

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

## BERICHTE

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

Teil 2:  
Optische Brandrauchdichte.

# 50

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

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

Forschungsbericht Nr.50

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

Teil 2: Optische Brandrauchdichte.

von

Dipl.-Ing.Reiner John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Dezember 1983

FA.Nr. 96 (4/82)

	FORMELZEICHEN	
	INDIZES	
1.	EINLEITUNG	1
2.	LITERATURÜBERSICHT	2
2.1	Messung der optischen Brandrauchdichte	2
2.1.1	Theoretische Grundlagen	2
2.1.2	Meßverfahren	4
2.2	Überblick über Untersuchungen der Zusammen- setzung und der optischen Eigenschaften von Brandrauch	8
2.2.1	Chemische Zusammensetzung des Brandrauches	8
2.2.2	Art und Größe der Rauchpartikel	10
2.2.3	Optische Rauchdichte	11
2.2.4	Untersuchung der Sichtverhältnisse durch Brandrauch	12
2.2.5	Beeinträchtigung des Menschen durch Brandrauch	14
2.3	Maximal zulässige Brandrauchkonzentration in Rettungswegen aufgrund der Literatur- angaben	16
3.	VERDÜNNUNG DES BRANDRAUCHES	17
4.	VERSUCHE ZUR BEURTEILUNG DER VERDÜNNUNG VON BRANDRAUCH DURCH UNTERSCHIEDLICHE ZULUFTVOLUMENSTRÖME HINSICHTLICH DER OPTISCHEN DICHTEN	19
4.1	Versuchsaufbau	19
4.2	Meßmethoden zur Bestimmung der optischen Rauchdichte	20
4.2.1	Meßanordnung 1	20
4.2.2	Meßanordnung 2	21
4.2.3	Meßanordnung 3	21
4.2.4	Meßanordnung 4	22
4.3	Brandgut und Zuluftvolumenstrom	22
4.4	Auswertung der Meßwerte	23
4.4.1	Optische Rauchdichte	23
4.4.2	Berechnung des Verdünnungsgrads	24

		Seite
5.	VERSUCHSERGEBNISSE	25
5.1	Optische Rauchdichte	25
5.2	Verdünnung	28
6.	SCHADSTOFFGEHALT DES VERDÜNNTEN BRAND- RAUCHES	29
7.	DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE	31
8.	ZUSAMMENFASSUNG	33
9.	LITERATUR	34
	TABELLEN	39
	BILDER	41

## FORMELZEICHEN

$C_{\text{ext}}$	Extinktionsquerschnitt, siehe Gleichung (11)
$D$	äquivalenter Durchmesser der Teilchenprojektionsfläche
$I$	Lichtstrom
$I(\lambda)$	Lichtstrom bei der Wellenlänge $\lambda$ für monochromatisches Licht
$I_{\lambda}$	spektraler Lichtstrom $dI/d\lambda$
$K$	Konstante, siehe Gleichung (11)
$l$	Länge der Meßstrecke
$n$	Luftzahl
$R$	Korrekturfaktor für Streulicht, siehe Bild 3
$S$	Sichtweite
$T(\lambda)$	spektrale Transmission des Brandrauches
$v$	Verdünnungsgrad, siehe Gleichung (18)
$V$	Volumen
$\dot{V}$	Volumenstrom
$V(\lambda)$	spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für Tagsehen
$x$	Länge
$Y$	siehe Bild 3
$Z$	Teilchenkonzentration im Brandrauch
$\epsilon(\lambda)$	spektrale Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers
$\theta$	Öffnungswinkel, siehe Bild 2
$\sigma$	Extinktionskoeffizient bei natürlicher Logarithmendarstellung
$\sigma'$	Extinktionskoeffizient bei dekadischer Logarithmendarstellung
$\sigma(n)$	Extinktionskoeffizient berechnet aus den mit der Meßanordnung $n = 1, 2$ oder $3$ ermittelten Werten
$\sigma(\lambda)$	spektraler Extinktionskoeffizient
$\overline{\sigma(n)}$	zeitlicher Mittelwert von $\sigma(n)$ über die Zeit, in der $\sigma(\lambda)$ von $0,400 \mu\text{m}$ bis $0,700 \mu\text{m}$ gemessen wurde
$\overline{\sigma(\lambda)}$	Mittelwert von $\sigma(\lambda)$ im Bereich von $0,400 \mu\text{m}$ bis $0,700 \mu\text{m}$ entsprechend Gleichung (19)
$\tau(\lambda)$	spektrale Transmission von Optik und Filter einer Brandrauchdichtemeßstrecke

## INDIZES

0	von der Lichtquelle ausgehend
1	beim Eintritt in die Meßstrecke
2	beim Austritt aus der Meßstrecke
BR	Brandrauch
E0	auf den Empfänger auftreffend
E1	vom Empfänger ohne Brandrauch in der Meßstrecke abgegeben
E2	vom Empfänger mit Brandrauch in der Meßstrecke abgegeben
f	Wasseranteil in Dampfform
g	bezogen auf die Gesundheitsgefährdung
gem	gemessen
L	Luft
min	minimal
s	bezogen auf die Sichtverhältnisse
st	stöchiometrisch
tr	Wasseranteil in flüssiger Form
ZL	Zuluft
zul	zulässig

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

Teil 2: Optische Brandrauchdichte

## 1. EINLEITUNG

Der durch einen Brand in einem Gebäude entstehende Rauch breitet sich im ganzen Gebäude aus, wenn keine besonderen Schutzmaßnahmen getroffen werden. Dieser Brandrauch in Rettungswegen stellt die größte Gefahr für Personen dar. Nahezu alle Todesfälle bei Gebäudebränden sind durch die Einwirkung des Brandrauches hervorgerufen worden.

Brandrauch wirkt in mehrfacher Weise auf den Menschen ein. Neben der direkten Gesundheitsgefahr durch toxische Gase, z.B. Kohlenmonoxid oder die Atemwege reizende Säurenanteile ergeben sich durch die Sichtbehinderung so große psychologische und physiologische Auswirkungen, daß Rettungswege nicht mehr benutzt werden bzw. benutzt werden können. Diese Sichtbehinderung stellt auch eine Gefahr für die Personen dar, die mit Atemschutzgeräten ausgerüstet sind. Insbesondere handelt es sich hierbei um Feuerwehrkräfte, die zur Rettung von Personen, wie z.B. Kranken und Verletzten sowie zur Brandbekämpfung in das Gebäude eindringen müssen.

Dabei ist weiterhin zu berücksichtigen, daß gewisse toxische Gase im Brandrauch bei kurzen Einwirkungszeiten noch keine Gesundheitsschäden verursachen. Durch die eingeschränkten Sichtverhältnisse wird jedoch die Zeit für das Verlassen der mit den toxischen Gasen angefüllten Räume vergrößert bzw. die Zeit bis zum Auffinden von an der Flucht gehinderten Personen durch Retter verlängert, wodurch die Einwirkungsdauer so groß werden kann, daß dadurch Gesundheitsschäden auftreten.

Die Sicht innerhalb von Rettungswegen stellt daher sowohl für die Personen, die im Brandfall das Gebäude verlassen müssen als auch für die Rettungsmannschaften eine große Gefahr dar.

Zur Beurteilung der Sichtbehinderung bzw. zur Bestimmung der Anteile des Brandrauches in der Raumluft wird die optische Dichte verwendet. Die Werte für die optische Dichte können mit verschiedenen Meßverfahren bestimmt werden. Ebenso werden verschiedene Einheiten zur Angabe der optischen Dichte verwendet. Ein Vergleich von Werten ist daher nur bei gleichen Bezugsgrößen möglich, die mit vergleichbaren Meßsystemen gewonnen wurden.

## 2. LITERATURÜBERSICHT

### 2.1 Messung der optischen Brandrauchdichte

#### 2.1.1 Theoretische Grundlagen

Die durch Brandrauch verursachte Sichtbehinderung wird durch die Bestimmung der optischen Dichte des Brandrauches bzw. des Gemisches aus Luft und Brandrauch gekennzeichnet. Die Grundlage für diese Messungen ist das Gesetz der Lichtabsorption.

Ein Strom monochromatischen Lichtes der Wellenlänge  $\lambda$ , der einen homogenen, absorbierenden Körper durchläuft, wird in jeder Schicht der Dicke  $dx$  um einen konstanten Bruchteil  $dI(\lambda)$  seiner Intensität  $I(\lambda)$  geschwächt. Dafür ergibt sich die Differentialgleichung

$$-\frac{dI(\lambda)}{I(\lambda)} = \sigma(\lambda) dx, \quad (1)$$

Nach einer Integration über die Strecke  $x$  gilt:

$$-\ln \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} = \sigma(\lambda)x \quad \text{bzw.} \quad (2)$$

$$I(\lambda) = I_1(\lambda) \cdot e^{-\sigma(\lambda)x} \quad (3)$$

oder in dekadischer Logarithmendarstellung

$$- \lg \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} = \sigma'(\lambda)x \quad \text{bzw.} \quad (4)$$

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \cdot 10^{-\sigma'(\lambda)x} \quad (5)$$

Dabei gilt:

$$\sigma'(\lambda) = 0,434 \sigma(\lambda) \quad (6)$$

Zur Definition der Sichtbehinderung können die Gleichungen (3) und (5) herangezogen werden. Aus ihnen ergeben sich für die Beurteilung der optischen Brandrauchdichte folgende Größen:

1. der Extinktionskoeffizient  $\sigma(\lambda)$  bzw.  $\sigma'(\lambda)$  oder als Mittelwert über einen bestimmten Wellenlängenbereich  $\sigma$  bzw.  $\sigma'$ ,
2. die Extinktion  $\sigma(\lambda) \cdot x$  bzw.  $\sigma'(\lambda) \cdot x$  und  $\sigma \cdot x$  bzw.  $\sigma' \cdot x$ , und
3. die Transmission  $T(\lambda) = I_2(\lambda)/I_1(\lambda)$  oder als Mittelwert über eine bestimmte Wellenlänge  $T = I_2/I_1$ .

Die Extinktion  $\sigma(\lambda) \cdot x$ ,  $\sigma'(\lambda) \cdot x$  bzw.  $\sigma \cdot x$ ,  $\sigma' \cdot x$  wird auch häufig als optische Dichte bezeichnet.

Die oben aufgeführten Beziehungen gelten auch für monochromatisches Licht nur dann, wenn der Strahlendurchgang durch einen optisch klaren, isotropen, homogenen und nicht lumineszierenden Stoff erfolgt. Wird eine dieser Bedingungen nicht erfüllt bzw. wird die Wellenlänge des Lichtes verändert, so können die Werte nicht miteinander verglichen werden.

### 2.1.2 Meßverfahren

Der Aufbau des häufig in Labors eingesetzten optischen Rauchdichtemeßgerätes ist in Bild 1 dargestellt. Es besteht im wesentlichen aus der Lichtquelle 1, dem optischen System 2, daß im Rauchkanal 4 einen parallelen Lichtstrahl erzeugt und das Licht nach dem Durchgang durch den Kanal wieder auf den Empfänger 5 bündelt, der sein Signal 6 an die Auswertelektronik o.ä. weitergibt. Der Ein- und Austritt in bzw. aus den Rauchkanal erfolgt durch die Fenster 3. Bei dieser Messung treten gegenüber den im Abschnitt 2.1.1 aufgestellten Beziehungen Abweichungen grundsätzlicher Art auf. Die Lichtquelle ist in der Regel keine monochromatische Lichtquelle, sondern eine Lampe mit einer speziellen wellenlängenabhängigen Intensitätsverteilung der Strahlung. Die abgegebene Strahlungsleistung  $I_0$  der Lichtquelle ergibt sich aus einer Integration des spektralen Lichtstromes  $I_{\lambda 0}$  über den Wellenlängenbereich, in dem Strahlungsenergie ausgesandt wird.

$$I_0 = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda 0} \cdot d\lambda \quad (7)$$

Entsprechend der eingebauten Optik einschließlich der Filter wird diese von der Lampe abgegebene Strahlung wiederum in Abhängigkeit von der Wellenlänge unterschiedlich absorbiert und dem Empfänger zugeführt. Dabei wird zunächst angenommen, daß im Rauchkanal keine Absorption erfolgt. Die am Empfänger ankommende Strahlung  $I_{E0}$  wird durch die spektrale Transmission von Optik und Filter verändert

$$I_{E0} = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) I_{\lambda 0} \cdot d\lambda \quad (8)$$

Die auf den Empfänger auftreffende Strahlung  $I_{E0}$  wird von diesem entsprechend seiner spektralen Empfindlichkeit  $\epsilon(\lambda)$  in ein elektrisches Signal umgesetzt. Dieses abgegebene Signal  $I_{E1}$  ist:

$$I_{E1} = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot I_{\lambda 0} \cdot d\lambda. \quad (9)$$

Befindet sich in dem Rauchkanal Brandrauch, so erfolgt eine Abschwächung der auf den Empfänger auftreffende Strahlung und dadurch ist in diesem Fall das abgegebene Signal  $I_{E2} < I_{E1}$ . Diese Absorption durch den Brandrauch ist abhängig von der Teilchenkonzentration, Gas- bzw. Teilchenart und wiederum von der Wellenlänge des Strahlers. Setzt man für die durch den Brandrauch hervorgerufene Änderung der Transmission die Funktion  $T(\lambda)$  in Gleichung (9) mit ein, so ist das Ausgangssignal des Aufnehmers

$$I_{E2} = \int_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot I_{\lambda 0} \cdot d\lambda. \quad (10)$$

Die zur Bewertung der optischen Rauchdichte herangezogenen Größen  $I_{E1}$  und  $I_{E2}$  entsprechend den Werten  $I_2$  und  $I_1$  unter Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften der optischen Rauchdichtemeßanordnung. Im Gegensatz zu monochromatischem Licht gehen bei der Verwendung einer Glühlampe als Lichtquelle nicht nur die von der Wellenlänge abhängigen Einzelwerte, sondern auch ihre von der Wellenlänge abhängige Verteilungsfunktion innerhalb des ausgestrahlten Wellenlängenbereiches mit in das Ergebnis ein.

Meßergebnisse, die sich auf die optische Dichte von Brandrauch oder ähnlichen Stoffen beziehen, können daher nur dann miteinander verglichen und beurteilt werden, wenn der bei dem Meßsystem verwendete Wellenlängenbereich, die Verteilungsfunktion, der spektrale Empfindlichkeitsbereich sowie die Art und Größe der Brauchteilchen und die Gasart im wesentlichen übereinstimmen.

