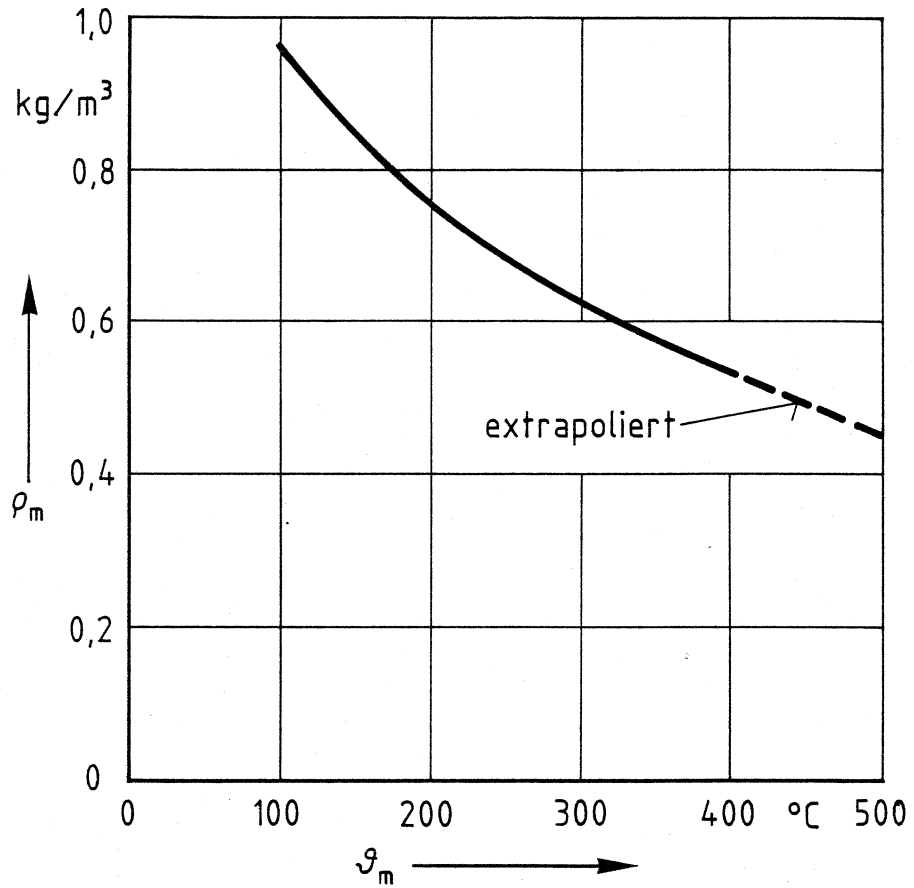


Bild 5-7: Mittlere Rohdichte ρ_m der Abgase in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur θ_m nach [30]

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung ¹⁾							
		A14 ²⁾	B14 ³⁾	C14 ⁴⁾	A20 ²⁾	B20 ³⁾	C20 ⁴⁾		
Abgastemperatur	ϑ_g	°C	350						
O ₂ -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	
CO ₂ -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	ϵ_i	-	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08
	außen	ϵ_a	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	α_i	W/(m ² K)	12,1	13,3	13,2	6,0	6,4	7,8
	außen	α_a		8,6	8,7	8,4	8,3	8,4	8,2

1) vgl. Abschn. 5.1

2) vgl. Bild 5-1

3) vgl. Bild 5-3

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 ¹⁾				
		A26 ²⁾	B26 ³⁾	C25 ⁴⁾		
Abgastemperatur	ϑ_g	°C	350			
O ₂ -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	
CO ₂ -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	ϵ_i	-	0,08	0,08	0,08
	außen	ϵ_a	-	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	α_i	W/(m ² K)	5,0	5,0	5,7
	außen	α_a		8,3	8,4	8,4

1) vgl. Abschn. 5.1

2) vgl. Bild 5-1

3) vgl. Bild 5-2

4) vgl. Bild 5-3

Tabelle 5-8: 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 1; Bild 5-4(b))

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert ²⁾			Temperaturerhöhungen an der Innenfläche ³⁾ Meßwerte				Rechen- wert	vgl. Bild	Temperaturerhöhungen an der Außenfläche ⁴⁾ Meßwerte				Rechen- wert	vgl. Bild	Luft- tempe- ratur	relative Luft- feuch- tigkeit	Wasser- dampf- gehalt
	°C	m/s	w _m	min.	max.	im Mittel	K			K	K	K	°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 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

Tabelle 5-8a: 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 1; Bild 5-4(b))

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert ²⁾			Temperaturerhöhungen an der Innenfläche ³⁾ Meßwerte				Temperaturerhöhungen an der Außenfläche ⁴⁾ Meßwerte				Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampf- gehalt
	Meßwert	Rechenwert	w _m	min.	max.	im Mittel	Rechenwert	min.	max.	im Mittel	Rechenwert			
-	°C		m/s	K			K	K			K	°C	%	g/m ³
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	65	67	66	68	20	48	19,0
B 14	353	350	3,50	231	256	243	226	64	69	67	67	17	39	15,8
C 14	351	350	4,30	212	240	229	211	55	58	56	54	18	62	16,8
A 20	350	350	1,45	249	257	252	195	66	77	71	62	21	57	20,4
B 20	354	350	1,53	206	269	247	194	64	69	68	62	17	36	15,8
C 20	350	350	1,91	211	245	229	191	57	60	58	62	21	63	20,4
A 26	351	350	0,94	247	268	260	184	86	95	90	67	22	59	21,6
B 26	353	350	0,90	251	291	264	191	67	72	69	63	15	39	13,6
C 25	350	350	1,35	227	277	255	183	58	69	63	53	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

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

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung ¹⁾						
		A14 ²⁾	B14 ³⁾	C14 ⁴⁾	A20 ²⁾	B20 ³⁾	C20 ⁴⁾	
Abgastemperatur	ϑ_g °C			200				
O ₂ -Gehalt	V-%	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1	
CO ₂ -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 ϵ_i	-	0,06	0,06	0,06	0,09	0,09	0,09
	außen ϵ_a	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen α_i	W/(m ² K)	5,9	6,1	6,4	5,0	5,0	5,0
	außen α_a		7,8	7,8	7,6	7,7	7,7	7,4

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

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung ¹⁾				
		A26 ²⁾	B26 ³⁾	C25 ⁴⁾		
Abgastemperatur	\sqrt{g}	°C	200			
O ₂ -Gehalt		V-%	15,8	15,8	15,8	
CO ₂ -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	ϵ_i	-	0,11	0,11	0,11
	außen	ϵ_a	-	0,95	0,95	0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen	α_i	W/(m ² K)	5,0	5,0	5,0
	außen	α_a		7,6	7,6	7,4

1) vgl. Abschn. 5.1

2) vgl. Bild 5-1

3) vgl. Bild 5-2

4) vgl. Bild 5-3

Tabelle 5-11: 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 ²⁾			Temperaturerhöhungen an der Innenfläche ³⁾ Meßwerte				Rechen- wert	vgl. Bild	Temperaturerhöhungen an der Außenfläche ⁴⁾ Meßwerte				Rechen- wert	vgl. Bild	Luft- tempe- ratur °C	relative Luft- feuch- tigkeit %	Wasser- dampf- gehalt g/m ³
	°C	m/s	w _m	min.	max.	im Mittel	min.			max.	im Mittel	min.	max.					
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 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

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 ²⁾		Temperaturerhöhungen an der Innenfläche ³⁾ Meßwerte				Rechenwert	Temperaturerhöhungen an der Außenfläche ⁴⁾ Meßwerte			Rechenwert	Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampfgehalt
	°C	m/s	min.	max.	im Mittel	min.		max.	im Mittel	°C				
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A 14	200	200	1,19	125	134	127	85	30	37	32	27	19	51	17,8
B 14	202	200	1,23	103	138	120	86	39	42	41	28	16	39	14,6
C 14	203	200	1,29	101	120	112	81	27	29	29	22	18	53	16,8
A 20	201	200	0,62	116	123	119	86	27	33	29	28	19	57	17,8
B 20	203	200	0,68	97	137	120	87	43	50	47	30	14	37	12,8
C 20	202	200	0,83	110	130	118	80	33	35	34	23	19	61	17,8
A 26	201	200	0,44	114	133	127	85	47	53	50	32	21	72	20,4
B 26	203	200	0,41	126	153	135	93	43	48	47	33	12	41	11,4
C 25	203	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 (vgl. Bild 5-1 bis 5-3)

4) Meßstellen 1, 1.2, 1.4, 1.6

Forschungsvorhaben Vh 2435

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 $1/\lambda$

Schornstein 1)	Temperatur im Schornstein	Verlust- wärme- strom/ Meter ²)	$1/\lambda$	Temperatur im Schornstein	Temperatur an der inneren Wand	Verlust- wärme- strom/ Meter	$1/\lambda$	Temperatur im Schornstein	3) w_m	Verlust- wärme- strom/ Meter	$1/\lambda$
-	°C	W/m	m ² K/W	°C	°C	W/m	m ² K/W	°C	m/s	W/m	m ² 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] ≥ 4 m/s)

3) vgl. Tabelle 5-4

6 Vergleich von Berechnungen und Messungen der Oberflächen- temperaturen verschiedener Hausschornsteine

6.1 Vergleich von Berechnungen und Messungen der Oberflächen- temperaturen einschaliger Schornsteine

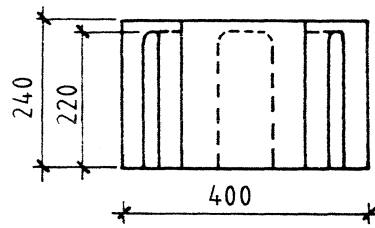
Die Berechnung der Oberflächentemperaturen der auf den Bildern 6-1 bis 6-5 dargestellten Schornsteine [21] erfolgte mit dem Computer-Programm "TASEF-2D" (Abschn. 4). Den Rechnungen lagen die in der Tabelle 6-1 zusammengestellten Einflußgrößen zugrunde.

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.

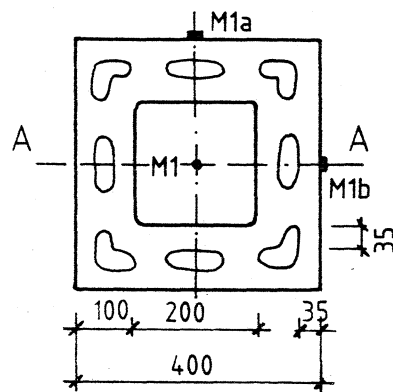
In Tabelle 6-2 sind die Rechenergebnisse den aus [21] entnommenen Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

Längsschnitt A-A

(Einzelformstück) M1:10

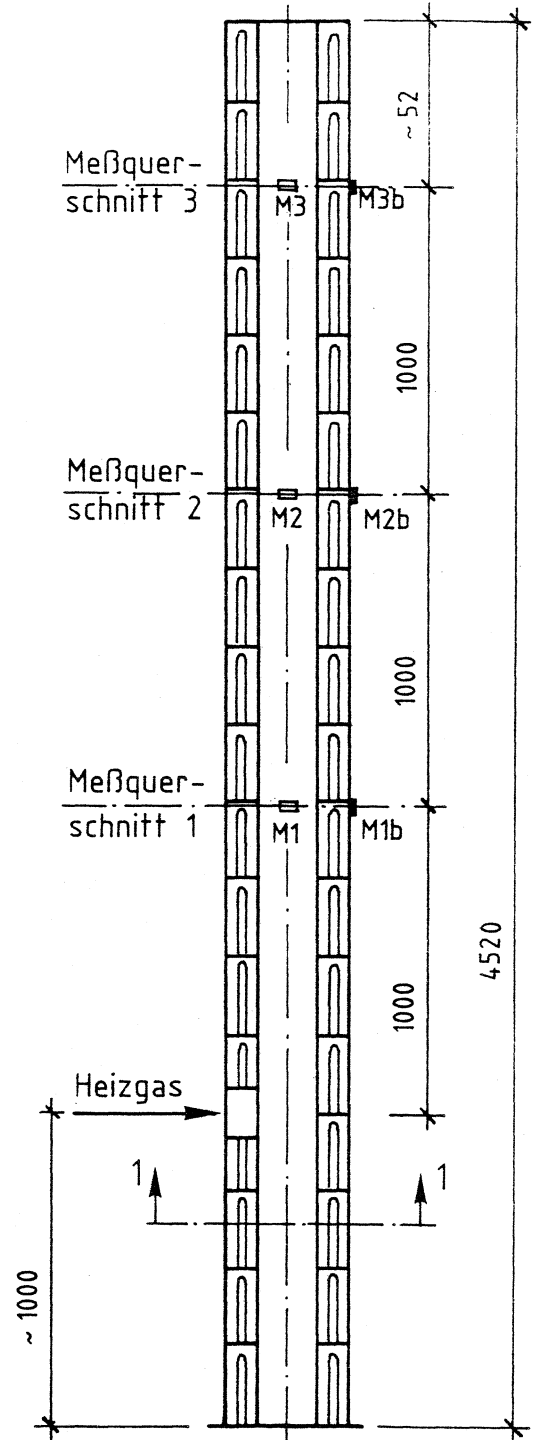


Querschnitt 1-1



Maße in mm

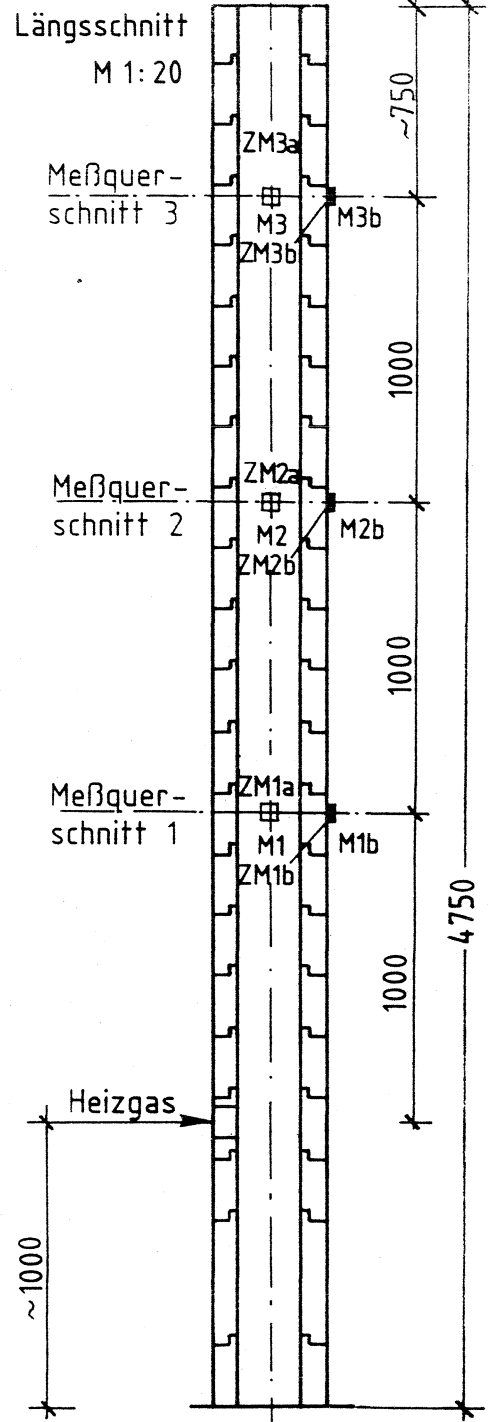
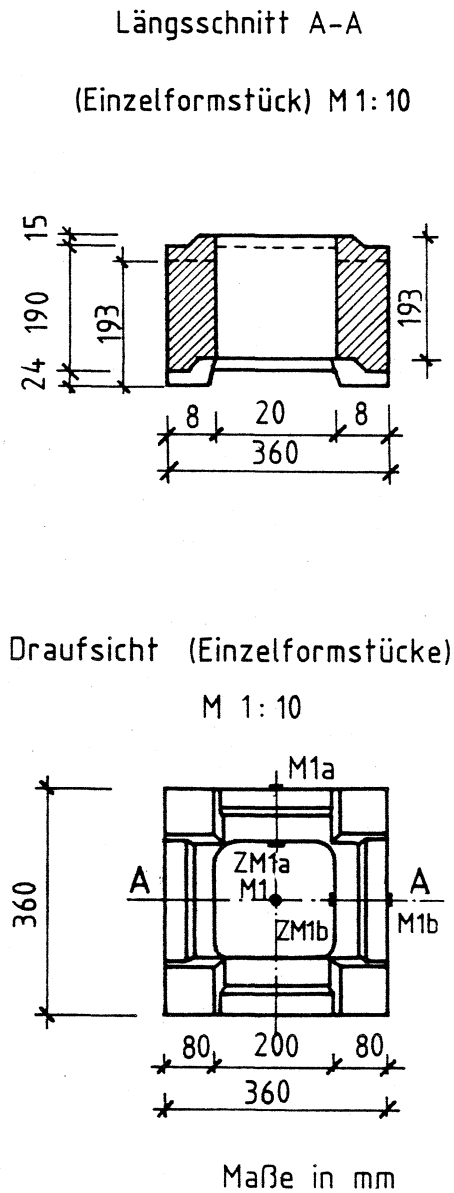
Längsschnitt M1:20



Schornsteintyp "A"

Schornstein aus 18 Leichtbeton-Zellenformstücken nach DIN 18 150 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 luftgetrockneten Beton bezogene mittlere Rohrdichte betrug 1,90 kg/dm³.

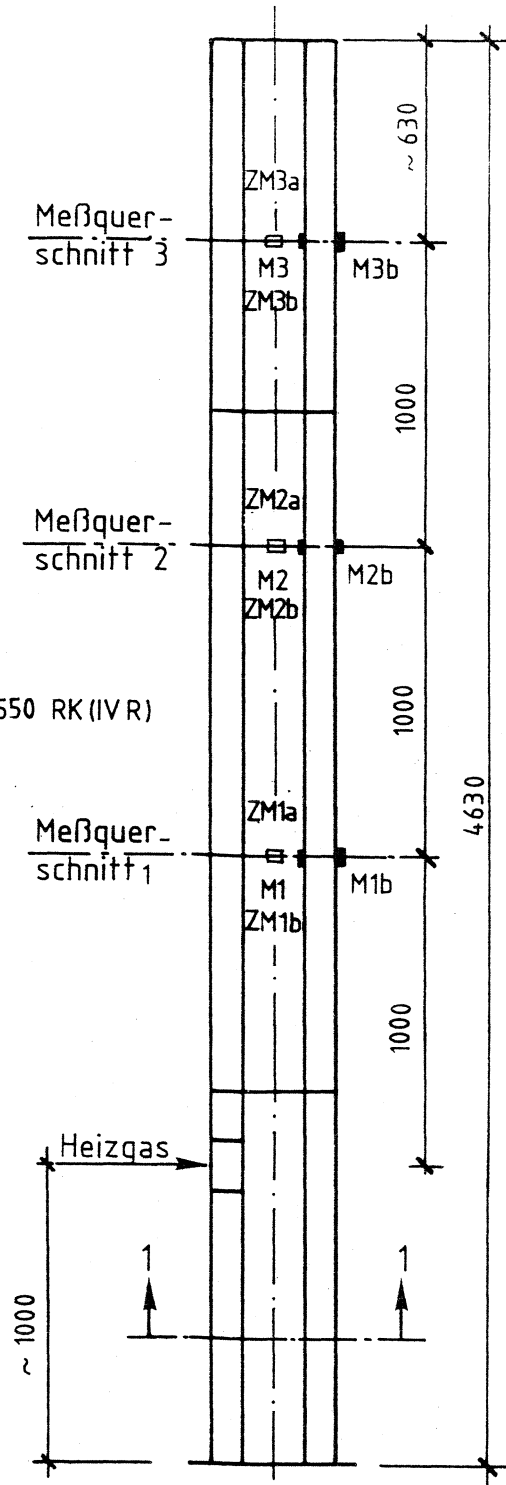
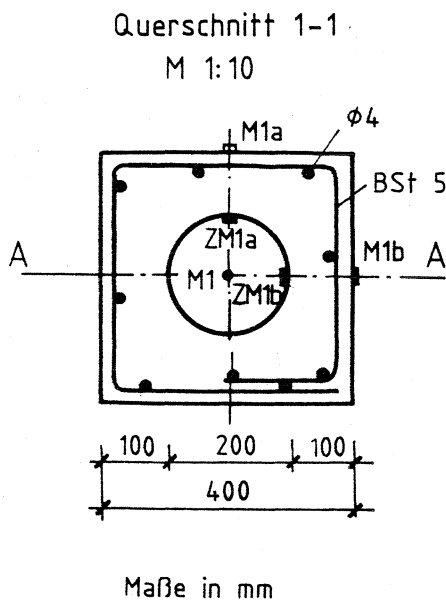
Bild 6-1: Prüfschornstein und Lage der Thermoelemente [21]



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 kg/dm³.

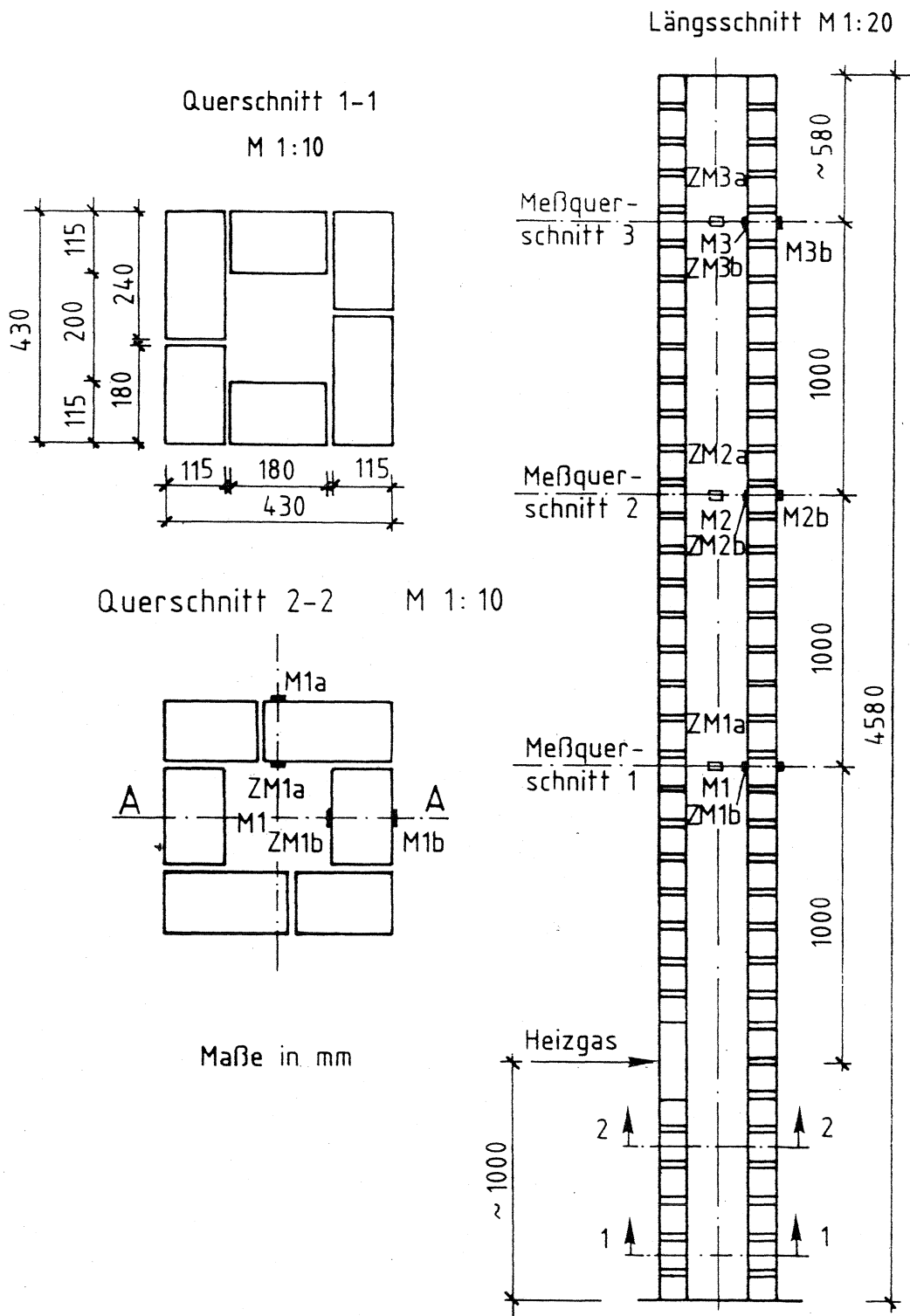
Bild 6-2: Prüfschornstein und Lage der Thermoelemente [21]



Schornsteintyp "C"

Schornstein aus geschobhohen 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/dm³.

