

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme
zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein die
Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen
gewährleistendes Maß.

Teil I: Planung und Bau der Versuchseinrichtung

46

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Forschungsbericht Nr. 46

Ermittlung der erforderlichen Luftvolumen-
ströme zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein
die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungs-
wegen gewährleistendes Maß.

Teil I: Planung und Bau der Versuchsein-
richtung

von
Dipl.-Ing.R.John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
März 1982

FA.Nr. 92 (4/81)

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1.	EINLEITUNG	1
2.	LITERATURÜBERSICHT	2
3.	VERSUCHSANLAGE ZUR ERMITTLUNG VON GRENZWERTEN FÜR DIE ZULÄSSIGE RAUCHGASKONZENTRATION IN RETTUNGSWEGEN	4
3.1	Gesamtkonzeption der Versuchsanlage	4
3.2	Aufbau des Verbrennungsraumes	5
3.3	Mischung Rauchgas/Frischluft	7
3.4	Untersuchung der verdünnten Rauchgase	8
3.4.1	Transmission der Rauchgase im sichtbaren Wellenlängenbereich	9
3.4.2	Transmission der Rauchgase im infraroten Wellenlängenbereich	11
3.4.3	Transmissions- bzw. Absorptionsspektren	12
3.4.3.1	Rechenprogramm zur Auswertung der Meßdaten	13
3.5	Weitere Einsatzmöglichkeiten für die errichtete Versuchsanlage	16
3.5.1	Verbrennungsabläufe in hermetisch abge- dichteten Räumen bzw. in Räumen mit sehr kleinen Austauschflächen für Luft- und Rauchgase	16
3.5.2	Mechanische Rauchabzugseinrichtungen	17
4.	ZUSAMMENFASSUNG	17
5.	LITERATUR	19
6.	BILDER	21

FORMELZEICHEN

A	Absorption
HW	Halbwertsbreite der Transmissionskurve bei $T_{\max}/2$ in μm
l	der Längsverschiebung proportionales Spannungsverhältnis
l'	Längsverschiebung in mm
m, n	Laufzahlen
Δp	Druckdifferenz in N/m^2
T	Transmission absolut
T'	Auf den Eichwert bezogene Transmission
ΔU	Spannungsdifferenz in V
U_{sps}	Speisespannung in V
V	Volumenstrom in m^3/s
x	Einschraubtiefe der Drosselschraube in mm
n	Luftzahl
β	Durchflußfaktor in m^2
λ	Wellenlänge in μm
ρ	Dichte in kg/m^3
σ	Extinktionskoeffizient in m^{-1}
ω	dem Drehwinkel proportionales Spannungsverhältnis
ω'	Drehwinkel

INDIZES

max	Maximum
E	Eichwert
M	Meßwert

1. EINLEITUNG

Untersuchungen der Todesopfer infolge von Gebäudebränden haben ergeben, daß in fast allen Fällen eine Vergiftung durch Rauchgase zum Tode führte. Nur selten wurden Personen bei Gebäudebränden durch hohe Temperaturen, d.h. durch unmittelbare Flammeneinwirkungen, lebensgefährlich verletzt.

Ohne Schutzmaßnahmen breiten sich die bei einem Brand entstehenden Rauchgase sehr schnell von der Brandstelle ausgehend auf das ganze Gebäude aus. Dadurch werden nicht nur die sich im unmittelbaren Brandbereich befindenden Personen gefährdet, sondern auch die Personen, die sich weit vom Brandherd entfernt aufhalten. Kritisch für die Sicherheit aller Personen in einem Gebäude wird es, wenn im Brandfall die Rauchgase in Rettungswege eindringen. Dies gilt besonders bei hohen und weitläufigen Gebäuden sowie bei fensterlosen und unterirdischen Bauwerken, bei denen die vertikalen und horizontalen Verkehrswege in der Regel auch im Gefahrenfall die einzige Verbindung zur freien Umgebung darstellen. Auf diesen Wegen müssen im Brandfalle die Personen das Gebäude verlassen, Rettungskräfte in das Gebäude eindringen, um verletzte und gehunfähige Personen zu retten, sowie die Feuerwehr zur Brandbekämpfung vorgehen. Diese Aufgaben können die Rettungswege nur erfüllen, wenn sie auch im Brandfall ohne Behinderung benutzbar bleiben.

Rauchgase in Rettungswegen wirken in mehrfacher Weise auf den Menschen ein. Neben der direkten Gesundheitsgefahr durch z.B. CO oder die Atemwege reizende Säureanteile in der Luft ergeben sich durch die Sichtbehinderung unter Umständen so große psychologische und physiologische Auswirkungen, daß die Rettungswege nicht mehr benutzt werden bzw. benutzt werden können.

Das Überschreiten der maximal zulässigen Rauchgaskonzentration in Rettungswegen, die noch eine ausreichende Benutzbarkeit gewährleistet, muß daher verhindert werden. Zur Berechnung und wirtschaftlichen Auslegung aller Maßnahmen, die eine unbehinderte

Benutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall ermöglichen, ist daher die Kenntnis des noch zulässigen Grenzwertes für den Rauchanteil in Rettungswegen erforderlich. Allgemein gültige Aussagen über Grenzwerte der Rauchgaskonzentration in Rettungswegen für alle möglichen Brandstoffe und Abbrandbedingungen sind zur Zeit noch nicht bekannt.

2. LITERATURÜBERSICHT

Die neueste Untersuchung zur Bestimmung von Grenzwerten für die zulässige Rauchgaskonzentration in Rettungswegen wurde von Jin /1/ durchgeführt. Bei dieser Untersuchung wurde in einem 4 m breiten und 5 m langen Raum Rauchgas dadurch erzeugt, daß Holzstücke auf eine elektrisch beheizte Platte von 500 °C aufgelegt wurden. In diesen Raum wurden einzelne Personen geschickt. Die Versuchspersonen hatten bei unterschiedlichen Rauchgaskonzentrationen verschiedene Aufgaben durchzuführen. Dabei wurden jeweils die optische Rauchgaskonzentration und der CO-Gehalt im Raum gemessen sowie die Herz- und Atemfrequenz der Versuchspersonen telemetrisch übertragen und registriert.

Nach dem Betreten des Raumes wurde die Konzentrationsfähigkeit der Versuchspersonen dadurch getestet, in dem sie einen Metallstift entsprechend den Anweisungen so in unterschiedlich große Löcher in einer pultförmig angeordneten Metallplatte stecken mußten, daß mit dem Stift nicht der Rand der Löcher berührt wurde. Die Anzahl der Versuche, bei denen der Stift den Rand berührte, wurde registriert. Dieser Test dauerte maximal 30 s. Danach mußte jede Versuchsperson zu einem 5 m entfernt liegenden Schalter gehen, diesen betätigen und erneut an dem zuvor beschriebenen Gerät ihre Konzentrationsfähigkeit testen. Aus der Zeitdauer für den Weg zum Schalter und zurück wurde die Gehgeschwindigkeit berechnet. Insgesamt wurden damit 48 Personen (Männer und Frauen) unterschiedlichen Alters getestet. Unter diesen 48 Personen waren 24 Mitarbeiter des Forschungsinstitutes.

Bei diesen Versuchen hat sich gezeigt, daß die kritische optische Rauchdichte davon abhängig ist, wie gut die einzelnen Personen mit den verqualmten Räumlichkeiten vertraut sind. Für die Mitarbeiter des Forschungsinstitutes wurde ein maximal zulässiger Extinktionskoeffizient σ von $0,5 \text{ m}^{-1}$ ermittelt. Dabei betrug die Sichtweite ca. 4 m. Für die Personen, die den Versuchsraum nicht kannten, lag der zulässige Extinktionskoeffizient σ mit $0,15 \text{ m}^{-1}$ wesentlich niedriger. Die Sichtweite bei dieser Rauchgaskonzentration betrug ca. 13 m. Die aufgrund dieser Untersuchung angegebenen Grenzwerte haben jedoch nur Gültigkeit für die bei dem Versuch vorliegenden Bedingungen und einer relativ kurzen Verweildauer der Testpersonen in diesem Raum von insgesamt ca. 1 min.

Dies ist die zur Zeit einzige bekanntgewordene Untersuchung, bei der das Verhalten von Menschen in mit Rauchgasen verunreinigter Luft untersucht wurde.

In /2/ wurde von Jin die Sichtbarkeit durch Rauch untersucht. Die bei der Verbrennung von verschiedenen Materialien in kleinen Modellräumen entstehenden Rauchgase sind bezüglich ihrer optischen Rauchdichte sowie ihrer Giftstoffe untersucht worden (z.B./3,4/). Aufgrund dieser Untersuchungen ist eine relative Bewertung der bei der Verbrennung verschiedener Stoffe entstehenden Rauchgas-mengen und deren optische Dichte sowie die dabei auftretenden gesundheitsgefährdenden Bestandteile unter den bei den Versuchen herrschenden Abbrandbedingungen möglich.

Die Mechanismen der Rauchbildung beim Aufheizen und Verbrennen verschiedener Materialien sind in /5/ untersucht worden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, daß die bei der Verbrennung entstehenden Partikel in ihrer Größenverteilung wesentlich von der Wärmeeinstrahlung auf das Brandgut abhängig sind.

Bei den genannten Arbeiten sowie bei weiteren Untersuchungen /6,7/ wurden zur Erzeugung der Rauchgase nur kleine Modellbrände

verwendet. Aufgrund der Vielzahl von Einflußgrößen ist es jedoch nicht ohne weiteres möglich, diese Ergebnisse auf die Verhältnisse bei einem tatsächlichen Brandverlauf zu übertragen.