Untersuchungen über die Abhängigkeit der Extinktionseigenschaften von Brandrauch im optischen Spektralbereich sowie ein

Vergleich der optischen Rauchdichtemessung mit monochromatischem und nichtmonochromatischem Licht wurde von Portscht in /1/ und /2/ durchgeführt. In /1/ ist hauptsächlich der Extinktionsquerschnitt  $C_{\text{ext}}$ , der die Absorptionseigenschaften der einzelnen Teilchen im Brandrauch beschreibt, in Abhängigkeit von der Wellenlänge untersucht worden.

$$C_{\text{ext}} = \frac{\sigma(\lambda)}{z} \quad (11)$$

Dieser Wert  $C_{\text{ext}}$  ist abhängig vom Brandstoff, der Teilchengröße sowie der Wellenlänge. Dabei zeigt sich z.B., daß der Extinktionsquerschnitt für Azetylen- und Propanruß u.a. sehr stark von dem Partikeldurchmesser abhängig ist. Bei einer Wellenlänge von  $0,5 \mu\text{m}$  beträgt  $C_{\text{ext}}$  bei einem Partikeldurchmesser von  $0,1 \mu\text{m}$  ca.  $2 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}^2$  und bei einem Partikeldurchmesser von  $0,5 \mu\text{m}$  ca.  $0,5 \cdot 10^{-1} \mu\text{m}^2$ . Die unterschiedlichen spektralen Strahldichten einer Wolframbandlampe in Abhängigkeit von der Temperatur sowie die relative spektrale Empfindlichkeit verschiedener Strahlungsempfänger kann aus /2/ entnommen werden.

Auf einen weiteren Einfluß bei der optischen Rauchdichtemessung macht Mulholland /3/ aufmerksam. Es handelt sich hierbei um die Lichtstreuung in Richtung auf den Strahlungsempfänger. Um diese zusätzliche Streulichteinstrahlung zu verhindern bzw. klein im Verhältnis zum Transmissionsanteil zu halten, müssen beim Bau der Meßeinrichtung bestimmte Bedingungen erfüllt sein. Der in Bild 2 eingezeichnete Öffnungswinkel  $\theta$  muß durch die Blende 4 auf einen Maximalwert begrenzt werden. Dieser Grenzwert beträgt nach /3/  $2 \cdot 1/10$  des Beugungswinkels, unter dem das 1. Minimum im Fraunhoferschen Beugungsbild entsteht, wenn eine Lochblende mit dem Durchmesser verwendet wird, der dem äquivalenten Projektionsdurchmesser  $D$  eines der untersuchten Rauchpartikel entspricht. Dieser maximale Winkel  $\theta$  ergibt sich im Bogenmaß nach /3/ aus der Beziehung

$$\theta = \frac{0,768 \cdot \lambda}{D \cdot \pi} \text{ rad.} \quad (12)$$

Für Rauchpartikel mit einem äquivalenten Projektionsdurchmesser von  $5 \mu\text{m}$  und einer Wellenlänge des Lichtes von  $0,55 \mu\text{m}$  ergibt sich  $\theta$  zu  $0,026 \text{ rad}$  bzw.  $1,49^\circ$ .

Anstelle der Meßanordnung mit Blende, wie im Bild 2 gezeigt, kann auch eine Anordnung gewählt werden, bei der sich der Empfänger im Brennpunkt der Sammellinse befindet. Der Winkel wird dabei durch die Brennweite der Linse sowie durch die Abmessungen der lichtempfindlichen Empfängerfläche bestimmt.

Eine quantitative Fehlerberechnung des Streulichtes auf den Strahlungsempfänger ist nach /3/ aufgrund der Mie-Theorie möglich. Dazu ist ein von  $Y$  abhängiger Korrekturfaktor  $R$  berechnet worden, der graphisch in Bild 3 dargestellt ist.

Dabei ist  $Y$ :

$$Y = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \cdot \frac{\theta}{2} \quad (13)$$

Die im Bild 3 dargestellte Kurve gilt für die Meßanordnung, bei der der Empfänger im Brennpunkt der Linse liegt, sowie unter der Bedingung gleicher Teilchendurchmesser, gleicher Wellenlänge des Lichtes und für einen Lichtbrechungsindex der Partikel von 1,5.

Bei einem Öffnungswinkel  $\theta$  von  $0,158 \text{ rad}$  für eine Meßanordnung mit einer Linse mit einer Brennweite  $10 \text{ cm}$  und einer Empfängerfläche  $1,59 \text{ cm} \times 1,59 \text{ cm}$  ergibt sich für  $D = 5 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$  ein Wert  $Y$  von  $2,26$ . Aus dem Bild 3 erhält man dazu  $R = 0,7$ . Das tatsächliche Intensitätsverhältnis  $I_2/I_1$  ergibt sich aus dem gemessenen Wert nach der Beziehung aus /3/ zu:

$$I_2/I_1 = (I_2/I_1)_{\text{gem}}^{1/R} \quad (14)$$

Bei einem gemessenen Intensitätsverhältnis  $(I_2/I_1)_{\text{gem}}$  von 0,1 beträgt bei  $R = 0,7$  der tatsächliche Wert  $I_2/I_1 = 0,037$ . Die hier angegebenen Werte beziehen sich nicht auf die Mehrfachstreuung, die bei hohen Partikelkonzentrationen auftritt. Jedoch ist nach /3/ die Mehrfachstreuung für ein richtig konstruiertes optisches Rauchdichtemeßgerät kein Problem. Nach /3/ sind genaue Messungen nur mit monochromatischem Licht (Laser) oder bei weißen Lichtquellen mit einem Bandfilter enger Bandbreite möglich. Große Schwierigkeiten bei der Messung der optischen Dichte von Brandrauch entstehen auch durch Koagulation der Rauchpartikel innerhalb sehr kurzer Zeit, durch den Rußniederschlag an den Wänden sowie durch die Kondensation.

## 2.2 Überblick über Untersuchungen der Zusammensetzung und der optischen Eigenschaften von Brandrauch

Von den vielen vorliegenden Untersuchungen des Brandrauches bezüglich ihrer Zusammensetzung und ihrer optischen Eigenschaften wurden im Folgenden einige Arbeiten zitiert, die die einzelnen Kenngrößen für unterschiedlichen Brandrauch wiedergeben.

### 2.2.1 Chemische Zusammensetzung des Brandrauches

Die chemische Zusammensetzung des Brandrauches ist wesentlich von der Art der brennenden Stoffe sowie von den Belüftungsverhältnissen des Brandortes abhängig. Damit ändern sich auch in sehr weiten Grenzen die Anteile der einzelnen Stoffe. Aus verschiedenen Versuchen ergaben sich die folgenden Maximalwerte für die einzelnen Bestandteile im Brandrauch.

Bei verschiedenen Versuchen in Mobil-Homes wurden nach /4/ maximal 21%  $\text{CO}_2$  und 8%  $\text{CO}$  gemessen. Ähnliche Maximalwerte, 21%  $\text{CO}_2$  und 7%  $\text{CO}$ , ergaben sich auch bei Wohnungsbränden nach /5/. Bei Brandversuchen in einer NBS-Kammer wurden nach /6/ bei der Verbrennung von Kunststoffen für die Innenverkleidung von Flugzeugkabinen folgende Maximalwerte ermittelt:

CO	HCN	NO+NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	HF	HCl
1000 ppm	15 ppm	17 ppm	15 ppm	30 ppm	430 ppm

Bei Schwelbränden in einem Raum mit einer sehr kleinen Öffnung zum Druckausgleich - schwelende Sessel in einem geschlossenen Raum - ergab sich nach /7/ für CO ein Wert von 0,6% nach ca. 60 min und 1,8% nach ca. 110 min.

Die Zahl und Konzentration der im Brandrauch auftretenden Gasanteile können sich durch die Verwendung von gasförmigen Löschmitteln noch wesentlich erhöhen. Beim Löschen mit Halon 1211 oder Halon 1301 entstehen durch die Zersetzung des Löschmittels in der Flamme bzw. an heißen Oberflächen Spaltprodukte wie HF, HCl oder HBr u.a., die die Gesamtkonzentration dieser Stoffe im Brandrauch erhöhen. In verschiedenen Untersuchungen nach /8/ wurden folgende maximale Konzentrationen gemessen:

HF	HCl	COCl
1700 ppm	6000 ppm	1 ppm

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß diese Mengen ganz entscheidend von den Versuchsanordnungen abhängen und daß die angewendeten Meßmethoden für die Bestimmung der Gasanteile z.T. sehr unsichere Ergebnisse liefern. Die Meßwerte des Chlorwasserstoffgehaltes wurden bei Brandversuchen mit PVC-Material erzielt und sind daher auch auf das Brandgut zurückzuführen.

Wird mit CO<sub>2</sub> gelöscht, so kann die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Brandrauch nach /9/ je nach Brandgut und Vorbrennzeit bis ca. 45% betragen.

### 2.2.2 Art und Größe der Rauchpartikel

Die Entstehung und die Größe der Rauchpartikel ist in /10/ für natürliche und synthetische brennbare Stoffe unter verschiedenen Bedingungen untersucht worden. Der wesentliche Unterschied in der Art des Brandrauches wurde zwischen einer Verbrennung mit Flammenbildung und einer Verschwelung festgestellt. Dieser Einfluß sowie der unterschiedliche Aufbau der Polymere und ihrer Zusätze führen zu den beobachteten unterschiedlichen Bildungsmechanismen und Kondensationserscheinungen der Rauchpartikel. Die Untersuchungen wurden in der "Combustion Products Test Chamber (CPTC) des Georgia Institute of Technology durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen ergaben sich die in Tabelle 1 angegebenen Teilchendurchmesser.

In dieser Tabelle sind nach /10/ die Teilchendurchmesser angegeben, durch die der Bereich abgegrenzt wird, bei dem 10% bzw. 90% der Masse der Teilchen einen kleineren Durchmesser als der angegebene Wert haben. Daraus folgt, daß der Teilchendurchmesser zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $2,3 \mu\text{m}$  liegt. Nach Angaben aus /3/ liegt der auf die Masse bezogene mittlere Teilchendurchmesser von Brandrauch bei der thermischen Zersetzung ebenfalls in diesem Bereich. Da diese Werte in kleinen Räumen ermittelt wurden, geht Mulholland in /3/ davon aus, daß in großen Räumen mit Teilchen mit einem massenbezogenen mittleren Durchmesser von ca.  $5 \mu\text{m}$  gerechnet werden muß. Die Änderung der Durchmesser der Teilchen in Abhängigkeit von der Zeit nach ihrer Entstehung sind in /11/ untersucht worden. Danach nimmt der Durchmesser der Teilchen mit zunehmender Zeit nach der Entstehung der Teilchen zu. Während bei der Entstehung der Teilchen, d.h. während der Raucherzeugung bei dem Extinktionskoeffizienten  $\sigma_0$ , der häufigste Durchmesser bei ca.  $0,5 \mu\text{m}$  bis  $0,7 \mu\text{m}$  lag, stieg er nach einer Zeit von 33 min bei einer ursprünglichen Rauchdichte entsprechend einem Extinktionskoeffizienten von  $\sigma_0 = 0,9$  auf ca.  $1,0 \mu\text{m}$  an, bei  $\sigma_0 = 1,7$  auf  $1,4 \mu\text{m}$  und bei  $\sigma_0 = 5,9$  auf  $1,3 \mu\text{m}$ . Der Durchmesser der Brandrauchteilchen ist aufgrund dieser Ergebnisse von der Zeit und von der Konzentration abhängig.

Nach /12/ besteht der bei der Verschwelung entstehende "weiße Rauch" aus Teilchen im Durchmesserbereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 1,5  $\mu\text{m}$ . Der bei der Verbrennung entstehende "schwarze Rauch" besteht aus Teilchen mit einem Durchmesser von 1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  bei der Verbrennung von Holz und 1  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$  bei der Verbrennung von Kunststoffen. Diese Ergebnisse liegen damit wesentlich über den Werten nach /3/ und /10/.

### 2.2.3 Optische Rauchdichte

Zur Bestimmung der optischen Dichte des Brandrauches wird allgemein die Schwächung eines Lichtstrahles beim Durchgang durch den Brandrauch gemessen. Die Erzeugung des Brandrauches erfolgt unter definierten Bedingungen durch eine thermische Zersetzung oder durch eine Verbrennung. In /13/ sind mehrere Verfahren zur Bestimmung der optischen Brandrauchdichte beim Verschwelen oder beim Verbrennen verschiedener Stoffe beschrieben. Da die Entstehung der Rauchpartikel von sehr vielen, z.T. in /19/ untersuchten Faktoren bestimmt wird, können die Ergebnisse, die mit den einzelnen Prüfverfahren ermittelt werden, nicht miteinander verglichen werden. Selbst die relative Bewertung von verschiedenen Materialien untereinander ist bei der Prüfung mit unterschiedlichen Prüfverfahren nicht gewährleistet. Ein weiterer Nachteil der meisten Prüfverfahren ist, daß nur Proben mit kleinen Abmessungen verwendet werden können. Dadurch ist es nicht möglich, die Materialien entsprechend ihrem anwendungsbezogenen Einsatz zu prüfen.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen von Versuchen in Modellkammern zu denen von Großversuchen werden besonders deutlich in /14/. In dieser Arbeit wird die durch den Brandrauch verursachte Lichtschwächung aufgeteilt in den Anteil, der durch die Teilchenkonzentration hervorgerufen wird und in den Anteil, der aufgrund der optischen und geometrischen Eigenschaften der Teilchen entsteht. Eine einheitliche Tendenz der Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Modell- und Großversuchen läßt sich

aufgrund der Daten in /14/ nicht erkennen. In dieser Arbeit wurde auch der Einfluß der Sauerstoffkonzentration auf die optischen Eigenschaften des Brandrauches untersucht. Die Grundtendenz der Versuchsergebnisse ist, daß mit sinkendem Sauerstoffanteil, d.h. bei Luftmangel, die optische Dichte des Brandrauches ansteigt. Der Massenverlust des Brandgutes sowie die Art und die Konzentration der Teilchen im Brandrauch werden durch die Größe des an das Brandgut übertragenen Wärmestromes bei sonst gleichen Bedingungen bestimmt. Der an das Brandgut übertragene Wärmestrom ist von der Oberfläche und der Geometrie des Brandraumes sowie der Anordnung des Brandgutes abhängig. Durch eine Änderung dieser Einflußgrößen verändern sich auch die optischen Eigenschaften des Brandrauches. Nach /14/ sind auf diese Abhängigkeit die unterschiedlichen optischen Eigenschaften des Brandrauches zwischen Modell- und Großversuchen zurückzuführen.

#### 2.2.4 Untersuchung der Sichtverhältnisse durch Brandrauch

Bei der Beurteilung der Sichtverhältnisse durch Brandrauch sind verschiedene Fälle zu berücksichtigen.

1. In einem durch die allgemeine Raumbelichtung erhellten Rettungsweg müssen bei eingedrunenem Brandrauch die Umfassungswände sowie die Türen noch zu erkennen sein.
2. Durch die Raumbelichtung angestrahlt besonders reflektierende Hinweisschilder in Rettungswegen müssen bei eingedrunenem Brandrauch noch zu erkennen sein.
3. Selbstleuchtende oder blinkende Hinweisschilder in Rettungswegen müssen bei eingedrunenem Brandrauch noch zu erkennen oder zu lesen sein.