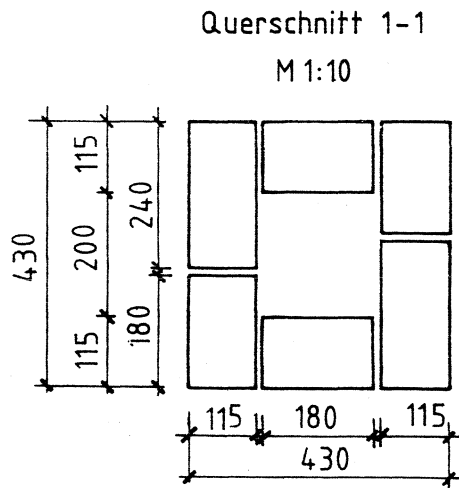
Bild 6-3: Prüfschornstein und Lage der Thermoelemente [21]



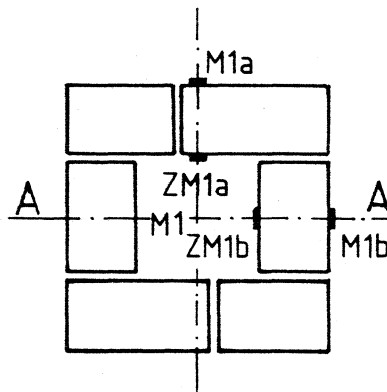
Schornsteintyp "D"

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

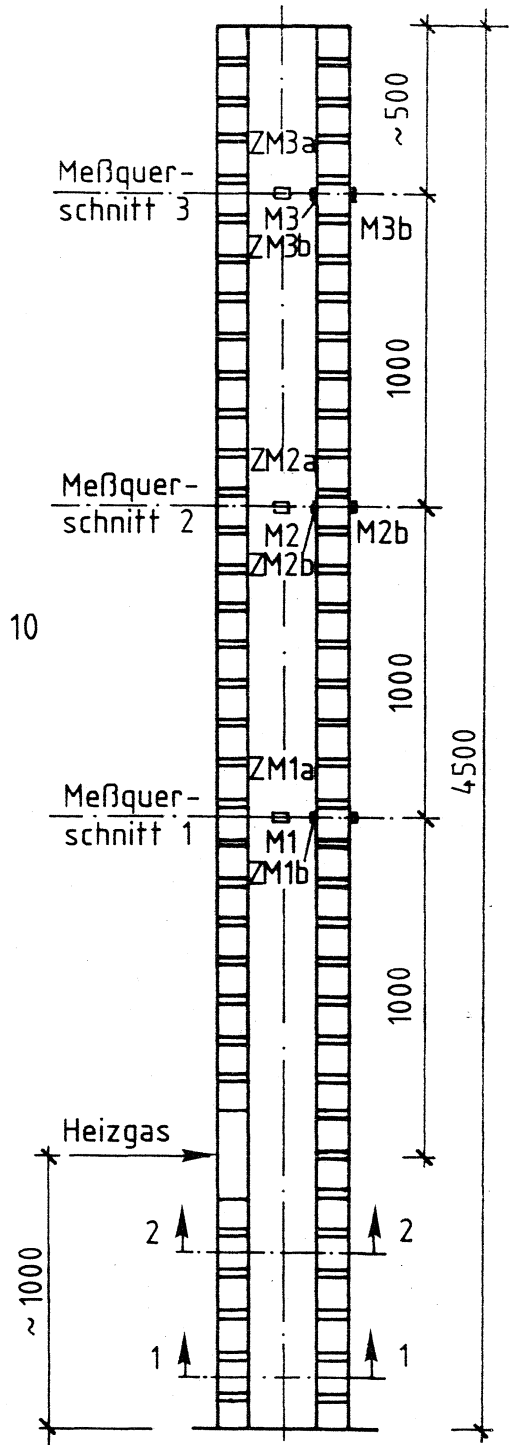
Bild 6-4: Prüfschornstein und Lage der Thermolemente [21]



Querschnitt 2-2 M 1:10



Maße in mm



Schornsteintyp "E"

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

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

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Kennwerte	Dimension	Schornsteinbezeichnung					
		A ¹⁾	B ²⁾	C ³⁾	D ⁴⁾	E ⁵⁾	
Abgastemperatur	v_g	°C			500		
O ₂ -Gehalt		V-%	16,1	16,1	16,1	16,1	16,1
CO ₂ -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 ϵ_i außen ϵ_a	-	0,08 0,95	0,08 0,95	0,08 0,95	0,08 0,95	0,08 0,95
Wärmeübergangskoeffizient	innen α_i außen α_a	W/(m ² K)	7,0 8,3	8,9 8,6	10,3 7,9	8,4 8,0	9,4 8,2
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(mK) ⁶⁾	[20]	[20]	[20]	[28]	[28]
Spezifische Wärmekapazität	c	J/(Kg/K) ⁶⁾	[20]	[20]	[20]	[25]	[25]

- 1) vgl. Bild 6-1
- 2) vgl. Bild 6-2
- 3) vgl. Bild 6-3a
- 4) vgl. Bild 6-4
- 5) vgl. Bild 6-5
- 6) vgl. Abschn. 10

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 1)	Temperatur im Schornstein Meß-/Rechenwert ²⁾			Meßwerte an der Innenfläche			Rechenwert	Meßwerte an der Außenfläche			Rechenwert	Lufttemperatur	relative Luftfeuchtigkeit	Wasserdampfgehalt
	°C	m/s	°C	min.	max.	im Mittel		°C	°C	°C				
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

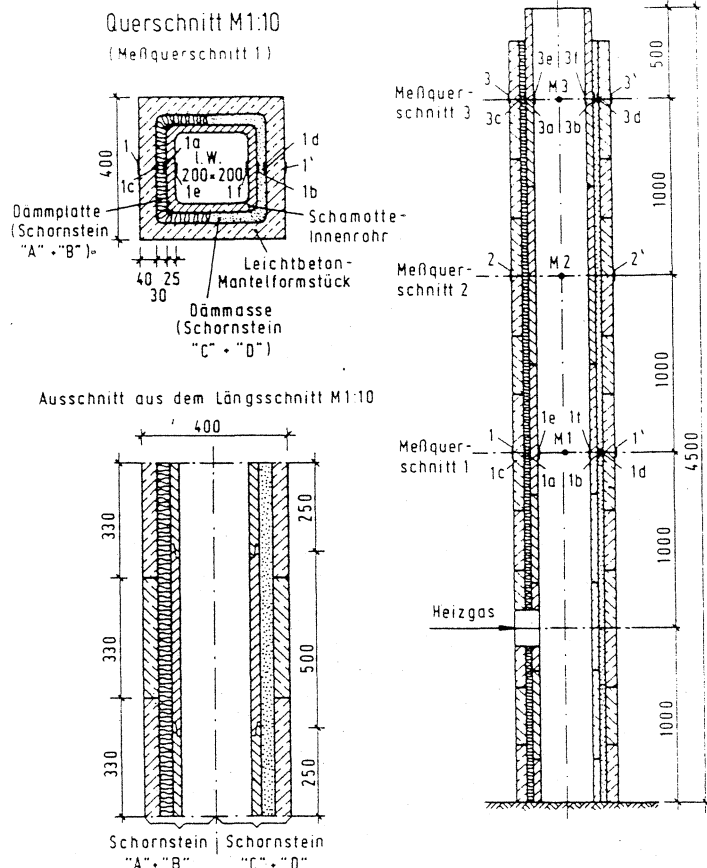
1) vgl. Bilder 6-1 bis 6-5

2) Korrektur der Meßwerte (vgl. Abschnitt 5.1)

3) Keine Angaben

6.2 Vergleich von Berechnungen und Messungen der Oberflächen- temperaturen 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 6-5 aufgebaut und wurden mit einer Heizbeanspruchung entsprechend Bild 5-4(a) thermisch belastet. Die für die Berechnung erforderliche Abgasgeschwindigkeit sowie die thermodynamischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärmekapazität c_p) wurden im Rahmen des von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bearbeiteten Forschungsvorhabens [20] ermittelt. In der Tabelle 6-4 sind die in [20] angegebenen Meß- und Rechenergebnissen den mit "TASEF-2D" ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt.



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 kg/m³.

- Dämmstoffschicht (Dicke 30 mm) :

Schornstein-bezeichnung	Dämmstoffschicht	Herstellungshinweise
"A"	Mineralfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von 80 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 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 (∅ 8 mm) verdichtet.
"D"	Dämmmasse mit Vermiculit-Zuschlag	Diese Dämmmasse wurde in erdfeuchter Konsistenz (15 l Anmachwasser auf 80 l Sackinhalt) eingebracht und nach Angabe der Herstellerfirma mit einer Holzplatte 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 kg/m³.

Bild 6-5: Prüfschornsteine und Lage der Thermolemente [20]

Tabelle 6-3: Vergleich der auf den Schornsteinachsen gemessenen Temperaturen [20] mit den von "TASEF-2D" 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				Luft- tempe- ratur	Rel. Luft- feuchtig- keit	Wasser- dampf- gehalt
		Meß- / Rechen- werte	Rechen- werte	Meßwerte	Rechenwerte nach [20]	TASEF	Meßwerte	Rechenwerte nach [20]	TASEF	min	max			
-	m/s	°C		°C		°C		°C		°C		°C	%	g/m ³
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	2,0	495	495 ²⁾ 515	445	465	441 -	436 453	69	75	68 -	70 73	18,0	75	16,7
B	1,5	495	495 ²⁾ 515	435	460	447 -	441 459	60	66	62 -	64 67	21,0	73	20,3
C	1,8	493	493 ²⁾ 525	440	455	426 -	418 447	78	102	76 -	77 81	24,5	66	25,1
D	1,9	496	496 ²⁾ 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)

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.

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 rechteckigem 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.

Forschungsvorhaben Vh 2435

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

Forschungsvorhaben Vh 2435

- [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 Struc-
 tures Exposed to Fire.
 Lund/Schweden: Institute of Technology; Department of Struc-
 tural 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. Rohrman:
 Zur numerischen Abschätzung der stationären Wärmebeanspruchung
 von Dämmschichten in dreischaligen Hausschornstein-Konstruk-
 tionen.
 Technik am Bau 8(1977)H. 5, S. 485-490

Forschungsvorhaben Vh 2435

- [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 thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen; Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche von Hausschornsteinen.
Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1989