3. VERSUCHSANLAGE ZUR ERMITTLUNG VON GRENZWERTEN FÜR DIE ZULÄSSIGE RAUCHGASKONZENTRATION IN RETTUNGSWEGEN

Aus dem Abschnitt 2 folgt, daß noch keine Untersuchungen derart durchgeführt wurden, daß Rauchgase bei etwa wirklichkeitsnahen Brandabläufen erzeugt und mit Frischluft soweit verdünnt wurden, daß sich in diesem Rauchgas-Luftgemisch Personen ohne Behinderung längere Zeit, d.h. mindestens 10 min aufhalten können. Eine Zeit von ca. 10 min ist nach /8/ erforderlich, um z.B. aus dem 30. Obergeschoß eines Gebäudes ins Freie zu gelangen. Aufgrund von Abschätzungen bezüglich des zulässigen CO- und CO₂- Gehaltes in den Rettungswegen wird nach /9/ eine Verdünnung der in Rettungswege eingedrungenen Rauchgase im Verhältnis 1:100 empfohlen. Dieser Wert ist jedoch durch Versuche bisher nicht überprüft worden. Zur Überprüfung dieser Empfehlung sowie zur Messung der optischen Rauchdichte und Gaskonzentrationen bei unterschiedlicher Luftverdünnung der Rauchgase wurde die im folgenden beschriebene Anlage entwickelt und aufgebaut.

3.1 Gesamtkonzeption der Versuchsanlage

Das Gesamtkonzept der Versuchsanlage ist in Bild 1 dargestellt.

In dem Verbrennungsraum 1 können unterschiedliche feste, flüssige und gasförmige Stoffe verbrannt werden. Der dem Verbrennungsraum zugeführte Frischluftvolumenstrom wird durch die Frischluftleitung 2 angesaugt, eingeregelt und gemessen. Über die Abgasleitung 3 strömen die Rauchgase ins Freie. Aus dieser Abgasleitung wird über das Rohr 4 ein definierter Rauchgasvolumenstrom abgesaugt. Dieser Volumenstrom kann über eine Drosselklappe geregelt und mit dem speziellen Volumenstrommesser 5 ermittelt werden. Dieser Rauchgasstrom wird mit dem regelbaren Frischluftvolumenstrom aus der Zuluftleitung 6 in dem Venturirohr 7

gemischt. Das Venturirohr erfüllt zudem die Aufgabe, die Rauchgase über die Rohrleitung 4 anzusaugen. Nach dem Venturirohr führt die daran anschließende Leitung das Rauchgasluftgemisch ins Freie. Mittels der Rohrleitung 8 können verdünnte Rauchgase in den Raum 9 geleitet werden. Die verdünnten Rauchgase werden an der Stelle 10 bezüglich ihrer optischen Rauchdichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich untersucht. Bei 11 wird die Zusammensetzung der Rauchgase mit einem Infrarotspektrometer gemessen.

Diese Anlage gestattet es, die bei einem tatsächlichen Brandablauf auftretenden Verhältnisse nachzuvollziehen, die dabei in Abhängigkeit von der Verdünnung auftretende Zusammensetzung des Rauchgasluftgemisches zu ermitteln und die Behinderung durch die Rauchgase im Raum 9 subjektiv zu beurteilen.

3.2 Aufbau des Verbrennungsraumes

Der schematische Aufbau des Verbrennungsraumes ist dem Bild 2 zu entnehmen.

Der eigentliche Verbrennungsraum hat eine quadratische Grundfläche von 2420 mm Seitenlänge. Die Höhe des senkrechten Teils 1 beträgt 2010 mm. Darüber ist ein pyramidenförmiges Teil 2 von 780 mm Höhe angeordnet, aus dessen Mitte die Rauchgase über das Rohr 3 mit einem Durchmesser von 630 mm abziehen können.

Die Wände des Verbrennungsraumteils 1 sind aus 3 Schichten aufgebaut. Die äußere Schicht, siehe Teilbild A, besteht aus auf der Basis von Glimmer aufgebauten nichtbrennbaren 16 mm starken Platten a, die in ihrem Aussehen und in ihrer Verarbeitbarkeit ähnlich wie Spanplatten sind. Die innere Schicht b besteht aus 16 mm starken Asbestzementplatten. Zwischen diesen beiden Schichten ist eine 22 mm starke Mineralfaserisolierung c eingelegt. Der obere, pyramidenförmige Teil 2, besitzt im Gegensatz zu Teil 1 auf der Außenseite Stahlblech anstelle des Plattenmaterials

aus Glimmer. Die Mineralfaserisolierung wurde angewendet, um den Wärmeverlust durch die Wände klein zu halten und dadurch einen großen thermischen Auftrieb der Rauchgase zu erreichen.

Zum Einführen von Brandstoffen in den Verbrennungsraum ist in eine Seitenwand die Tür 4 mit einer Öffnungsfläche von 1050 mm x 1050 mm eingebaut. Diese Tür kann mit mehreren Schrauben am Umfang völlig dicht verschlossen werden. Sie ist genauso wie die Seitenwände 1 aus 3 Schichten aufgebaut. Zum Beobachten und Beleuchten des Innenraumes ist in der Tür sowie in der dazu rechtwinkligen Seitenwand je ein Fenster eingebaut.

Die untere Begrenzung des senkrechten Teiles 1 bildet der auf 3 Druckkraftaufnehmern liegende Rahmen 6 der Waage zur Bestimmung des Massenverlustes beim Abbrand. Auf die Unterlage 7, z.B. eine Asbestzementplatte, wird das Brandgut 8 aufgebaut.

Mit steigender Temperatur im Verbrennungsraum ergibt sich zwischen dem Verbrennungsraum und der freien Umgebung eine von der Temperaturdifferenz abhängige Druckdifferenz. Damit diese Druckdifferenz die Wägung nicht beeinflusst und um das Eintreten von Fremdluft in den Verbrennungsraum zu verhindern, sind die Druckkraftaufnehmer 5 mit in den Verbrennungsraum einbezogen.

Unterhalb der Waage ist der Zulufttrichter 9 angeordnet. Er besteht aus Stahlblech. Durch mehrere Lochbleche 10 wird die unten in den Trichter einströmende Frischluft gleichmäßig auf den ganzen Querschnitt verteilt. Die Frischluft wird über eine Leitung von 250 mm Durchmesser dem Zuluftkasten 11 zugeführt. Die Zuluft zum Verbrennungsraum wird durch 2 hintereinanderliegende Axialventilatoren gefördert. In Verbindung mit einer motorisch angetriebenen Drosselklappe kann der Zuluftvolumenstrom zwischen etwa 0 m³/s und 0,6 m³/s geregelt werden. Die Volumenstrommessung erfolgt über eine Geschwindigkeitsmessung mittels eines Prandtlrohres. Bei einer Luftzahl $n = 1$ können mit dem max. Luftvolumenstrom ca. 0,12 kg/s Holz, ca. 0,07 kg/s Polyamid oder ca. 0,05 kg/s Heizöl verbrannt werden.

3.3 Mischung Rauchgas/Frischlufft

Die zum Mischen mit den abgesaugten Rauchgasen erforderliche Frischluft wird von außerhalb der Versuchshalle mit einem Axialventilator durch die Rohrleitung 6 angesaugt und über eine motorisch angetriebene Drosselklappe geregelt (siehe Bild 1). Der maximal mögliche Frischluftvolumenstrom beträgt $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Ermittlung des Frischluftvolumenstromes erfolgt über die Strömungsgeschwindigkeit, die mit einem Prandtlrohr bestimmt wird. Um die Strömungsgeschwindigkeitsmessung in der 18 m langen Rohrleitung mit einem Durchmesser von 630 mm nicht durch den vom Ventilator ausgehenden Drall zu beeinflussen, ist vor dem Ventilator ein Strömungsgleichrichter eingebaut.

In Strömungsrichtung hinter der Drosselklappe ist eine Venturidüse 7 eingebaut. Die Abmessungen dieser Venturidüse sind in Bild 3 angegeben. Diese Abmessungen haben sich aufgrund durchgeführter Berechnungen als ein Kompromiß ergeben, bei dem einerseits noch eine so starke Druckabsenkung im engsten Querschnitt bei gedrosseltem Zuluftvolumenstrom erreicht wird, daß noch mindestens 5 l/s Rauchgas bezogen auf 0°C angesaugt wird, und andererseits bei vollem Zuluftvolumenstrom kein zu großer Druckverlust im Venturirohr auftritt.

Der angesaugte Rauchgasvolumenstrom wird über das an der Forschungsstelle gebaute Meßgerät 5, siehe Bild 1, ermittelt. Der schematische Aufbau dieses Meßgerätes ergibt sich aus Bild 4. Es besteht aus dem Grundkörper 1 mit den beiden Anschlußstutzen 2 und 3 für die Messung der Druckdifferenz sowie einem Gewindestück 4, in das die Drosselschraube 5 mit ihrem kugeligen Ende eingeschraubt ist. Durch die mehr oder weniger tief eingeschraubte Drosselschraube wird der freie Strömungsquerschnitt in der Ebene der Druckmeßstelle 3 verändert. Damit ist es möglich, auch bei unterschiedlichen Rauchgasvolumenströmen immer eine optimale Meßwertanzeige bei geringstem Strömungswiderstand zu erhalten.

Der Volumenstrom ergibt sich bei diesem Meßgerät zu:

$$V = \beta \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \text{ in m}^3/\text{s} \quad (1)$$

Dabei ist der Faktor β von dem hier vorhandenen Innendurchmesser $d = 32$ mm sowie von der Einschraubtiefe der Drosselschraube abhängig. Eine Eichung mit Luft hat für dieses Durchflußmeßgerät folgende Abhängigkeiten des Wertes β von der Einschraubtiefe x im Bereich von 3 mm bis 20 mm ergeben:

$$\beta = 0,3834 \cdot 10^{-6} \cdot (x + 9,10)^{2,32} \text{ in m}^2 \quad (2)$$

Darin ist x die Einschraubtiefe der Drosselschraube 5. Dieser Wert x kann an der Skala 6 abgelesen werden. Bei der Einschraubtiefe $x = 0$ liegt das Ende der Halbkugel in gleicher Höhe wie die Rohrwand. Für die Messung der Rauchgastemperatur ist das Mantelthermoelement 7 mit einem äußeren Durchmesser von 1,5 mm eingebaut.

Dadurch, daß in diesem Staukörpermeßgerät keine scharfen Kanten vorhanden sind, wird erwartet, daß auch bei Rauchgasen mit einem hohen Rußanteil genaue Messungen möglich sind.