Umfangreiche Untersuchungen zu den Punkten 2 und 3 sind von Jin durchgeführt und in /12/, /15/ und /16/ beschrieben worden. Die Versuche zur subjektiven Beurteilung der Sichtverhältnisse erfolgten mit der in Bild 4 nach /12/ dargestellten Anordnung. Die Beobachter befanden sich außerhalb des mit Brandrauch angereicherten Raumes und beurteilten die Sichtverhältnisse zu den an der Stelle 3 des Bildes 4 eingeblendeten oder aufgelegten Zeichen. Folgende wesentliche Erkenntnisse ergaben sich aus den Arbeiten von Jin. Nach /15/ liegt ein linearer Zusammenhang zwischen dem Extinktionskoeffizienten und der Sichtweite vor.

$$\sigma \cdot S = K \quad (15)$$

Die Sichtweite  $S$  eines Zeichens ergibt sich daraus zu:

$$S = \frac{K}{\sigma} \quad \text{in m} \quad (16)$$

Für reflektierende Zeichen liegt die Konstante  $K$  zwischen 2 und 4. Dabei gilt der Wert 2 für schlecht reflektierende Hinweisschilder mit einem Reflektionsgrad von 0,13 und der Wert 4 für Hinweisschilder mit einem hohen Reflektionsgrad von 0,70. Die hier aufgeführten Werte ergaben sich aus Versuchen bei einer Raumbelichtungsstärke von 40 lx.

Für selbstleuchtende Hinweisschilder liegt der Wert  $K$  zwischen 5 und 10. Der Wert 5 gilt dabei für eine Leuchtdichte der Schilder von 500 cd/m<sup>2</sup> und Schwelgase, der Wert 10 für Schilder mit einer Leuchtdichte von 2000 cd/m<sup>2</sup> und Brandrauch, der von einer Verbrennung herrührte. Die Raumbelichtungsstärke betrug bei diesen Messungen 80 lx.

Die Raumbelichtungsstärke von 20 lx bis 150 lx hat bei kleinen Abständen (5,5 m) zum selbstleuchtenden Hinweisschild nach /15/ keinen Einfluß auf das Kontrastempfinden für den Beobachter.

Mit zunehmendem Abstand wird das Kontrastempfinden bei steigender Raumbeluchtungsstärke schlechter. Bei einem Abstand von 15,5 m fällt das Kontrastempfinden von ca. 0,06 bei 30 lx Raumbeluchtungsstärke auf ca. 0,025 bei 150 lx ab.

Aufgrund von Untersuchungen des spektralen Extinktionskoeffizienten für verschiedene Raucharten und für verschiedene Zeiten nach der Raucherzeugung ergibt sich nach /15/, daß die Sichtbarkeit von roten Zeichen um 20% bis 40% besser ist als für blaue Zeichen. Die Sichtbarkeit von Hinweisschildern durch Brandrauch hindurch, die mit einer Xenon-Lampe angeblitzt wurden (Frequenz 1 Hz), sind in /16/ untersucht worden. Dabei hat sich gezeigt, daß das Produkt  $\sigma \cdot S$  in Gleichung (15) linear mit der Kondensatorkapazität der Blitzlampe ansteigt. Bei sehr großen Kondensatorkapazitäten nimmt die Sichtbarkeit nur noch wenig zu, da sehr viel Streulicht auftritt. Es ist daher schwierig, ein Blinkzeichen mit sehr großer Sichtweite gegenüber üblichen selbstleuchtenden Hinweiszeichen zu konstruieren. Es hat sich ergeben, daß die erforderliche Lichtenergie eines Blitzzeichens nur 1/10 der Energie beträgt, die für ein dauernd leuchtendes Hinweiszeichen gleicher Sichtweite benötigt wird. Zum Vergleich der Sichtweite der 3 verschiedenen Hinweiszeichen dienen die Bilder 5, 6 und 7 nach /15/. Aus den Bildern 6 und 7 erkennt man, daß die ungünstigen Sichtverhältnisse durch "weißen Rauch", der bei der Verschwelung entsteht, hervorgerufen werden. Aus dem Bild 7 ergibt sich weiterhin, daß die Sichtbarkeit von angeblitzten Zeichen verbessert wird, wenn die allgemeine Raumbeluchtungsstärke verringert wird.

#### 2.2.5 Beeinträchtigung des Menschen durch Brandrauch

Die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Beurteilungen der Sichtverhältnisse durch Brandrauch erfolgte aufgrund der Beobachtung von Personen, die sich außerhalb des verrauchten Raumes aufhielten. In /15/ und /17/ sind Ergebnisse von Versuchen dargestellt, bei denen sich die Versuchspersonen in der

mit Brandrauch angereicherten Raumlufte aufhielten. Nach /15/ wurden Versuche zur Ermittlung der Sichtbarkeit und Lesbarkeit des selbstleuchtenden Hinweisschildes "FIRE EXIT" in einem 20 m langen Flur durchgeführt.

Dabei wurde ein die Atemwege stark reizender weißer Rauch durch die Verschwelung von Holz und ein schwach reizender schwarzer Rauch durch die Verbrennung von Kerosin erzeugt. Die Ergebnisse geben die Bilder 8 und 9 wieder. Bei den Untersuchungen wurde unterschieden, ob ein Hinweisschild nur als solches erkannt wurde (Sichtbarkeit) oder ob auch der Text des Schildes zu lesen war (Lesbarkeit). Für die Sichtbarkeit des Hinweisschildes "FIRE EXIT" kann in allen untersuchten Fällen von einem Wert  $\sigma \cdot S = 4,5$  ausgegangen werden (siehe Bild 8). Um die Schrift lesen zu können, sind jedoch bei höheren Rauchkonzentrationen wesentlich kürzere Abstände der Personen zum Hinweisschild erforderlich (siehe Bild 9). Als unterer Grenzwert ergibt sich hier ein Wert  $\sigma \cdot S$  von ca. 2,5. Die Gehgeschwindigkeit von Personen in einem 20 m langen Flur ist im Bild 10 nach /15/ in Abhängigkeit von dem Extinktionskoeffizient aufgetragen. Hier zeigt sich besonders der Unterschied zwischen einem die Atemwege stark reizenden und schwach reizenden Rauch.

In /17/ ist die Konzentrationsfähigkeit und Gehgeschwindigkeit von Personen untersucht worden, die sich in einem Raum befanden, in dem durch Verschwelung von Holz Rauchgase erzeugt wurden. Bei diesen Versuchen wurde die Herz- und Atemfrequenz mit gemessen. Zur Bestimmung der Konzentrationsfähigkeit wurde eine Vorrichtung verwendet, bei der nach Anweisung ein Metallstift so in verschieden große Bohrungen eingeführt werden mußte, daß der Stift nicht den Rand der Bohrung berührte.

Diese Untersuchungen wurden an insgesamt 48 Personen durchgeführt. 24 dieser Personen waren Mitarbeiter des Forschungsinstitutes, den übrigen Personen waren derartige Untersuchungen

sowie die Räumlichkeiten unbekannt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat ergeben, daß sich diese Gruppen wesentlich unterscheiden. Die Beeinflussung durch den Brandrauch war bei der 1. Gruppe (Mitarbeiter) wesentlich geringer als bei der 2. Gruppe (Allgemeinheit). Die zulässigen Grenzwerte der Brandrauchkonzentration sind daher auch unterschiedlich für Personen, die an Brandrauch gewöhnt und mit den Räumlichkeiten vertraut sind, zu denjenigen, denen diese Situation und die Örtlichkeiten neu sind. Für die erste Gruppe (Mitarbeiter) ergab sich als zulässiger Grenzwert ein Extinktionskoeffizient von  $\sigma = 0,5 \text{ m}^{-1}$  bei einer Sichtweite von 4 m. Für die 2. Gruppe (Allgemeinheit) darf der Extinktionskoeffizient den Wert  $\sigma = 0,15 \text{ m}^{-1}$  bei einer Sichtweite von 13 m nicht überschreiten.

### 2.3 Maximal zulässige Brandrauchkonzentration in Rettungswegen aufgrund der Literaturangaben

Aufgrund der vorliegenden Literaturangaben werden im folgenden die erforderlichen bzw. die maximal zulässigen Verhältnisse in einem Rettungsweg bezüglich der Sichtverhältnisse abgeschätzt. Für die Abschätzung der Sichtverhältnisse wird ein 25 m langer Flur angenommen. Um auf die Entfernung von 25 m ein reflektierendes Hinweisschild zu erkennen, wäre mit einem Wert von  $\sigma \cdot S = 3$  nach Bild 5 eine maximal zulässige optische Rauchdichte entsprechend einem Extinktionskoeffizient von

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ m}^{-1}$$

zulässig. Dabei ist nach Bild 5 für das Hinweisschild ein Reflektionsgrad von ca. 0,7 erforderlich. Für ein selbstleuchtendes Hinweisschild mit einer Leuchtdichte von ca. 1000 cd/m<sup>2</sup> und einer allgemeinen Raumbeluchtungsstärke im Flur von 80 lx darf der maximale Wert des Extinktionskoeffizienten für  $\sigma \cdot S = 8$  nach Bild 6 den Wert

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{8}{25} = 0,32 \text{ m}^{-1}$$

nicht überschreiten.

Legt man die Verhältnisse nach Bild 8 zugrunde, Personen im Brandrauch, so darf für einen Wert  $\sigma \cdot S = 4,5$  der maximale Extinktionskoeffizient den Wert

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{4,5}{25} = 0,18 \text{ m}^{-1}$$

nicht überschreiten. Ist es erforderlich, daß der Text der Hinweisschilder gelesen werden kann, so ist die zulässige Rauchgaskonzentration weiter zu verringern. Nach Bild 9 und Abschnitt 2.2.5 ergibt sich mit  $\sigma \cdot S = 2,5$  ein Wert von

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{2,5}{25} = 0,1 \text{ m}^{-1}$$

Aufgrund der in /17/ durchgeführten Untersuchungen beträgt der zulässige Extinktionskoeffizient für Personen die nicht an Brandrauch gewöhnt und nicht mit den Örtlichkeiten vertraut sind (Allgemeinheit)

$$\sigma_{\text{zul}} = 0,15 \text{ m}^{-1}$$

Da ab einem Extinktionskoeffizienten von  $\sigma = 0,15 \text{ m}^{-1}$ , verursacht durch die Verschwelung von Holz, der Pulsschlag anstieg und das Konzentrationsvermögen nachließ, ist dies als Maximalwert anzusehen, auch wenn bezüglich der Sichtverhältnisse im Einzelfall höhere optische Brandrauchdichten zulässig wären.

### 3. VERDÜNNUNG DES BRANDRAUCHES

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch hat eine wesentlich höhere optische Rauchdichte als es dem im vorhergehenden Abschnitt ermittelten Grenzwert des Extinktionskoeffizienten von

$\sigma_{\text{zul}} = 0,15 \text{ m}^{-1}$  entspricht. Der in Rettungswege eindringende Brandrauch führt daher je nach den örtlichen Bedingungen und der vorhandenen Öffnung zwischen Brandraum und Rettungsweg innerhalb

kurzer Zeit zu einer so starken Verqualmung der Rettungswege, daß sie unpassierbar werden. Durch bauliche Maßnahmen oder durch mechanische Lüftungssysteme /18/ ist es möglich, Rettungswege im Brandfall passierbar zu halten. Das Druckbelüftungssystem, wie es in /18/ beschrieben wird, ist eine sehr aufwendige Art, den Brandraucheintritt in die Rettungswege zu verhindern. Sind jedoch die noch zulässigen Brandrauchkonzentrationen in den Rettungswegen bekannt, so kann die Auslegung so erfolgen, daß im ungünstigsten Fall gerade soviel Brandrauch in die Rettungswege eintritt, daß die zulässige Konzentration nicht überschritten wird. Dadurch ergeben sich kleinere Anlagen.

Für Lüftungssysteme, bei denen der in Rettungswege eingedrungene Brandrauch nur verdünnt wird, ist der erforderliche Verdünnungsgrad und damit der Luftvolumenstrom so zu berechnen, daß die zulässige Brandrauchkonzentration nicht überschritten wird. Die zulässige Brandrauchkonzentration in den Rettungswegen ist durch die maximale optische Rauchdichte sowie durch den jeweiligen maximalen Gehalt der verschiedenen Schadstoffe in den Brandgasen festgelegt.

Ist die chemische Zusammensetzung des Brandrauches bekannt, so kann rechnerisch die erforderliche Zumischung von Frischluft ermittelt werden um ein Brandrauch -Luftgemisch im Rettungsweg zu erhalten, in dem eine Gesundheitsgefährdung auszuschließen ist. Bezüglich der optischen Dichte des Brandrauches können noch keine derartigen Berechnungen durchgeführt werden, da das Verhalten der Rauchpartikel beim Mischen mit Frischluft bzw. ihre Entstehung unter den verschiedenen Bedingungen noch nicht ausreichend bekannt ist und durch sehr viele Faktoren beeinflusst wird. Es sind daher Versuche erforderlich, die den Einfluß der Verdünnung auf die optische Brandrauchdichte untersuchen.

#### 4. VERSUCHE ZUR BEURTEILUNG DER VERDÜNNUNG VON BRANDRAUCH DURCH UNTERSCHIEDLICHE ZULUFTVOLUMENSTRÖME HINSICHTLICH DER OPTISCHEN DICHTEN

Bei der nachfolgend beschriebenen Versuchsserie wurde die optische Dichte des Brandrauches untersucht, die sich beim Abbrand von Holz und Heizöl EL bei unterschiedlichen Zuluftvolumenströmen einstellte.

##### 4.1 Versuchsaufbau

Die zur Untersuchung der optischen Dichte sowie der chemischen Zusammensetzung der Rauchgase errichtete Versuchsanlage ist in /19/ beschrieben. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde nur der in Bild 11 dargestellte Teil der Anlagen benutzt, weil zunächst Erkenntnisse darüber gewonnen werden mußten, wie sich die optischen Eigenschaften von Brandrauch in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftvolumenstrom ändern.

Im Verbrennungsraum 1, siehe Bild 11, wurden die bei den Versuchen verwendeten Holzkrippen bzw. die Heizölbehälter auf dem Waagerahmen 2 aufgebaut. Der Abbrand des Materials erfolgte bei unterschiedlichen Zuluftvolumenströmen, die über die Ventilatoren 4 angesaugt und mit Hilfe der Drosselklappe 5 geregelt wurden. Ermittelt wurde die Größe des Zuluftvolumenstromes über die Strömungsgeschwindigkeit mittels des Prandlrohres 7. Am Ende der Brandrauchleitung 6 wurde an den Meßstellen 11 und 12 die optische Rauchdichte gemessen. Um die Meßergebnisse verschiedener optischer Rauchdichtemeßstrecken untereinander vergleichen zu können, wurden die optischen Rauchdichten mit 4 verschiedenen Meßanordnungen ermittelt.

Während des Versuches wurden folgende Meßwerte aufgezeichnet (siehe Bild 11):

Temperatur 1 und dynamischer Druck des Zuluftvolumenstromes an den Stellen 7 und 8,  
zeitlicher Massenverlust des Brandgutes an der Stelle 2,  
Temperaturen T2 und T3 des Brandrauches an den Stellen 9 und 10,  
Ausgangssignal der Fotozellen der optischen Rauchdichtemeßgeräte an den Stellen 11 und 12.

Während in die Meßstrecke 11 abwechselnd die Meßanordnung 1, 2 oder 3 eingesetzt wurde, war in der Meßstrecke 12 als Vergleichsstelle immer die Meßanordnung 4 eingebaut.

#### 4.2 Meßmethoden zur Bestimmung der optischen Rauchdichte

Die im folgenden beschriebenen Methoden wurden zur Messung der optischen Rauchdichte eingesetzt.