Forschungsvorhaben Vh 2435

- [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

Forschungsvorhaben Vh 2435

11 Anlagen

11.1 Anlage A:

"Listing des Rechenprogramms "TASEF-2 D
zur Berechnung der Temperaturen und Wärmeströme
in Schornsteinen ("A 20", C 20" bei einer ther-
mischen 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


```

*****
*
*           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

Table with 5 columns: XMIN, YMIN, XMAX, YMAX, FICTITIOUS AREA. It lists diagonal limits for three subregions.

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

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 $1/..(q_i) = 0.108$
 WAERMEDURCHgangskoeffizient $k (q_i) = 4.955$

CP = 1111.250
 RHO = 0.446
 M_PUNKT = 0.036

11.2 Anlage B:

Darstellung des gemessenen, volumenbezogenen, prozentualen O₂- und CO₂-Gehaltes im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit [5] während der Heizbeanspruchung entsprechend Betriebphase 2 nach DIN 18 160 Teil 6 [1]

11.2 Anlage B

(Bilder B-1 bis B-9)

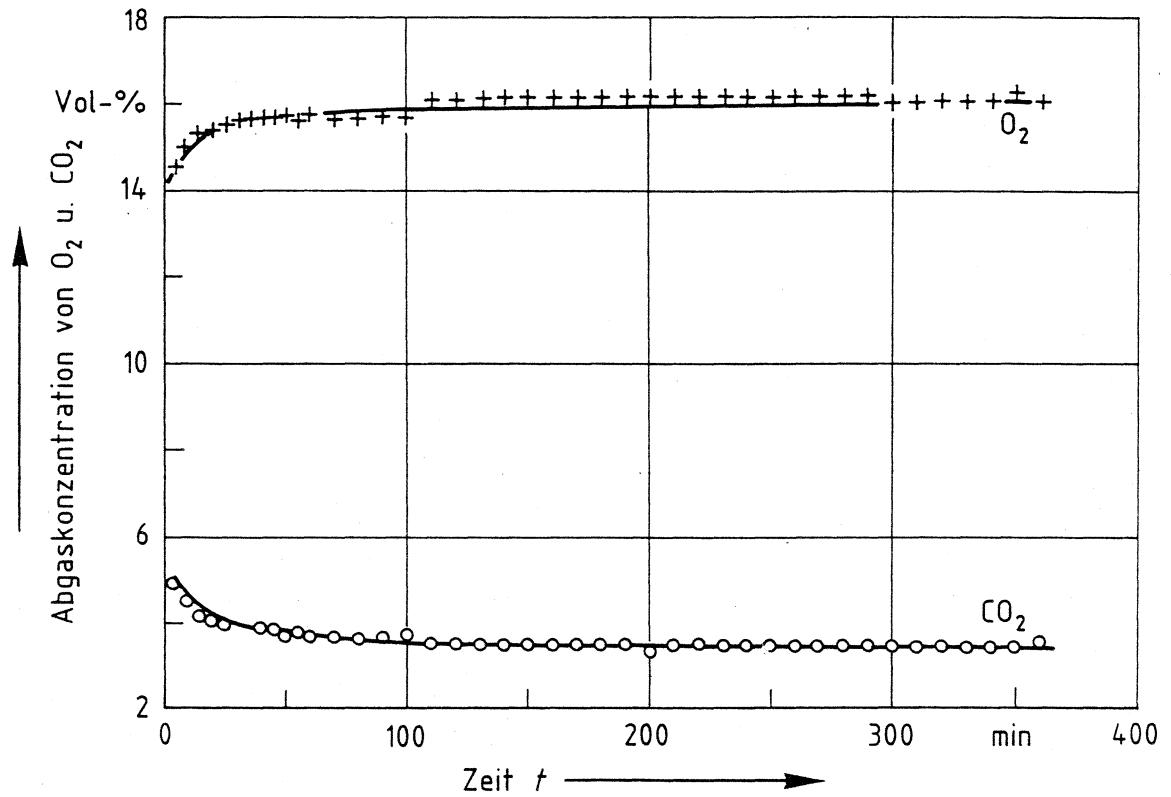


Bild B - 1: Schornstein A14; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

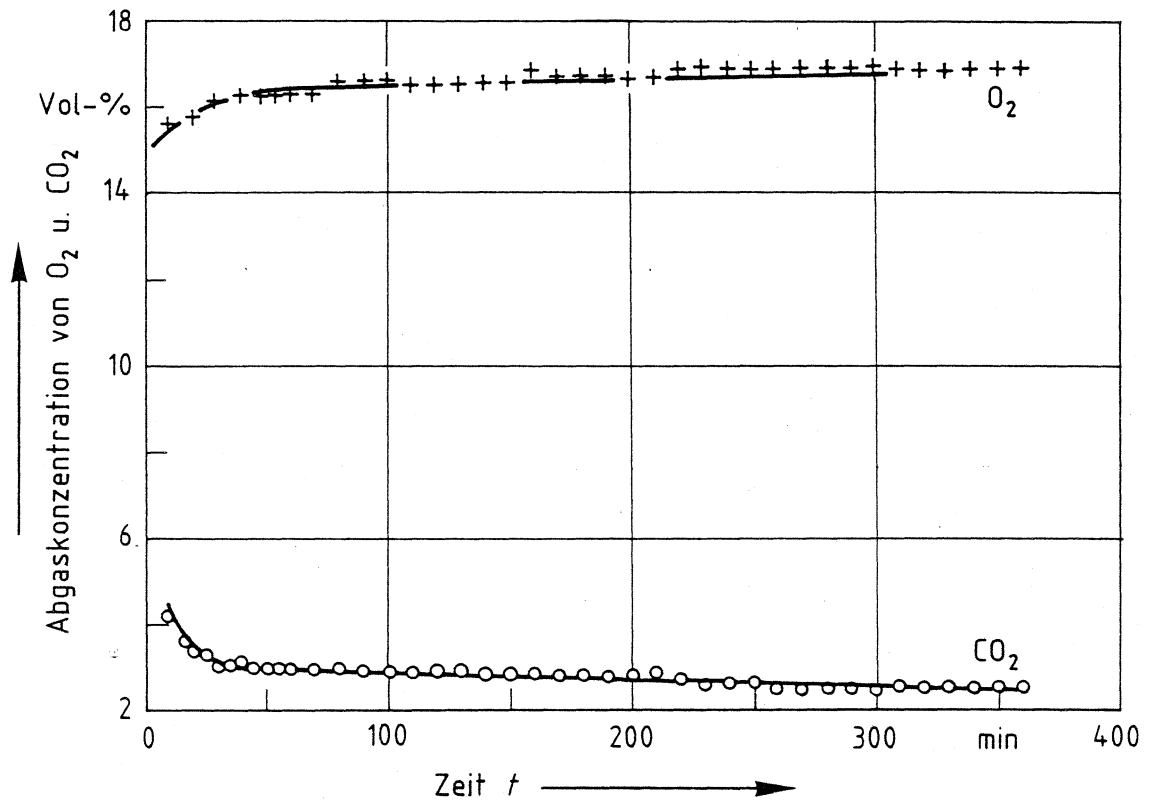


Bild B - 2: Schornstein A20; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

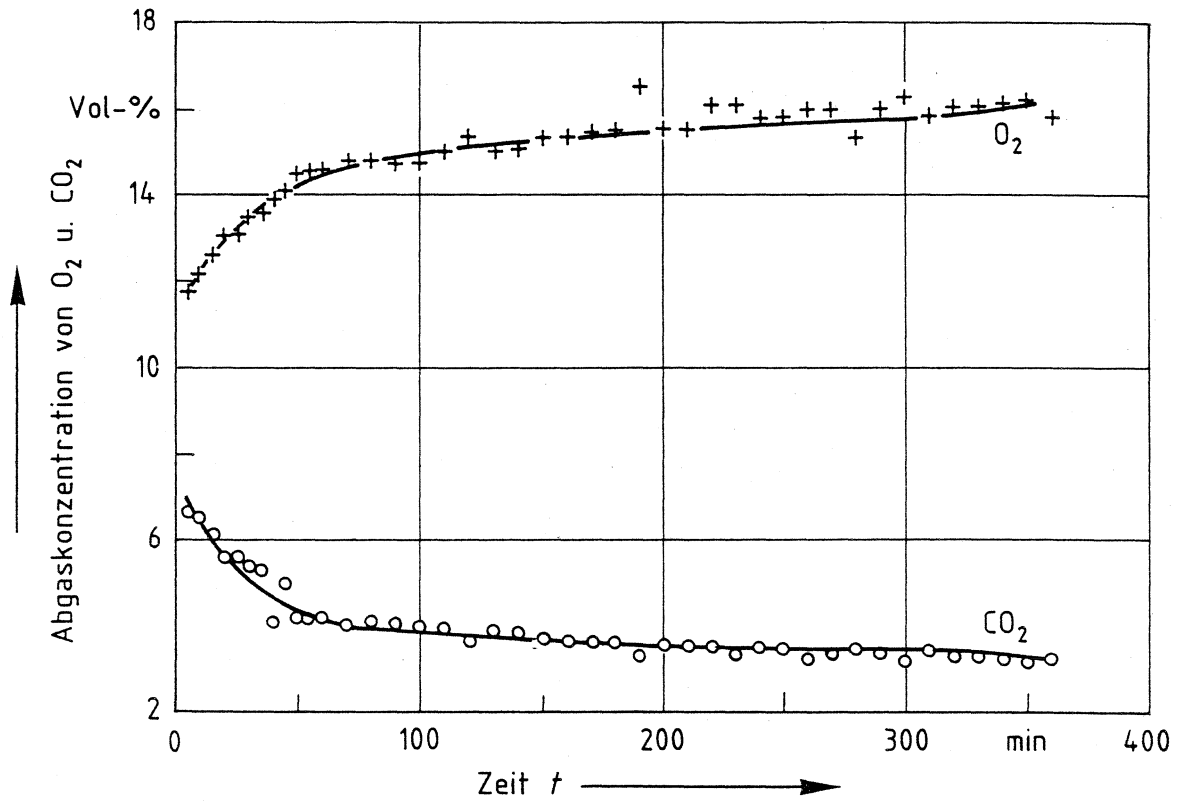


Bild B - 3: Schornstein A26; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

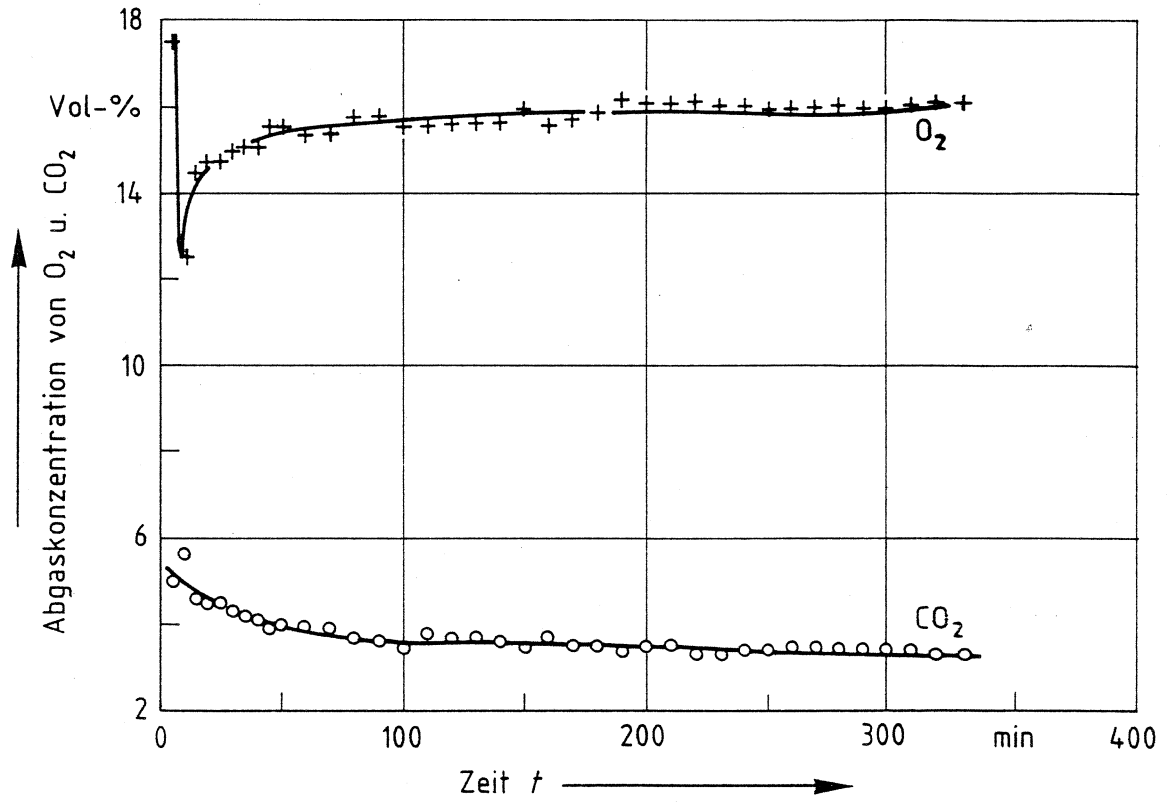


Bild B - 4: Schornstein B14; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

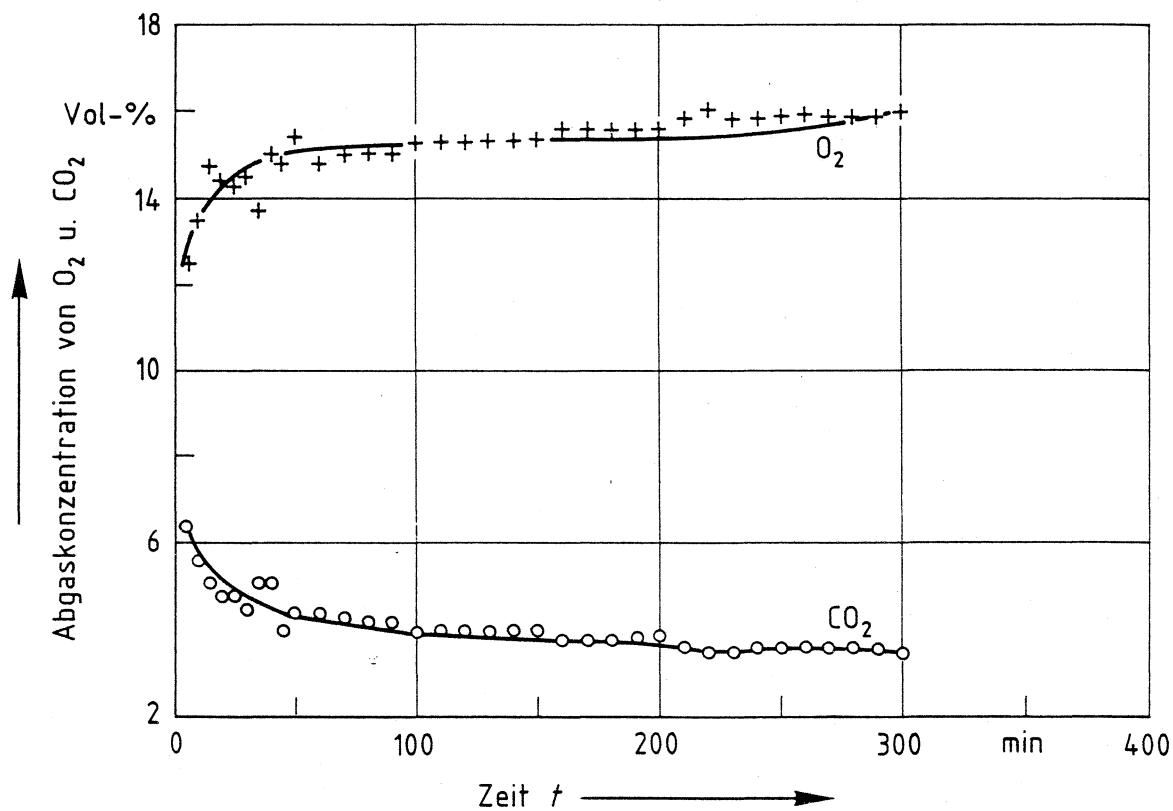


Bild B - 5: Schornstein B20; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

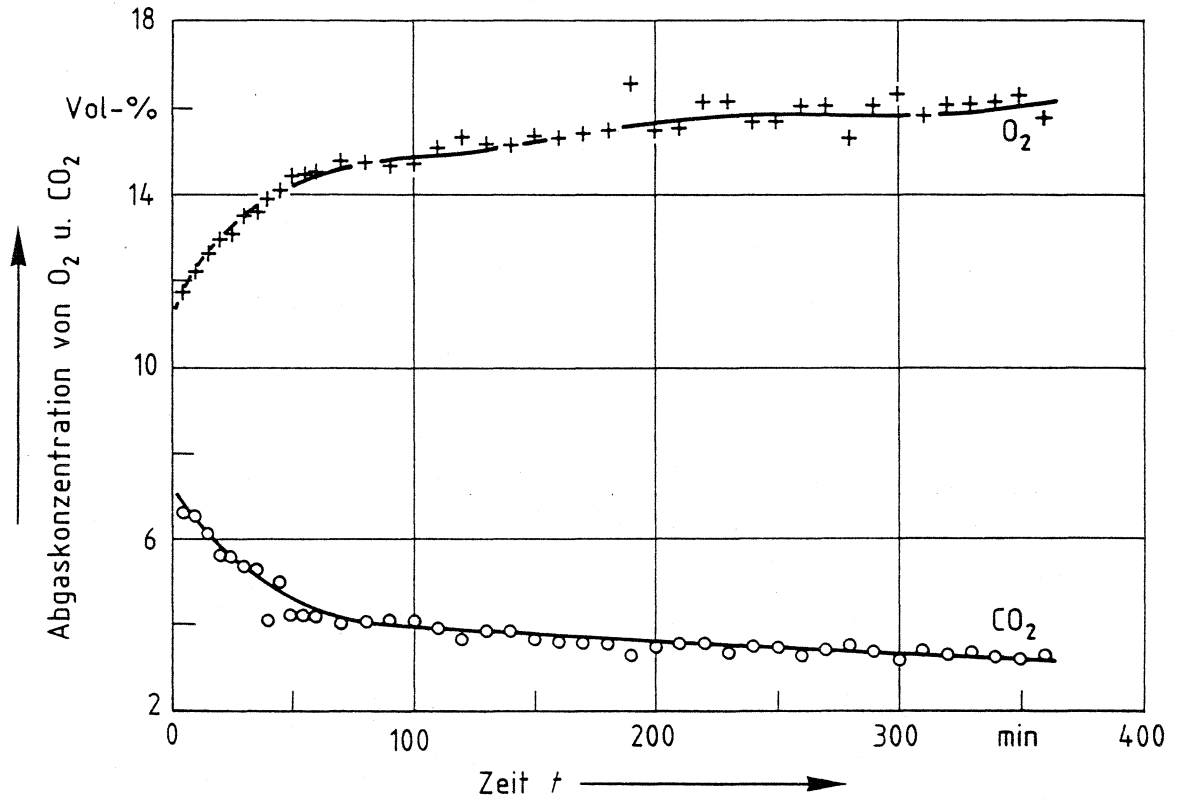


Bild B - 6: Schornstein B26; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

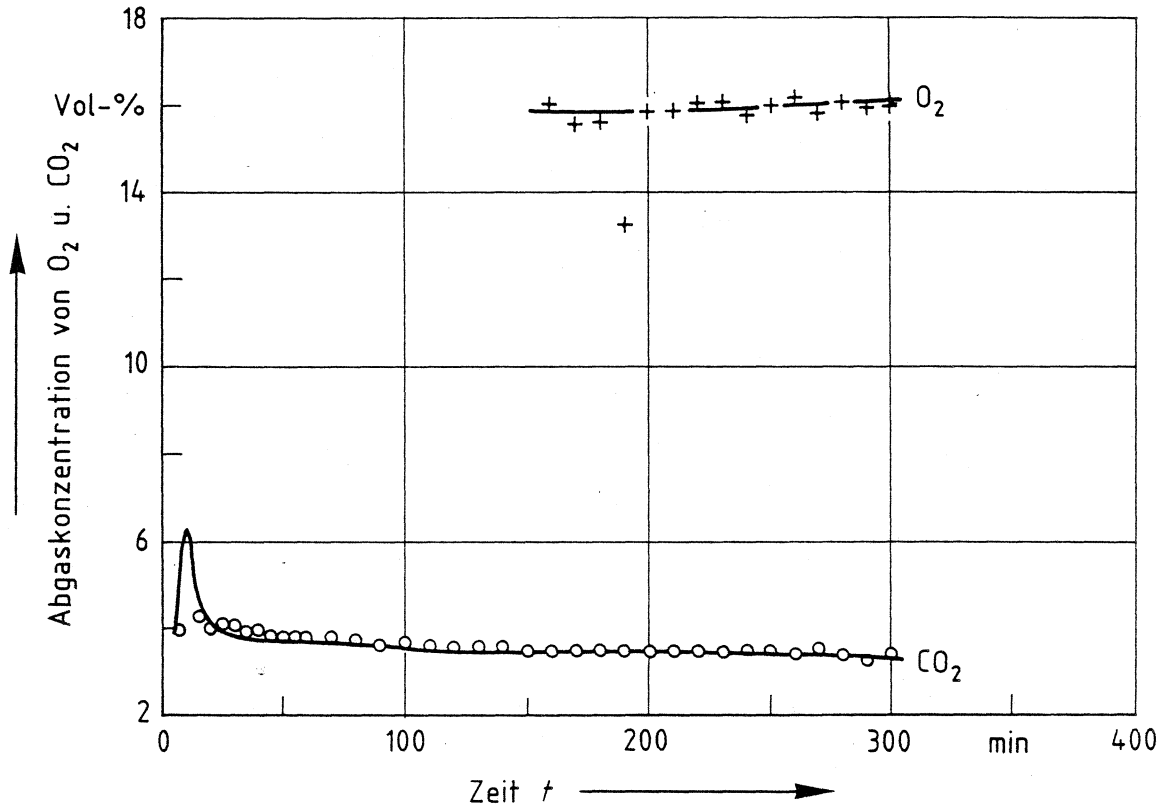


Bild B - 7: Schornstein C14; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

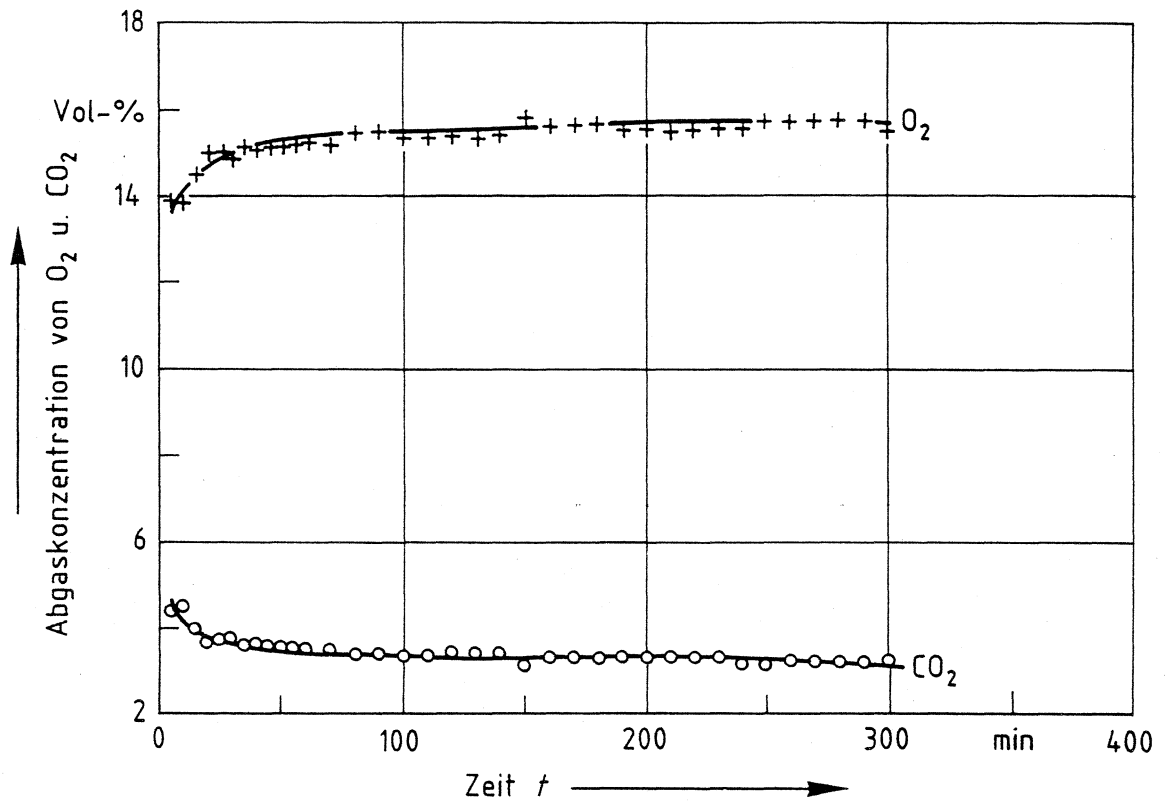


Bild B - 8: Schornstein C20; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage B

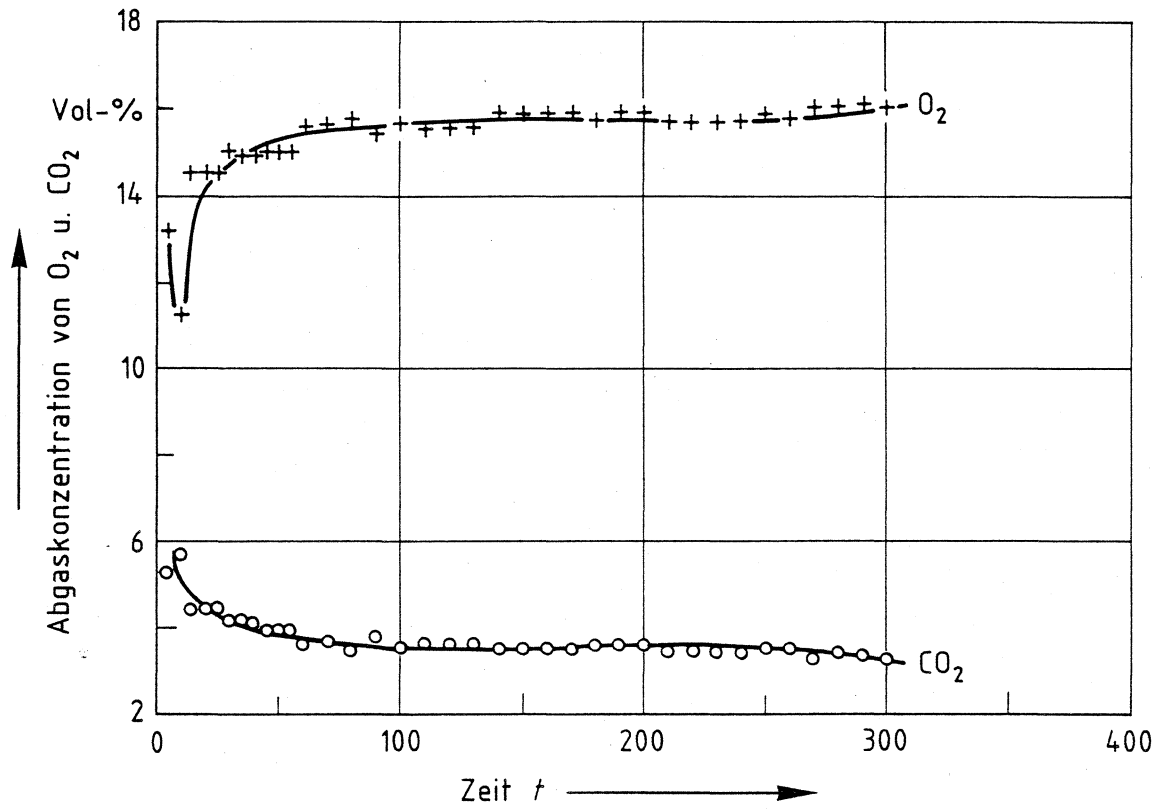