3.4 Untersuchung der verdünnten Rauchgase

Um die Benutzbarkeit der Rettungswege im Brandfall zu gewährleisten, darf, wie schon erwähnt, keine Behinderung durch eine eingeschränkte Sicht sowie keine Gesundheitsgefährdung durch zu hohe Schadstoffanteile in der Luft auftreten. Bei den durchzuführenden Versuchen wird daher ermittelt, welche Sichtbehinderungen und welche Schadstoffe bei verschiedenen Brandmaterialien in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad der Rauchgase mit Luft in diesem Gemisch auftreten. Zur Bestimmung dieser Werte wird die Änderung der Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge im Rauchgas-Luftgemisch gegenüber reiner Luft gemessen. Die Sichtbehinderung wird dabei im Wellenlängenbereich

des sichtbaren Lichtes von $0,4 \mu\text{m}$ bis $0,7 \mu\text{m}$ und die Schadstoffanteile im Infrarotbereich von $2,45 \mu\text{m}$ bis $14,5 \mu\text{m}$ gemessen.

3.4.1 Transmission der Rauchgase im sichtbaren Wellenlängenbereich

Die Transmission der Rauchgase in Abhängigkeit von der Wellenlänge im sichtbaren Wellenlängenbereich wird durch die Art der Rauchpartikel beeinflusst. Die Art der Rauchpartikel ist nach /2/ von dem brennenden bzw. schwelenden Material abhängig. Nach /5/ wird die Art der Rauchpartikel auch durch die Wärmeeinstrahlung auf das Brandgut beeinflusst. Daraus ergibt sich, daß die Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei einem Brandgut von dem Brandablauf bestimmt wird. Um in einem Rettungsweg eine Sichtbehinderung durch Rauchgase zu vermeiden, muß daher die erforderliche Verdünnung mit Frischluft für den ungünstigsten Fall, d.h. für die geringste Transmission während des Brandablaufs, ausgelegt werden. Aus der spektralen Abhängigkeit der Transmission ergibt sich, welche Beleuchtungskörper die besten Sichtverhältnisse in den Rettungswegen ergeben. Dabei sind die Beleuchtungskörper zu verwenden, die in dem Wellenlängenbereich der größten Transmission auch den Hauptanteil ihres Lichtes ausstrahlen.

Die spektrale Transmission der verdünnten Rauchgase wird an der Meßstelle 10 (siehe Bild 1) gemessen. Die dafür von der Forschungsstelle entwickelte und gebaute Meßeinrichtung wird anhand der Prinzipskizze auf Bild 5 beschrieben.

Von dem Getriebemotor 1 wird über die Spindel 2 der Rahmen 3 zwischen zwei Endlagen mit einer Geschwindigkeit von 132 mm/min hin und her bewegt. Auf diesem Rahmen ist das Interferenzverlauffilter 4 für den Wellenlängenbereich zwischen $0,4 \mu\text{m}$ und $0,7 \mu\text{m}$ befestigt. Als Lichtquelle für die Erzeugung eines in einem schmalen Wellenlängenbereich liegenden Lichtstrahles dient die Kaltlichtquelle 5. Von dieser Lampe wird das Licht über den Glasfaserlichtleiter 6 vor das Interferenzfilter geleitet.

Vor dem Lichtleiteraustritt ist eine Optik vorhanden, die das unter einem Winkel von 60° aus dem Lichtleiter austretende Licht so bündelt, daß durch das Interferenzverlauffilter ein Lichtspalt von ca. 2 mm Breite hindurchtritt. Auf der Austrittsseite wird das Licht durch eine Linse etwa parallel gerichtet und durchstrahlt die Meßstrecke. Auf der Ein- und Austrittsseite der Meßstrecke sind mit Frischluft gespülte Fenster 7 und 8 eingebaut. Auf der Rückseite des Fensters 8 ist der Strahlungsempfänger 9 montiert. Zur Bestimmung der Wellenlänge des Lichtstrahles ist ein lineares Schiebepotentiometer 10 vorhanden. Über den Schleifer 11 kann aus der Teilspannung die Lage des Interferenzverlauffilters bestimmt werden.

Für diesen Aufbau wurde ein Interferenzverlauffilter der Firma Schott Typ VERIL S 200 verwendet. Im Bild 6 sind die Daten dieses verwendeten Interferenzverlauffilters angegeben. Der Bereich von der Wellenlänge $\lambda = 0,4 \mu\text{m}$ bis $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$ wird auf einer Länge von 128,2 mm durchfahren.

Die maximale Transmission T_{max} dieses Filters ist von der Wellenlänge abhängig und ist größer als 47%. Die Halbwertsbreite HW, d.h. die Bandbreite des Wellenlängenbereiches, die bei $T_{\text{max}}/2$ noch vom Filter durchgelassen wird, beträgt weniger als $0,017 \mu\text{m}$. Eine Spaltbreite von 2 mm verändert die spektrale Wirkung dieses Filters nicht, da von dieser Spaltbreite nur eine Wellenlängenbreite von $0,0047 \mu\text{m}$ erfaßt wird.

Als Strahlungsempfänger wurde ein Siliziumfotoelement mit erhöhter Blauempfindlichkeit, Fabrikat Siemens, BTX 79 verwendet. Dieses Fotoelement wird quasi im Kurzschlußbetrieb betrieben und ergibt dabei am eingebauten Widerstand eine der Beleuchtungsstärke proportionale Spannung ab.

Zur Bestimmung der Absorption in Abhängigkeit von der Wellenlänge werden die bei einem Versuch aufgenommenen Werte mit den unmittelbar vor diesem Versuch in reiner Luft erhaltenen Werte verglichen bzw. daraus der Absorptionskoeffizient berechnet.

Als Lichtquelle wurde für diesen Versuchsaufbau die "Kaltlichtquelle" Fabrikat Schott, Typ KL 1500 mit einem Schwanenhalslichtleiter verwendet. Damit ist es möglich, eine sehr hohe Beleuchtungsstärke ohne thermische Belastung des Interferenzverlauffilters zu erhalten. Um den gewünschten Strahlengang zu erreichen, ist unmittelbar vor dem Ende des Lichtleiters eine bikonvexe Linse mit 10 mm Brennweite angeordnet. Dahinter ist ein Kondensator aus 2 asphärischen Kondensatorlinsen mit 15 mm Brennweite eingebaut. Nach dem Kondensator befindet sich unmittelbar vor dem Interferenzverlauffilter ein verstellbarer Spalt. Im Abstand von 60 mm zum Spalt bzw. 55 mm vor dem Interferenzverlauffilter ist zur Bündelung des Strahles ein Achromat mit einer Brennweite von 60 mm angeordnet.

3.4.2 Transmission der Rauchgase im infraroten Wellenlängenbereich

Alle in den Rauchgasen enthaltenen Gase emittieren und absorbieren in für die jeweiligen Gase charakteristischen Banden Energie im infraroten Wellenlängenbereich. Aus diesem Grund ändert sich in diesen Bereichen die Transmission entsprechend dem jeweiligen Anteil der Gase im Gesamtgemisch. Wird die Transmission des Rauchgas-Luftgemisches in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen, so kann aus diesen Ergebnissen die Zusammensetzung des Gemisches bestimmt werden. Die für Gase charakteristische Transmissionsspektren sind u.a. in /10/ aufgeführt.

Die Transmissionsmessung im infraroten Wellenlängenbereich erfolgt an der Meßstelle 11, siehe Bild 1, allein oder zusammen mit der Transmissionsmessung im sichtbaren Wellenlängenbereich.

Zur Messung der Transmission im Infrarotbereich wird ein von der Forschungsstelle erweiterter handelsüblicher Einstrahlinfrarotanalysator vom Typ Miran I A verwendet. Der Aufbau dieses Gerätes ist dem Bild 7 zu entnehmen.

Dieses Gerät besitzt einen drehbar angeordneten Interferenzverlauffilter 3 der aus 3 Sektoren besteht. Die Bereiche der einzelnen Sektoren überlappen leicht. Damit ergibt sich ein kontinuierlich erfaßbarer Wellenlängenbereich von 2,50 μm bis 14,50 μm . Zusätzlich ist noch ein Interferenzfilter für eine Wellenlänge von 2,450 μm eingebaut worden. Mit diesem Filter kann der Fluor-Wasserstoffanteil der Rauchgase bestimmt werden, da die Absorptionsbande von Fluor-Wasserstoff bei dieser Wellenlänge liegt.

Die vom Infrarotstrahler 1 abgestrahlte Energie trifft auf den Hohlspiegel 2 und wird von diesem auf das Filterrad 3 gelenkt. Dieses Filterrad 3 wird über den Antriebsmotor mit Getriebe 4 angetrieben. Vor dem Filterrad ist das Unterbrecherrad 5 angeordnet. Die Breite des durch den Interferenzverlauffilter hindurchtretenden Strahles kann durch den verstellbaren Spalt 6 verändert werden. Der Drehwinkel des Filterrades wird über den Drehwinkelgeber 7 bestimmt. Der aus dem Gerät austretende Strahl wird in der Eintrittsöffnung zur Meßstrecke von der Sammellinse 8 gebündelt. Diese Sammellinse ist in einer Halterung angeordnet, die so mit Luft gespült werden kann, daß sich keine Partikel auf ihrer Oberfläche ablagern können. Nach dem Durchdringen der Meßstrecke 9 tritt der Strahl über die Austrittsöffnung 10, die ebenfalls eine Luftspülung besitzt, aus der Meßstrecke aus und erreicht über eine Sammellinse 11 den Empfänger. Das von ihm abgegebene Signal wird dem Grundgerät zugeführt und dort verstärkt. Die Anordnung der Segmente des Interferenzverlauffilters auf den Filterrand sowie ihre Werte bezüglich des Wellenlängenbereiches sind dem Bild 8 zu entnehmen.