##### 4.2.1 Meßanordnung 1

Die Meßanordnung 1 zur Ermittlung der Lichtschwächung durch den Brandrauch besteht aus einer Lichtquelle, einer Linse sowie aus dem Empfänger. Das von der Lichtquelle, einer Glühlampe 6V, 5W, ausgehende Licht wird durch eine Linse annähernd parallel gerichtet. Durch ein mit Frischluft gespültes Fenster aus Fensterglas tritt es in den Rauchgaskanal ein. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein zweites Fenster, hinter dem unmittelbar der Empfänger angeordnet ist. Die maximale Empfindlichkeit dieser Meßanordnung liegt, entsprechend Bild 12, bei einer Wellenlänge von ca.  $0,89 \mu\text{m}$ . Begrenzt wird der Empfindlichkeitsbereich durch den Emissionsbereich der Glühlampe (Kurve 1) bei etwa  $0,400 \mu\text{m}$  (blau) und durch die Empfindlichkeit der Siliziumfotозelle (Kurve 2) bei ca.  $1,08 \mu\text{m}$ . Durch die beiden Glasfenster wird entsprechend Bild 12 Kurve 4 die Durchlässigkeit des Lichtes im Bereich von  $0,4 \mu\text{m}$  bis  $0,85 \mu\text{m}$  um

durchschnittlich 15% abgeschwächt.

#### 4.2.2 Meßanordnung 2

Die Meßanordnung 2 entspricht in ihrem Aufbau der Meßanordnung 1 bis auf ein vor den Empfänger eingebautem Filter. Dabei handelt es sich um einen Kurzpaßkantenfilter mit den im Bild 12 (Kurve 5) eingezeichneten Verlauf der Transmission. Dieser Filter läßt Strahlungsenergie mit einer Wellenlänge  $> 0,680 \mu\text{m}$  nicht mehr durch. Die maximale Empfindlichkeit dieser Meßanordnung liegt bei einer Wellenlänge von ca.  $0,64 \mu\text{m}$  gegenüber  $0,89 \mu\text{m}$  bei der Meßanordnung 1. Die maximale Empfindlichkeit liegt damit im Bereich des sichtbaren Lichtes (hellrot). Nach /15/, siehe Abschnitt 2.2.4, ergibt sich für diese Farbe die größte Sichtweite bzw. erfolgt die geringste Lichtabsorption.

#### 4.2.3 Meßanordnung 3

Als Meßanordnung 3 diente die handelsübliche Rauchdichtemeßeinrichtung Type ME 82 der Firma Maurer mit dem Meßlichtgeber MG 82-G und dem Meßlichtempfänger ME 82/25-E. Der optische Aufbau entspricht etwa dem nach Bild 1. Als Lichtsender wird eine Glühlampe, angepaßt an die Normallichtart A nach DIN 5033, verwendet. Die Lichtaustrittsöffnung hat einen Durchmesser von 25 mm. Auf der Empfängerseite ist im Brennpunkt der Sammellinse eine Milchglasscheibe angeordnet. Zwischen dieser Scheibe und dem dahinter liegenden Empfänger befindet sich ein  $V(\lambda)$  - Filter zur Anpassung an die Augenempfindlichkeit für Tageslichtsehen. Bei einer aktiven Fläche der Milchglasscheibe von 16 mm und einer Brennweite der Sammellinse von 80 mm ergibt sich entsprechend Bild 2 ein Öffnungswinkel  $\theta$  von  $11,42^\circ$  bzw.  $0,1994 \text{ rad}$ . Nach Abschnitt 2.1.2 darf aber bei diesem Wert des Öffnungswinkels  $\theta$  und bei einer mittleren Wellenlänge des Lichtes von  $0,55 \mu\text{m}$  nach Gleichung (12) der Teilchendurchmesser in den Brandgasen den Wert von  $0,67 \mu\text{m}$  nicht überschreiten, damit eine Verfälschung der Meßwerte durch die Lichtstreuung auf den

Aufnehmer ausgeschlossen werden kann. Nach Abschnitt 2.2.2 ist jedoch mit Teilen bis zu einem Durchmesser von 20  $\mu\text{m}$  zu rechnen. Daraus folgt, daß die von /3/ aufgestellte Forderung für die Meßanordnung 3 nicht erfüllt ist und mit einer Verfälschung der Meßwerte durch die Lichtstreuung auf den Empfänger gerechnet werden muß.

#### 4.2.4 Meßanordnung 4

Die Meßanordnung 4 entspricht dem in /19/ beschriebenen Meßaufbau zur Bestimmung der spektralen Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich von 0,4  $\mu\text{m}$  bis 0,7  $\mu\text{m}$ . Mit dieser Meßanordnung wird die Abhängigkeit der Transmission bzw. des Extinktionskoeffizienten von der Wellenlänge im sichtbaren Bereich untersucht.

Vor einem optischen System wird ein Interferenzverlauffilter im angegebenen Wellenlängenbereich hin- und herbewegt. Bei einer Spaltbreite von 2 mm ergibt sich eine Wellenlängendifferenz des austretenden Lichtstrahls von 0,0047  $\mu\text{m}$ . Lichtquelle ist eine Halogenlampe mit einem Glasfaserlichtleiter, die handelsüblich als Kaltlichtquelle bezeichnet wird. Als Empfänger wurde ein Siliziumfotoelement mit erhöhter Blauempfindlichkeit verwendet. Wie bei der Meßanordnung 1 tritt der Lichtstrahl durch ein mit Frischluft gespültes Fenster in den Rauchkanal ein. Der Empfänger ist unmittelbar hinter dem gegenüberliegenden Fenster angeordnet. Eine Sammellinse zur Fokussierung des Lichtes auf den Empfänger ist auch hier nicht vorhanden. Inwieweit bei dieser Anordnung mit Meßfehlern durch Streulicht gerechnet werden muß, ist nicht bekannt.

#### 4.3 Brandgut und Zuluftvolumenstrom

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde Heizöl EL sowie Holz in Form von Krippen verbrannt. Die Holzkrippen wurden aus gesägten Kiefernholzstäben, Querschnitt 20 mm x 20 mm, Länge 400 mm, errichtet. Es wurden 7 Lagen mit je 4 Hölzern aufgesetzt.

Je nach gewünschter Branddauer wurden z.T. 2 Krippen hintereinander gesetzt. Die vordere Krippe wurde durch 100 cm<sup>3</sup> Brennspritus in einer Zündwanne mit einer Grundfläche von 100 mm x 100 mm entzündet. Das Heizöl EL wurde in Behältern mit Durchmessern von 125 mm, 275 mm und 350 mm abgebrannt. Der Zuluftvolumenstrom in den Brandraum wurde bei allen Versuchen stufenweise zwischen 0,14 m<sup>3</sup>/s und 0,75 m<sup>3</sup>/s verändert.

#### 4.4 Auswertung der Meßwerte

##### 4.4.1 Optische Rauchdichte

Die optische Rauchdichte wird durch den Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  gekennzeichnet. Die Bezugsgröße für die Berechnung ist der vom Fotoelement abgegebene Strom, der der einfallenden Lichtenergie proportional ist. Dieser Strom ist im Fall von reiner Luft in der Meßstrecke  $I_{E1}$ , im Fall der teilweisen Absorption durch den Brandrauch  $I_{E2}$ . Die absolute Größe dieser Werte ist abhängig von der verwendeten Meßanordnung. Aus dem Verhältnis  $I_{E1}$  zu  $I_{E2}$  ergibt sich der Extinktionskoeffizient  $\sigma(n)$  zu:

$$\sigma(n) = \frac{\ln \frac{I_{E2}}{I_{E1}}}{l} \quad (17a)$$

$\sigma(n)$  ist hierbei der auf die angewendete Meßanordnung  $l$  bis 3 bezogene Wert. Die Meßstrecke  $l$  ist bei dieser Versuchsanordnung konstant und entspricht dem Durchmesser der Brandrauchrohrleitung von 0,63 m.

Für  $I_{E2}$  kann auch der zeitliche Mittelwert  $\overline{I_{E2}}$  über eine bestimmte Versuchsdauer eingesetzt werden. Dafür wird:

$$\overline{\sigma(n)} = \frac{\ln \frac{\overline{I_{E2}}}{I_{E1}}}{l} \quad (17b)$$

Für die Meßanordnung 4, mit der die spektrale Transmission gemessen wird, gilt:

$$\sigma(\lambda) = \frac{\ln \frac{I_{E2}(\lambda)}{I_{E1}(\lambda)}}{1} \quad (17c)$$

#### 4.4.2 Berechnung des Verdünnungsgrads

Als Verdünnungsgrad  $v$  des Brandrauches wird hier das Verhältnis des Anteiles des Zuluftvolumenstromes, der nicht zur Verbrennung unter stöchiometrischen Bedingungen benötigt wird, zum theoretischen Brandrauchvolumenstromes bei stöchiometrischer Verbrennung bezeichnet. Liegt die Mischungstemperatur über  $100^\circ\text{C}$ , so wird das im Brandrauch enthaltene Wasser als Wasserdampf volumenmäßig mitberücksichtigt.

$$v = \frac{\dot{V}_{ZL} - \dot{V}_{Lst}}{\dot{V}_{BRst}} \quad (18)$$

Für die Verbrennung von Holz wurde nach /20/ folgende Werte bezogen auf  $0^\circ\text{C}$  und  $1,013$  bar in Gleichung (18) eingesetzt.

$$V_{Lst} = 3,60 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{BRsttr} = 3,61 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{für } t_{BR} < 100^\circ\text{C}$$

$$V_{BRstf} = 4,31 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{für } t_{BR} \geq 100^\circ\text{C}$$

Bei der Verbrennung von Heizöl wurden nach /21/ folgende Werte bezogen auf 0°C und 1,013 bar in Gleichung (18) eingesetzt.

$$V_{L \text{ st}} = 11,08 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{BR \text{ st tr}} = 10,35 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{für } t_{BR} < 100^\circ\text{C}$$

$$V_{BR \text{ st f}} = 11,80 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{für } t_{BR} \geq 100^\circ\text{C}$$

Die Volumenströme  $\dot{V}_{L \text{ st}}$  und  $\dot{V}_{BR \text{ st}}$  wurden aus dem gemessenen zeitlichen Massenverlust des Brandgutes berechnet.

## 5. VERSUCHSERGEBNISSE

### 5.1 Optische Rauchdichte

Als Beispiel für die Abhängigkeit der optischen Brandrauchdichte von der Wellenlänge dienen die Bilder 13 und 14. In diesen Bildern sind mit Gleichung (17c) berechnete Extinktionskoeffizienten  $1\sigma(\lambda)$  bis  $3\sigma(\lambda)$  als ausgezogene Linien über der Wellenlänge aufgetragen. Der Parameter ist in Bild 13 der Zuluftvolumenstrom und in Bild 14 die Versuchszeit. Die in Bild 13 dargestellten Kurven wurden aus den beim Abbrand von Heizöl EL in einem Behälter mit einem Durchmesser von 125 mm erhaltenen Ergebnisse berechnet. Der Zuluftvolumenstrom bei Versuch 1 (Kurve 1) betrug  $\dot{V}_{ZL} = 0,305 \text{ m}^3/\text{s}$ , bei Versuch 2 (Kurve 2)  $\dot{V}_{ZL} = 0,142 \text{ m}^3/\text{s}$  und bei Versuch 3 (Kurve 3)  $\dot{V}_{ZL} = 0,727 \text{ m}^3/\text{s}$ . Aus diesen Zuluftvolumenströmen ergaben sich zusammen mit den gemessenen Massenverlusten die Verdünnungsgrade nach Gleichung (18) für die Kurve 1 zu  $v = 247$ , für Kurve 2 zu  $v = 115$  und für Kurve 3 zu  $v = 591$ . Die in die Bilder 13 und 14 eingetragenen Kurven  $1\overline{\sigma}(l)$  bis  $3\overline{\sigma}(l)$  sind die nach Gleichung (17b) aus den Meßwerten der Meßanordnung 1 berechneten zeitlichen Mittelwerte über den Zeitbereich, in dem die Meßwerte für  $\sigma(\lambda)$  aufgezeichnet wurden.

Um diese Werte mit den spektralen Werten  $\sigma(\lambda)$  besser vergleichen zu können, wurde aus den Kurven  $1\sigma(\lambda)$  bis  $3\sigma(\lambda)$  ein Mittelwert nach der Beziehung

$$\bar{\sigma}(\lambda) = \frac{\ln \frac{\sum_{l=1}^m e^{\sigma(\lambda)l}}{1}}{1} = \frac{\ln \frac{\sum_{l=1}^m \frac{I_{E2}(\lambda)}{I_{E1}(\lambda)}}{1}}{1} \quad (19)$$

im Spektralbereich von 0,400  $\mu\text{m}$  bis 0,700  $\mu\text{m}$  gebildet und als Kurven  $1\bar{\sigma}(\lambda)$  bis  $3\bar{\sigma}(\lambda)$  aufgetragen. Im Bild 14 sind die Extinktionskoeffizienten  $1\sigma(\lambda)$  bis  $4\sigma(\lambda)$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge für den Abbrand von Holzkrippen bei verschiedenen Versuchszeiten als Parameter aufgetragen. Bei diesem Versuch wurde der Zuluftvolumenstrom konstant auf 0,130  $\text{m}^3/\text{s}$  gehalten. Die jeweilige Versuchszeit nach dem Entzünden der Holzkrippe steht in Klammern hinter der Kurvennummer. Da zum Durchfahren des Spektralbereiches von 0,400  $\mu\text{m}$  bis 0,700  $\mu\text{m}$  1,5 min benötigt werden, bezieht sich die Zeitangabe auf die Messung bei der Wellenlänge 0,500  $\mu\text{m}$ . Zusätzlich ist auch in das Bild 14 der im jeweiligen Zeitbereich aus den Meßwerten der Meßanordnung 1 berechnete mittlere Extinktionskoeffizient  $\sigma(1)$  als Gerade  $1\sigma(1)$  bis  $4\sigma(1)$  sowie der nach Gleichung (19) berechneten Mittelwert als Gerade  $1\bar{\sigma}(\lambda)$  bis  $4\bar{\sigma}(\lambda)$  eingezeichnet. Der mittlere Verdünnungsfaktor nach Gleichung (18) beträgt für die in Bild 14 eingezeichneten Kurven  $v = 6$ .

Aus den spektralen Extinktionskurven der Bilder 13 und 14 sowie aus den übrigen Meßwerten ergibt sich, daß im Bereich von 0,410  $\mu\text{m}$  bis 0,550  $\mu\text{m}$ , d.h. im Bereich der Farben blau bis grün eine stärkere Absorption auftritt als es dem Mittelwert  $\sigma(\lambda)$  nach Gleichung (19) entspricht. Im Bereich von 0,400  $\mu\text{m}$  bis 0,410  $\mu\text{m}$  und 0,600  $\mu\text{m}$  bis 0,700  $\mu\text{m}$  ist die Absorption geringer als der Mittelwert  $\sigma(\lambda)$ . Der Bereich 0,400  $\mu\text{m}$  bis 0,410  $\mu\text{m}$

entspricht etwa der violetten Farbe und liegt im Bereich sehr niedriger Augenempfindlichkeit (spektraler Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda) 0,610^{-4}$ ). Der Bereich  $0,600 \mu\text{m}$  bis  $0,700 \mu\text{m}$  entspricht der Farbe orange bis dunkelrot. Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$  liegt hier zwischen  $0,631$  und  $0,0411$ . Bei einem relativ hohen Hellempfindlichkeitsgrad von durchschnittlich  $0,55$  bietet sich daher orangefarbiges Licht für die Beleuchtung bzw. für die Farbe von Hinweisschildern an. Der hier gefundene Verlauf der spektralen Extinktion entspricht auch den in /15/ festgestellten Versuchsergebnissen.