Bild B - 9: Schornstein C26; gemessener, volumenbezogener, prozentualer O₂ u. CO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Forschungsvorhaben Vh 2435

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]

11.3 Anlage C

(Bilder C-1 bis C-9)

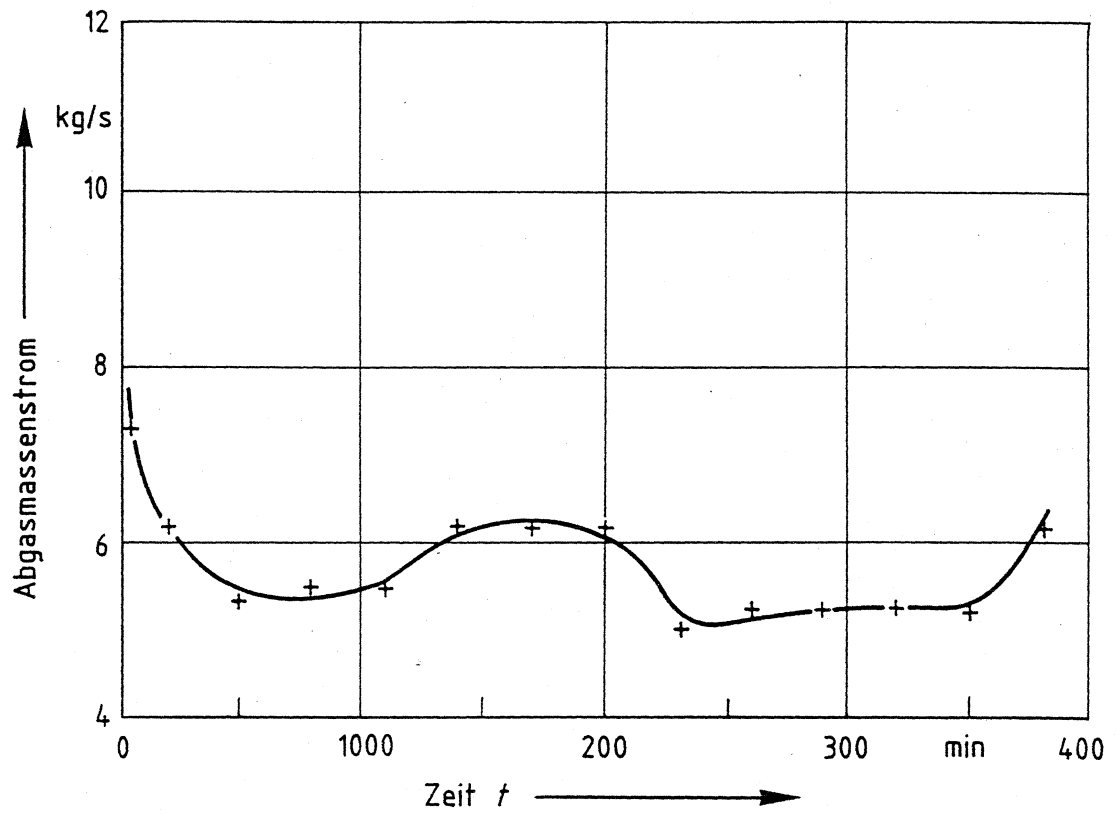


Bild C - 1: Schornstein A14; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t [5]

Anlage C

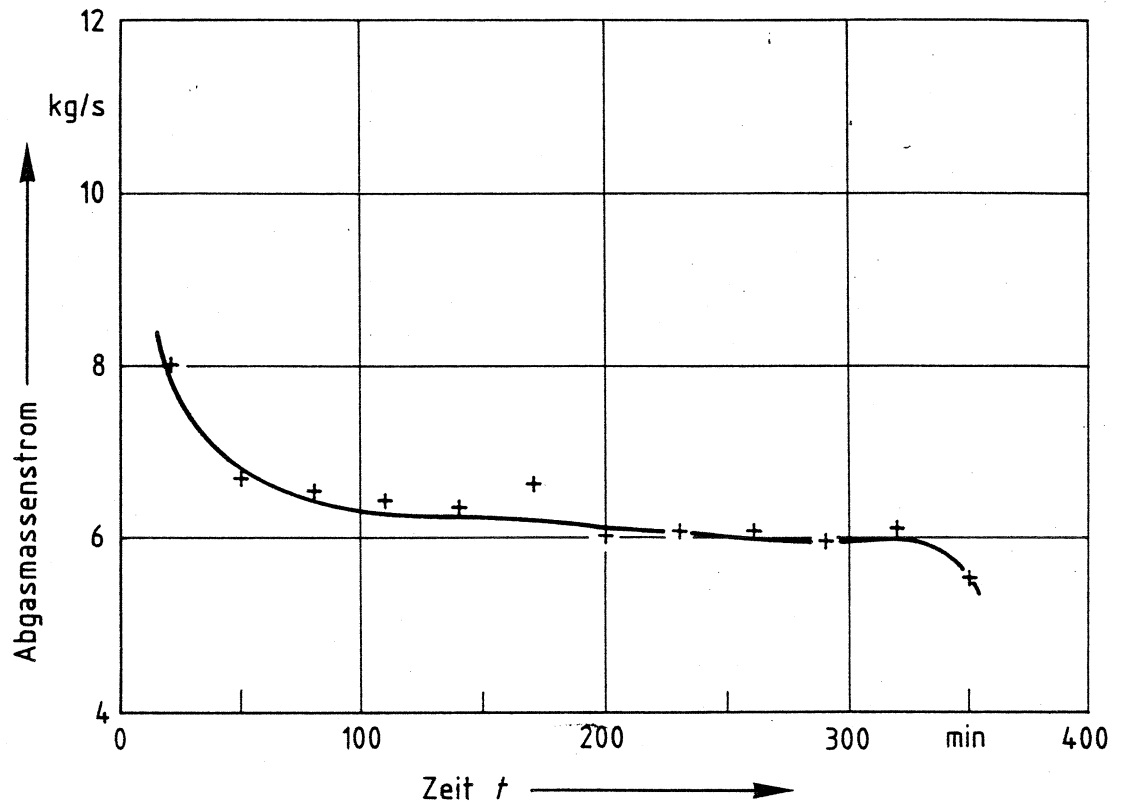


Bild C - 2: Schornstein A20; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

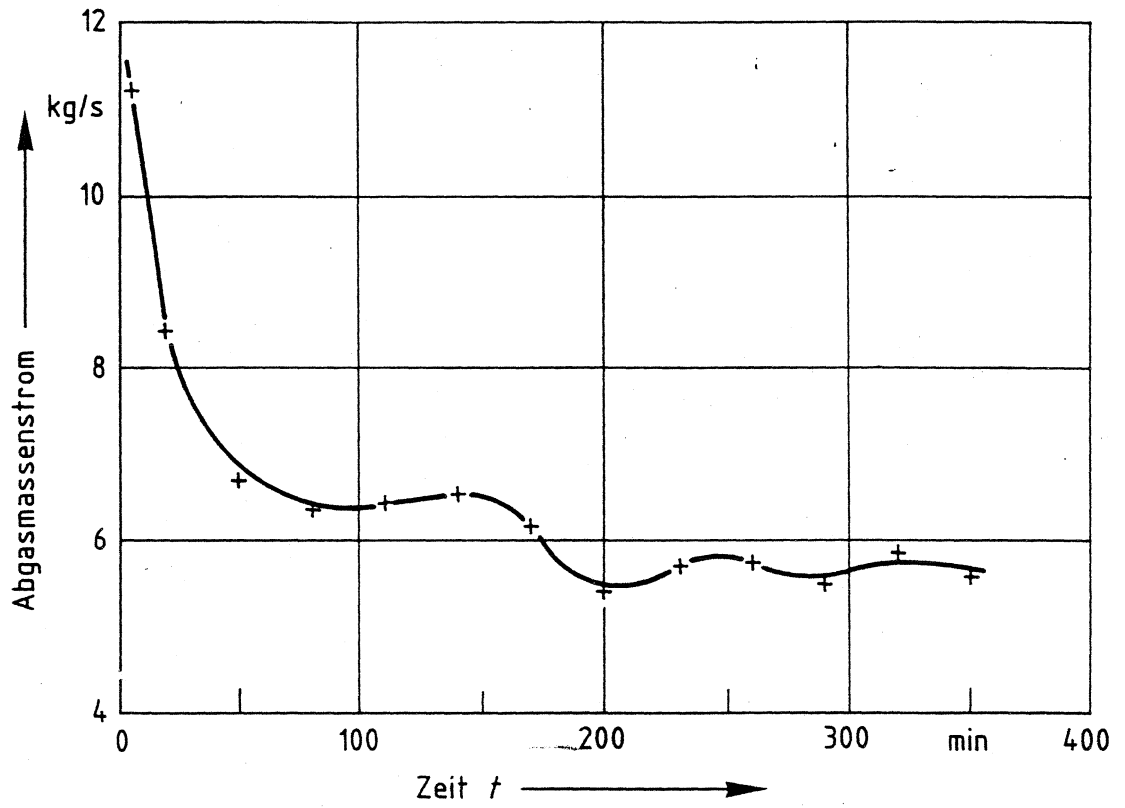


Bild C - 3: Schornstein A26; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

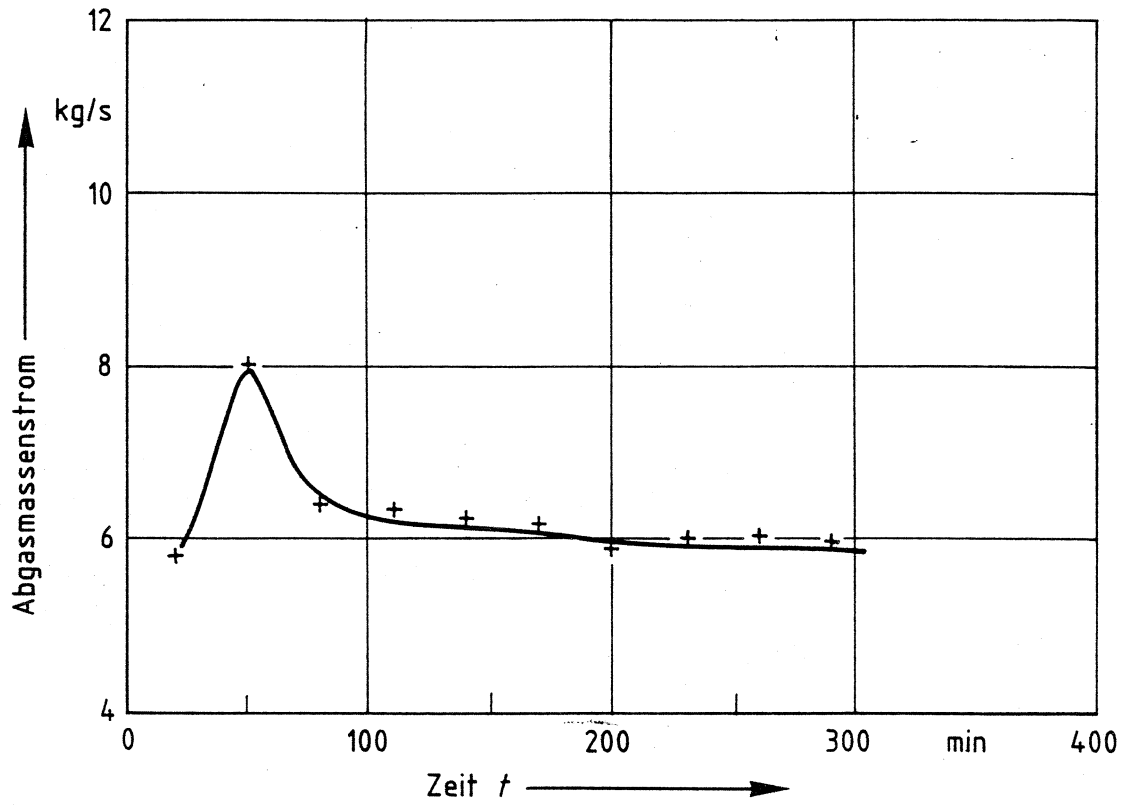


Bild C - 4: Schornstein B14; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

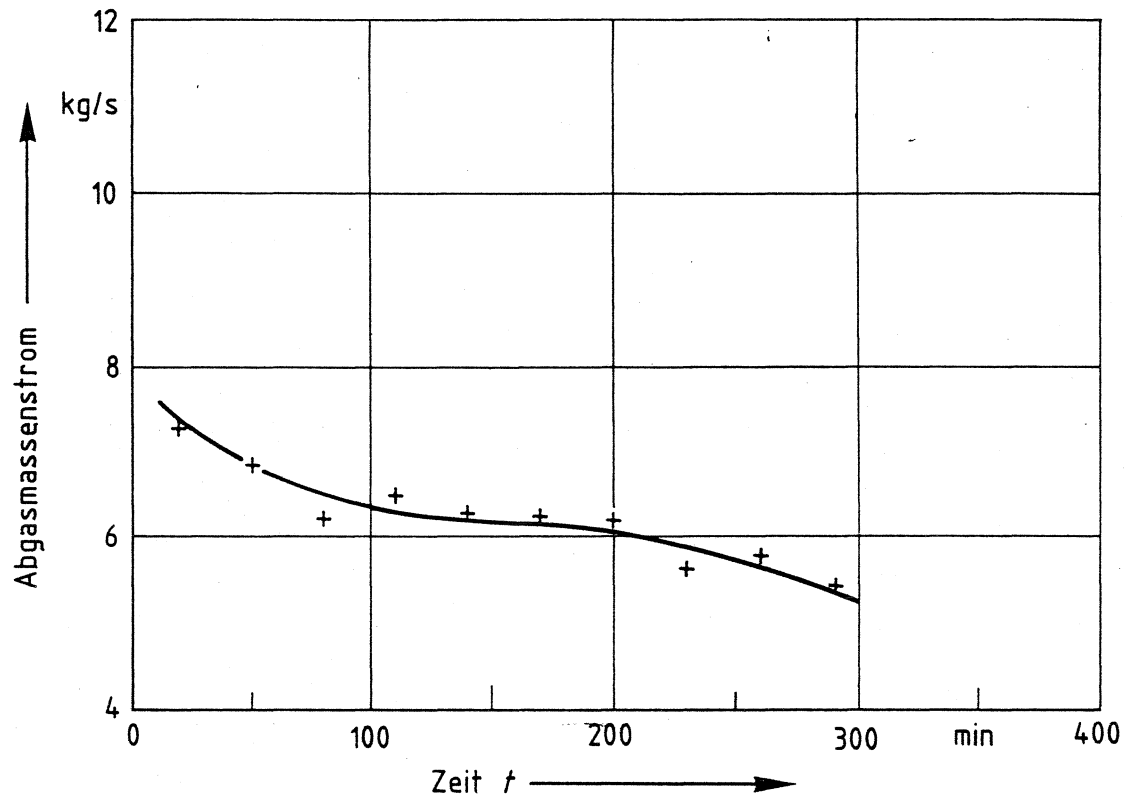


Bild C - 5: Schornstein B20; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

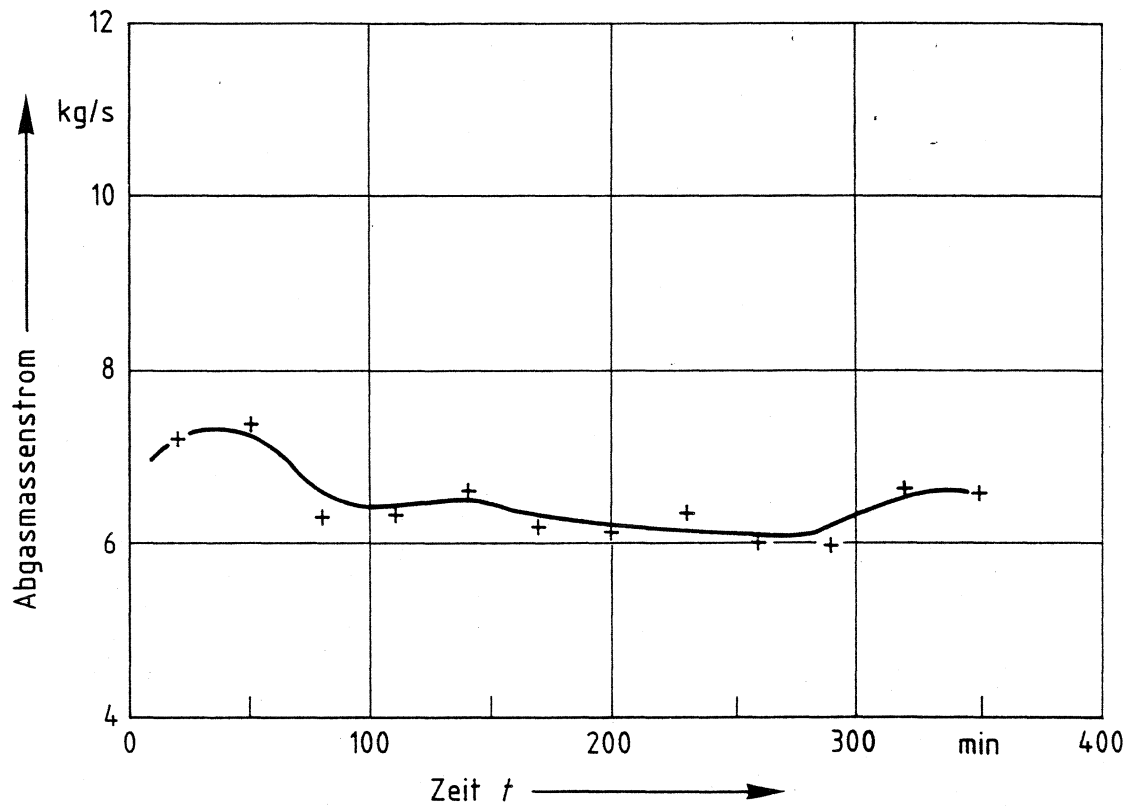


Bild C - 6: Schornstein B26; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

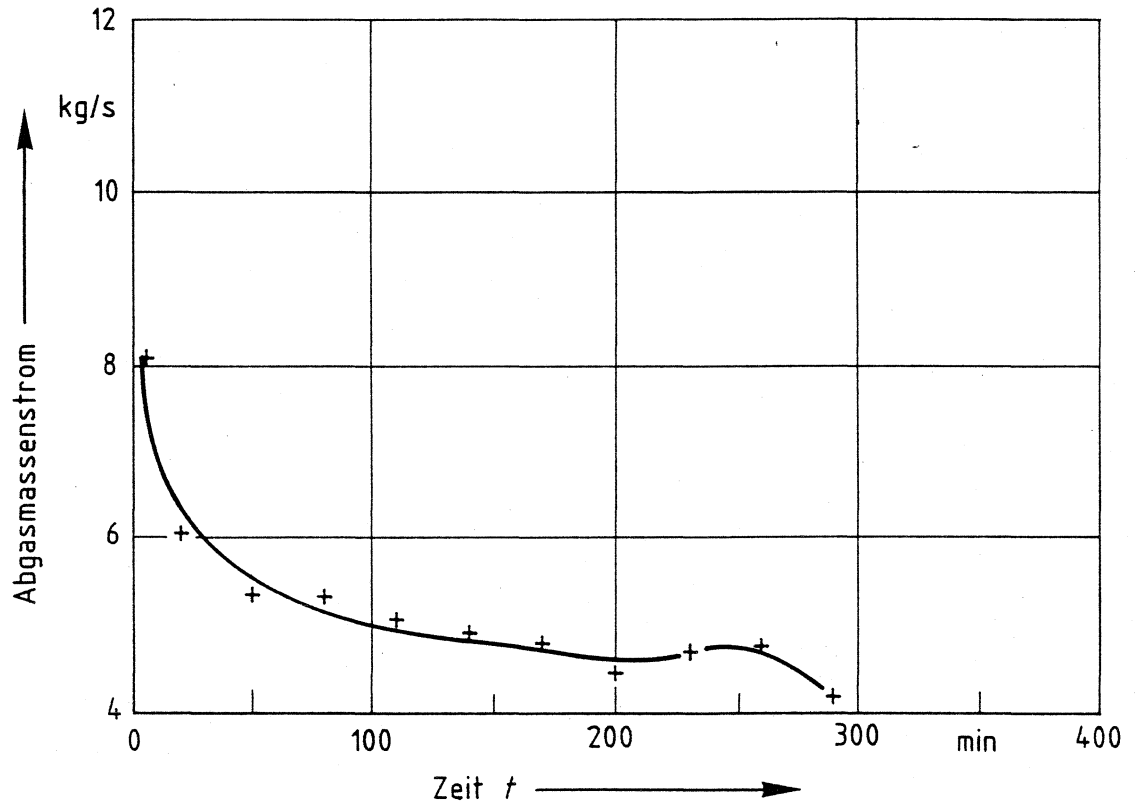


Bild C - 7: Schornstein C14; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

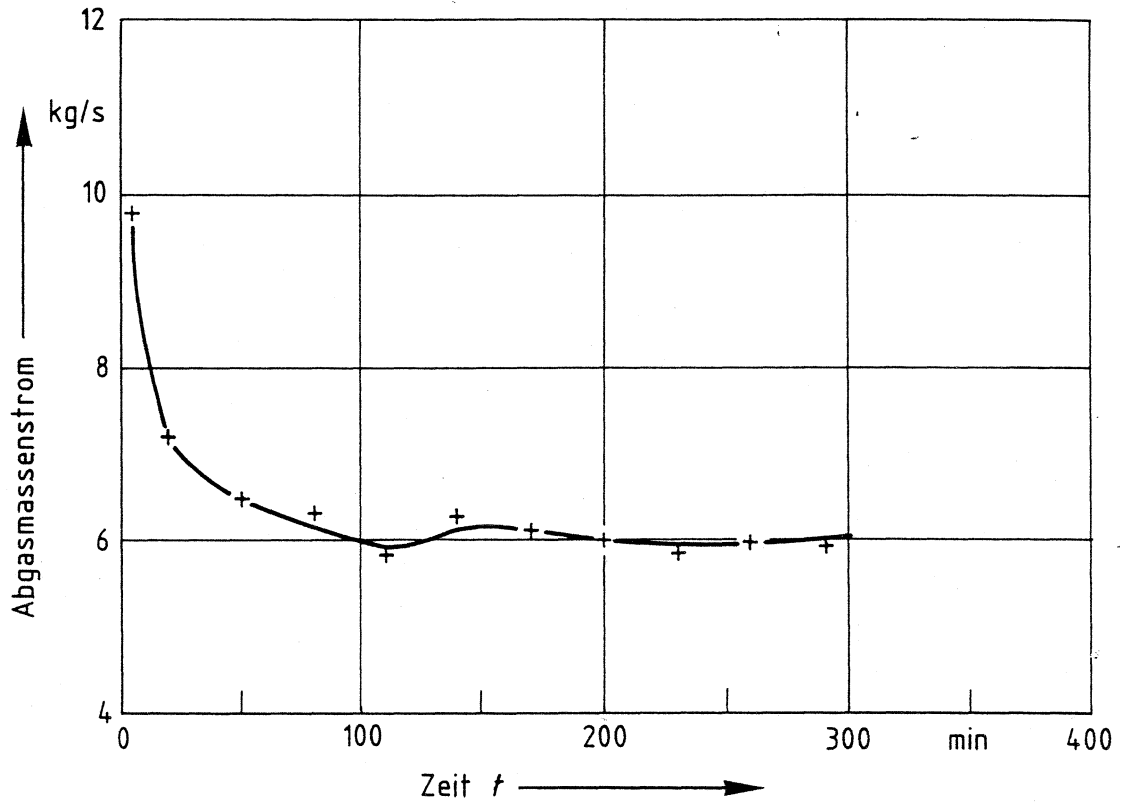


Bild C - 8: Schornstein C20, gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

Anlage C

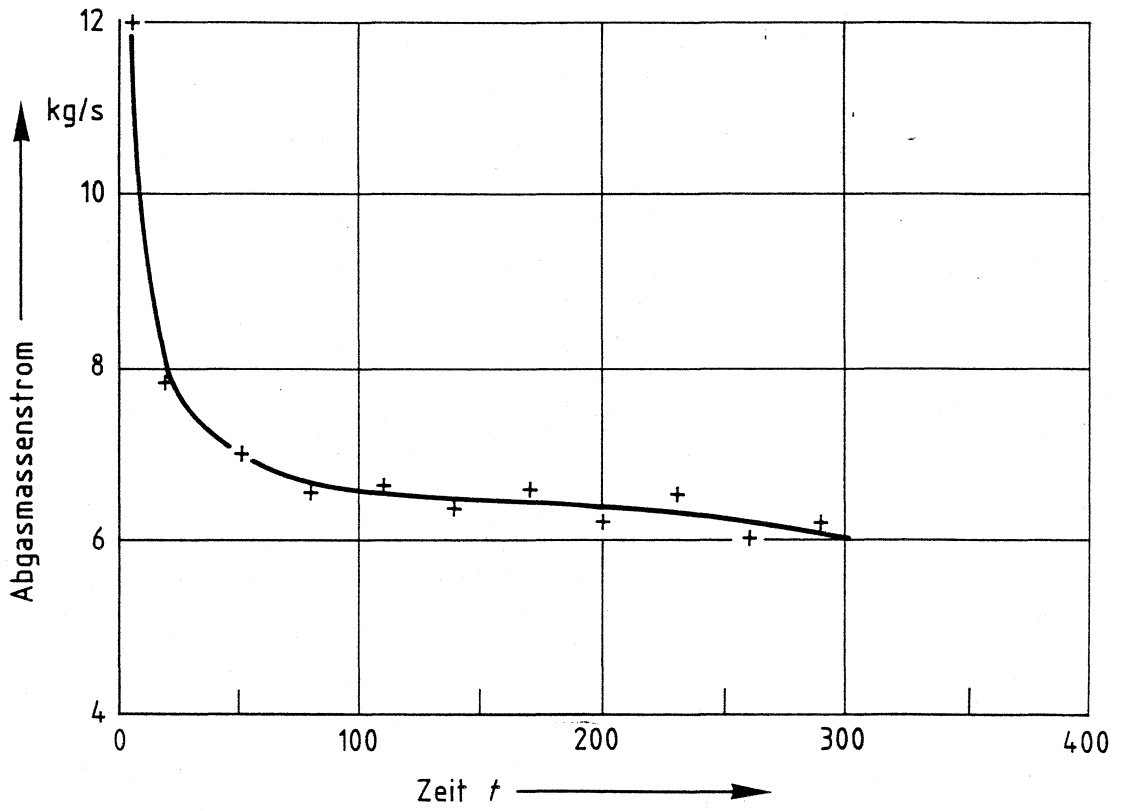


Bild C - 9: Schornstein C26; gemessener Abgasmassenstrom in Abhängigkeit von der Zeit t

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 18 160 Teil 6 [1]

11.4 Anlage D

(Bilder D-1 bis D-9)

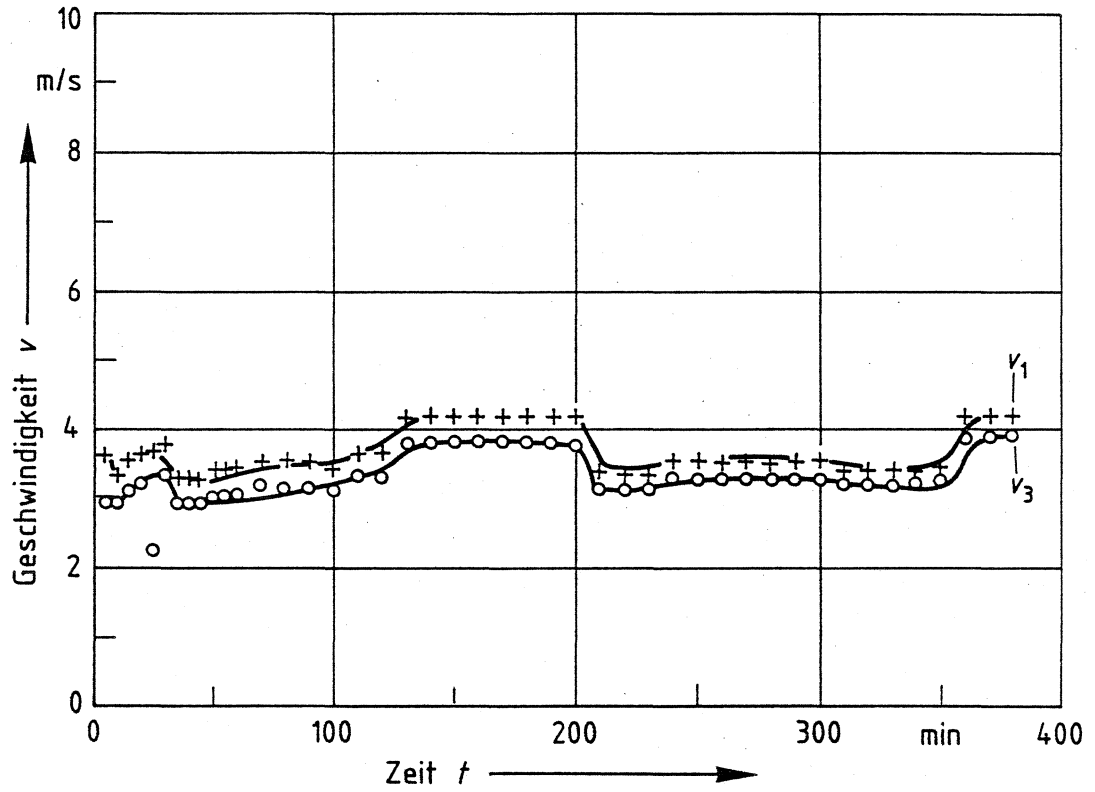


Bild D-1: Schornstein A14; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

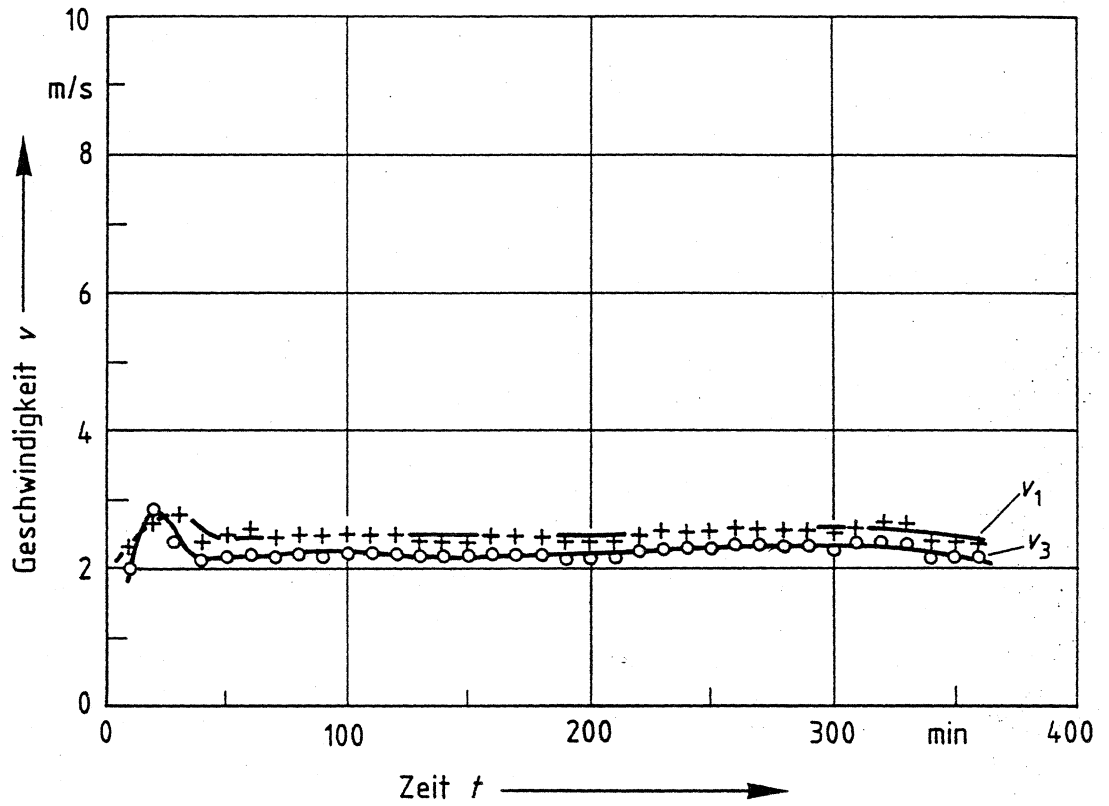


Bild D-2: Schornstein A20; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

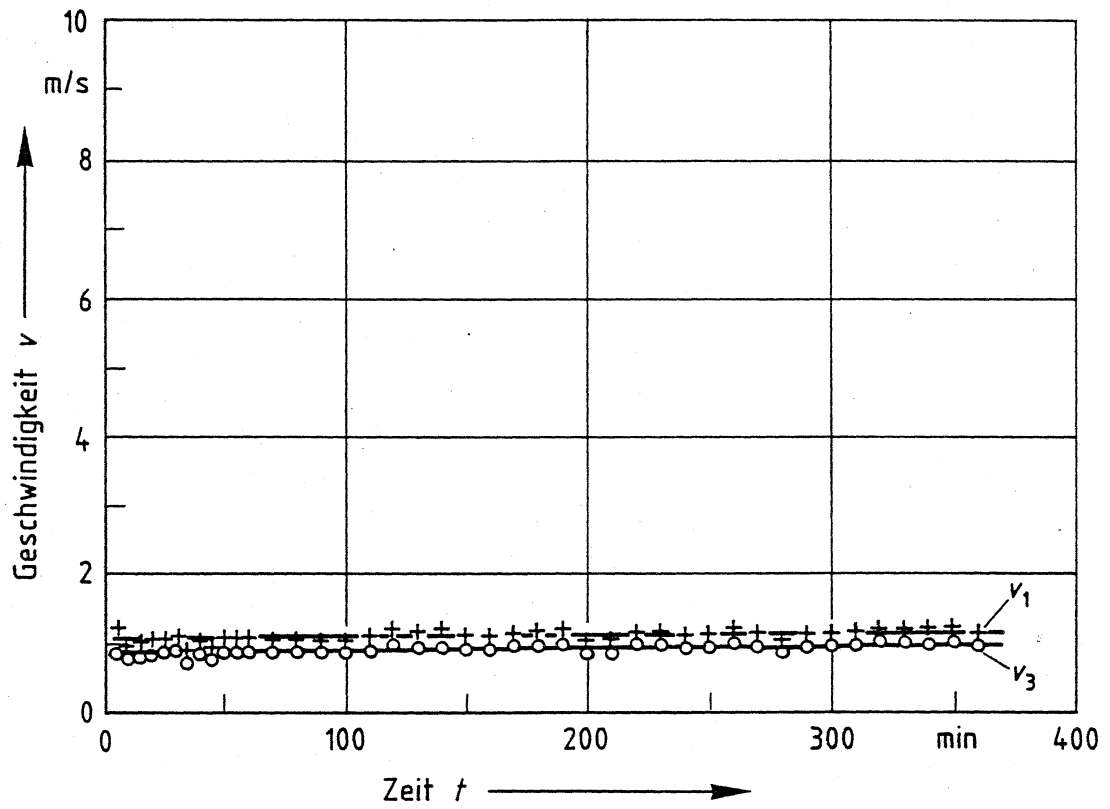


Bild D-3: Schornstein A26; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1(v_1) u. 3(v_3) [5]

Anlage D

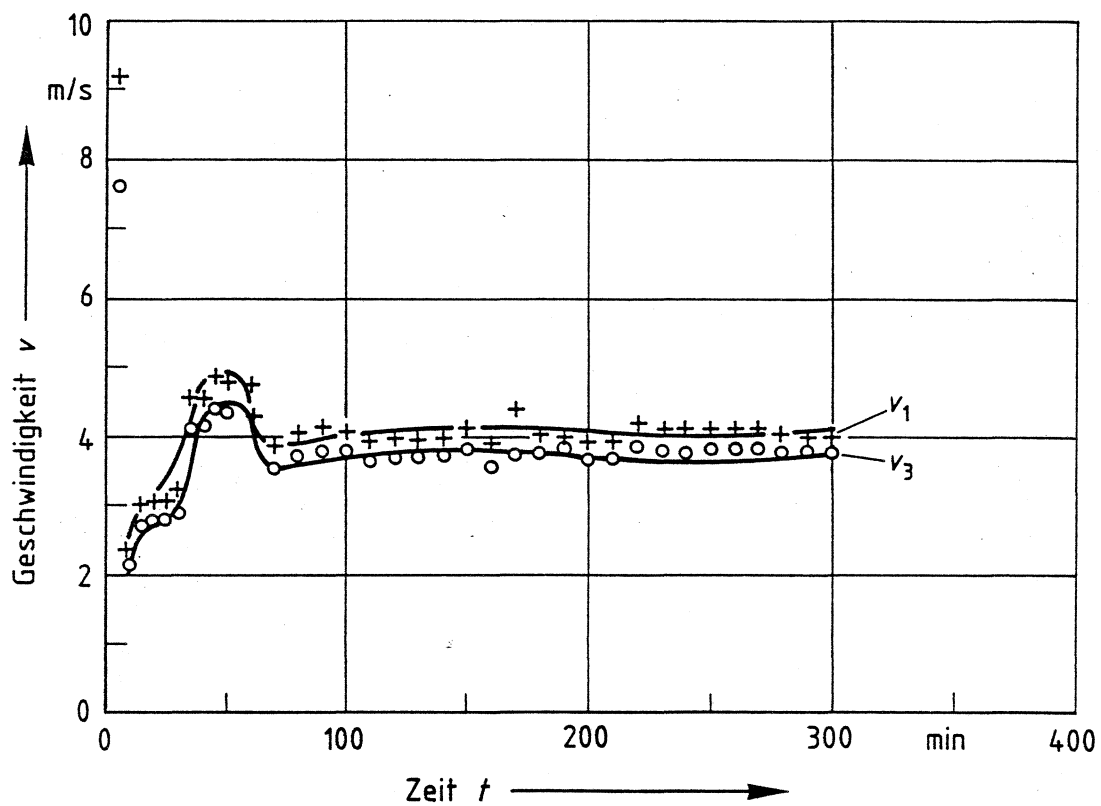


Bild D-4: Schornstein B14; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

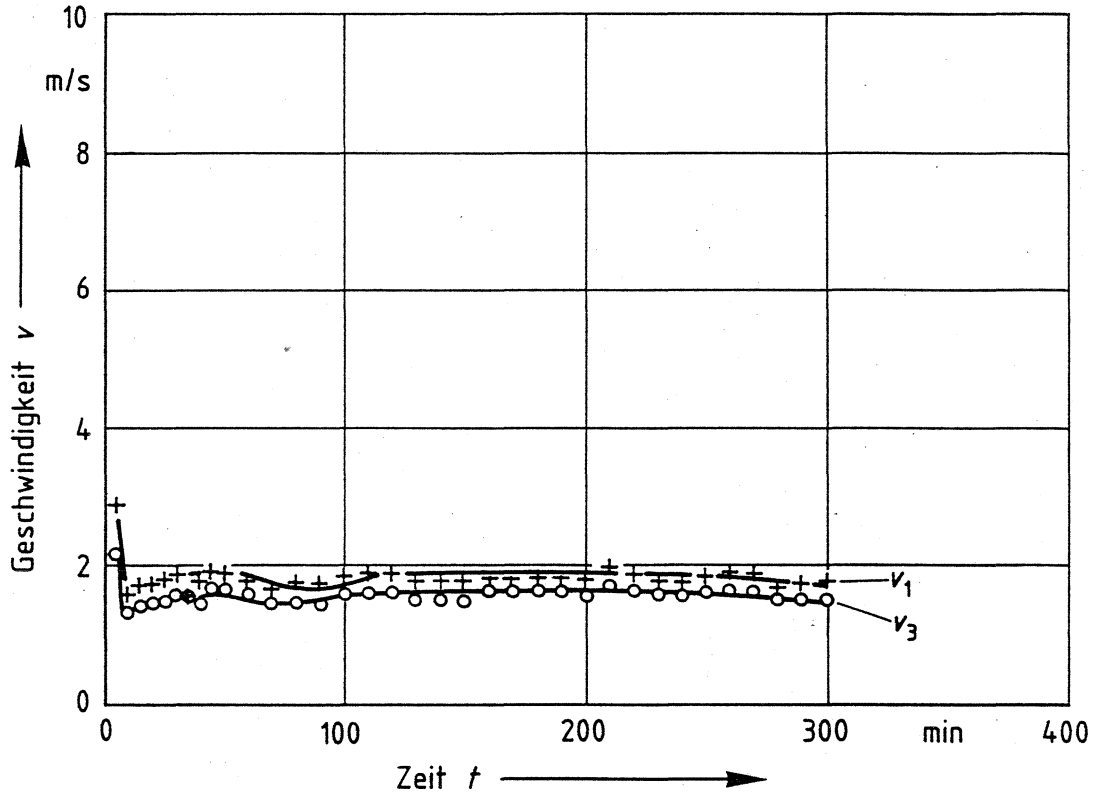