3.4.3 Transmissions- bzw. Absorptionsspektren

Die Bewertungsgröße zur Analyse der Rauchgase im sichtbaren wie im infraroten Bereich ist die Änderung der spektralen Transmission gegenüber denen eines Vergleichsgases wie z.B. reine Luft. Da es sich bei den beiden zuvor genannten Geräten um Einstrahlgeräte handelt, müssen die Meßwerte und die mit dem Vergleichsgas

erhaltenen Eichwerte getrennt aufgenommen und danach verglichen werden. Die Meß- und Eichwerte werden hierbei mit einer rechnergesteuerten Datenerfassungsanlage aufgenommen und digital abgespeichert. Mit einem zur weiteren Auswertung entwickelten Programm wird aus diesen Werten in Abhängigkeit von der Wellenlänge die Differenz der Transmissionswerte ermittelt, auf den Eichwert normiert, umgerechnet auf den Absorptionswert und über der Wellenlänge aufgezeichnet. Die so erhaltenen Absorptionsspektren ermöglichen eine Aussage über die Art und Entstehung der Rauchpartikel sowie über die chemische Rauchgaszusammensetzung.

3.4.3.1 Rechenprogramm zur Auswertung der Meßdaten

Das zur Berechnung der auf den Eichwert bezogenen Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge sowie zum Aufzeichnen der Absorptionskurven entwickelte Rechenprogramm ist als Fließschema im Bild 9 dargestellt.

Unmittelbar vor jeder Meßreihe werden die Eichwerte mit einem Vergleichsgas, z.B. reine Luft, aufgenommen. Dabei werden, ebenso wie bei den Meßwerten, die zusammengehörenden Werte von Transmission und Drehwinkel bzw. Längsverschiebung auf einen Datenträger, im vorliegenden Fall eine Diskette, abgespeichert. Als Meßgröße für den Drehwinkel ω bzw. die Längsverschiebung l dient die auf die Speisespannung U_{sps} des Drehwinkelgebers bzw. der Längenmeßeinrichtung bezogene Spannungsdifferenz ΔU

$$\omega = l = \frac{\Delta U}{U_{\text{sps}}} \quad (3)$$

Entsprechend dem entwickelten Rechenprogramm werden bei der Auswertung der Meßergebnisse zunächst die Eichwerte von der Diskette gelesen und im Kernspeicher der Rechenanlage abgespeichert. Die dafür erforderlichen Speicherplätze werden dadurch klein gehalten, indem nur die Wertepaare abgespeichert werden, die im Drehwinkelbereich der 3 Segmente und des Filters bei 2,450 μm liegen.

Im nächsten Schritt werden die Meßwertepaare schrittweise vom Datenträger gelesen. Nach jedem Wertepaar wird zu dem Drehwinkel des Meßwertes die aufeinanderfolgenden Wertepaare der Eichwerte gesucht, für die gilt:

$$\omega_E(n) < \omega_M(m) \leq \omega_E(n+1) \quad (4)$$

Damit wird durch eine lineare Interpolation zwischen den Werten $T_E(n)$ und $T_E(n+1)$ der Wert $T_E(n')$ berechnet, der sich bei $\omega_M(m)$ ergibt.

$$T_E(n') = T_E(n) + \frac{T_E(n+1) - T_E(n)}{\omega_E(n+1) - \omega_E(n)} (\omega_M(m) - \omega_E(n)) \quad (5)$$

Mit diesem Wert wird die auf den Eichwert bezogene Transmission $T'(m)$ berechnet:

$$T'(m) = \frac{T_E(n') - T_M(m)}{T_E(n')} \quad (6)$$

Zur Auftragung des bezogenen Transmissionswertes über der Wellenlänge ist eine Umrechnung des Drehwinkels ω auf die Wellenlänge λ erforderlich. Eine Eichung hat für die einzelnen Segmente folgende Beziehung ergeben:

Für das Segment I
(Wellenlängenbereich 2,5 μm bis 4,5 μm) gilt:

$$\lambda = 2,283 + 8,472 \cdot \omega \quad \text{in } \mu\text{m} \quad (7)$$

Für das Segment II
(Wellenlängenbereich 4,4 μm bis 8,0 μm) gilt:

$$\lambda = -1,039 + 15,368 \cdot \omega \quad \text{in } \mu\text{m} \quad (8)$$

Für das Segment III
(Wellenlängenbereich 7,9 μm bis 14,5 μm) gilt:

$$\lambda = -11,477 + 28,580 \cdot \omega \quad \text{in } \mu\text{m} \quad (9)$$

Der so erhaltene Wert $T'(m)$ wird nach der Beziehung

$$A(m) = 1 - T'(m) \quad (10)$$

in den Absorptionswert $A(m)$ umgerechnet. In Abhängigkeit von $\lambda(m)$ können jetzt die Transmissions- oder die Absorptionswerte in ein Diagramm eingezeichnet werden. Dabei werden die einzelnen Meßwerte durch Geraden miteinander verbunden. Bei dem gewählten Meßzyklus von 1,0 s ergibt sich folgende Auflösung in den 3 Segmentbereichen:

Segment I	0,0133 μm
Segment II	0,0238 μm
Segment III	0,0438 μm

Dieser Berechnungszyklus wiederholt sich so lange, bis der Wert $\omega_M(m)$ einen Betrag von 0,91 erreicht. Danach wird die Transmission bei der Wellenlänge 2,45 μm , entsprechend einem Wert ω von 0,9932 als Mittel aus 4 Meßwerten in gleicher Weise wie zuvor beschrieben berechnet und der Wert A für $\lambda = 2,450 \mu\text{m}$ auf das Diagramm der Transmissions- bzw. Absorptionskurve geschrieben.

Bei den Messungen im sichtbaren Wellenlängenbereich entspricht dem Drehwinkel ω' die Längsverschiebung l' bzw. $\omega = l$. Für die Umrechnung l in die Wellenlänge λ innerhalb des Bereiches von 0,4 μm bis 0,7 μm gilt:

$$\lambda = 377,7 + 595,6 \cdot l \quad \text{in } \mu\text{m} \quad (11)$$

Ergeben die durchzuführenden Versuche, daß eine Beurteilung der Rauchgaszusammensetzung infolge der Transmissionsänderung bei relativ wenigen, definierten Wellenlängen möglich ist, so wird das zuvor beschriebene Programm derart abgeändert, daß anstelle der aufgezeichneten Absorptionsspektren die betreffenden Werte unmittelbar ausgedruckt werden. Der Volumenanteil der jeweiligen Gasart kann dann aufgrund von weiteren durchgeführten Eichungen berechnet werden.

Ein Beispiel für die Auswertung der aufgenommenen Transmissionswerte mit dem geschilderten Rechenprogramm ist die Darstellung in Bild 10. Die Kurve 1 gibt die von der Wellenlänge abhängige Transmission reiner Luft wieder. Der Transmissionsverlauf bei einem Gemisch von 10% CO₂ in N₂ wird durch die Kurve 2 dargestellt. Beide Gase wurden bei einer Temperatur von 60 °C untersucht. Die Länge der Meßstrecke betrug in diesen Fällen 100 mm. Als Kurve 3 ist die auf den Eichwert bezogene Differenz der Transmissionswerte entsprechend Gleichung (6) aufgetragen. Aus dieser Kurve ergeben sich deutlich die für CO₂ charakteristischen Transmissionsänderungen bei 2,68 µm sowie bei 4,3 µm. Die Abnahme der Transmission bei 2,76 µm ist auf eine Verunreinigung des Gasgemisches zurückzuführen.

3.5 Weitere Einsatzmöglichkeiten für die errichtete Versuchsanlage

Neben dem vorgesehenen Anwendungszweck kann die hier beschriebene Anlage auch zur Untersuchung weiterer Probleme verwendet werden. Besonders geeignet ist dieser Versuchsaufbau zur Untersuchung folgender Aufgaben.

3.5.1 Verbrennungsabläufe in hermetisch abgedichteten Räumen bzw. in Räumen mit sehr kleinen Austauschflächen für Luft- und Rauchgase

In dem mit dichten Wänden umgebenen Verbrennungsraum können alle Verbrennungsvorgänge mit unterschiedlicher Luftzufuhr durchgeführt werden. Bei verschlossenen Zu- und Abluftrohren kann auch der Verbrennungsablauf in einem hermetisch verschlossenen Raum, wie z.B. in besonderen Fabrikationsanlagen oder in Kernreaktoren, untersucht werden. Bei diesen Verbrennungsvorgängen mit kleiner oder sehr geringer Luftzufuhr sind bisher insbesondere der Druckanstieg, die auftretende maximale Temperatur, der Massenverlust des Brandgutes sowie die Zusammensetzung der Restluft und der Rauchgase noch nicht ausreichend untersucht worden.

3.5.2 Mechanische Rauchabzugseinrichtungen

Um im Brandfall in Hallen eine rauchfrei Zone über dem Boden zu erreichen, müssen die entstehenden Rauchgase aus der Halle abgeführt werden. Bei mehrgeschossigen Hallen sind dazu die unteren Geschosse in der Regel mit einem mechanischen Rauchabzugssystem auszustatten. Zur optimalen Auslegung dieser Rauchabzugssysteme sind Untersuchungen erforderlich, aus denen sich in Abhängigkeit vom Brandgut sowie von der Frischluftzufuhr in die Halle der abzusaugende Rauchgasvolumenstrom und die Anordnung der Rauchgasabzugsöffnungen ergibt. Diese Untersuchungen können ebenfalls in der hier beschriebenen Anlage durchgeführt werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Ohne Schutzmaßnahmen breiten sich die bei einem Gebäudebrand entstehenden Rauchgase sehr schnell im ganzen Gebäude aus. Dadurch entsteht für alle Personen innerhalb des Gebäudes eine große Gefahr. Dies gilt insbesondere bei hohen und weitläufigen sowie unterirdischen Bauwerken. Rauchgase in Rettungswegen gefährden die Menschen im allgemeinen durch den zu hohen Giftstoffanteil sowie durch eine Sichtbehinderung. Die für eine unbehinderte Benutzbarkeit maximal zulässige Rauchgaskonzentration in den Rettungswegen kann z.Zt. noch nicht angegeben werden. Aus der Literatur sind nur sehr wenige Arbeiten bekannt, die unter etwa wirklichkeitsnahen Bedingungen die Auswirkung unterschiedlicher Rauchgaskonzentrationen auf den Menschen untersucht haben.