Ein Vergleich der mit den optischen Rauchdichtemeßanordnungen 1, 2 und 3 erhaltenen Ergebnisse bezüglich der Extinktionskoeffizienten  $\overline{\sigma(n)}$  mit den entsprechenden Werten  $\overline{\sigma(\lambda)}$  nach Gleichung (19) ergibt, daß mit den Meßanordnungen 1, 2 und 3 niedrige optische Rauchdichten gemessen werden. Bei optischen Rauchdichten im Bereich des Extinktionskoeffizient  $0,1 \leq \overline{\sigma(\lambda)} \leq 1,0$  wurden folgende prozentuale Werte für  $\overline{\sigma(n)}$  bezogen auf  $\overline{\sigma(\lambda)} = 100\%$  aufgrund der Meßwerte berechnet.

Bei der Verbrennung von Heizöl EL:

$\overline{\sigma(1)}$	62,6%
$\overline{\sigma(2)}$	63,2%
$\overline{\sigma(3)}$	95,7%

Bei der Verbrennung von Holz:

$\overline{\sigma(1)}$	59,7%
$\overline{\sigma(2)}$	61,0%
$\overline{\sigma(3)}$	90,1%

Aus diesen Angaben zeigt sich, daß mit den Meßanordnungen 1 und 2 die Rauchdichte um ca. 40% niedriger gemessen wird als es dem Wert nach Meßanordnung 4 entspricht. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, daß die maximale relative Empfindlichkeit dieser Meßanordnungen entsprechend Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 bei  $0,89 \mu\text{m}$

bzw.  $0,64 \mu\text{m}$  liegen und daß in diesem Wellenlängenbereich eine geringe Absorption erfolgt als bei dem maximalen Helligkeitsempfinden des Auges bei  $0,507 \mu\text{m}$ . Auch bei der Meßanordnung 3 liegt die gemessene optische Rauchdichte um durchschnittlich 7% unter dem Wert nach Meßanordnung 4, was ebenfalls auf eine unterschiedliche Helligkeitsbewertung bei den Meßmethoden zurückgeführt werden kann. Dies wird z.T. dadurch bestätigt, daß sich der Verlauf der spektralen Transmission und die oben aufgeführten Abweichungen von  $\overline{\sigma(n)}$  zu  $\overline{\sigma(\lambda)}$  bei der Verbrennung von Holz und Heizöl etwas unterscheiden.

Eine endgültige Klärung werden aber erst weitere Versuche mit anderen Brandstoffen und unter anderen Abbrandbedingungen liefern.

Die spektralen Extinktionskoeffizienten sind in den Bildern 15 und 16 beim Abbrand von Heizöl EL und Holzkrippen bei konstantem Zuluftvolumenstrom in Abhängigkeit von der Branddauer dargestellt. Aus diesen Darstellungen ergibt sich, daß in beiden Fällen in den ersten 10 min die optische Brandrauchdichte ansteigt und daß eine Änderung der spektralen Transmission erfolgt.

## 5.2 Verdünnung

Im Bild 17 sind die aus den Versuchsergebnissen ermittelten Extinktionskoeffizienten  $\overline{\sigma(\lambda)}$  entsprechend Gleichung (19) in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad  $v$ , nach Gleichung (18), aufgetragen. Dabei ergaben sich für die Versuche mit Holz und Heizöl EL bei einer Auftragung in doppeltlogarithmischem Maßstab zwei unterschiedliche Geraden. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit dem nach Abschnitt 2.3 als maximal zulässigen Wert  $\sigma_{\text{zul}}$  für die optische Brandrauchdichte in Rettungswegen aufgrund der vorliegenden Literaturangaben ermittelten Wert von 0,15 ergibt die erforderliche minimale Verdünnung des Brandrauches bezüglich der Sichtverhältnisse. Aus dem Bild 17 ergibt sich für die Verbrennung von Holz ein Wert für  $v_{\text{min}}$  von 18,4. Für Brandrauch, der bei der

Verbrennung von Heizöl EL entsteht, liegt der Wert für  $v_{\min}$  bei 1380. Brandrauch von Heizöl EL muß aufgrund dieser Ergebnisse 75 mal stärker verdünnt werden als Brandrauch von reinen Holzbränden. Bei einer 100-fachen Verdünnung, wie in /18/ vorgeschlagen, würde sich bei der Verbrennung von Heizöl EL ein Extinktionskoeffizient von 1,0 ergeben. Dieser Wert ist nach /15/ auch für geschulte, mit Rauch und den Räumlichkeiten vertrauten Personen wesentlich zu hoch.

Die erforderliche Verdünnung des Brandrauches beim Abbrennen von anderen Stoffen wird in weiteren Untersuchungen bestimmt werden.

#### 6. SCHADSTOFFGEHALT DES VERDÜNNTEN BRANDRAUCHES

Die Verdünnung des Brandrauches ist nicht nur im Hinblick auf die Sicht zu beurteilen, sondern auch auf den Anteil gesundheitsgefährdender Stoffe. In Abschnitt 2.2.1 sind die gesundheitsgefährdenden Stoffe im Brandrauch aufgrund von Literaturangaben zusammengestellt. Durch ein Verdünnen des Brandrauches wird der Anteil dieser Stoffe im entsprechenden Verhältnis verringert. Der maximal noch zulässige Gehalt der einzelnen Stoffe im Brandrauch, bei denen innerhalb einer Zeit von ca. 30 min keine Gesundheitsschäden auftreten, sind bis auf einzelne Stoffe, für die Daten vorliegen, noch nicht bekannt. Dies gilt besonders, wenn mehrere Stoffe gleichzeitig auftreten.

In der Tabelle 2 sind in Spalte 1 die Stoffe aufgeführt, die nach Abschnitt 2.2.1 im Brandversuch gemessen wurden. Die chemische Formel dieser Stoffe ist in Spalte 2 aufgeführt. Die z.Zt.gültigen maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) dieser Stoffe nach /22/ sind in Spalte 3 aufgeführt. Diese MAK-Werte dürfen nach /22/ für kurze Zeiten, in der Regel 30 min, überschritten werden. Die in Spalte 4 angegebenen Werte sind für die Stoffe CO, HCl und COCl<sub>2</sub> Mittelwerte für eine Zeitdauer von 30 min, für CO<sub>2</sub> ein Maximalwert während einer Dauer von 60 min

und für die Stoffe  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , HF und HCl Maximalwerte für die Dauer von 5 min. Jedoch kann bei diesen Stoffen nach /22/ dieser Maximalwert in 8 Stunden 8 mal erreicht werden, während bei den anderen Stoffen der Mittelwert innerhalb von 8 Stunden nur 2 mal auftreten darf. In den Spalten 5 und 6 sind Konzentrationen der einzelnen Stoffe aufgetragen, die nach Angaben aus /23/ und /6/ bei einer Einwirkungszeit von 30 min wahrscheinlich noch keine Gesundheitsgefährdung hervorrufen. Die aufgrund von Literaturangaben im Abschnitt 2.2.1 zusammengestellten Konzentrationen der einzelnen Brandrauchbestandteile sind in Spalte 7 eingetragen. Dabei gelten die mit \* versehenen Werte für den Fall, daß der Brand mit einem Halon gelöscht wurde, der mit \*\* versehene Wert gibt die Konzentration von  $\text{CO}_2$  für den Brandfall an, bei dem mit  $\text{CO}_2$  gelöscht wurde. In Spalte 8 ist das Verhältnis der vorhandenen Konzentration zur zulässigen Konzentration entsprechend den Spalten 4,5 oder 6 angegeben. Da keine Angaben darüber vorliegen, unter welchen Brandbedingungen bezüglich des Luftüberschusses die jeweiligen Konzentrationswerte ermittelt wurden, wird angenommen, daß diese bei einer Luftzahl  $n = 2$  erfolgten. Damit ergibt sich der erforderliche Verdünnungsgrad  $v$ , der dem mit der Gleichung (18) berechneten Wert entspricht, aus einer Verdoppelung dieser Verhältniszahl. Dieser erforderliche Verdünnungsgrad  $v$  ist in Spalte 9 eingetragen.

Aus diesen erforderlichen Verdünnungsgraden ergibt sich, daß durch den CO-Gehalt im Brandrauch die größte Gesundheitsgefährdung erfolgt und durch diesen Wert der erforderliche Verdünnungsgrad eines Brandrauches bestimmt wird. Der Verdünnungsgrad  $v = 200$  für CO wird überschritten, wenn ein Brand mit Halon abgelöscht wird. Dieser Fall ist jedoch für die hier durchgeführten Betrachtungen unbedeutend, da Halon in der Regel als ortsfeste Löschanlage im Anfangsstadium von Bränden eingesetzt wird und die beim Löschen in der Flamme und an heißen Oberflächen entstehenden Zersetzungsprodukte absolut gesehen klein sind und nur in einem kurzen Zeitabschnitt auftreten. Für alle übrigen Stoffe

liegen die erforderlichen Verdünnungsgrade wesentlich unter 200.

Beim Löschen mit  $\text{CO}_2$  ist jedoch stets der hohe Anteil von  $\text{CO}_2$  im Brandrauch bezüglich der Verdünnung zu berücksichtigen, da der  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Brandraum über längere Zeit aufrechterhalten wird und die Gesundheitsgefährdung durch das  $\text{CO}_2$  selbst und nicht wie beim Halon durch Zersetzungsprodukte entsteht.

## 7. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit Holz und Heizöl EL führen zusammen mit den in der Literatur vorliegenden Daten zu folgenden Erkenntnissen.

Die geringste Absorption im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes erfolgt zwischen  $0,60 \mu\text{m}$  und  $0,70 \mu\text{m}$  entsprechend der Farbe orange bis dunkelrot. In Verbindung mit der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges ist daher ein orange-farbenes Licht für Markierungen und Hinweisschilder in Rettungswegen zu empfehlen.

Die erforderliche Verdünnung von Brandrauch bezüglich der Sichtbarkeit in Rettungswegen beträgt aufgrund der hier durchgeführten Versuche bei einem aufgrund von Literaturangaben erhaltenen Grenzwert für den Extinktionskoeffizienten von

$\sigma_{\text{zul}} = 0,15$  für reine Holzbrände  $v = 19$  und für Heizölbrände  $v = 1380$ . Diese Werte gelten unter den bei diesen Versuchen vorhandenen Bedingungen sowie bei der Berechnung des Verdünnungsgrades  $v$  nach Gleichung (18) und für die mit der Meßanordnung 4 erhalten und nach Gleichung (19) berechneten Extinktionskoeffizienten  $\overline{\sigma(\lambda)}$ . Andere Meßmethoden für die optische Rauchdichte z.B. die Meßanordnungen 1 bis 3 ergeben niedrigere Extinktionskoeffizienten (siehe Abschnitt 5.1).

Die erforderliche minimale Verdünnung des Brandrauches bezüglich der Konzentration an gesundheitsgefährdenden Gasen beträgt  $v_g = 200$ . Dieser Wert wird durch den CO-Gehalt bestimmt. Er liegt wesentlich über dem Wert von  $v_s = 19$  für die erforderliche Verdünnung des Brandrauches von Holz bezüglich der Sichtverhältnisse. Der entsprechende Wert für die erforderliche Verdünnung des Brandrauches von Heizöl EL liegt mit  $v_s = 1380$  wesentlich darüber. Daraus ergibt sich, daß auch bei guten Sichtverhältnissen im Brandrauch-Luftgemisch von einem Holzfeuer ( $\sigma < 0,15$ ) immer noch eine starke Gesundheitsgefährdung vorliegen kann. Bei entsprechenden Sichtverhältnissen in einem Brandrauch-Luftgemisch, das beim Abbrennen von Heizöl EL entsteht, ist eine Gesundheitsgefährdung wegen der dabei vorhandenen hohen Verdünnung ausgeschlossen, da der Anteil der giftigen Gasanteile im Brandrauch-Luftgemisch weit unterhalb der MAK-Werte liegen mit Ausnahme des CO-Gehaltes, der bei maximal 116 ppm liegen würde. Dieser Wert ist aber noch weit unterhalb des für 30 min zulässigen Wertes nach Tabelle 2, Spalten 5 und 6. Nach /22/ ist es zur Zeit noch nicht möglich, durch einfache Rechenansätze die Wirkungskriterien für Gemische aus gesundheits-schädlichen Gasen befriedigend zu ermitteln. Aus diesem Grund sind keine Aussagen über die tatsächlichen Gesundheitsgefahren durch Brandrauch möglich, da hierzu auch noch die mögliche Gesundheitsgefährdung durch die im Brandrauch enthaltenen Aerosole berücksichtigt werden müßte.

Nach /22/ ist für die Beurteilung, welche Anteile der Rauchpartikel eingeatmet werden und welche Anteile der Rauchpartikel sich in welchem Bereich der Atemorgane absetzt, der aerodynamische Durchmesser der Rauchpartikel maßgebend. Dieser aerodynamische Durchmesser sowie die spezifische Wirkung der Teilchen ist zur Zeit noch nicht ausreichend untersucht, sodaß hierüber keine Angaben gemacht werden können.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Brandrauch stellt die hauptsächliche Gefahr für Menschen bei Gebäudebränden dar. Brandrauch ruft neben den direkten Gesundheitsgefahren durch Giftgase wie z.B. CO eine Sichtbehinderung hervor, die so stark sein kann, daß die Benutzung von Rettungswegen unmöglich wird. Dieser Gefahr kann nur begegnet werden, indem das Eindringen von Brandrauch in Rettungswege möglichst verhindert wird bzw. eingedrungener Brandrauch soweit mit Frischluft verdünnt wird, daß keine Gesundheitsgefahr und keine Sichtbehinderung mehr vorhanden ist.

Aufgrund von Literaturangaben wurden Meßverfahren für die Bestimmung der optischen Brandrauchdichte und deren Ergebnisse bezüglich der Sichtbarkeit von Zeichen durch Brandrauch hindurch sowie hinsichtlich des Verhaltens von Personen in einem Brandrauch-Luftgemisch überprüft und daraus ein zulässiger Grenzwert ermittelt. Da der bei einem Brand entstehende Brandrauch eine wesentlich größere optische Dichte hat als der ermittelte Grenzwert, muß dieser Brandrauch mit Frischluft verdünnt werden. Aus Brandversuchen mit Holz und Heizöl EL wurden in Abhängigkeit vom zeitlichen Massenverlust des Brandgutes der Zuluftvolumenstrom in den Brandraum verändert und in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad der Rauchgase die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches mit verschiedenen Methoden gemessen. Dabei hat sich ergeben, daß der Brandrauch von Heizöl EL wesentlich stärker verdünnt werden muß als der von Holz, um zu gleichen Sichtverhältnissen zu kommen. Eine Abschätzung der Schadstoffanteile im Brandrauch-Luftgemisch, wobei in der Regel der CO-Gehalt der Brandgase die größte gesundheitliche Gefahr darstellt, aufgrund von Literaturangaben sowie unter Berücksichtigung des ermittelten Verdünnungsgrades hat gezeigt, daß bei Brandrauch-Luftgemischen von einem Holzbrand trotz ausreichender Sichtverhältnisse noch gesundheitliche Gefahren auftreten können. Bei Brandrauch von Heizöl treten bei einer Verdünnung mit Frischluft, die die gleichen Sichtverhältnisse wie bei Brandrauch von Holz hervorruft, keine Gesundheitsgefahren wegen der erforderlichen wesentlich höheren Verdünnung mehr auf.