Bild D-5: Schornstein B20; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

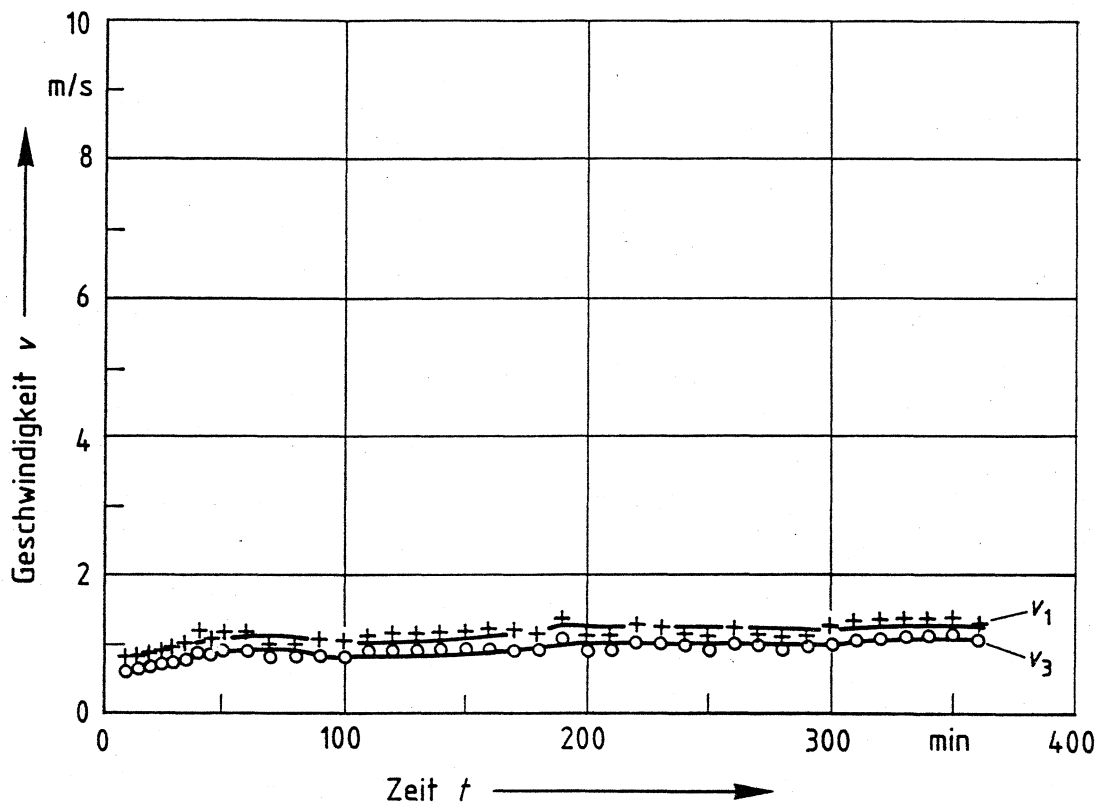


Bild D-6: Schornstein B26; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

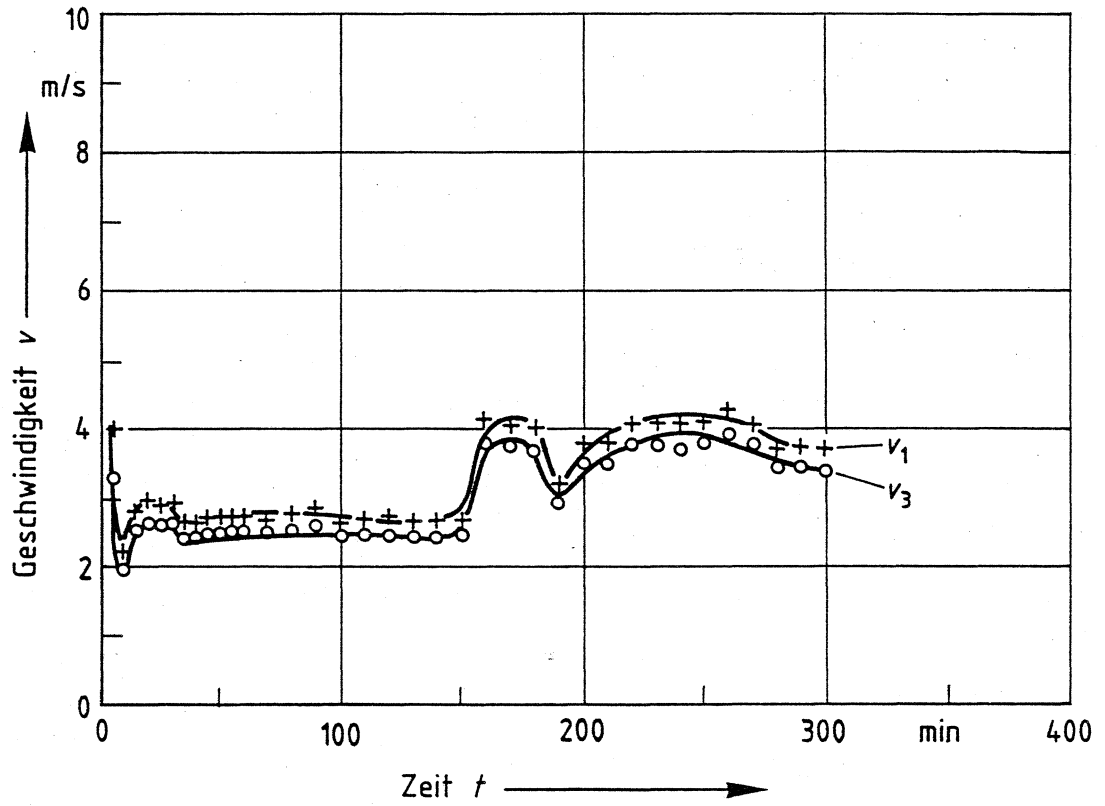


Bild D-7: Schornstein C14; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

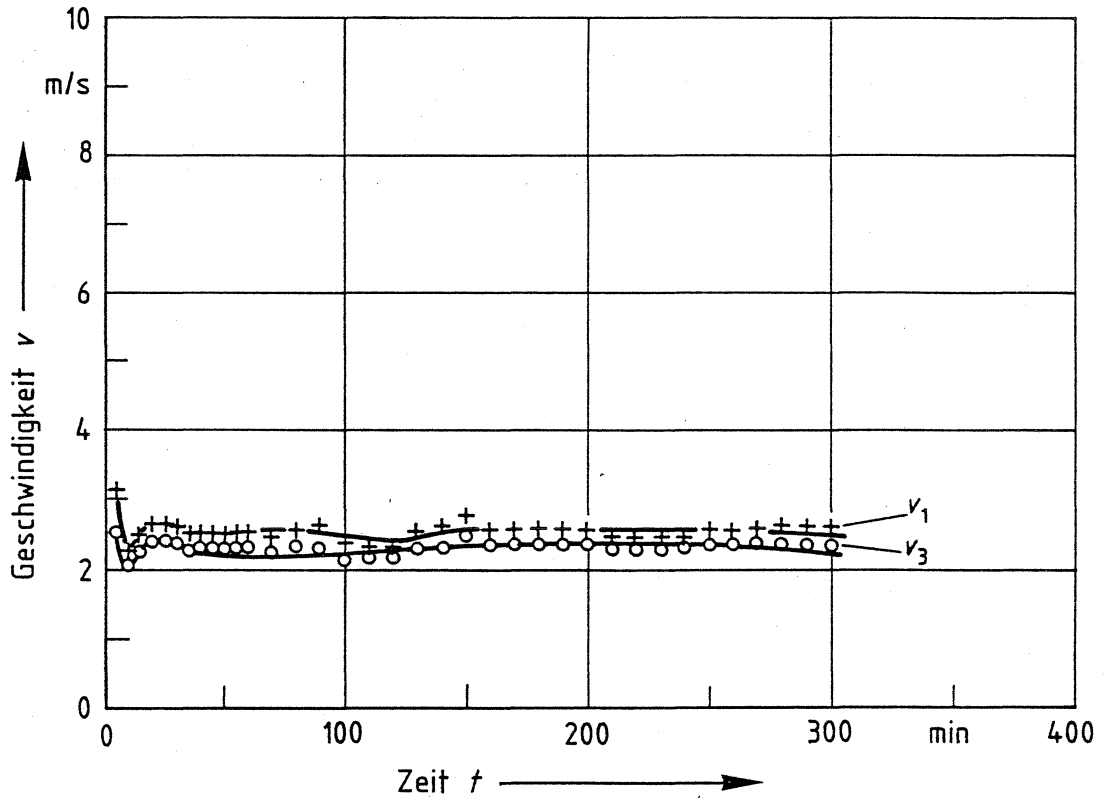


Bild D-8: Schornstein C20; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

Anlage D

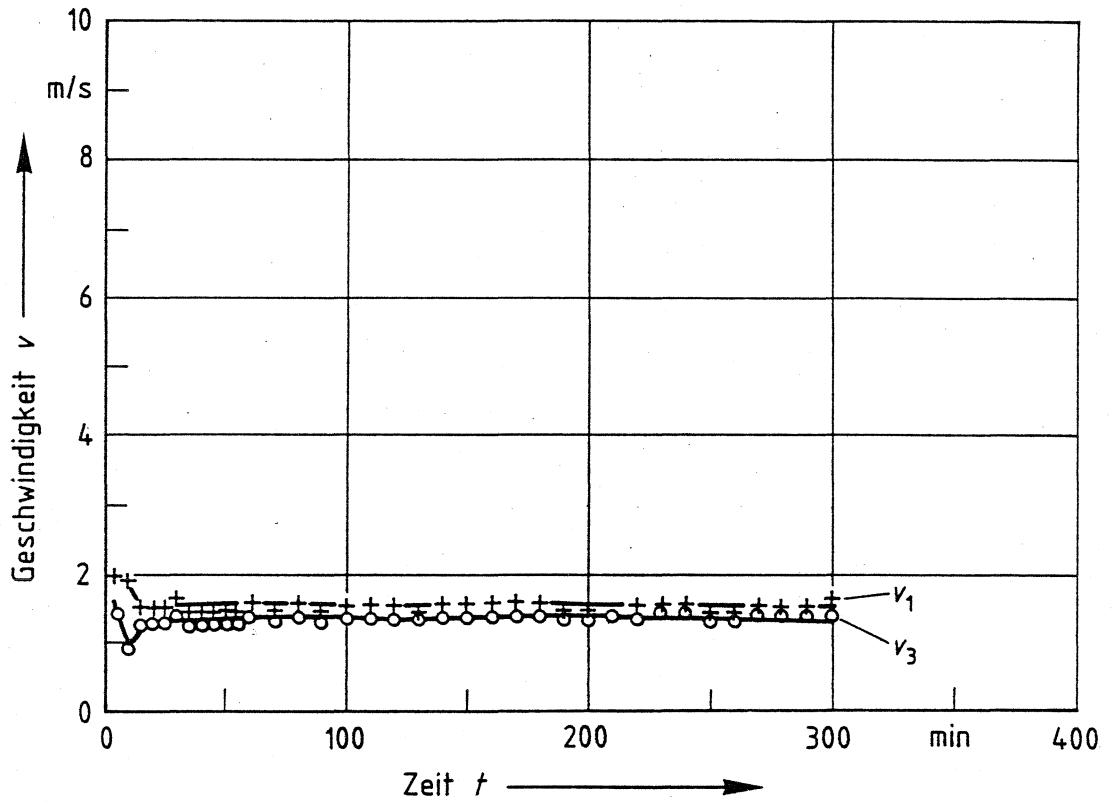


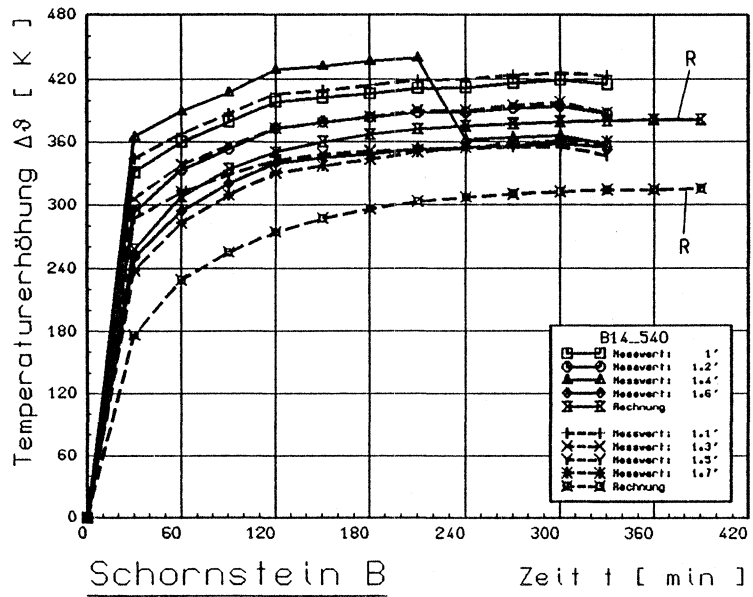
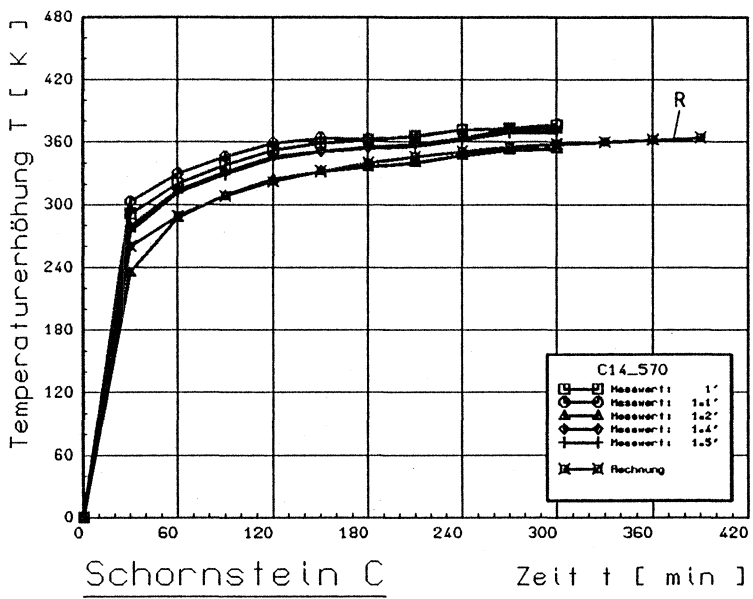
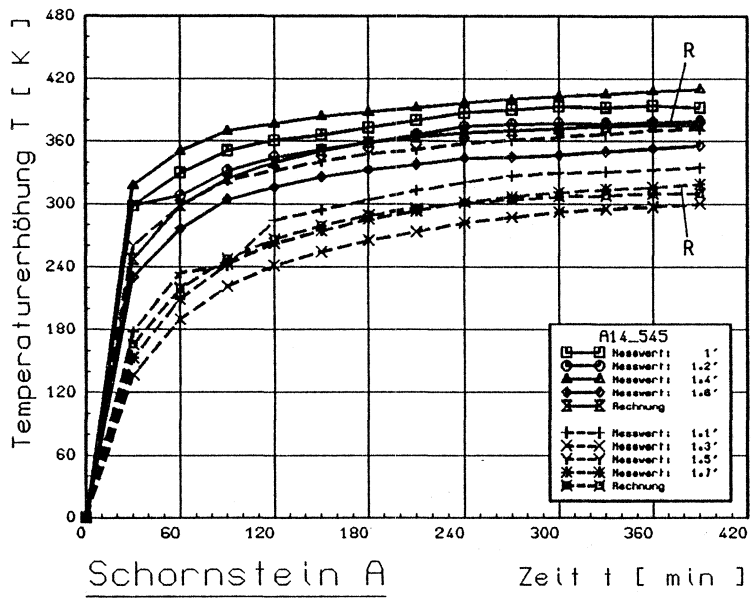
Bild D-9: Schornstein C25; berechnete Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t in den Meßquerschnitten 1 (v_1) u. 3 (v_3) [5]

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.



Innentemperaturen

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

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 384$	379	369	K
Standardabweichung	$s = 23$	28	10	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 375$	380	364	K

Schornstein A und B

Schornstein C

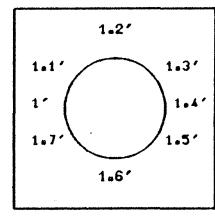
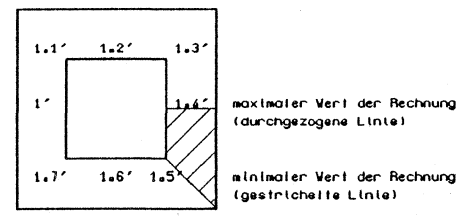
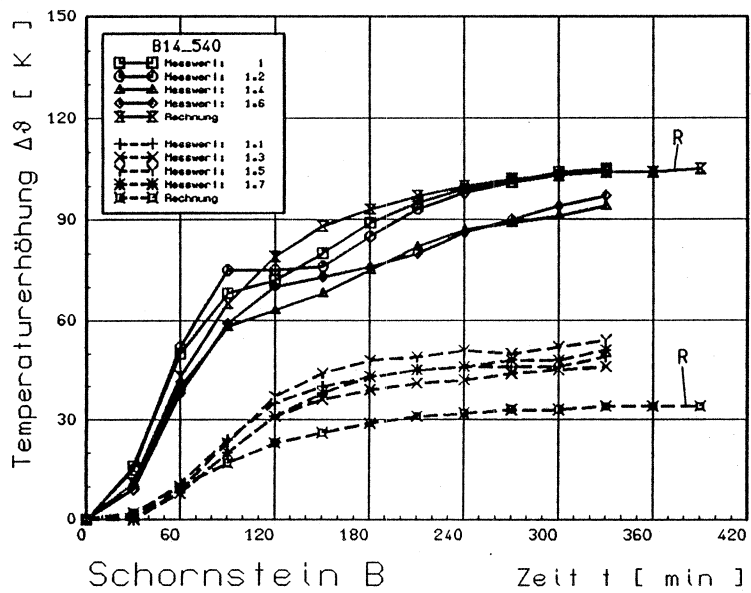
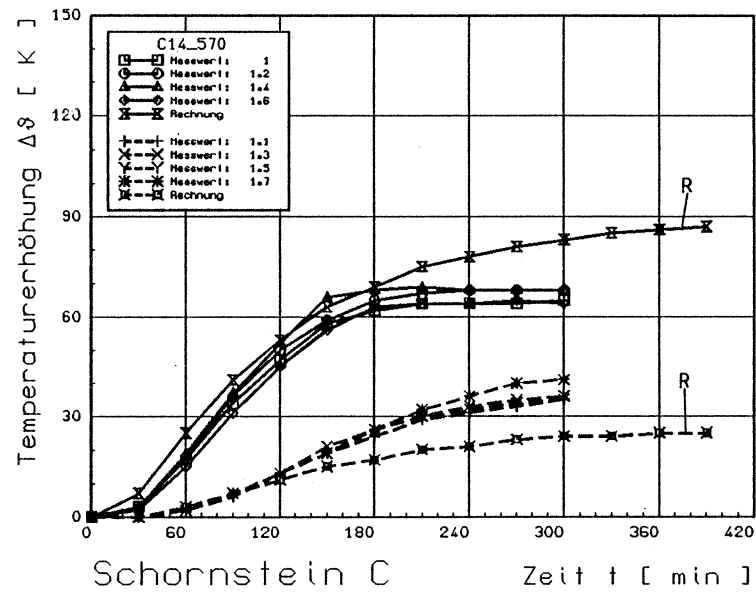
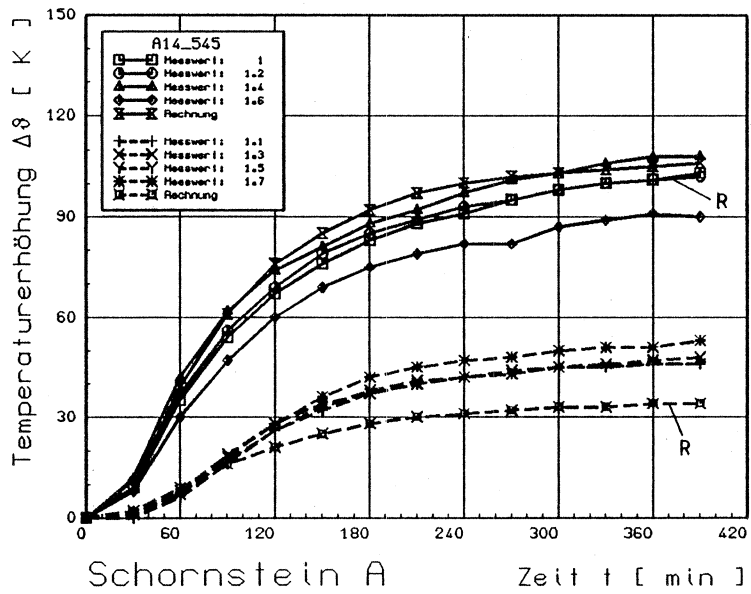


Bild E-1



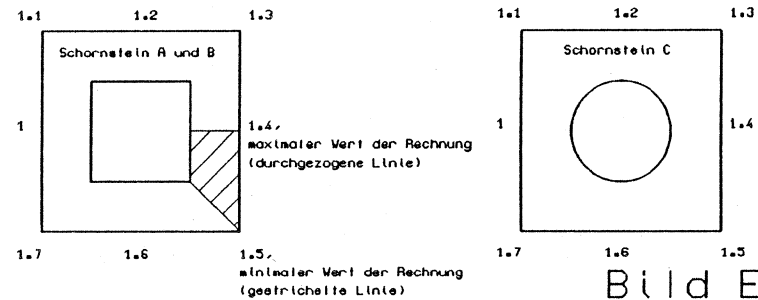
Ausstemperaturen

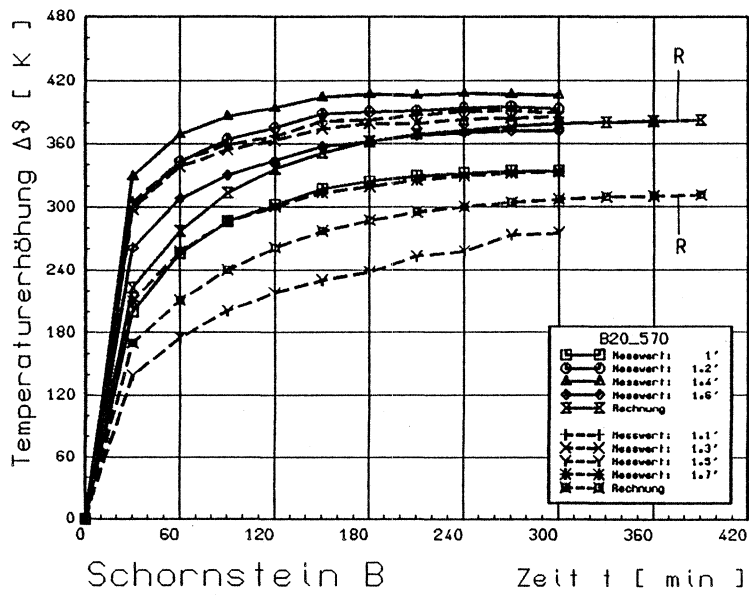
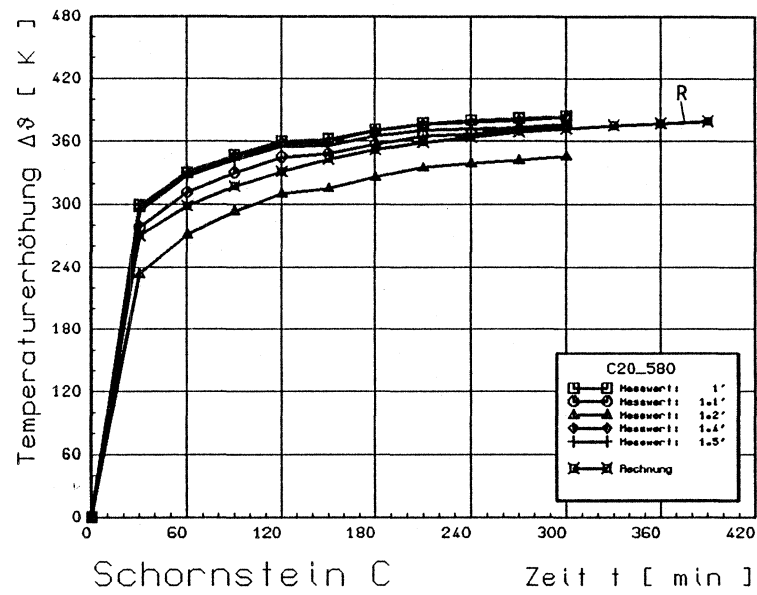
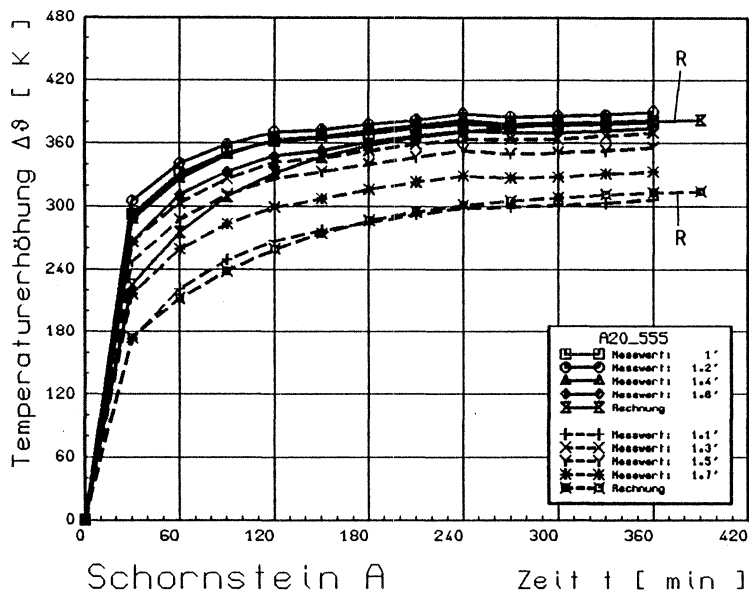
Maximalwerte im stationären Zustand (1.1, 1.2, 1.4, 1.6)

Schornstein A B C Dimension

Mittelwert der Temperaturerhöhung $\Delta \vartheta_P = 101$ 100 66 K
 Standardabweichung $s = 8$ 6 2 K

Rechnung (R) $\Delta \vartheta_R = 106$ 104 85 K



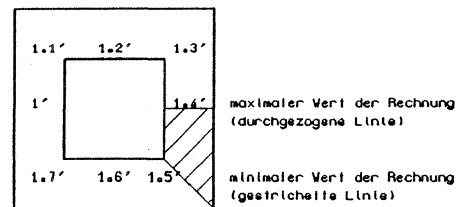


Innentemperaturen

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

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 382$	376	373	K
Standardabweichung	$s = 7$	31	15	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 381$	379	370	K

Schornstein A und B



Schornstein C

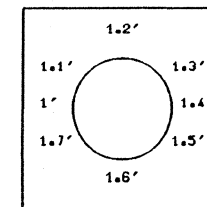