Um weitere Erkenntnisse bezüglich der maximal zulässigen Rauchgaskonzentration in Rettungswegen zu erhalten, wurde eine entsprechende Versuchsanlage geplant und aufgebaut. Die Versuchsanlage besteht aus einem etwa würfelförmigen Verbrennungsraum mit ca. 2,5 m Seitenlänge. Der Massenverlust beim Abbrand wird mit einer eingebauten Waage erfaßt. Die Verbrennungsluft wird dem Raum über eine Frischluftleitung regelbar zugeführt. Aus dem entstehenden Rauchgasstrom wird ein Teilstrom abgesaugt und mit

Frischluft in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt. Diese verdünnten Rauchgase werden z.T. in einen ca. 25 m² großen Raum zur subjektiven Beurteilung einer Behinderung geleitet. Zur objektiven Bewertung der verdünnten Rauchgase werden diese an 2 Meßstellen bezüglich der optischen Dichte sowie der chemischen Zusammensetzung untersucht. Für beide Untersuchungen werden Spektrometer, im sichtbaren Lichtbereich zwischen 0,4 µm und 0,7 µm Wellenlänge und im Infrarotbereich zwischen 2,450 µm und 14,5 µm Wellenlänge, eingesetzt.

Ziel der mit dieser Anlage durchzuführenden Versuche ist es, bei verschiedenen Brandstoffen in Abhängigkeit von den Abbrandverhältnissen die erforderliche minimale Verdünnung der Rauchgase mit Frischluft zu ermitteln, bei der eine Behinderung von Personen in Rettungswegen nicht auftritt.

5. LITERATUR

- /1/ Jin, T.: Studies of emotional instability in smoke from fires
Journal of Fire and Flammability
Vol.12 (April 1981) S.130-142;
- /2/ Jin, T.: Visibility through fire smoke
Report of Fire Research Institut
of Japan (1975) Nr.40, S.1-5;
- /3/ Winkler, H.: Meßverfahren der Rauchdichte und
Giftgasemission bei der Verbrennung
von Kunststoffen
TÜ 21 (1980) Nr.2, S.79-82;
- /4/ Rasbash, D.J.;
Pratt, B.T.: Estimation of the smoke produced
in fires
Fire Safety Journal Vol.2 (1980)
Nr. 1, S.23-37;
- /5/ Bankston, C.P.; u.a.: Aspects of the mechanisms of smoke
generation by burning materials
Combustion and Flame 41 (1981)
Nr.3, S.273-292;
- /6/ Seader, J.D.; Chien, W.P.: Mass optical density as a corre-
lating parameter for the NBS
smoke density
Fire and Flammability 5 (1974)
Nr. 2, S.151-163;
- /7/ Robertson, A.F.: Tow smoke test methods - a compa-
rison of data
Fire Technology 10 (1974)
Nr.4, S.282-286;

- /8/ Seeger, P.G.; John, R.: Räumungsversuche in Verwaltungshochhäusern und in großflächigen Schulgebäuden
VFDB 29 (1980) H.1, S.2-7;
- /9/ John, R.: Lüftungssysteme zur Rauchfreiheit von Treppenträumen
Ki Klima-Kälte-Heizung 7 (1979)
H.11, S.455-461;
- /10/ Zeller, M.V.: Infrared methods in air analysis
Part Number 993-9236
The Perkin-Elmer Corporation
Norwalk Conn. 06856

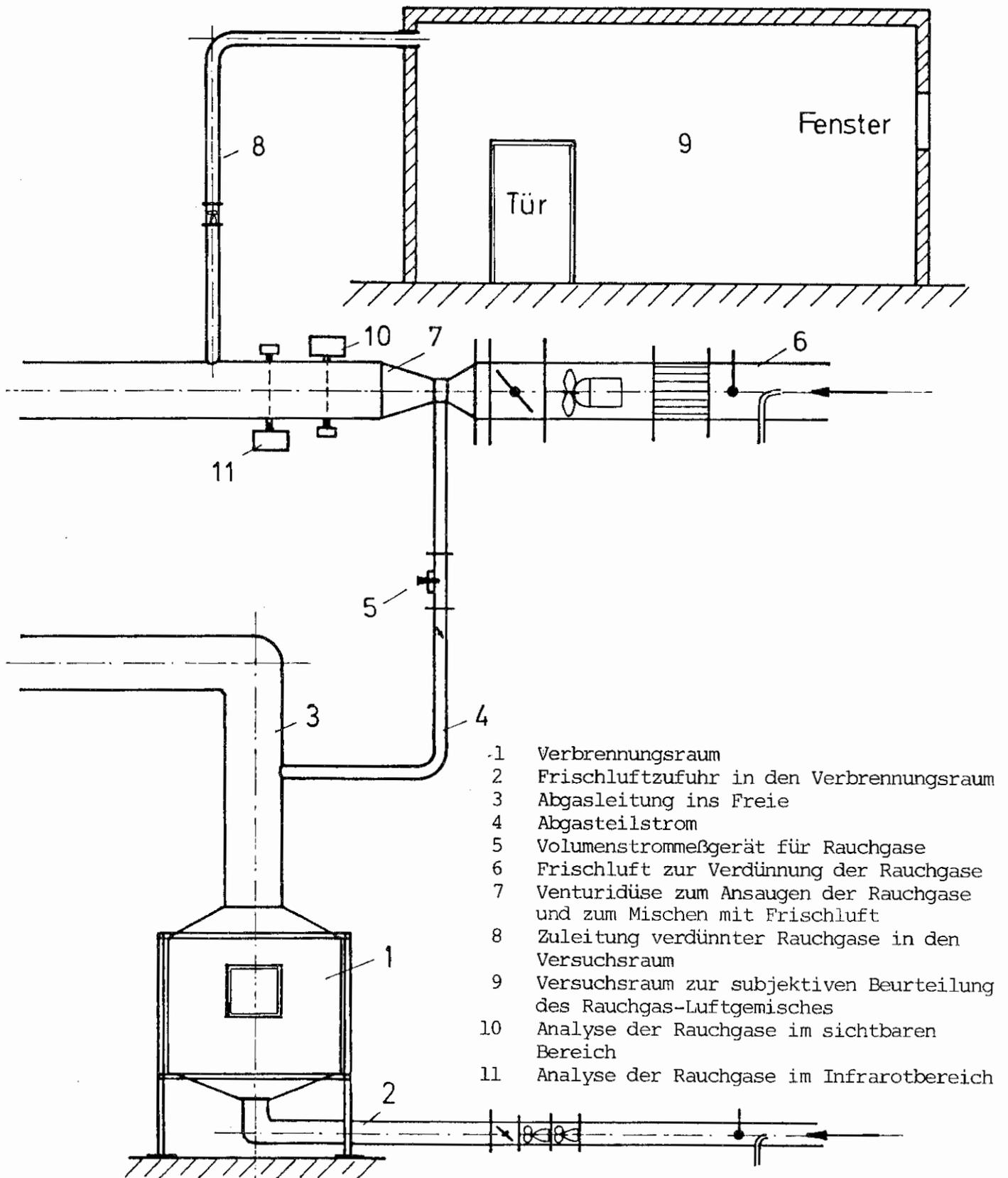


Bild 1: Schema der Versuchsanlage

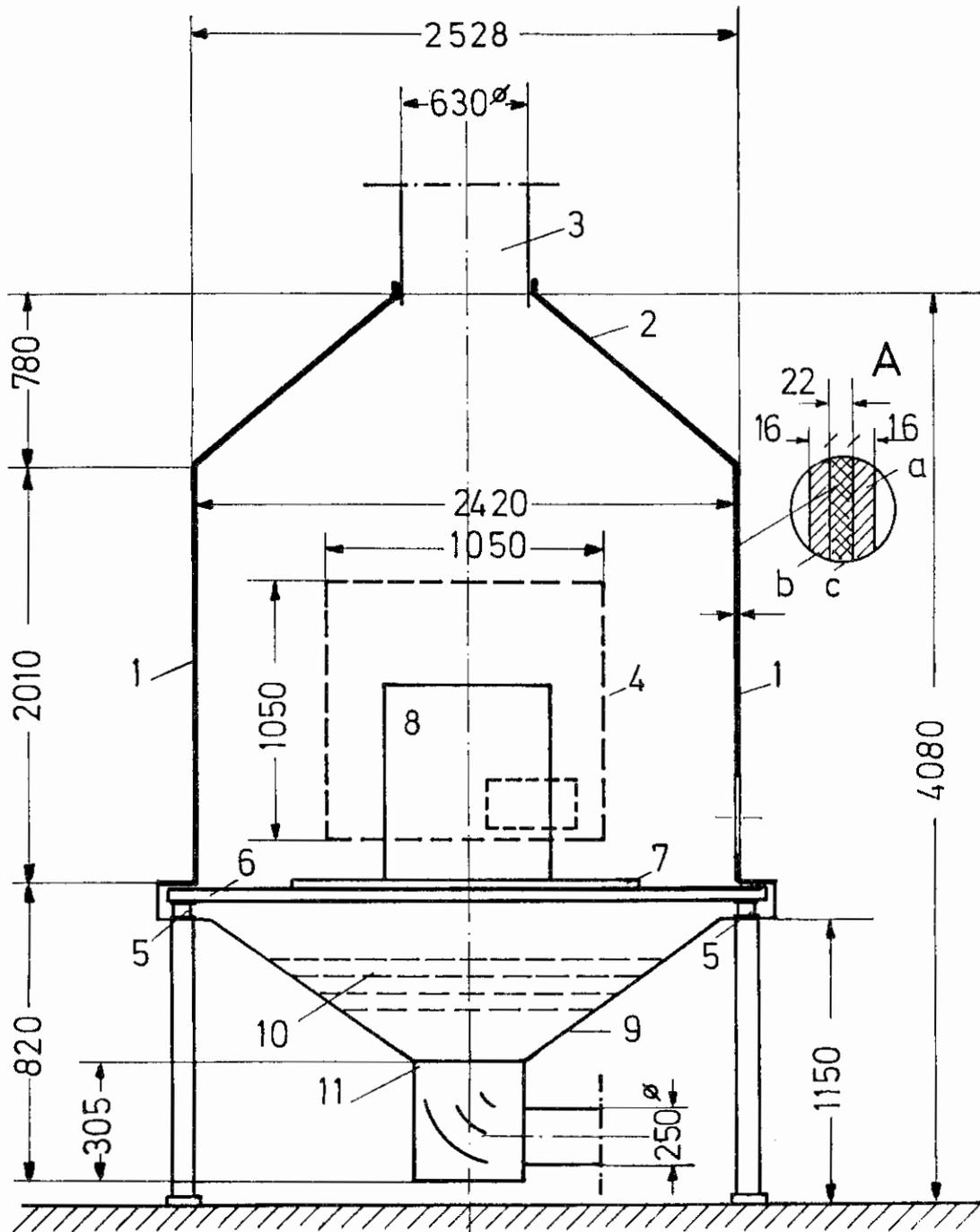


Bild 2: Verbrennungsraum

- | | | | |
|---|---------------------|----|---------------|
| 1 | Seitenwand | 7 | Asbestplatte |
| 2 | Abzugshaube | 8 | Brandgut |
| 3 | Rauchabzug | 9 | Zuluftrichter |
| 4 | Tür mit Fenster | 10 | Lochbleche |
| 5 | Druckkraftaufnehmer | 11 | Zuluftkasten |
| 6 | Waagerahmen | | |