9. LITERATUR

- /1/ Portscht, R.: Berechnung und Messung der Extinktions-  
eigenschaften von Rauch im optischen  
Spektralbereich  
Staub-Reinhaltung der Luft  
32(1972) H.7, S.277-285
- /2/ Portscht, R.: Vergleich von monochromatischer und  
nichtmonochromatischer Rauchdichte-  
messung nach dem Extinktionsprinzip  
Staub-Reinhaltung der Luft  
32(1972) H.8, S.323-329
- /3/ Mulholland, G.W.: How well are we measuring smoke?  
Fire and Materials  
Vol.6(1962) H.2, S.65-67
- /4/ Budnick, E.K.: Mobil home living room fire studies:  
The role of interior finish  
US Department of Commerce  
National Bureau of Standards, Washington  
DC 20234, NBSIR 78-1530
- /5/ Ehlert, K.-P.: Bericht über Brandversuche in einem  
viergeschossigen Wohngebäude, Teil II.  
5.Internationales Brandschutzseminar  
der VFDB in Karlsruhe, 1976  
Band I, S.85-96
- /6/ Winkler, H.: Meßverfahren der Rauchdichte und Gift-  
gasemission bei der Verbrennung von  
Kunststoffen  
TÜ 21(1980) H.2, S.79-82

- /7/ Quintiere, J.G.: An analysis of smoldering fires in  
Birky, M.; McDonald, F.; closed compartments and their  
Smith, G.; hazard due to carbon monoxide  
US Department of Commerce  
National Bureau of Standards,  
Washington DC 20234  
NBSIR 82-2556, July 1982
- /8/ Schatz, H.: Brand- und Löschversuche mit gas-  
förmigen Löschmitteln in Räumen  
natürlicher Größe  
Teil 1: Auswertung des in- und aus-  
ländischen Schrifttums über Unter-  
suchungen mit Halon als Löschmittel  
Forschungsbericht Nr.32, Febr.1978
- /9/ Schatz, H.: Teil 7: Vergleichende Untersuchung  
der Löschwirksamkeit von Kohlen-  
dioxid, Halon 1211 und Halon 1301  
bei einem Entstehungsbrand mit  
festen und flüssigen Brandgütern  
Forschungsbericht Nr.45, Sept.1981  
Arbeitsgemeinschaft der Innenmini-  
sterien der Bundesländer,  
Arbeitskreis V-Unterausschuß  
"Feuerwehrangelegenheiten"
- /10/ Bankston, C.P.: Aspects of the mechanisms of smoke  
Zinn, B.T.; Browner, R.F.; generation by burning materials  
Powell, E.A.; Combustion and Flame 41(1981),  
S.273-292

- /11/ Jin,T.: Decrease of smoke density  
(Part 1, decrease of smoldering smoke  
with time)  
Report of Fire Research Institut of Japan  
Serial No.40,Sept.1975, S.11-16
- /12/ Jin,T.: Visibility through fire smoke  
Part 2,visibility of monochromatic  
signs through fire smoke  
Report of Fire Research Institute of Japan  
Serial No.33, March 1971, S.31-48
- /13/ Prager,F.H.: Prüfung und Bewertung der Brandparallel-  
erscheinung Rauchgasdichte  
VFDB 31(1982) H.1, S.7-16
- /14/ Quintiere,J.G.: Smoke measurements: An assessment of  
correlations between laboratory and  
full-scale experiments  
Fire and Materials, Vol.6(1982)  
No.3 und 4, S.145-160
- /15/ Jin,T.: Visibility through fire smoke  
Journal of Fire and Flammability  
Vol.9(1978) April, S.135-155
- /16/ Jin,T.: Visibility through fire smoke  
Part 3 Visibility of flash sign  
Part 4 Experiment on light scattering  
coefficient of various fire smoke  
Report of Fire Research Institute of Japan  
Serial No.40,Sept.1975, S.1-10
- /17/ Jin,T.: Studies of emotional instability  
in smoke from fires  
Journal of Fire and Flammability  
Vol.12 (1981)April, S.130-142

- /18/ John, R.: Lüftungssysteme zur Rauchfreihaltung von Treppenträumen  
Ki Klima-Kälte-Heizung  
7(1979), Heft 11, S.455-461  
Berechnung von Druckbelüftungsanlagen zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen im Brandfall  
Ki Klima-Kälte-Heizung  
8(1980), Heft 7/8, S.307-311
- /19/ John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß  
Teil 1: Planung und Bau der Versuchseinrichtung  
Forschungsbericht Nr.46, März 1982  
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer,  
Arbeitskreis V-Unterausschuß  
"Feuerwehrangelegenheiten"
- /20/ Netz, H.: Dampfkessel  
5.Auflage  
Stuttgart, Verlagsgesellschaft  
BG.Taubner 1957
- /21/ Gumz, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik  
3.Auflage  
Berlin, Göttingen, Heidelberg:  
Verlag Springer 1962

- /22/ Deutsche Forschungs-  
gemeinschaft: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen  
und biologische Arbeitsstofftoleranz-  
werte 1983.  
Mitteilung XIX der Senatskommission  
zur Prüfung gesundheitsschädlicher  
Arbeitsstoffe  
Weinheim: Verlag Chemie
- /23/ Hommel, G.: Handbuch der gefährlichen Güter  
Berlin, Heidelberg, New York:  
Verlag Springer, 1983

Tabelle 1: Massenbezogener Durchmesser der Teilchen, bei dem 10% bzw. 90% der Masse einen kleineren Durchmesser aufweisen, nach /10/.

Bei thermischer Zersetzung (Verschwelung) von	zugeführter Wärmestrom $W/cm^2$	Teilchendurchmesser in $\mu m$ für 10% Massenanteil	Teilchendurchmesser in $\mu m$ für 90% Massenanteil
Holz	6,2	0,34	2,1
	3,2	0,2	1,1
harter Polyurethanschaum	6,2	0,3	2,3
	3,2	0,1	1,4
Hart-PVC	6,2	0,3	1,7
Bei Verbrennung mit Flammenbildung von			
Holz	2,5	0,1	1,2
Hart-PVC	2,5	0,1	1,2

Tabelle 2: Zulässige Gaskonzentrationen in der Atemluft nach verschiedenen Quellen, Brandrauchzusammensetzung und erforderliche Verdünnungsgrade.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stoffe	Formel	MAK-Werte nach /22/ ppm	Kurzzeitwerte nach /22/ ca.30 min ppm	Kurzzeitwerte nach /23/ ca.30 min ppm	Kurzzeitwerte nach /6/ ca.30 min ppm	Anteil nach Abschnitt 2.2.1 ppm	Verhältnis Spalte 7 zu Spalte ( )	Verdünnungsgrad v
Carbonylchlorid (Phosgen)	COCl <sub>2</sub>	0,1	0,2	3,1	-	1*	1 (4,5)	2
Chlorwasserstoff	HCl	5	10	1500	35	430 6000*	12 (6) 170*	24 340*
Fluorwasserstoff	HF	3	6	50	60	30 1700*	1 (5) 34*	2 68*
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	5000	10000	30000	-	210000 450000**	21 (4) 45**	42 90**
Kohlenmonoxid	CO	30	60	800	800	80000	100 (5,6)	200
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	2	4	-	20	15	1 (6)	2
Stickstoffdioxid	NO <sub>2</sub>	5	10	10	50	17***	1 (5,6)	2

\* Beim Löschen mit Halon

\*\* Beim Löschen mit CO<sub>2</sub>

\*\*\* NO + NO<sub>2</sub>

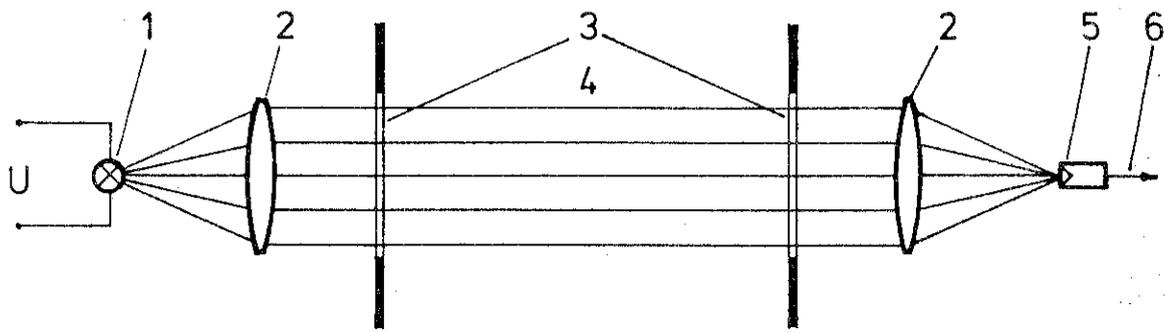


Bild 1: Grundsätzlicher Aufbau eines optischen Rauchdichtemeßgerätes

- |   |             |   |                           |
|---|-------------|---|---------------------------|
| 1 | Lichtquelle | 4 | Rauchkanal                |
| 2 | Linse       | 5 | Empfänger z.T. mit Filter |
| 3 | Fenster     | 6 | Meßsignal                 |

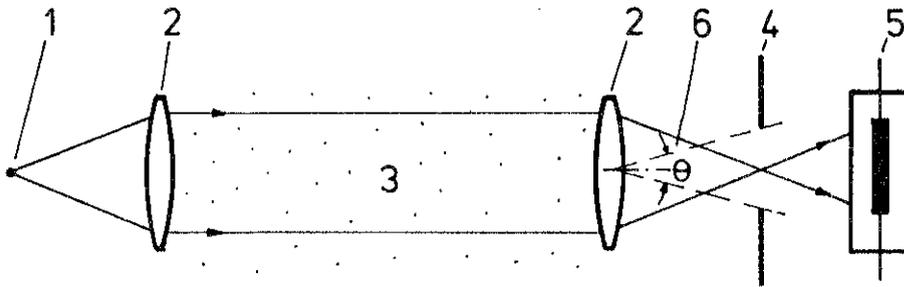


Bild 2: Schema zum Aufbau des optischen Rauchdichtemeßgerätes nach /3/, bei dem die Lichtstreuung in Richtung des Aufnehmers unbedeutend ist.

- |   |               |   |                         |
|---|---------------|---|-------------------------|
| 1 | Lichtquelle   | 4 | Blende                  |
| 2 | Linsen        | 5 | Empfänger               |
| 3 | Rauchpartikel | 6 | Öffnungswinkel $\theta$ |

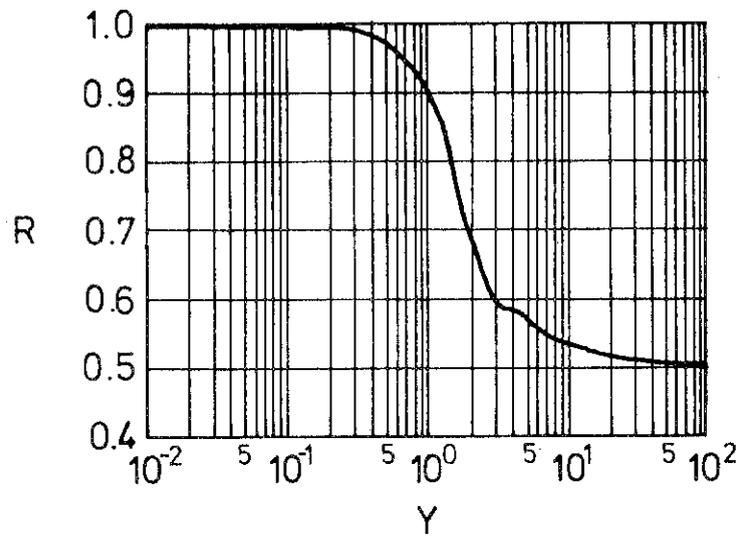


Bild 3: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Meßfehlers durch Lichtstreuung auf den Empfänger nach /3/

$$Y = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \cdot \frac{\theta}{2}$$

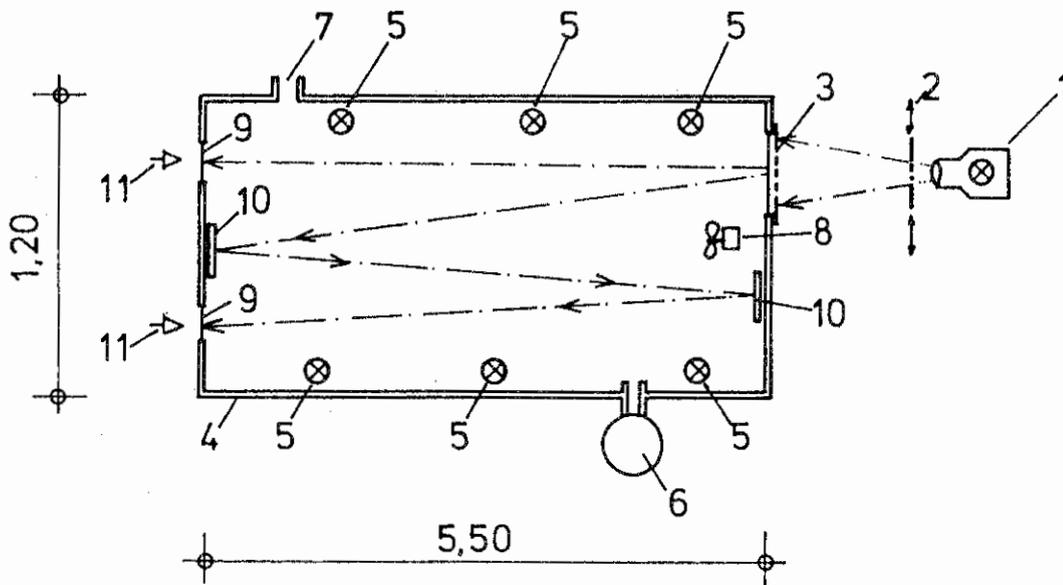


Bild 4: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Sichtbarkeit von Hinweiszeichen durch Brandrauch nach /12/

- 1 Projektor
- 2 Meßeinrichtung zur Intensitätskontrolle
- 3 Mattscheibe zur Abbildung bzw. Auflage für Hinweiszeichen
- 4 Rauchkammer
- 5 Beleuchtung der Rauchkammer  
(24 Leuchtstofflampen mit je 10 W Leistung)
- 6 Raucherzeuger
- 7 Rauchgasabsaugung
- 8 Ventilator zur Rauchumwälzung
- 9 Beobachtungsfenster
- 10 Spiegel
- 11 Beobachter