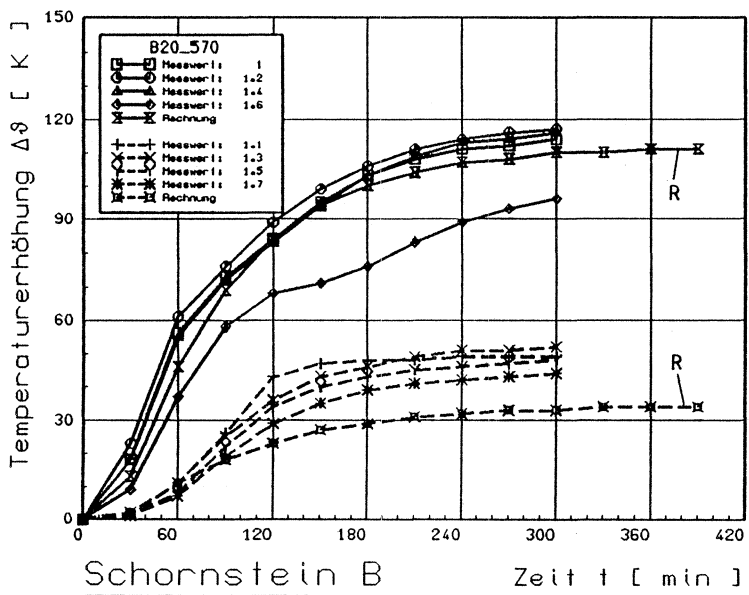
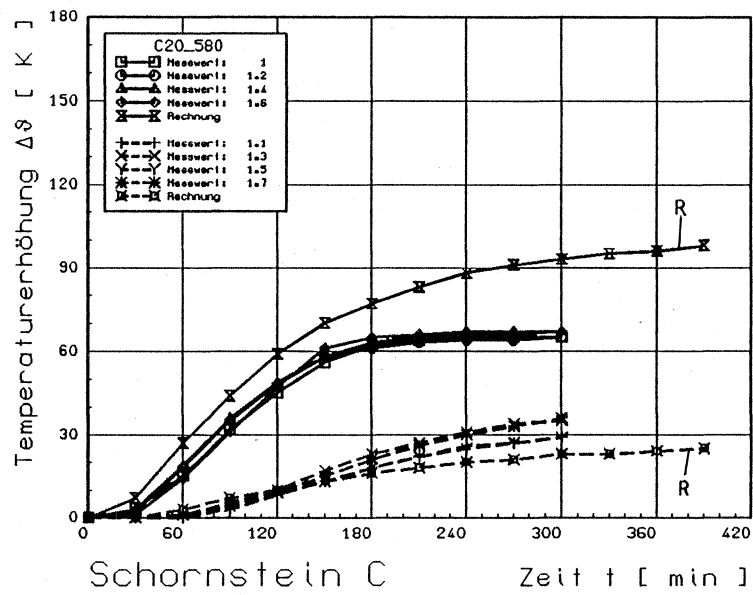
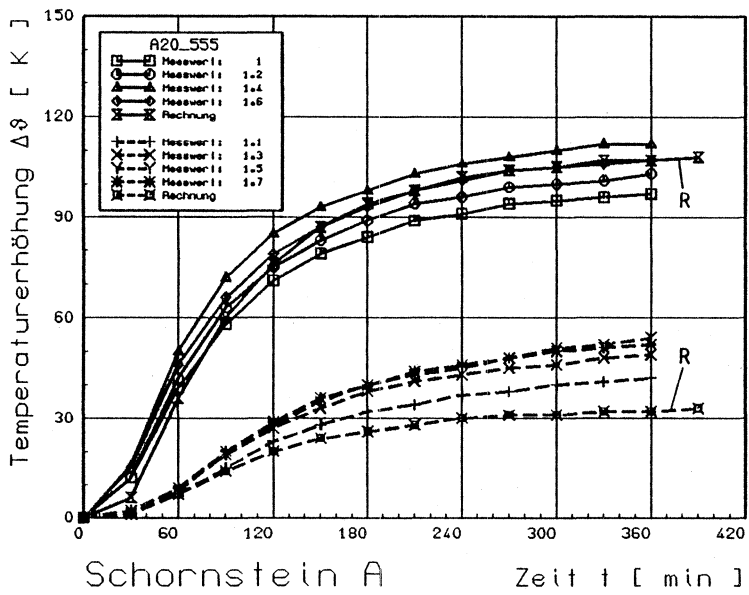


Bild E-3



Ausstemperaturen

Maximalwerte im stationären Zustand (1.1, 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

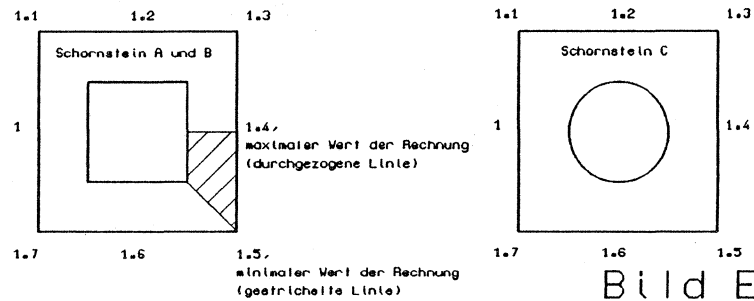
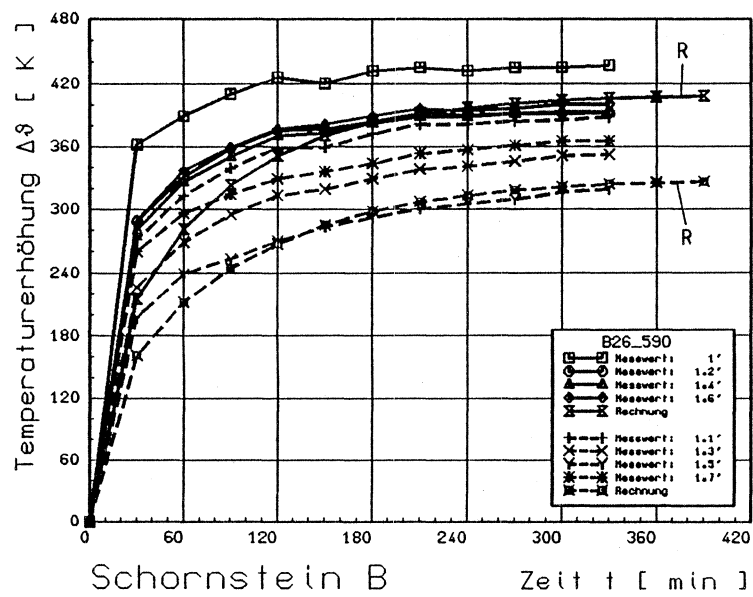
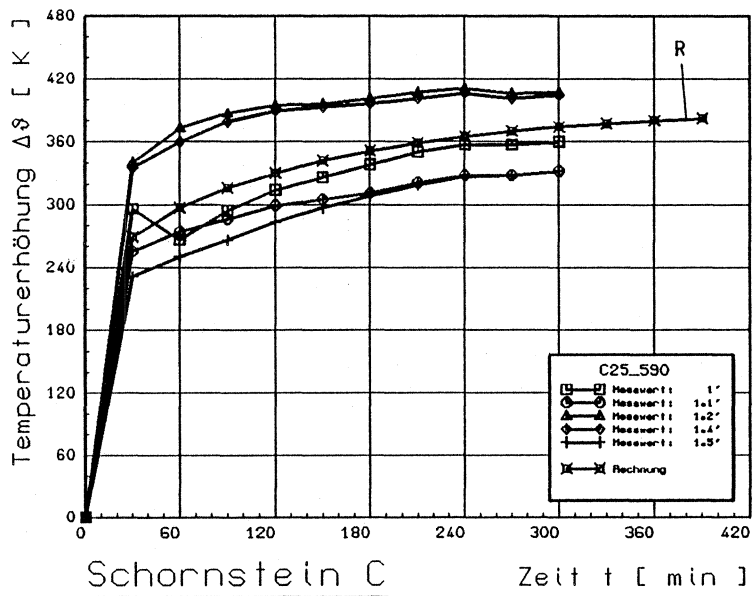
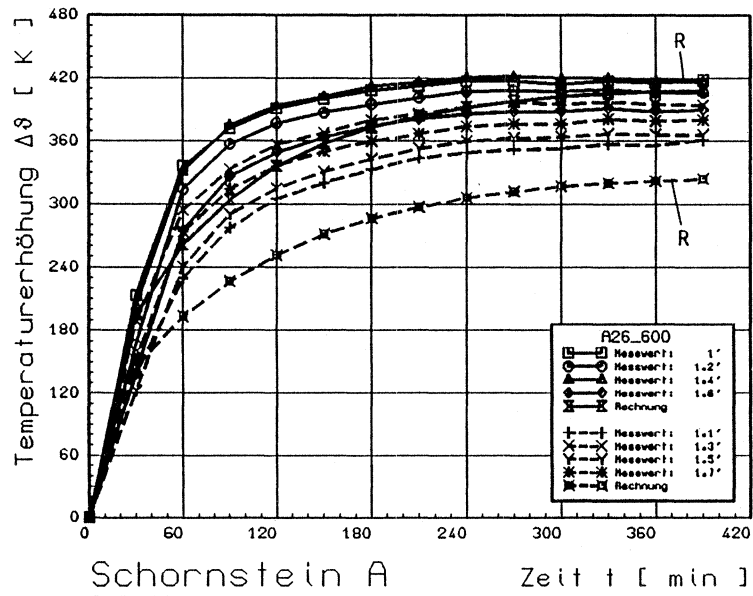


Bild E-4

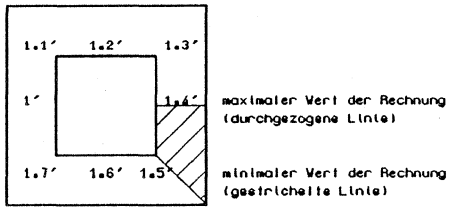


Innentemperaturen

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

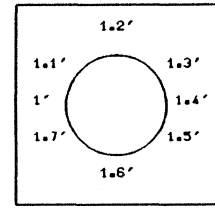
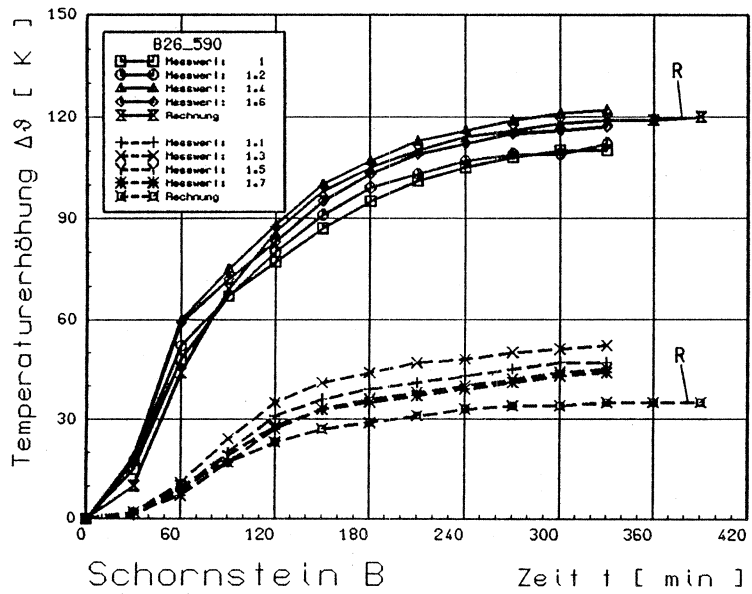
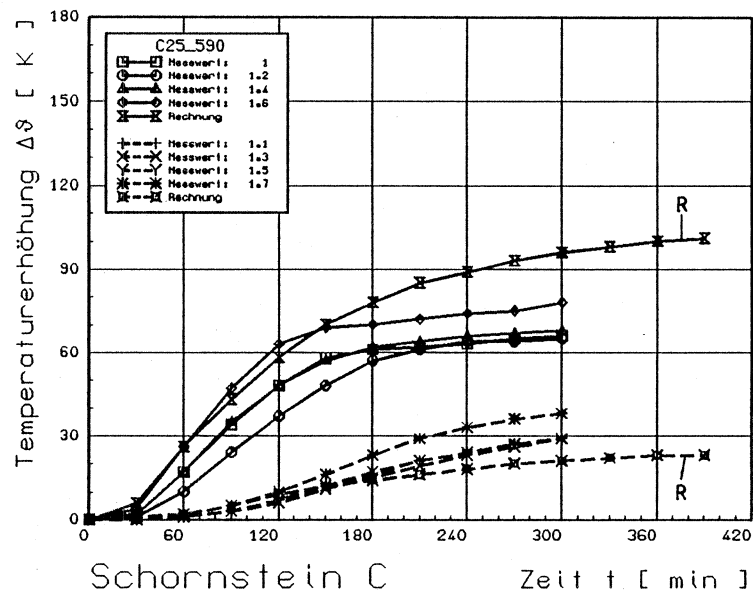
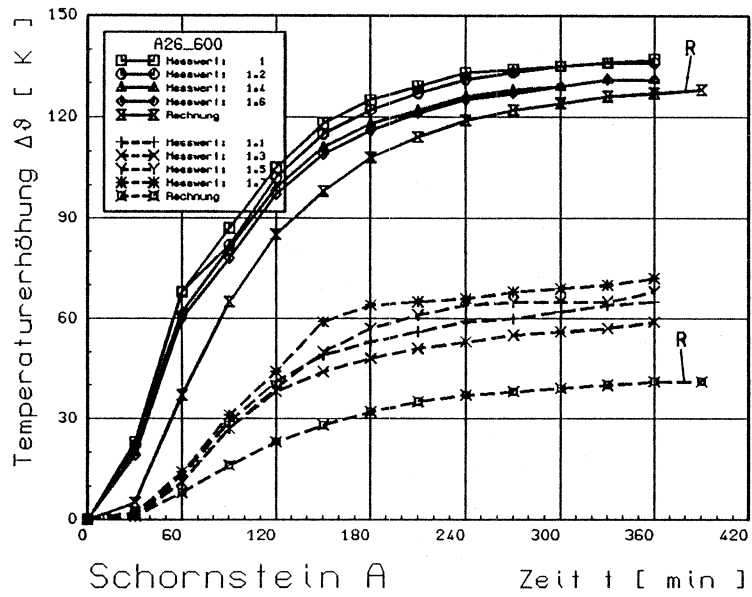


Bild E-5



Ausentemperaturen

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

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

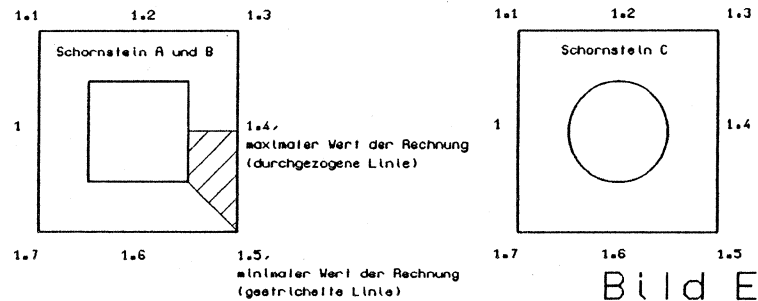
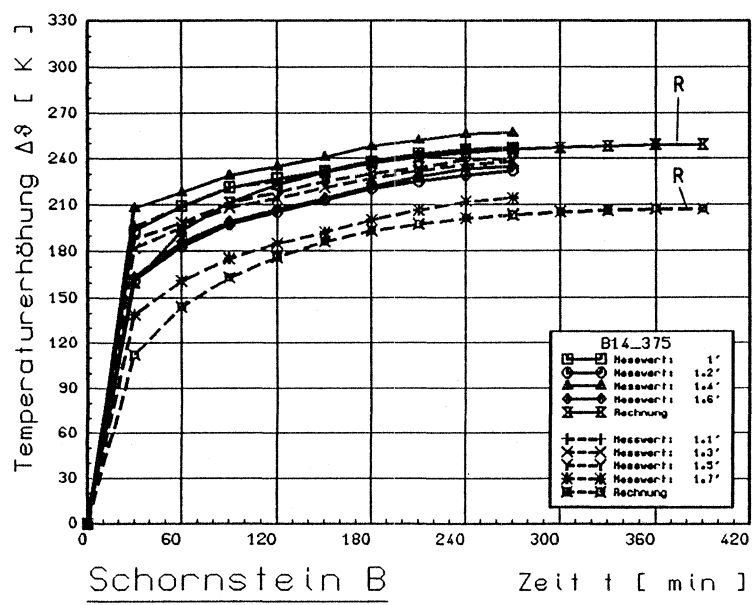
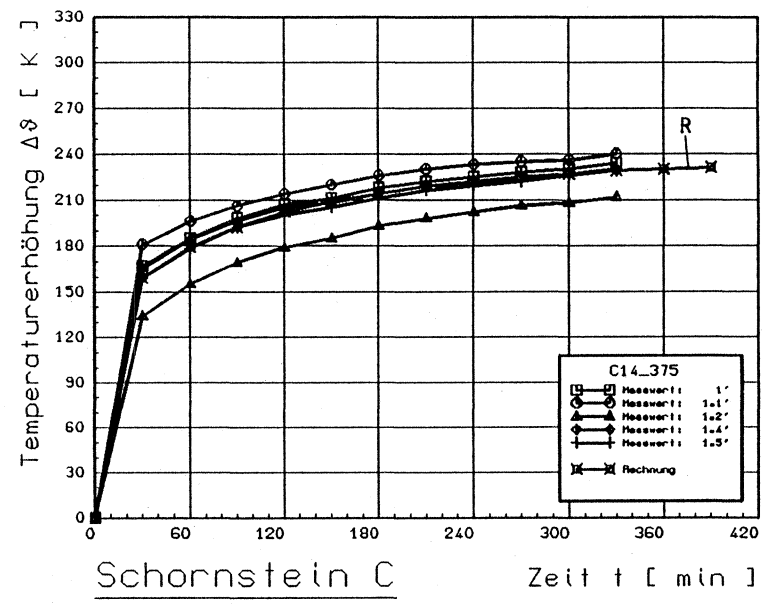
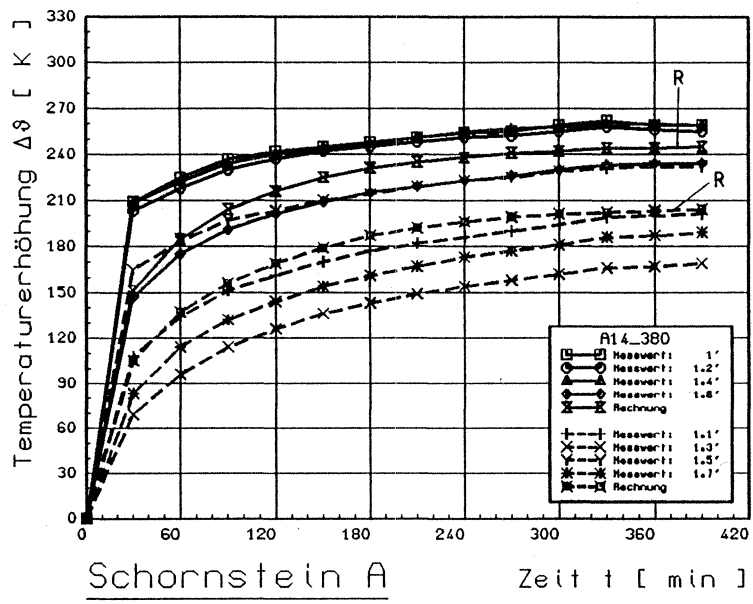


Bild E-6

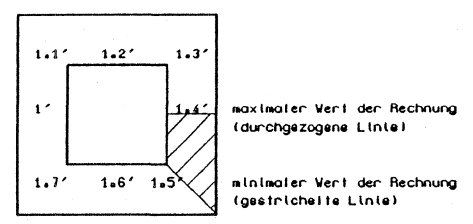


Innentemperaturen

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

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 252$	243	229	K
Standardabweichung	$s = 12$	12	10	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 245$	246	229	K

Schornstein A und B



Schornstein C

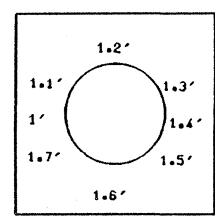
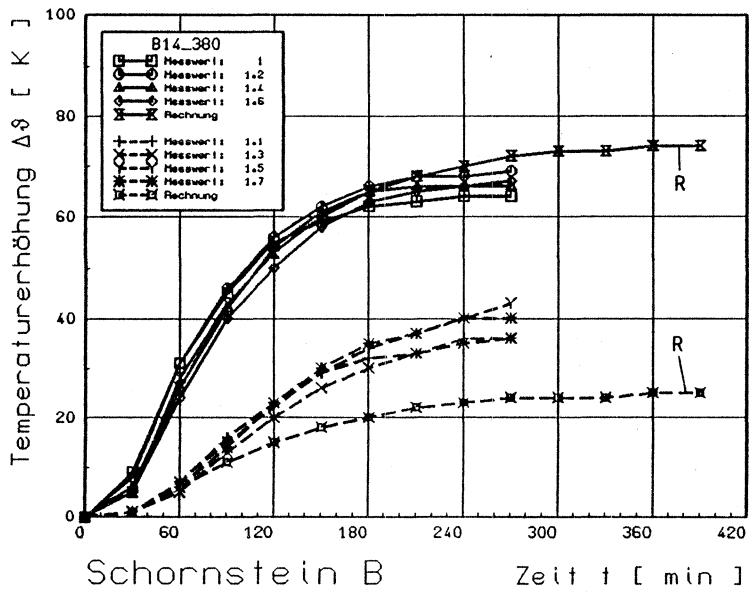
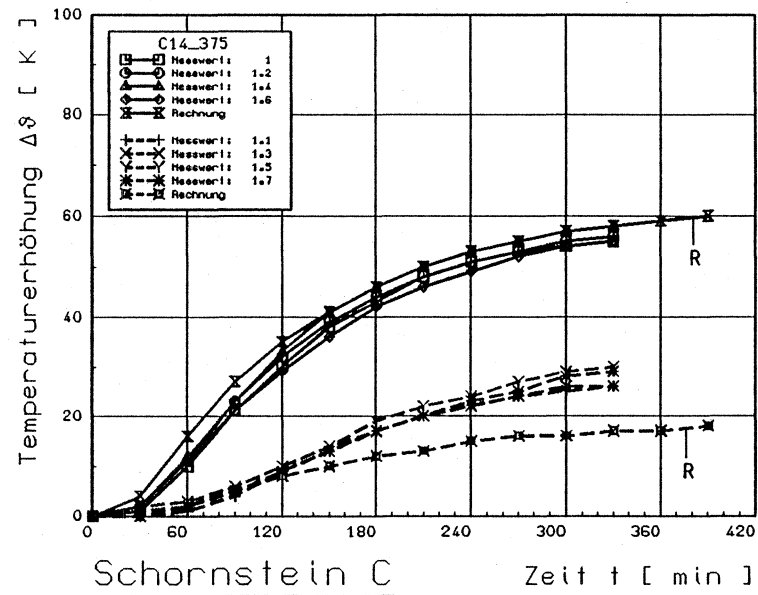
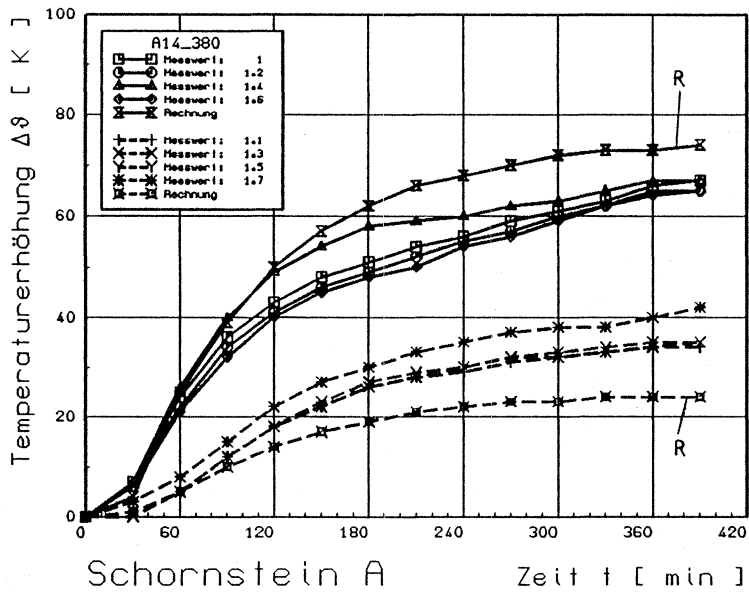


Bild E-7



Aussentemperaturen

Maximalwerte im stationären Zustand (1.1, 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

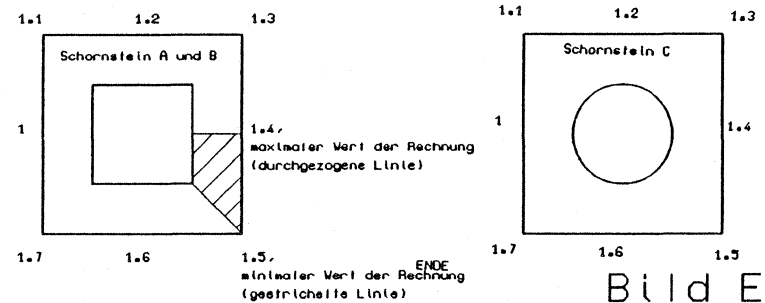
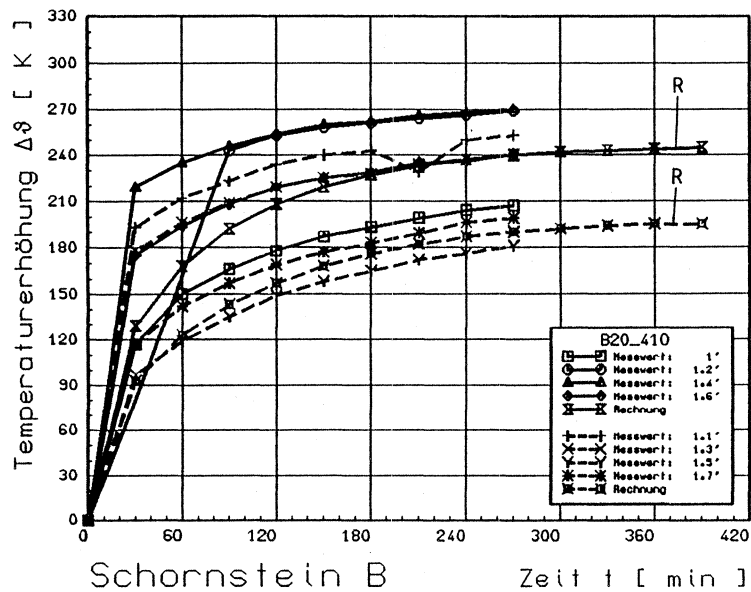
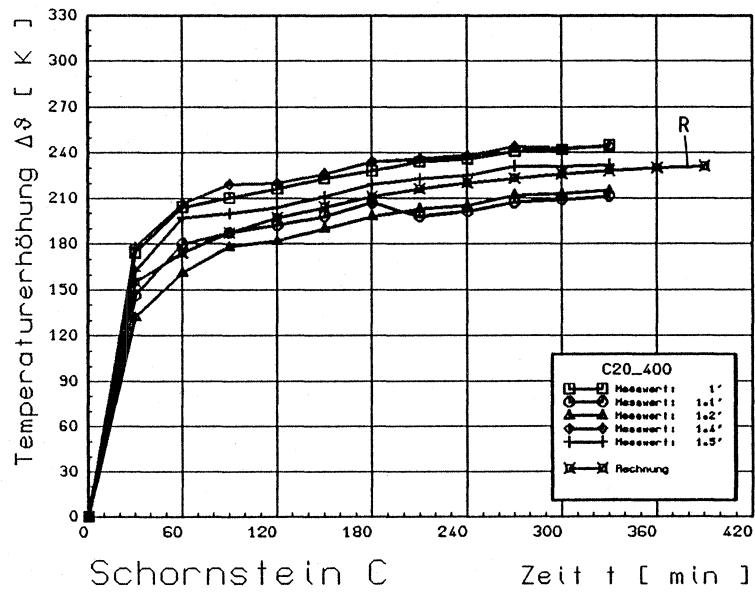
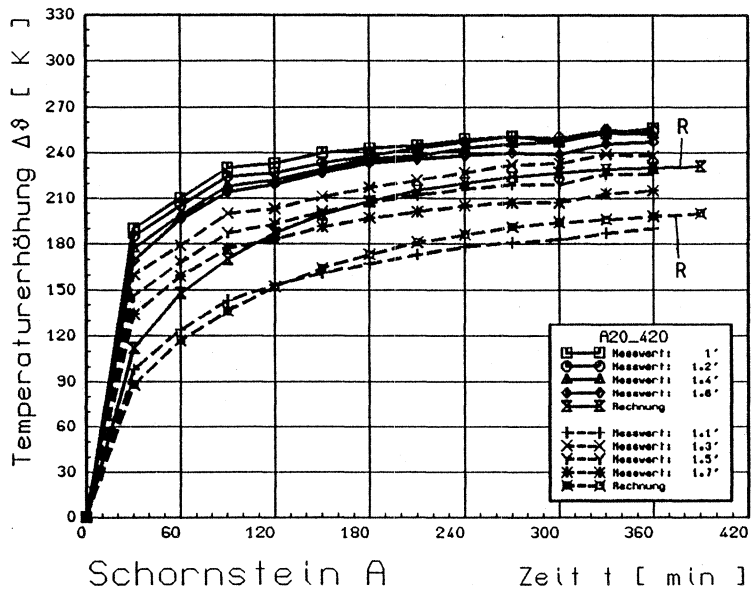


Bild E-8



Anlage E

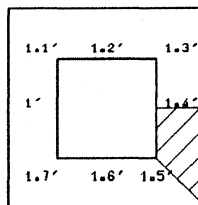
Innentemperaturen

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

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

Schornstein A und B

Schornstein C



maximaler Vert der Rechnung (durchgezogene Linie)