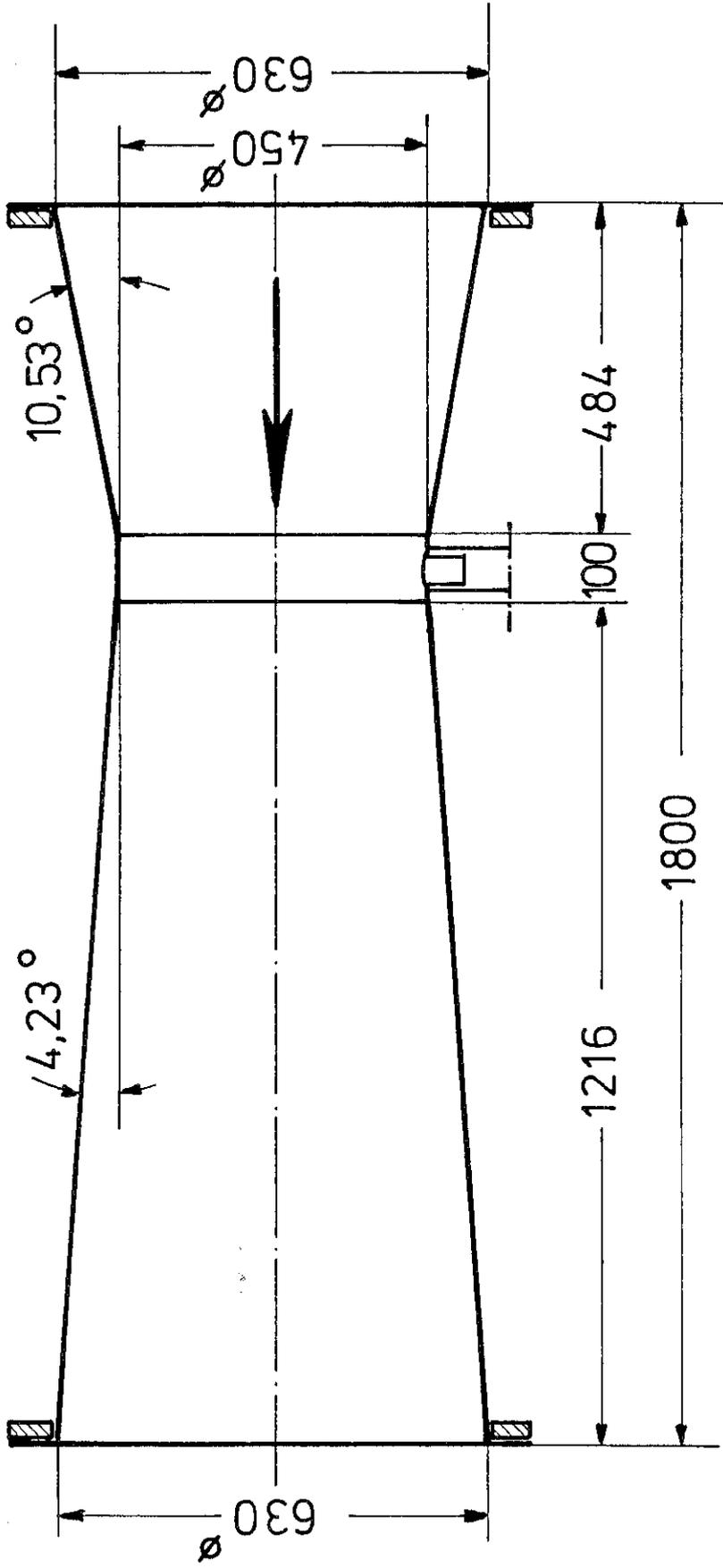


Bild 3: Abmessungen der Venturidüse

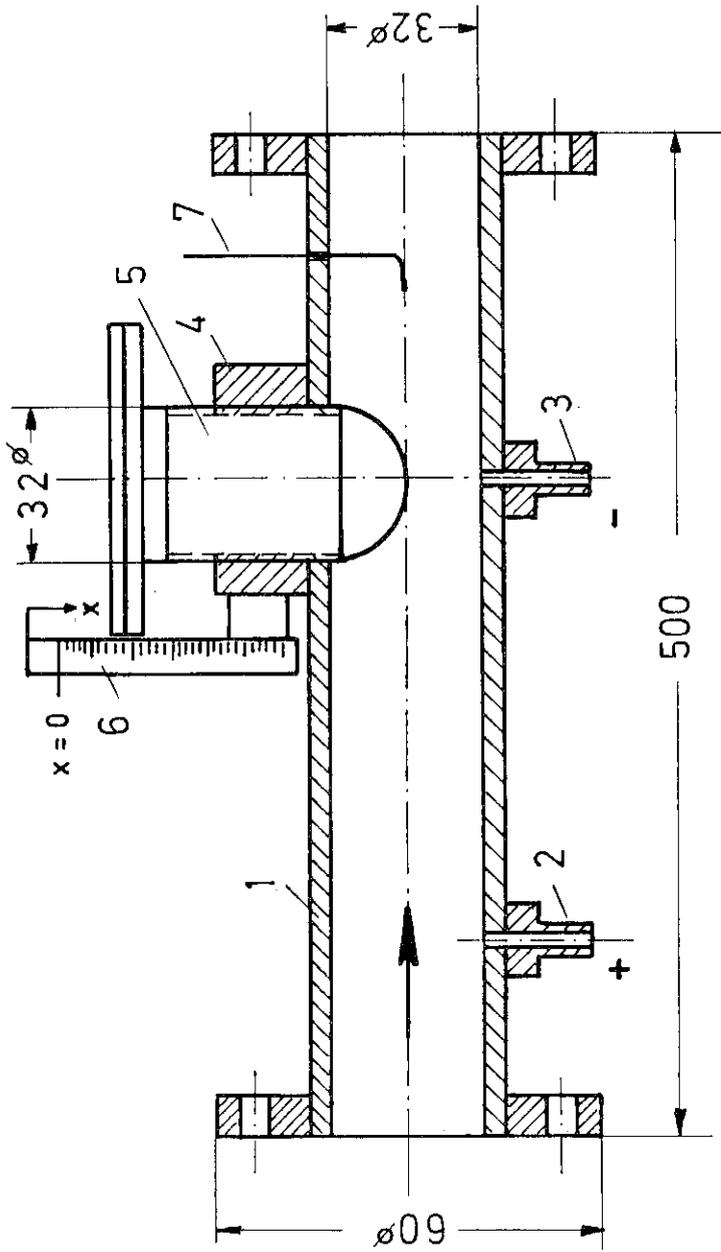


Bild 4: Volumenstrommeßgerät für Rauchgase

- 1 Grundkörper
- 2,3 Anschlußstücke für Druckmessung
- 4 Gewindestücke
- 5 Drosselschraube
- 6 Skala
- 7 Temperaturmeßstelle