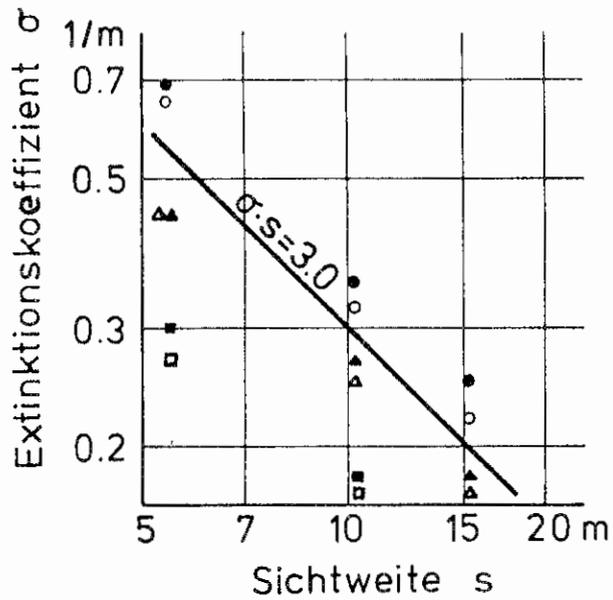


Bild 5: Sichtweite reflektierender Hinweisschilder in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

Reflektionsgrad Rauchentstehung

- 0,70
  - ▲ 0,26
  - 0,13
- } durch Verbrennung

- 0,70
  - △ 0,26
  - 0,13
- } durch Verschmelzung

Raumbeleuchtung 40 lx

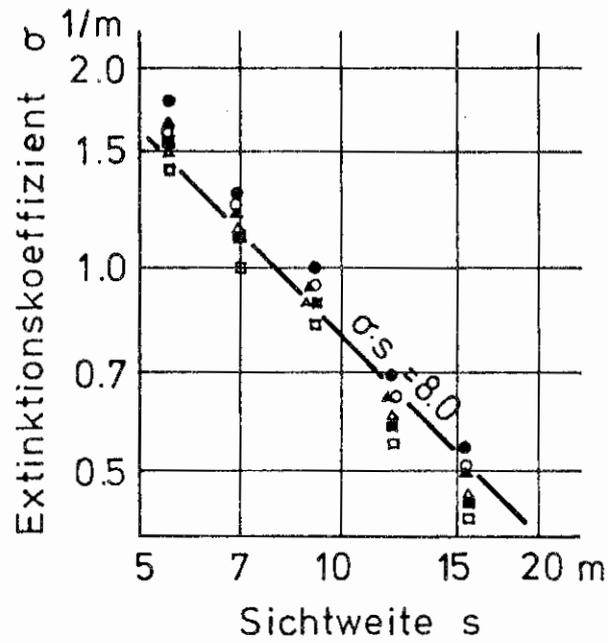


Bild 6: Sichtweite eines selbstleuchtenden Hinweisschildes in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

Leuchtdichte $cd/m^2$	Rauchentwicklung
• 2000	} durch Verbrennung
▲ 1000	
■ 500	
○ 2000	} durch Verschwelung
△ 1000	
□ 500	

Raumbeleuchtung 80 lx

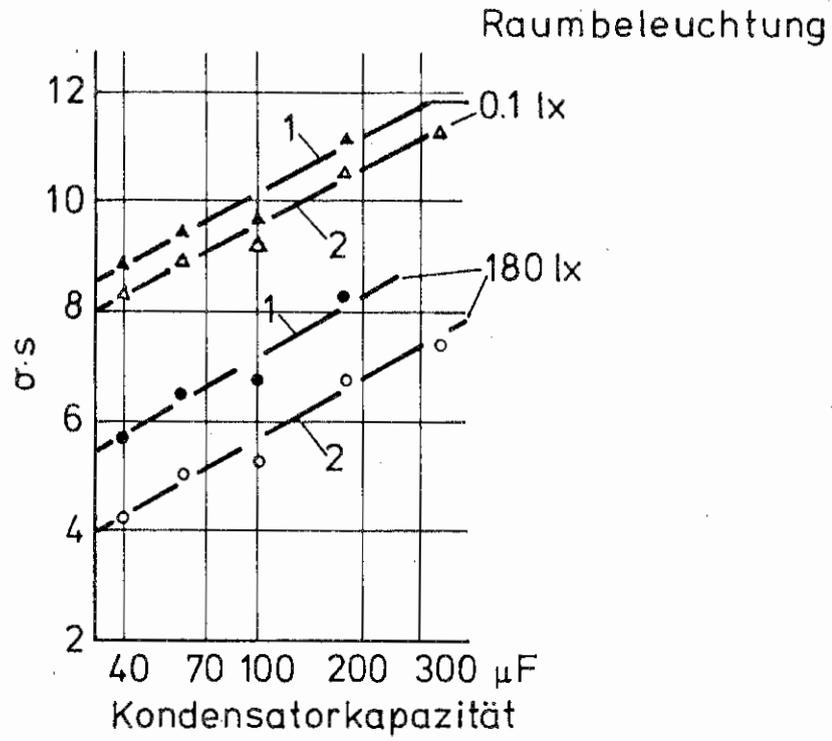


Bild 7: Sichtbarkeit  $S \cdot \sigma$  nach Gleichung (16) eines Hinweisschildes, das mit einer Xenonlampe angeblitzt wird, in Abhängigkeit von der Kondensatorkapazität nach /16/

- 1 schwarzer Brandrauch (Verbrennung)
- 2 weißer Brandrauch (Verschmelzung)

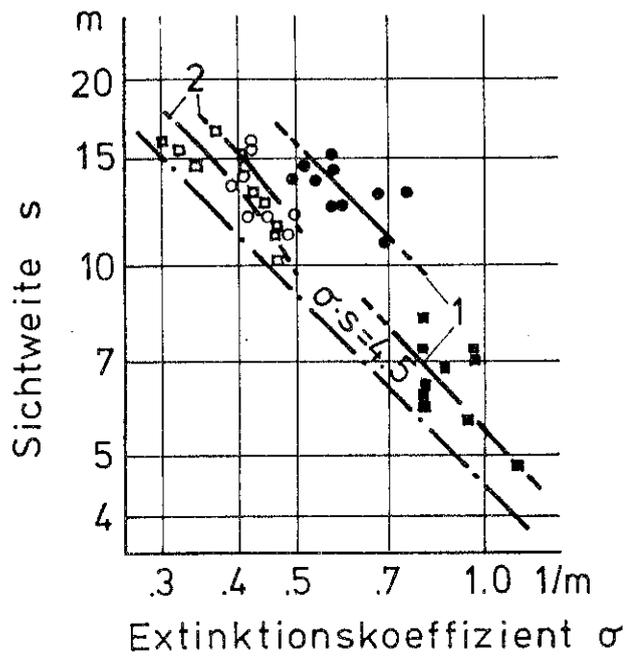


Bild 8: Sichtweite des selbstleuchtenden Hinweisschildes "FIRE EXIT" in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

- 1 schwach reizender Rauch (Verbrennung von Kerosin)
- 2 stark reizender Rauch (Verschmelzung von Holz)

- o ● normale Raumbelichtung
- ■ ohne Raumbelichtung

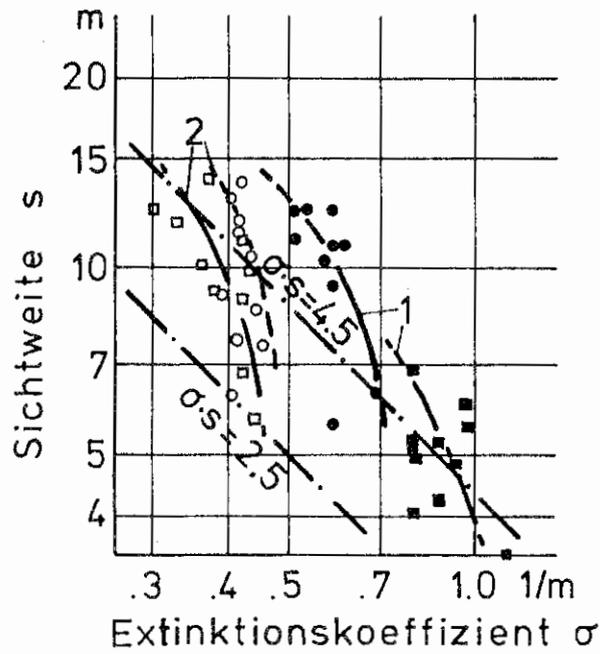


Bild 9: Lesbarkeit des selbstleuchtenden Hinweisschildes "FIRE EXIT" in Abhängigkeit von der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) nach /15/

- 1 schwach reizender Rauch (Verbrennung von Kerosin)
- 2 stark reizender Rauch (Verschmelzung von Holz)

- ● normale Raumbelichtung
- ■ ohne Raumbelichtung

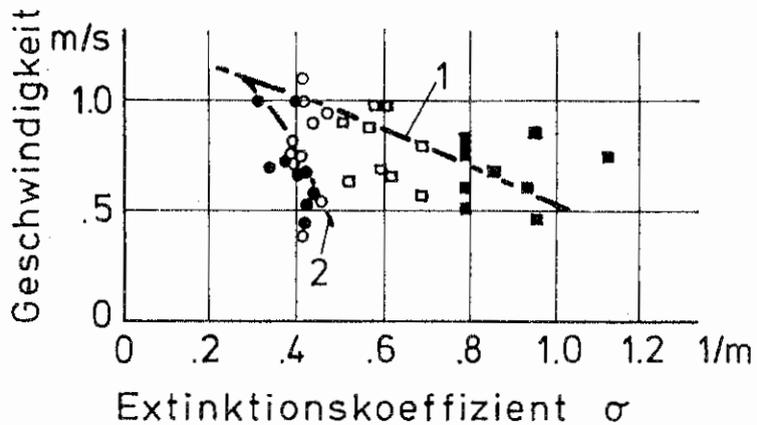


Bild 10: Einfluß der optischen Brandrauchdichte (Extinktionskoeffizient) auf die Gehgeschwindigkeit in einem 20 m langem Flur nach /15/

1 schwach reizender Rauch

2 stark reizender Rauch

□ ◯ normale Raumbelichtung

■ ● ohne Raumbelichtung

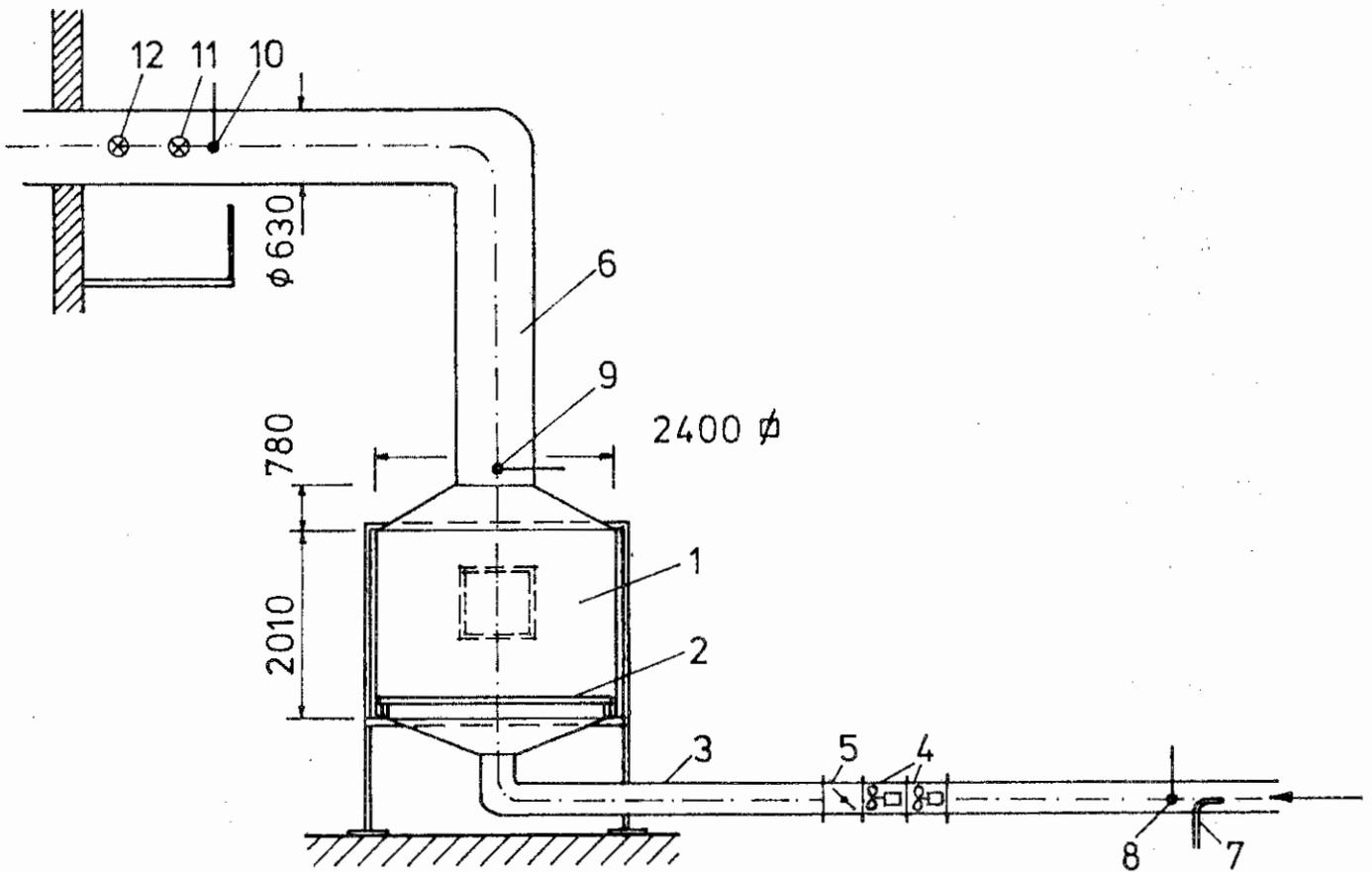


Bild 11: Schema der Versuchsanlage

- |   |                   |       |                                     |
|---|-------------------|-------|-------------------------------------|
| 1 | Verbrennungsraum  | 7     | Meßstelle dynamischer Druck         |
| 2 | Waagerahmen       | 8     | Meßstelle Zulufttemperatur T1       |
| 3 | Zuluftleitung     | 9     | Meßstelle Brandrauchtemperatur T2   |
| 4 | Axialventilator   | 10    | Meßstelle Brandrauchtemperatur T3   |
| 5 | Drosselklappe     | 11,12 | Meßstrecke für optische Rauchsichte |
| 6 | Brandrauchleitung |       |                                     |