minimaler Vert der Rechnung (gestrichelte Linie)

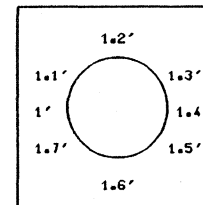
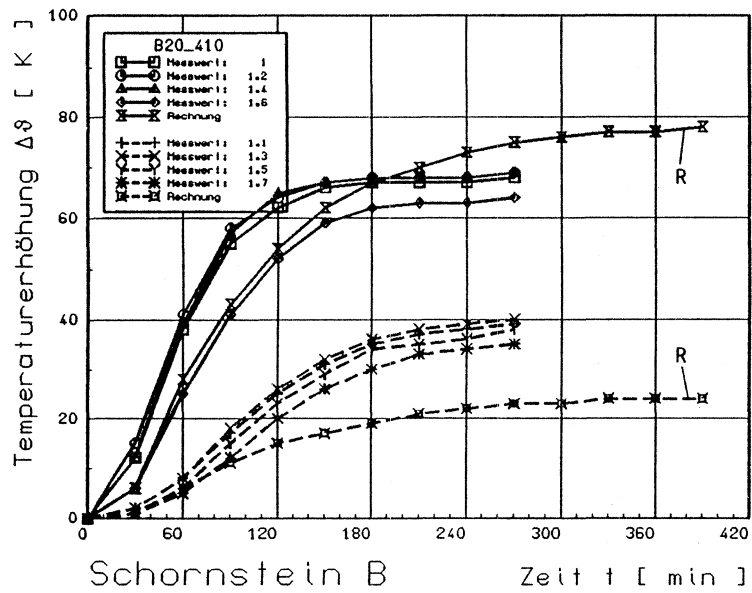
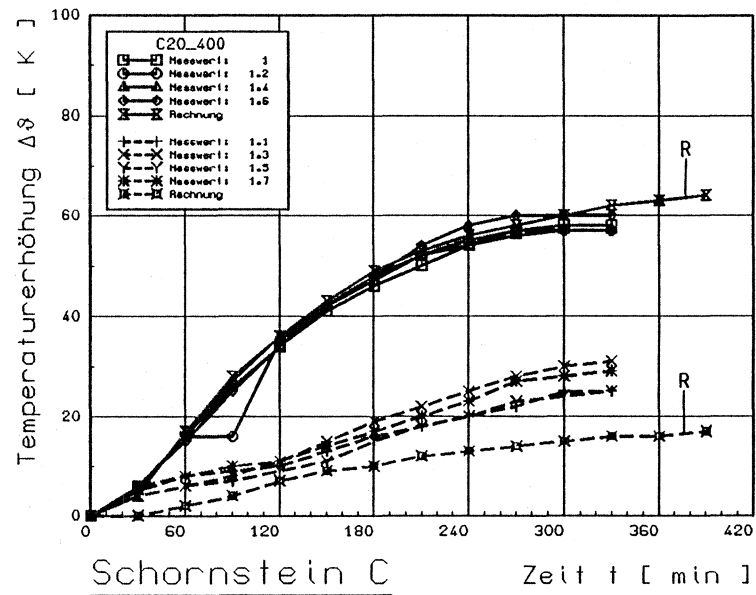
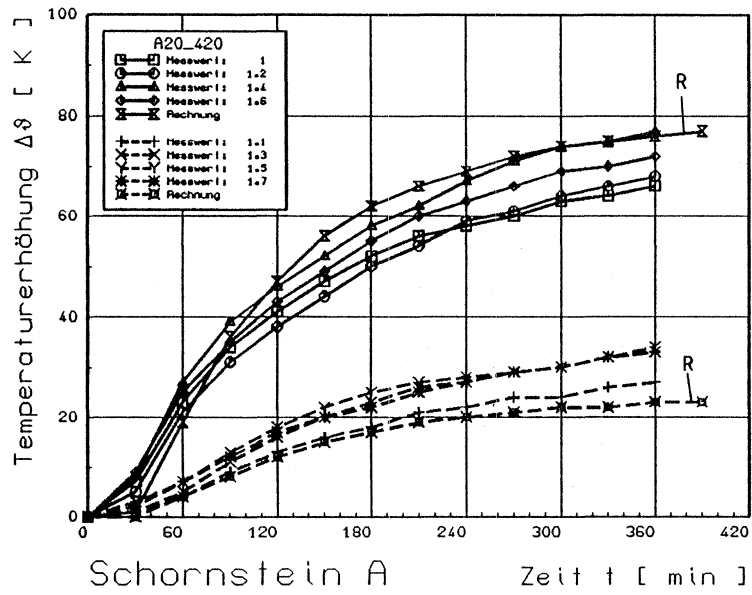


Bild E-9



Russentemperaturen

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
--------------	---------------------------	----	----	---

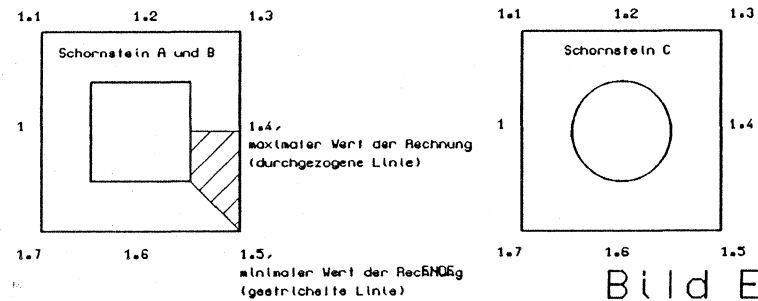
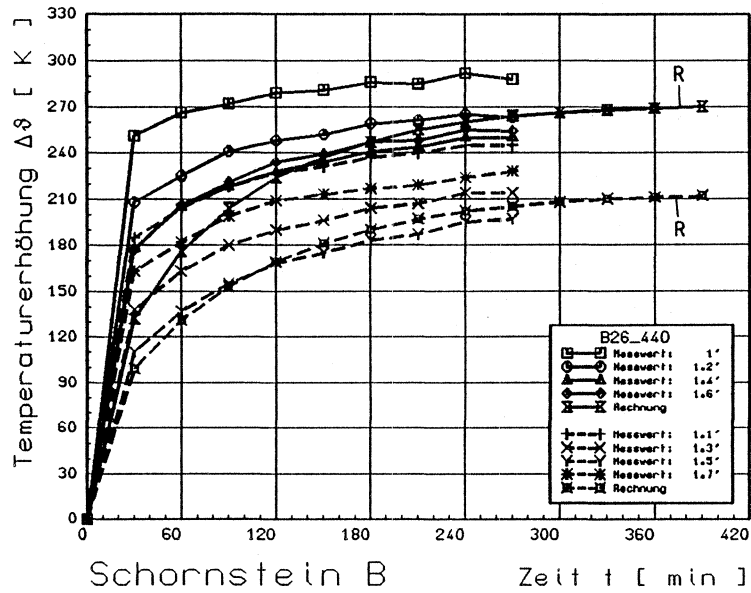
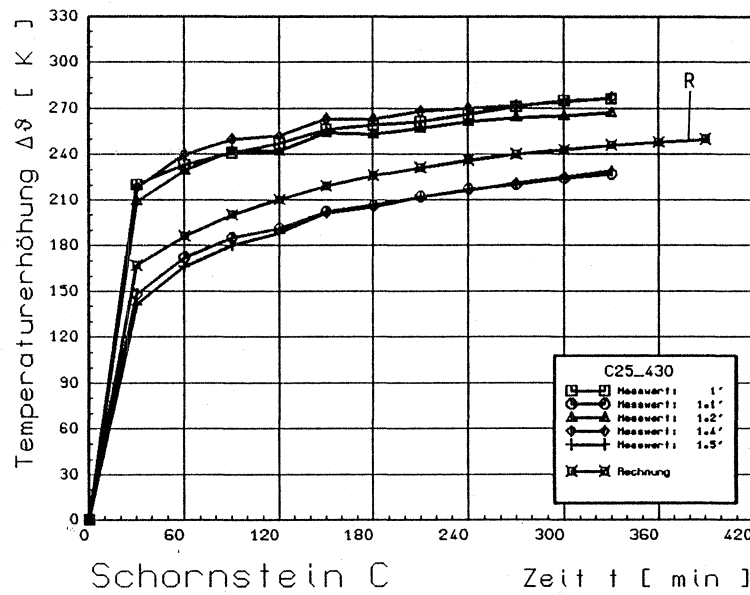
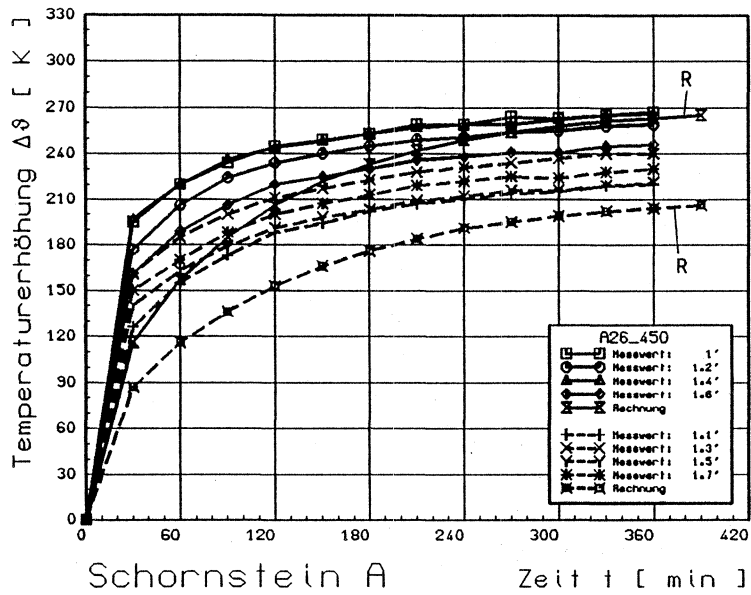


Bild E-10



Innentemperaturen

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

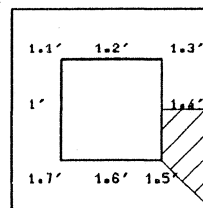
Schornstein	A	B	C	Dimension
-------------	---	---	---	-----------

Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 260$	264	255	K
Standardabweichung	$s = 10$	17	25	K

Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 263$	264	244	K
--------------	----------------------------	-----	-----	---

Schornstein A und B

Schornstein C



maximaler Wert der Rechnung (durchgezogene Linie)

minimaler Wert der Rechnung (gestrichelte Linie)

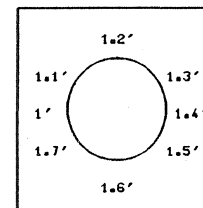
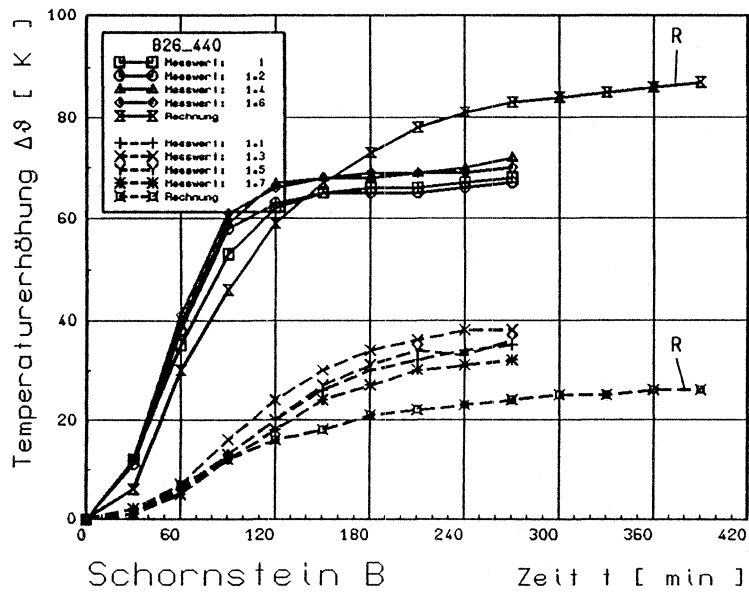
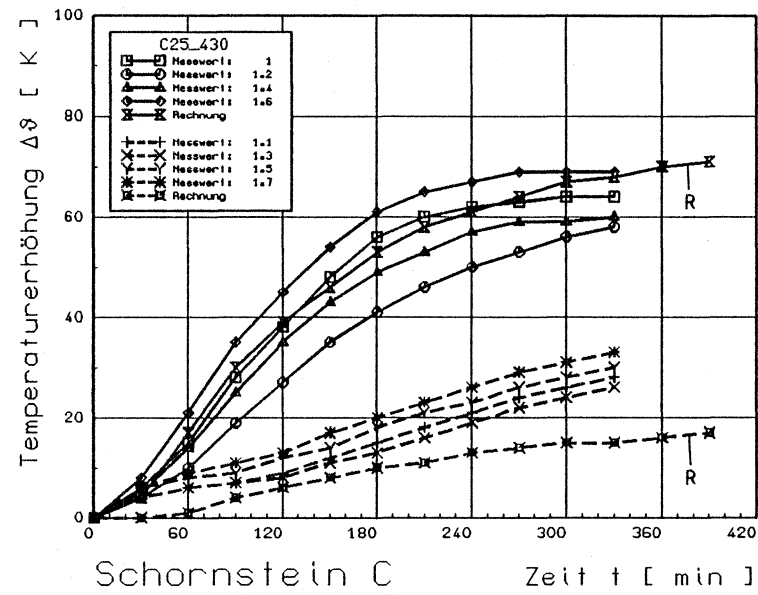
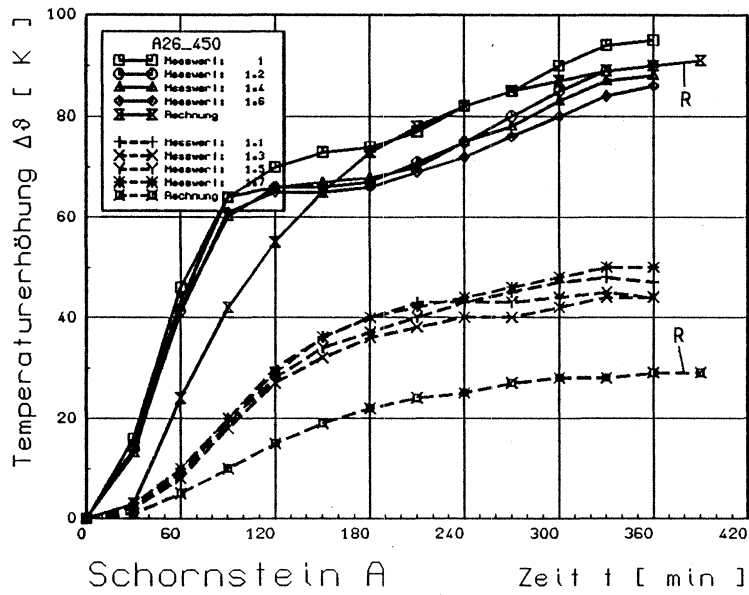


Bild E-11



Ausstemperaturen

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

Schornstein A B C Dimenston

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

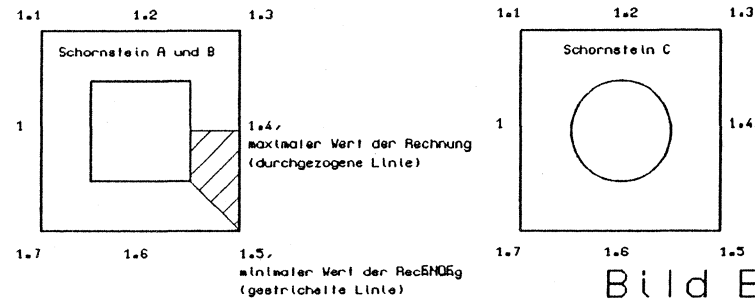
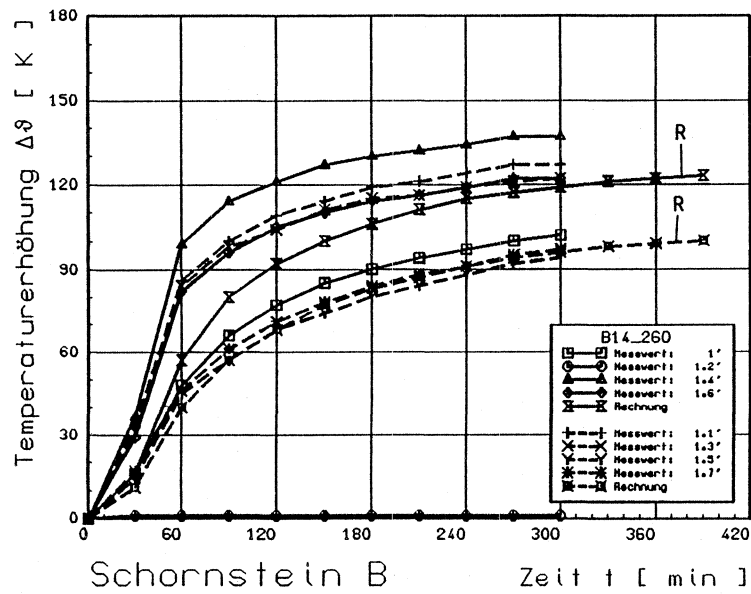
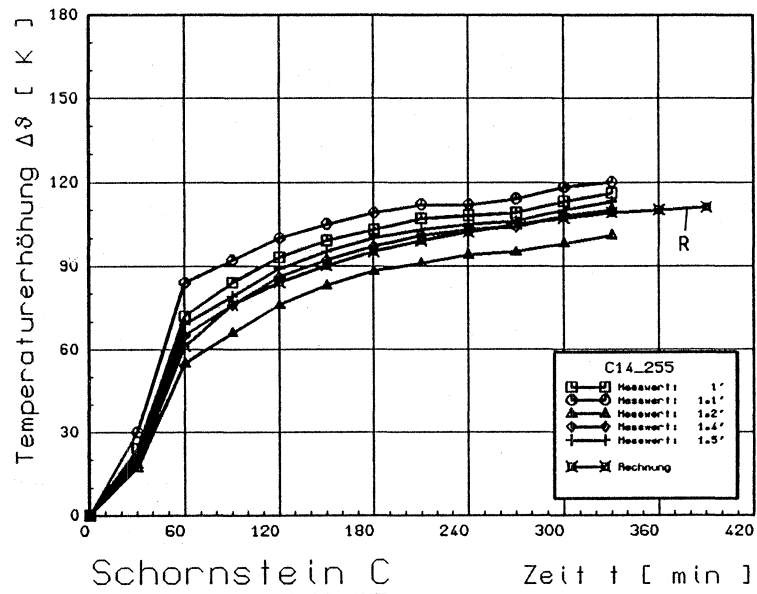
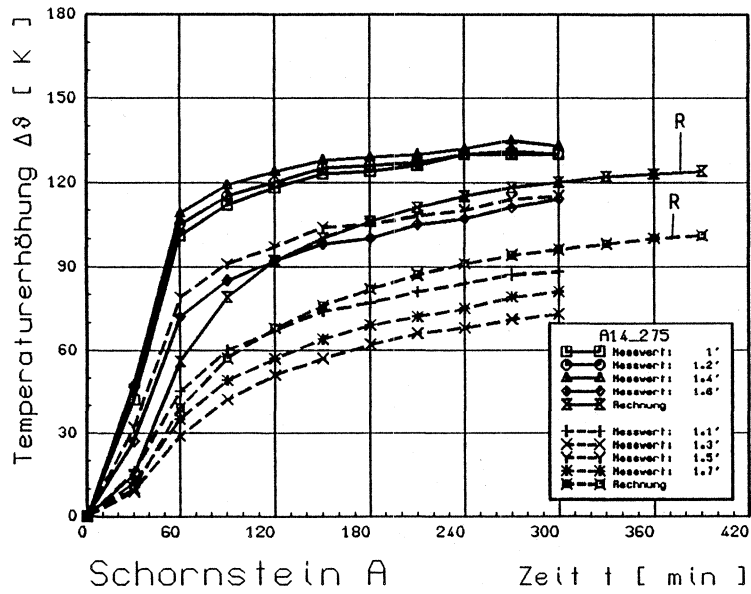


Bild E-12



Innentemperaturen

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

Schornstein	A	B	C	Dimension
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

Schornstein A und B

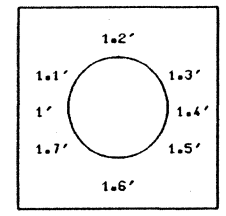
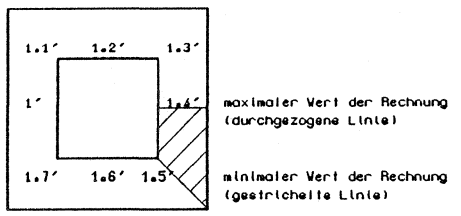
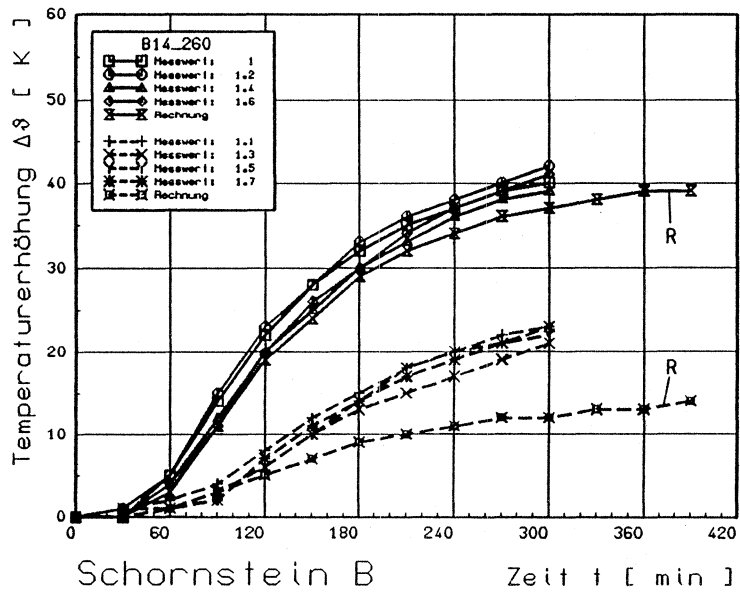
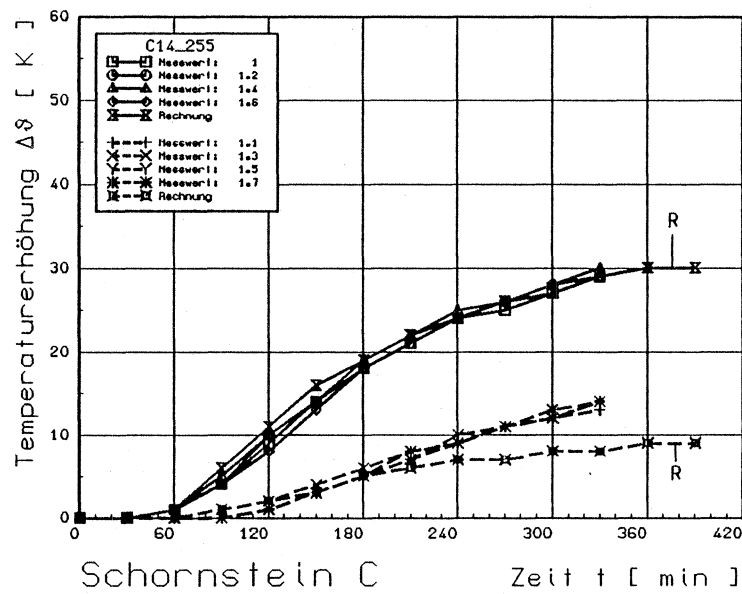
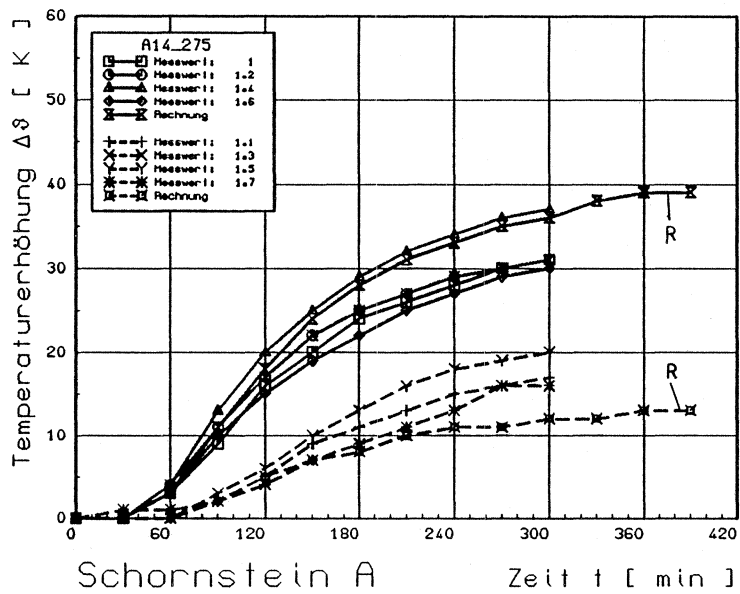


Bild E-13



Ausstemperaturen

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

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