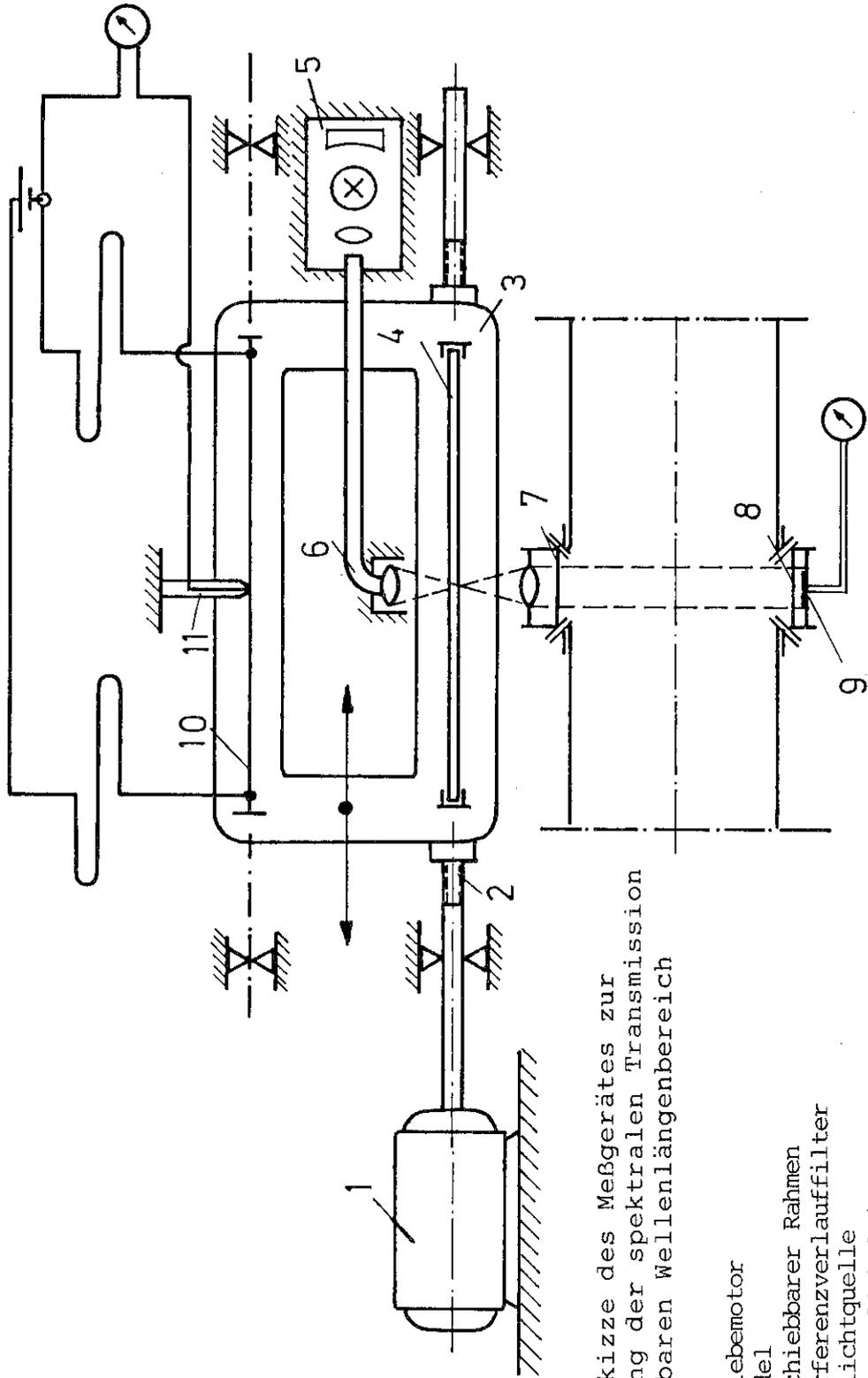
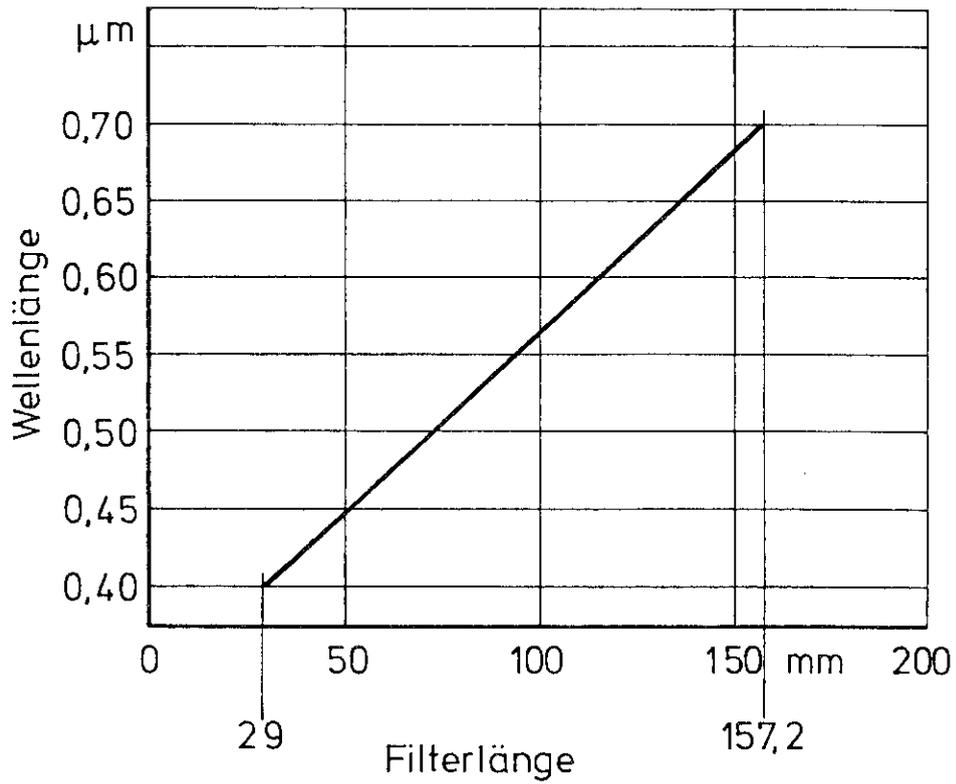


Bild 5: Prinzipskizze des Meßgerätes zur Bestimmung der spektralen Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich

- 1 Getriebemotor
- 2 Spindel
- 3 verschiebbarer Rahmen
- 4 Interferenzverlauffilter
- 5 Kaltlichtquelle
- 6 Glasfaserlichtleiter
- 7,8 Ein- und Austrittsfenster mit Luftspülung
- 9 Strahlungsempfänger
- 10 Widerstandswendel } für Weggeber
- 11 Schleifer



λ_m in μm	0,450	0,550	0,650
T_{max} in %	51	54	47
HW in μm	0,017	0,012	0,015

Bild 6: Daten des verwendeten Interferenzverlauffilters im sichtbaren Wellenlängenbereich

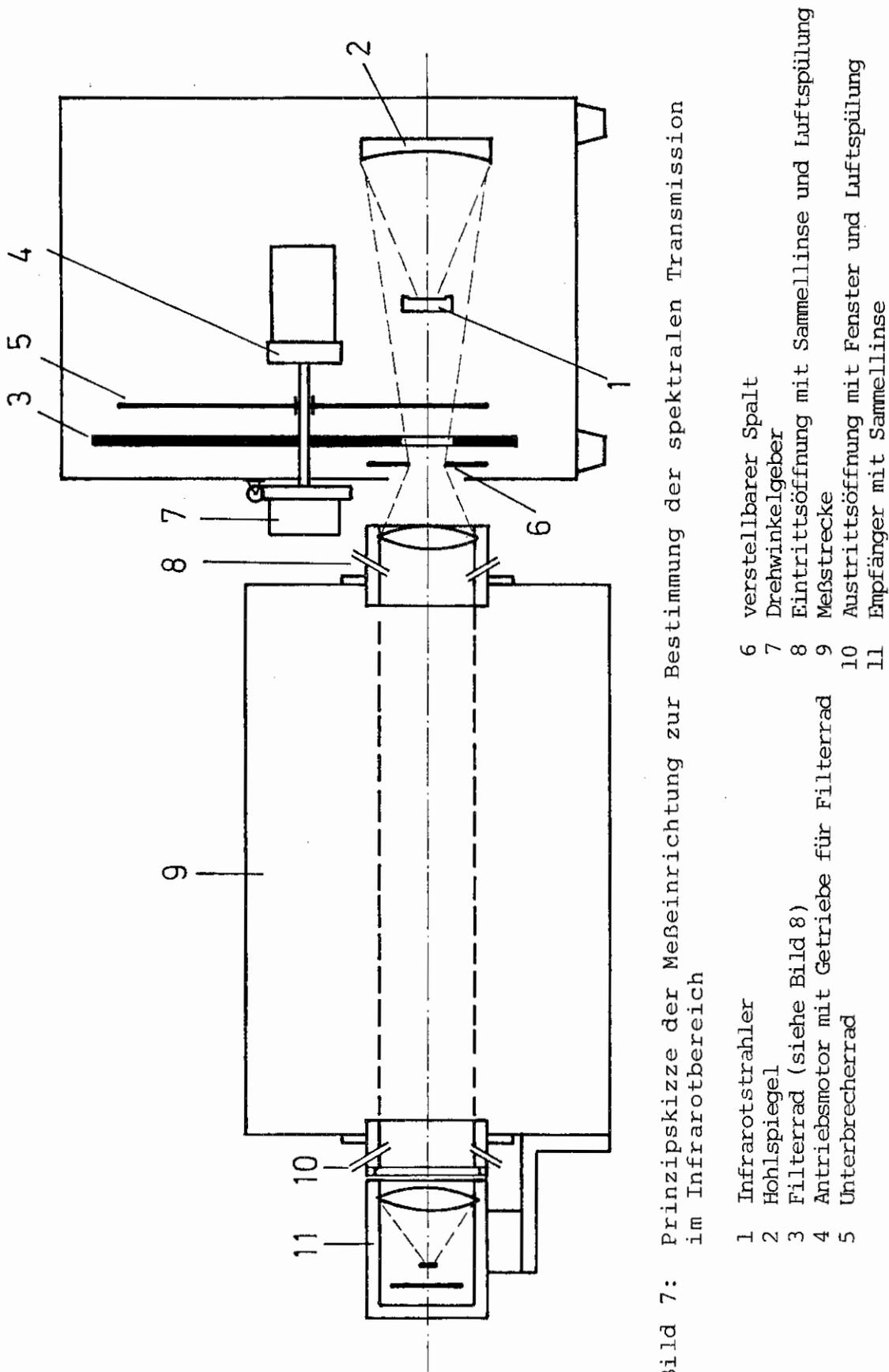


Bild 7: Prinzipskizze der Meßeinrichtung zur Bestimmung der spektralen Transmission im Infrarotbereich

- 1 Infrarotstrahler
- 2 Hohlspiegel
- 3 Filterrad (siehe Bild 8)
- 4 Antriebsmotor mit Getriebe für Filterrad
- 5 Unterbrecherrad
- 6 verstellbarer Spalt
- 7 Drehwinkelgeber
- 8 Eintrittsöffnung mit Sammellinse und Luftspülung
- 9 Meßstrecke
- 10 Austrittsöffnung mit Fenster und Luftspülung
- 11 Empfänger mit Sammellinse