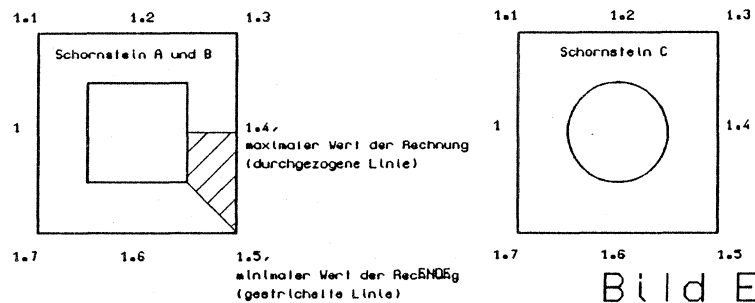
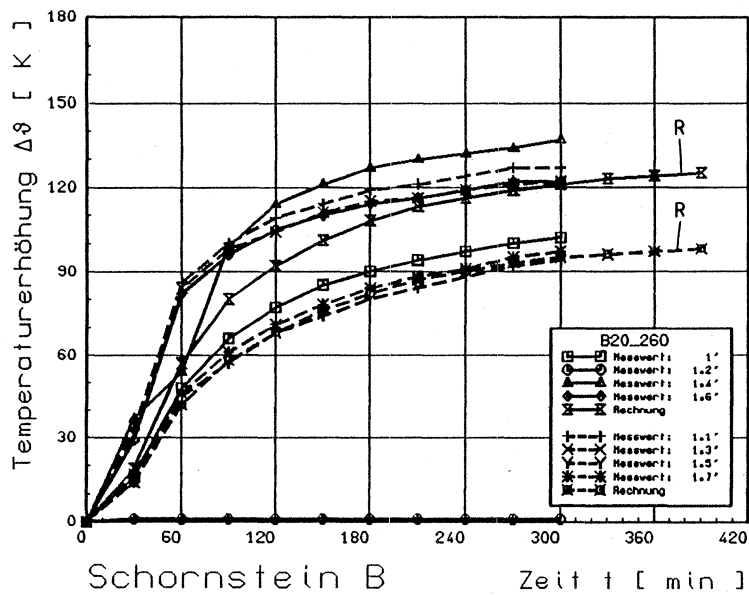
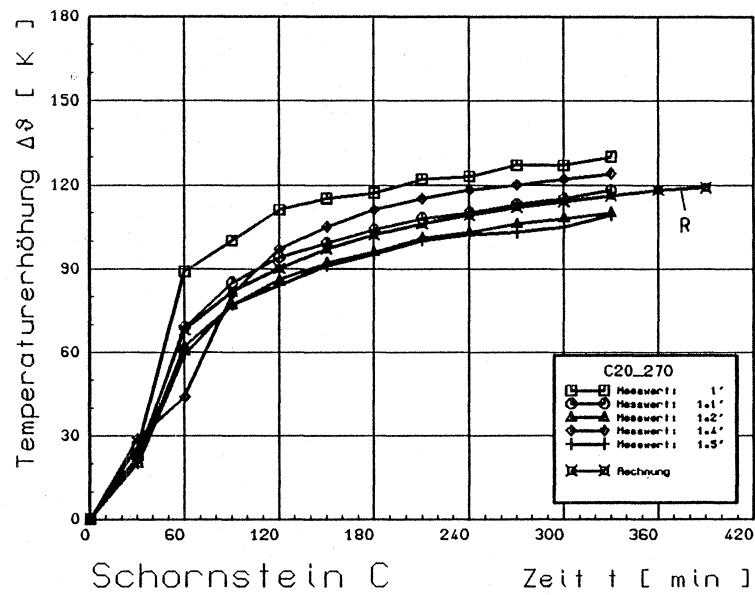
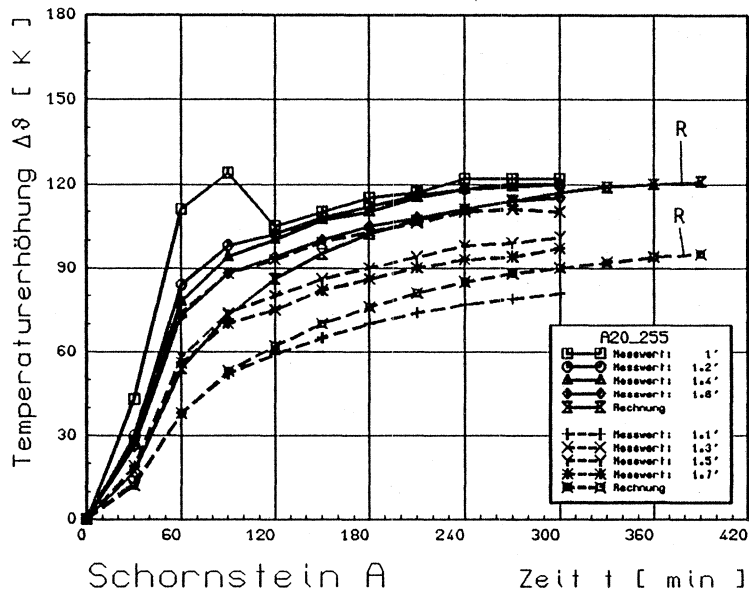


Bild E-14



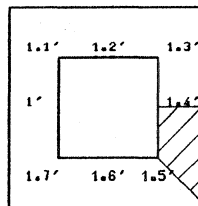
Innentemperaturen

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

Schornstein	A	B	C	Dimenston
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_p = 119$	120	118	K
Standardabweichung	$s = 3$	18	9	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 117$	121	116	K

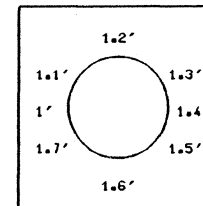
Schornstein A und B

Schornstein C



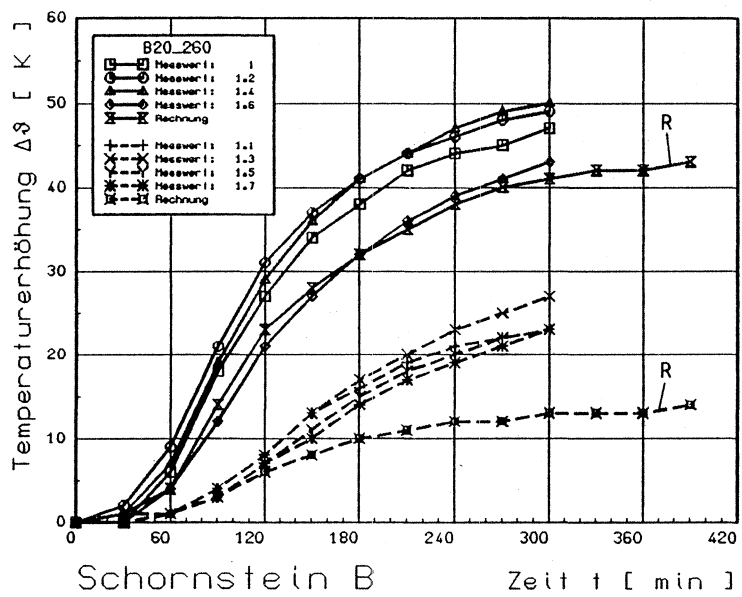
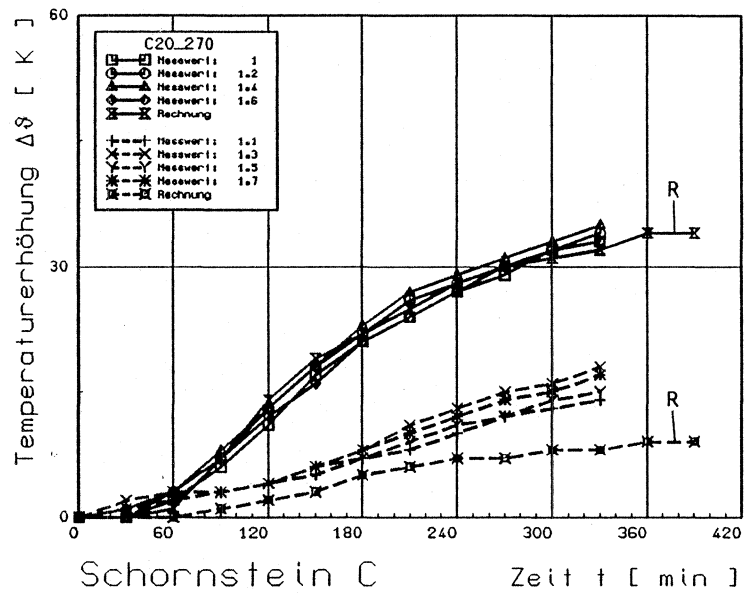
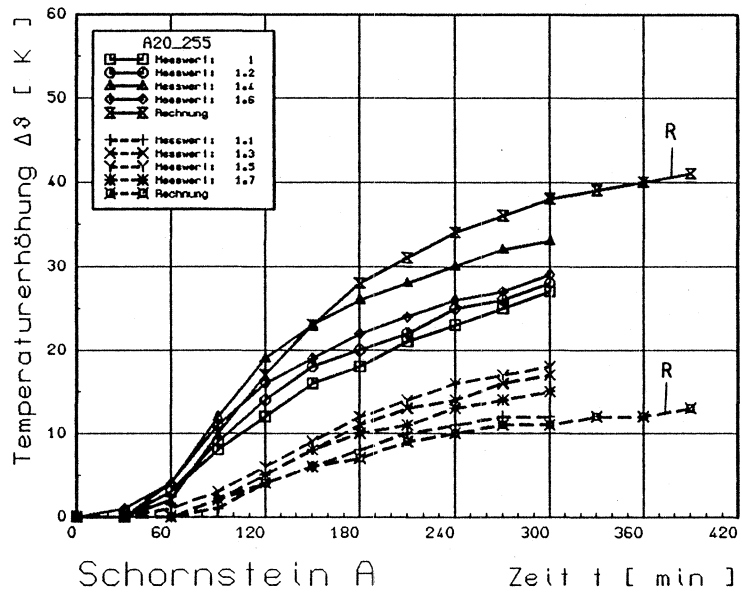
maximaler Wert der Rechnung (durchgezogene Linie)

minimaler Wert der Rechnung (gestrichelte Linie)



Anlage E

Bild E-15



Ausstemperaturen

Maximalwerte im stationären Zustand (1.1, 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

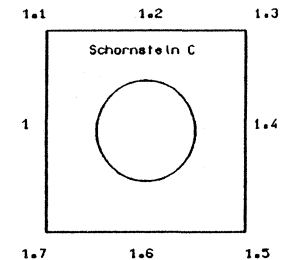
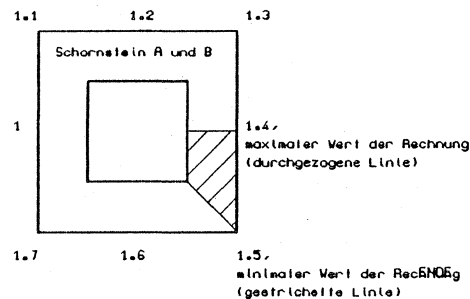
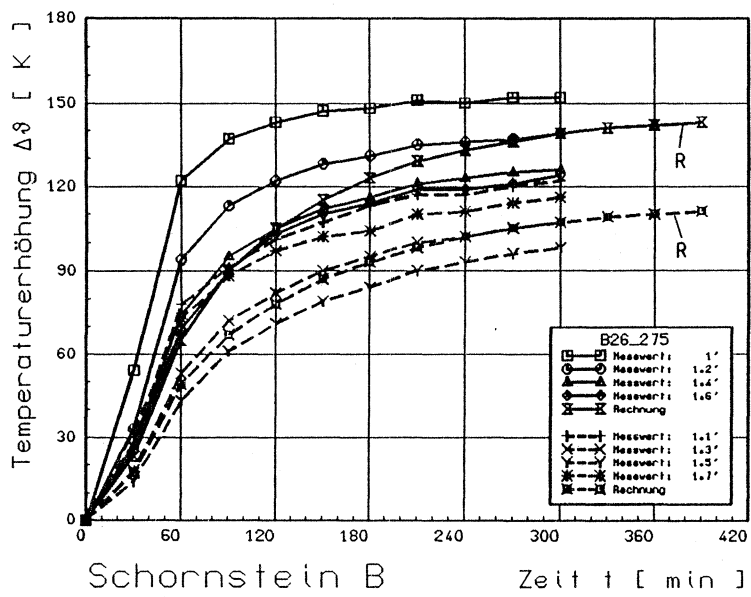
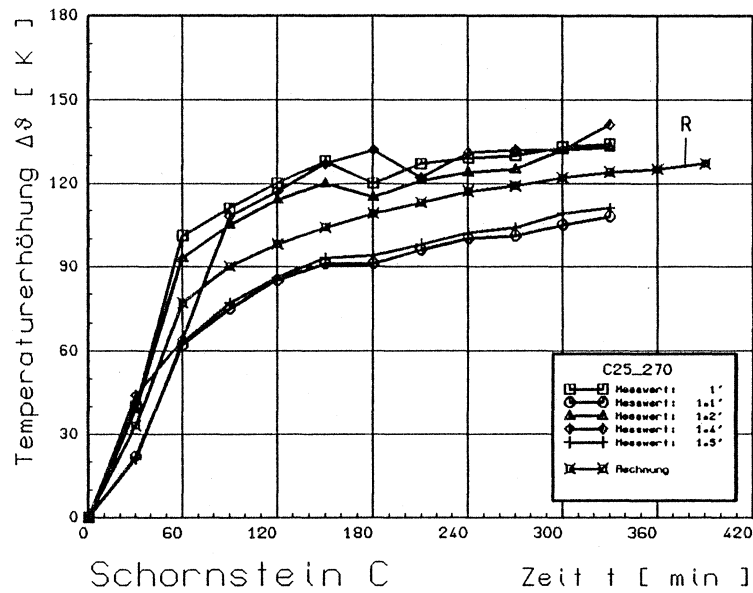
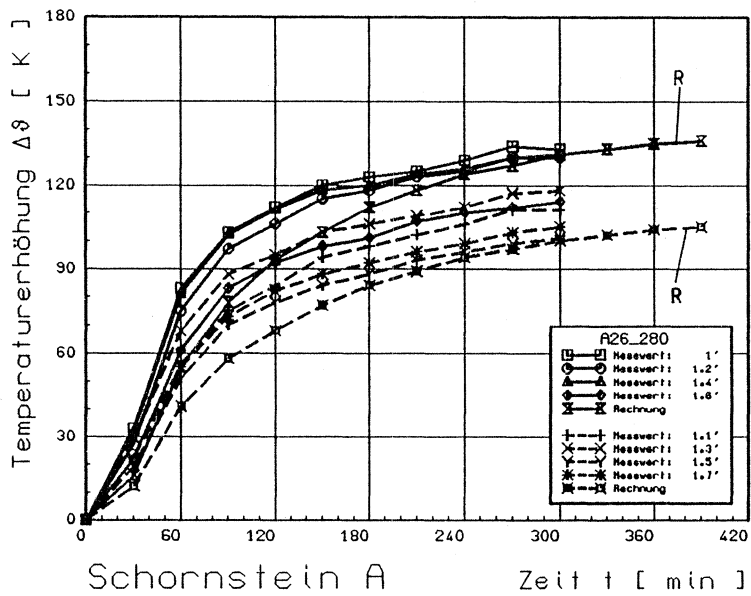


Bild E-16

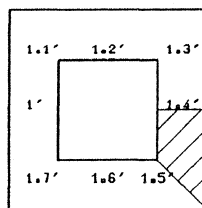


Innentemperaturen

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

Schornstein	A	B	C	Dimension
Mittelwert der Temperaturerhöhung	$\Delta \vartheta_P = 127$	135	125	K
Standardabweichung	$s = 9$	13	15	K
Rechnung (R)	$\Delta \vartheta_R = 131$	139	123	K

Schornstein A und B



maximaler Wert der Rechnung
(durchgezogene Linie)

minimaler Wert der Rechnung
(gestrichelte Linie)

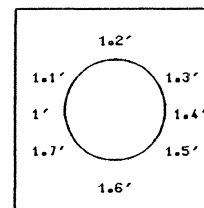
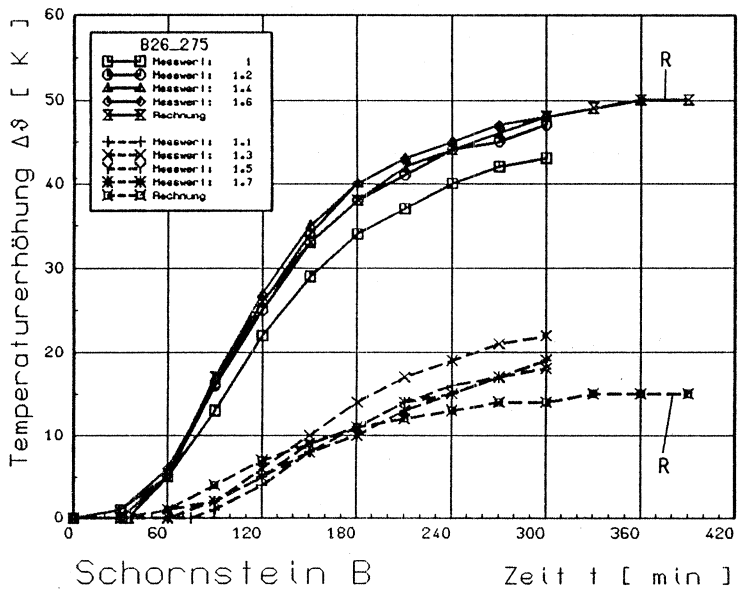
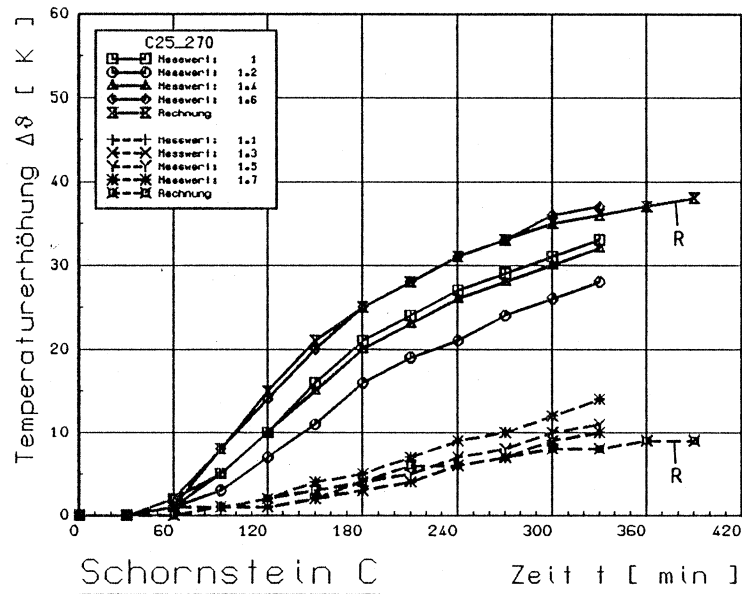
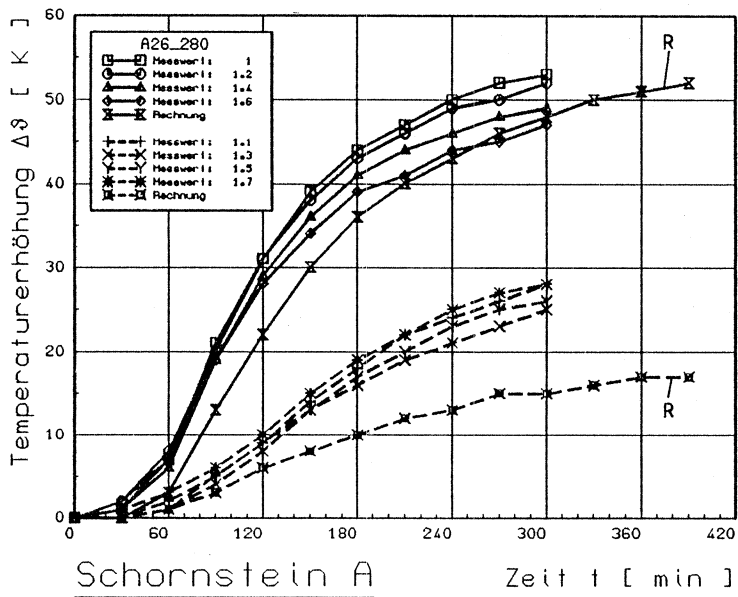


Bild E-17



Ausstemperaturen

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

Schornstein A B C Dimension

Mittelwert der
Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_P =$ 50 47 33 K
Standardabweichung $s =$ 3 2 4 K

Rechnung (R) $\Delta\vartheta_R =$ 48 48 36 K

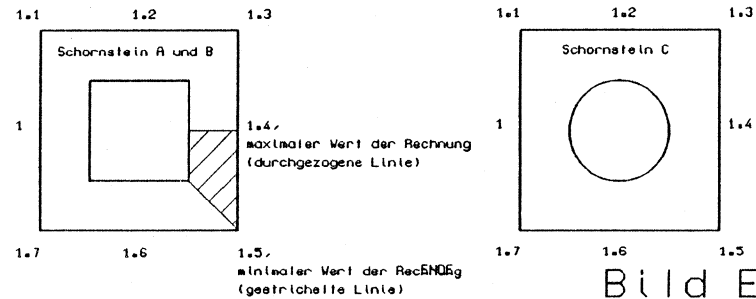


Bild E-18