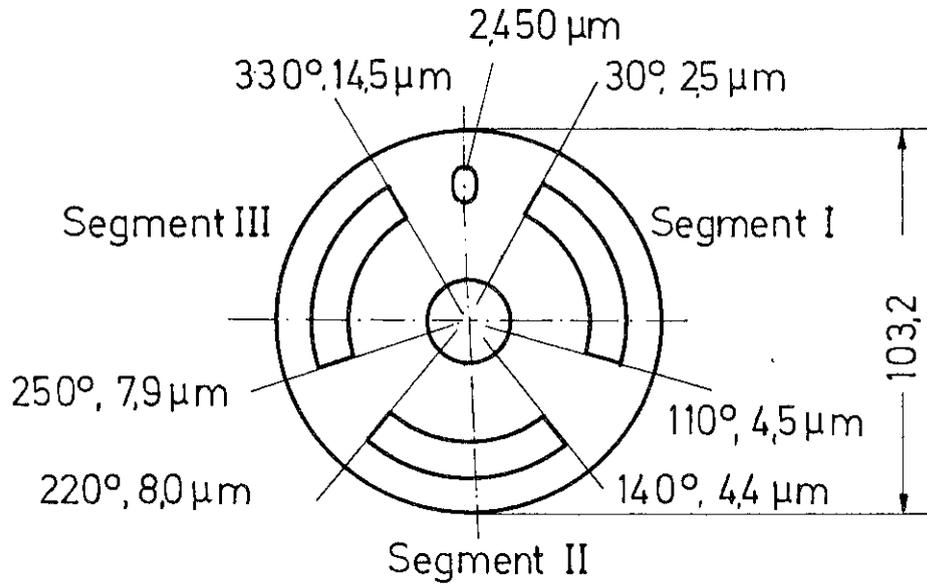


Bild 8: Anordnung der Segmente auf dem Filterrad und ihre physikalischen Daten

Segment I $\lambda = 2,5 \mu\text{m}$ bis $4,5 \mu\text{m}$
HW < 1,35% d.h. bei $2,5 \mu\text{m} < 0,034 \mu\text{m}$
bei $4,5 \mu\text{m} < 0,061 \mu\text{m}$

Segment II $\lambda = 4,4 \mu\text{m}$ bis $8,0 \mu\text{m}$
HW < 1,35% d.h. bei $4,4 \mu\text{m} < 0,059 \mu\text{m}$
bei $8,0 \mu\text{m} < 0,108 \mu\text{m}$

Segment III $\lambda = 7,9 \mu\text{m}$ bei $14,5 \mu\text{m}$
HW < 1,8% d.h. bei $7,9 \mu\text{m} < 0,142 \mu\text{m}$
bei $14,5 \mu\text{m} < 0,261 \mu\text{m}$

Filter für $\lambda = 2,450 \mu\text{m}$
HW = 1% d.h. $0,025 \mu\text{m}$

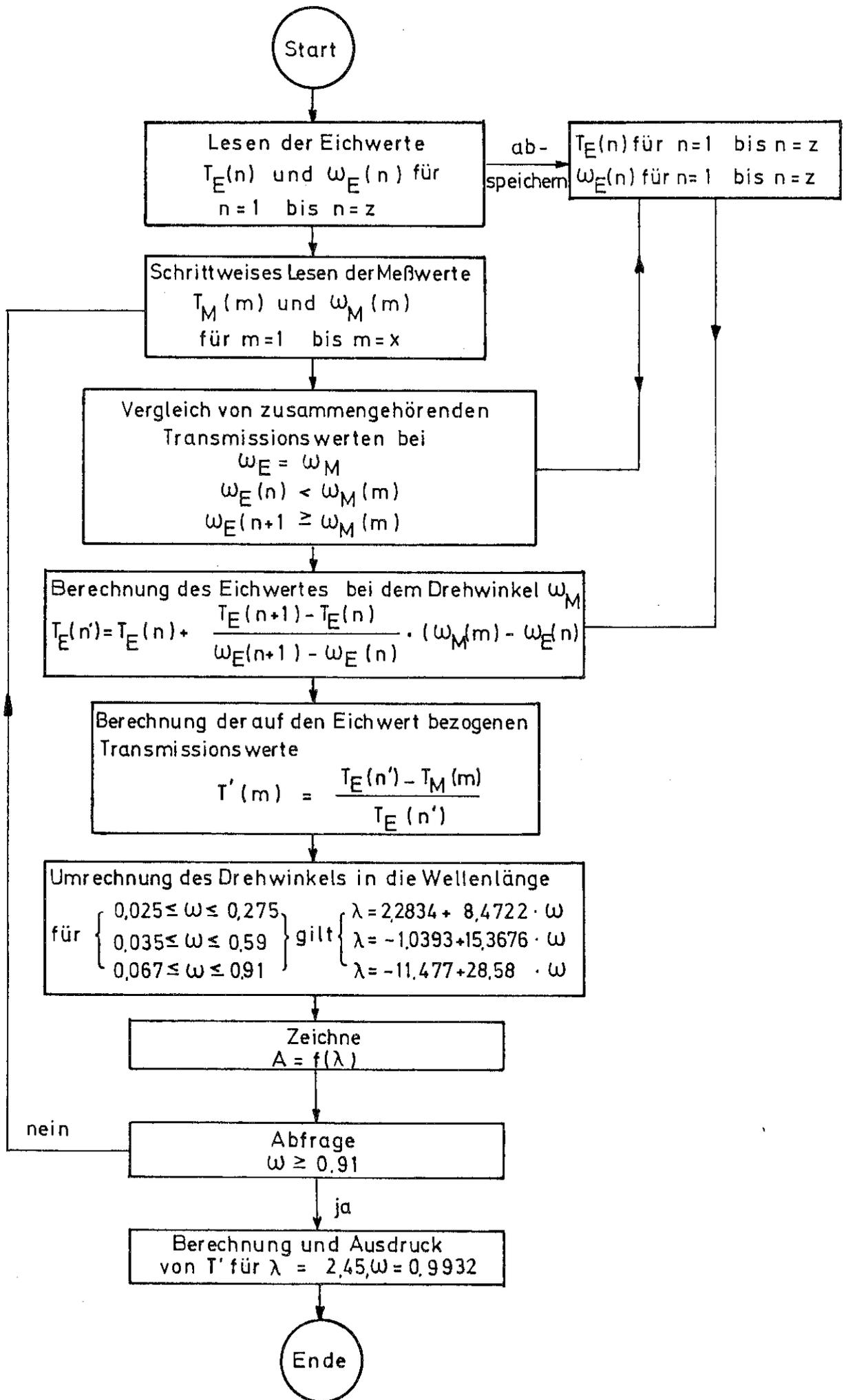


Bild 9: Fließschema des Auswerteprogrammes

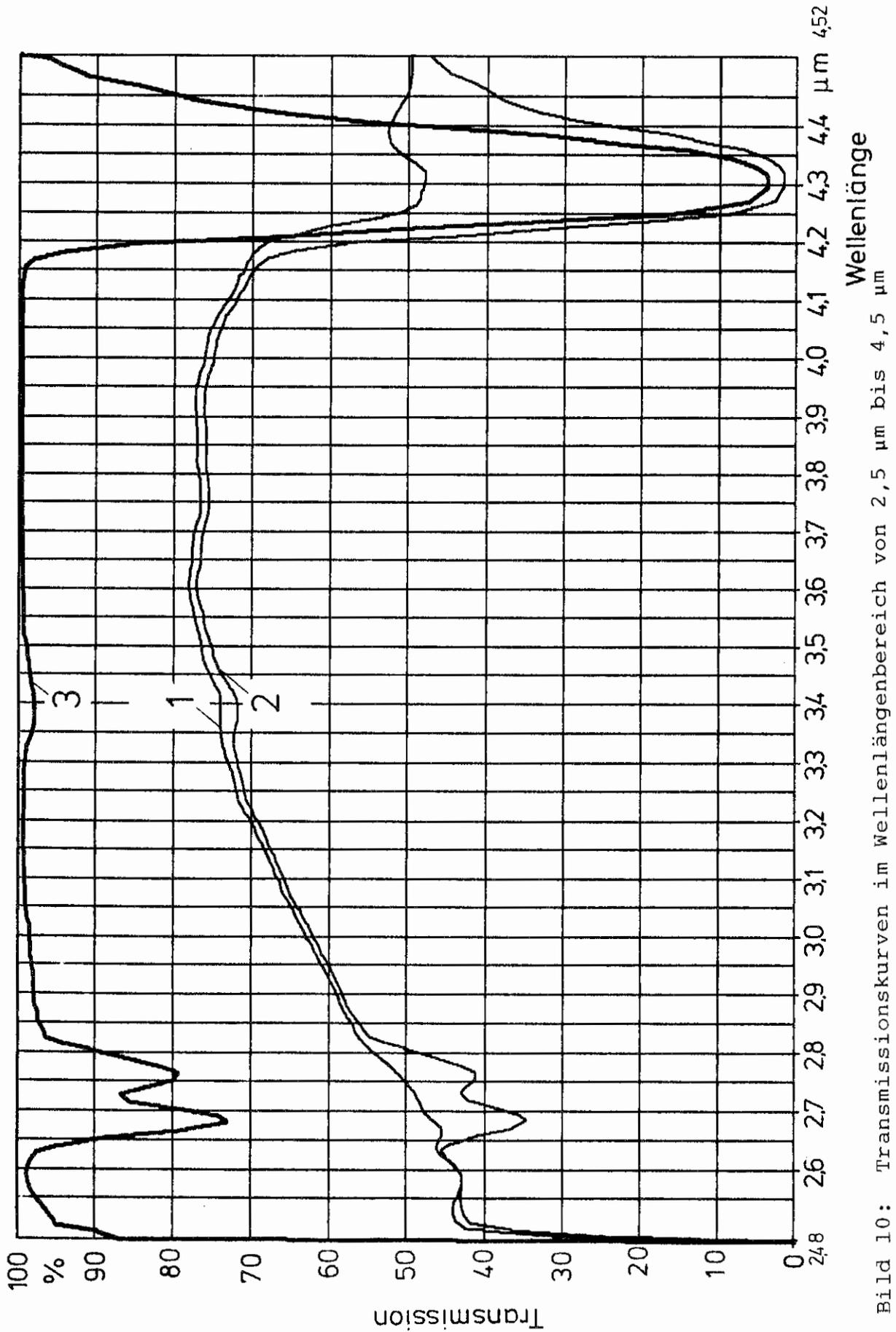


Bild 10: Transmissionskurven im Wellenlängenbereich von 2,5 μm bis 4,5 μm

1 reine Luft 3 auf den Eichwert (reine Luft) bezogene Transmissionswert
2 10% CO_2 in Stickstoff nach Gleichung (6)