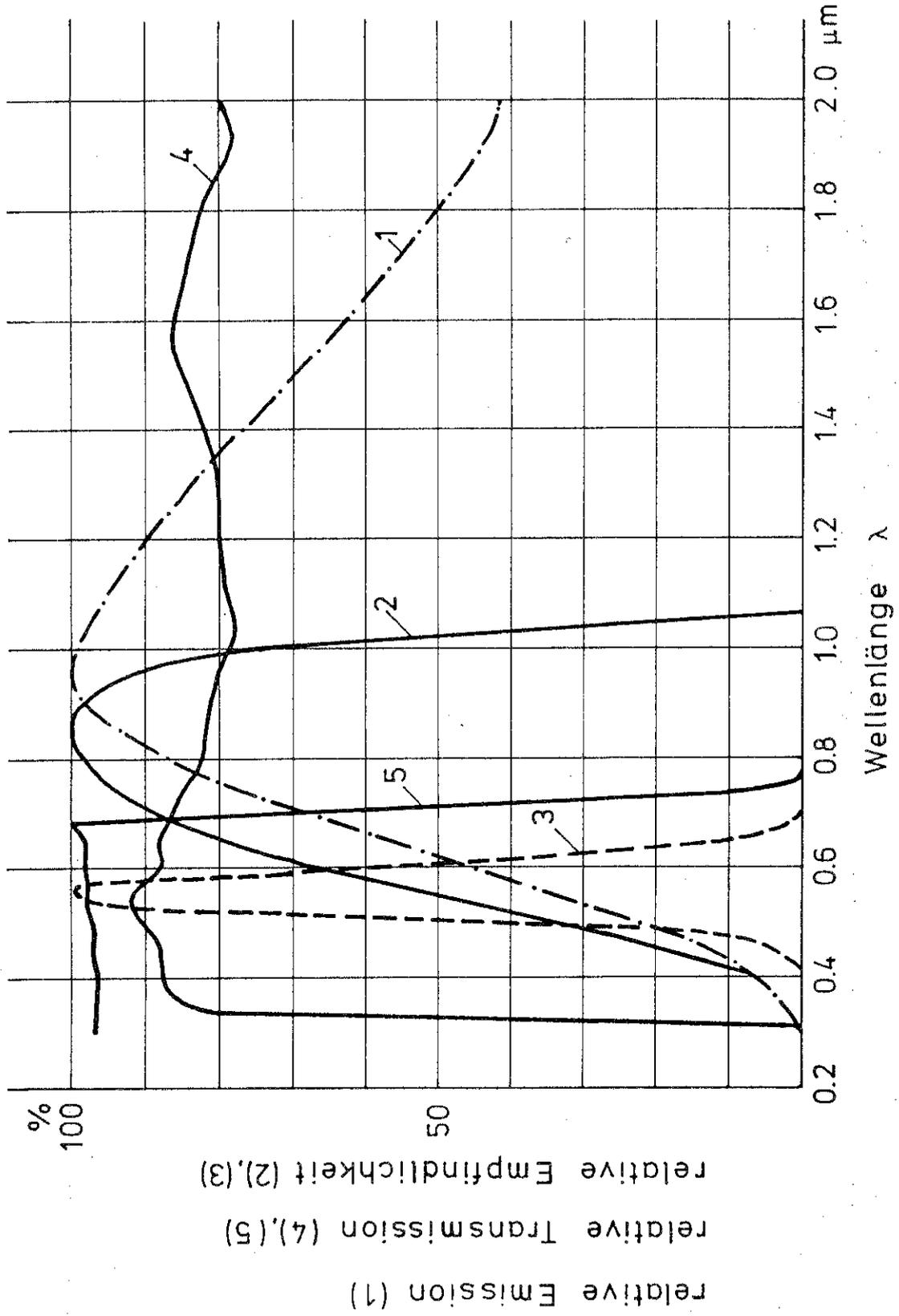


Bild 12: Relative Empfindlichkeit, Emission und Transmission von  
1 Glühlampe, 2 Siliziumfotозelle, 3 menschliches Auge,  
4 Fensterglas, 5 Kurzpaßkantenfilter

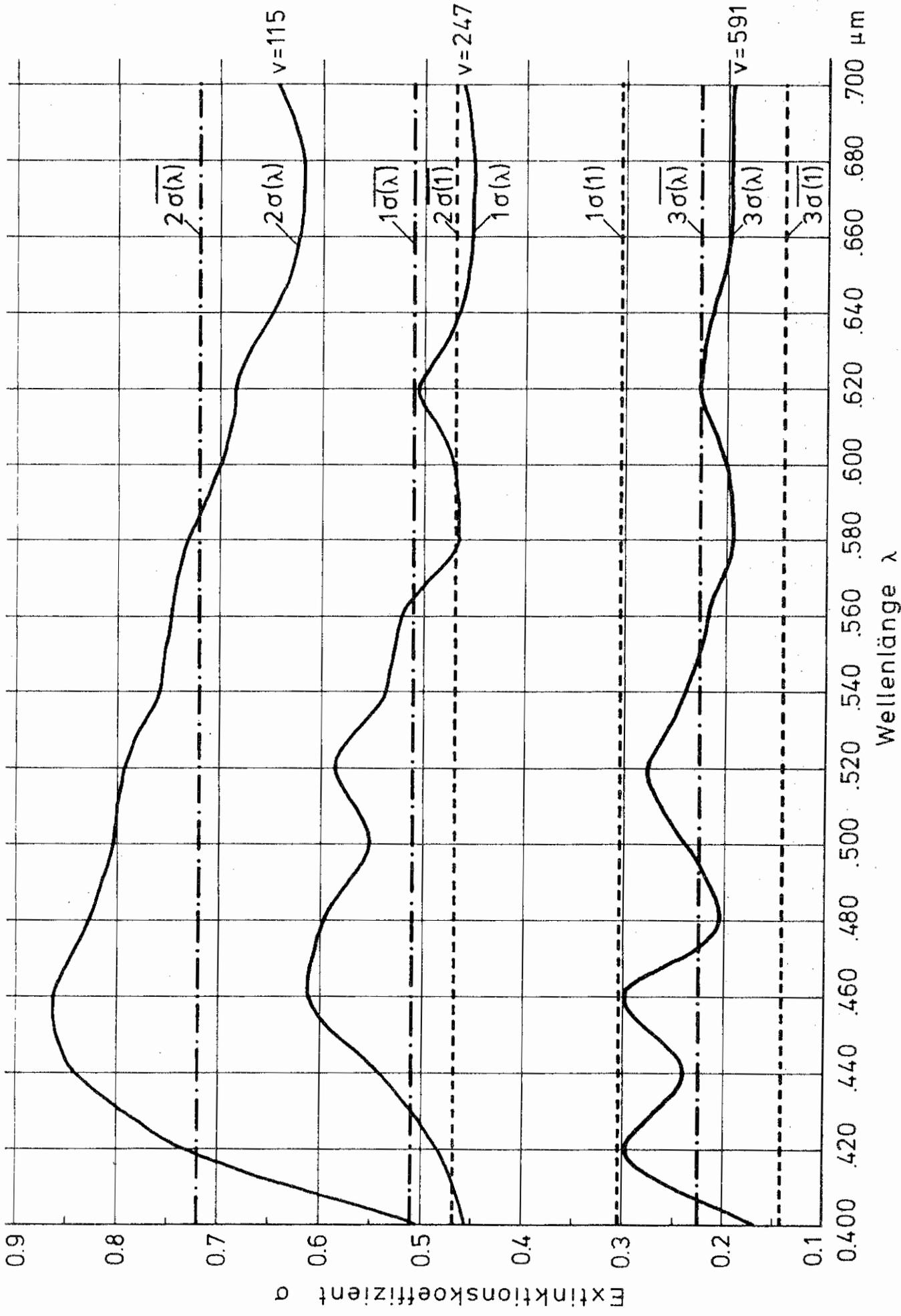


Bild 13: Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit von der Wellenlänge beim Abbrand von Heizöl EL  
Parameter ist der Verdünnungsgrad  $v$

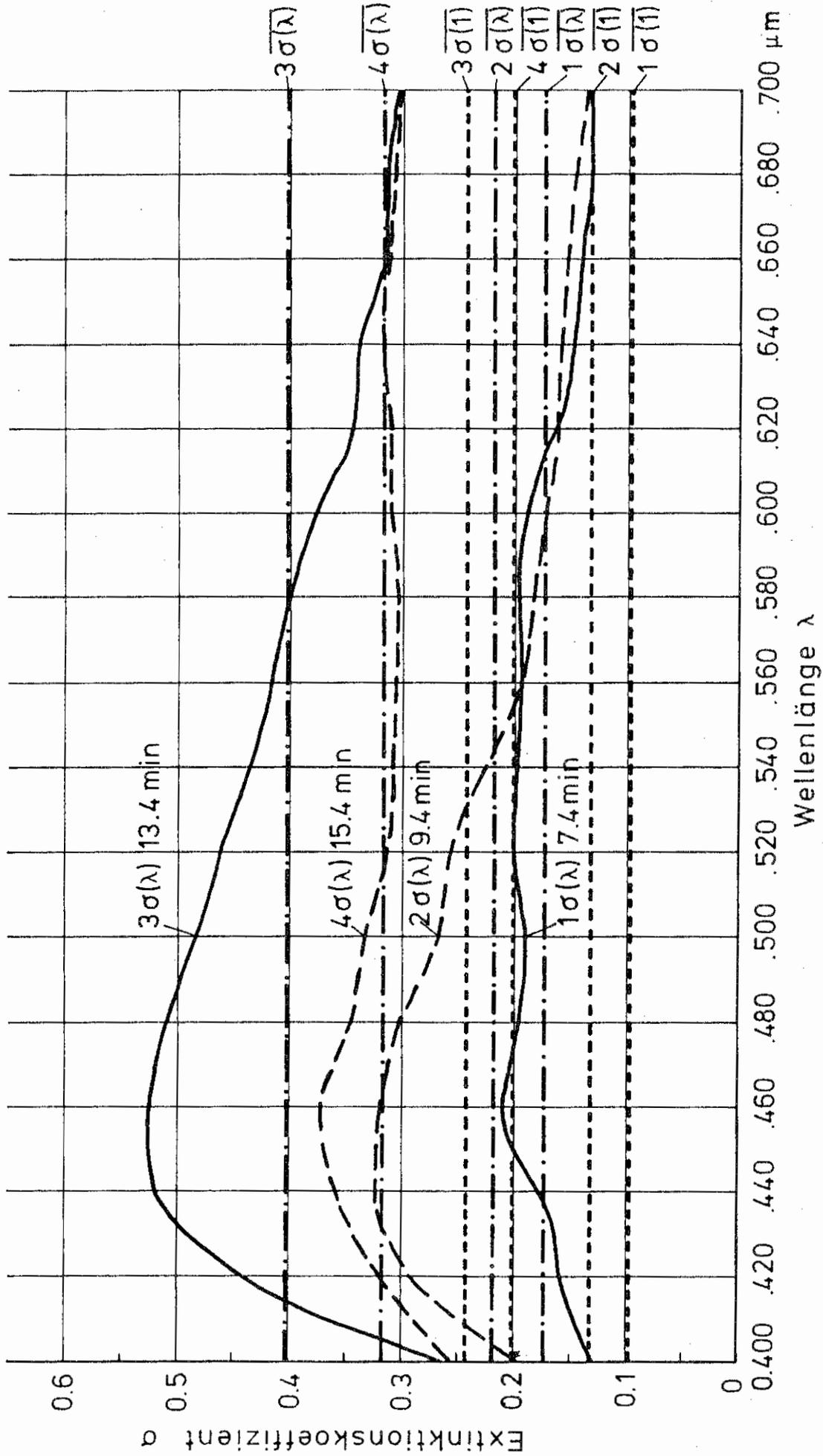


Bild 14: Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit von der Wellenlänge beim Abbrand von Holzkruppen  
Parameter ist die Versuchszeit. Der Verdünnungsgrad  $v$  beträgt im Durchschnitt 6

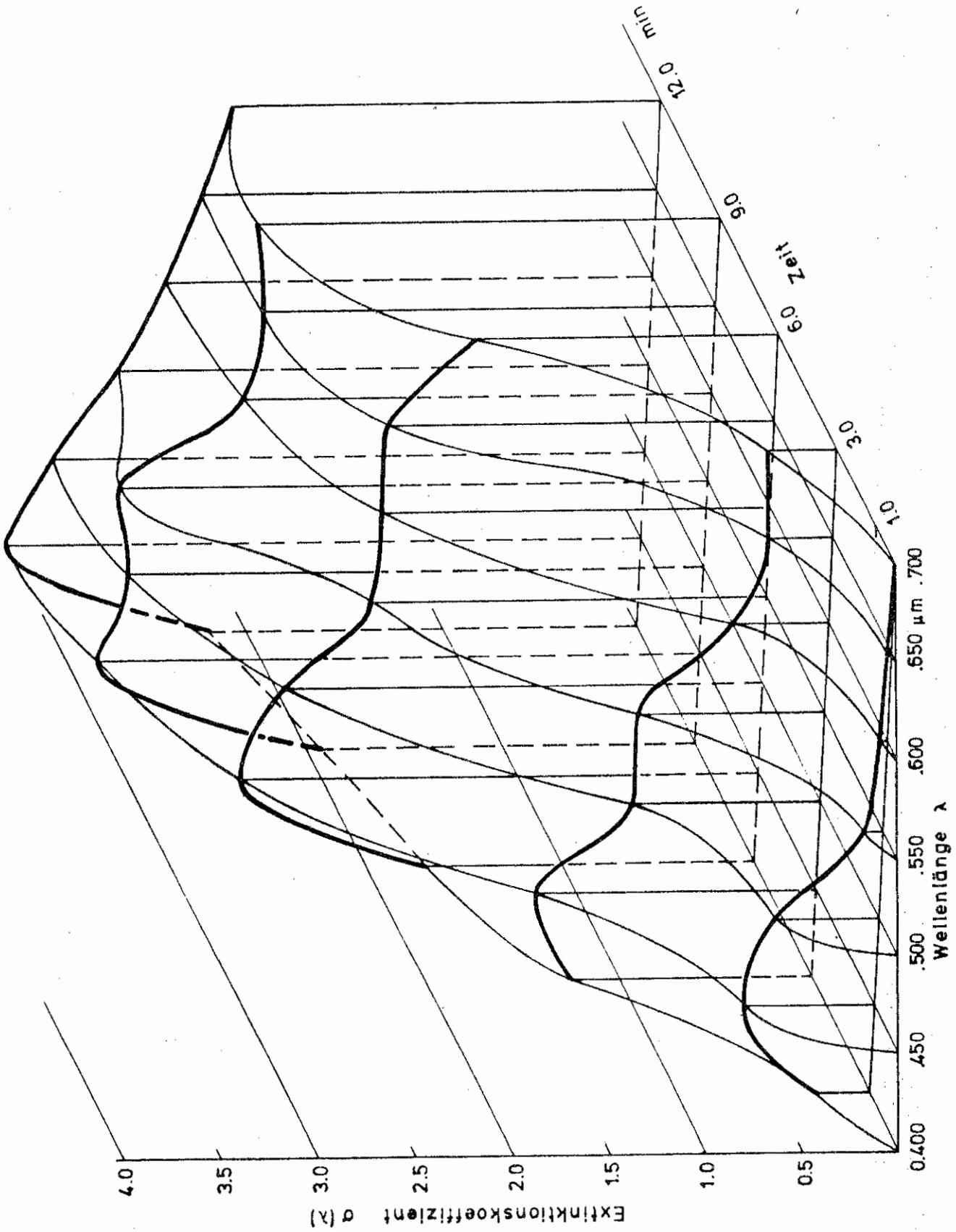


Bild 15: Extinktionskoeffizient  $\sigma(\lambda)$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Branddauer beim Abbrand von Heizöl EL

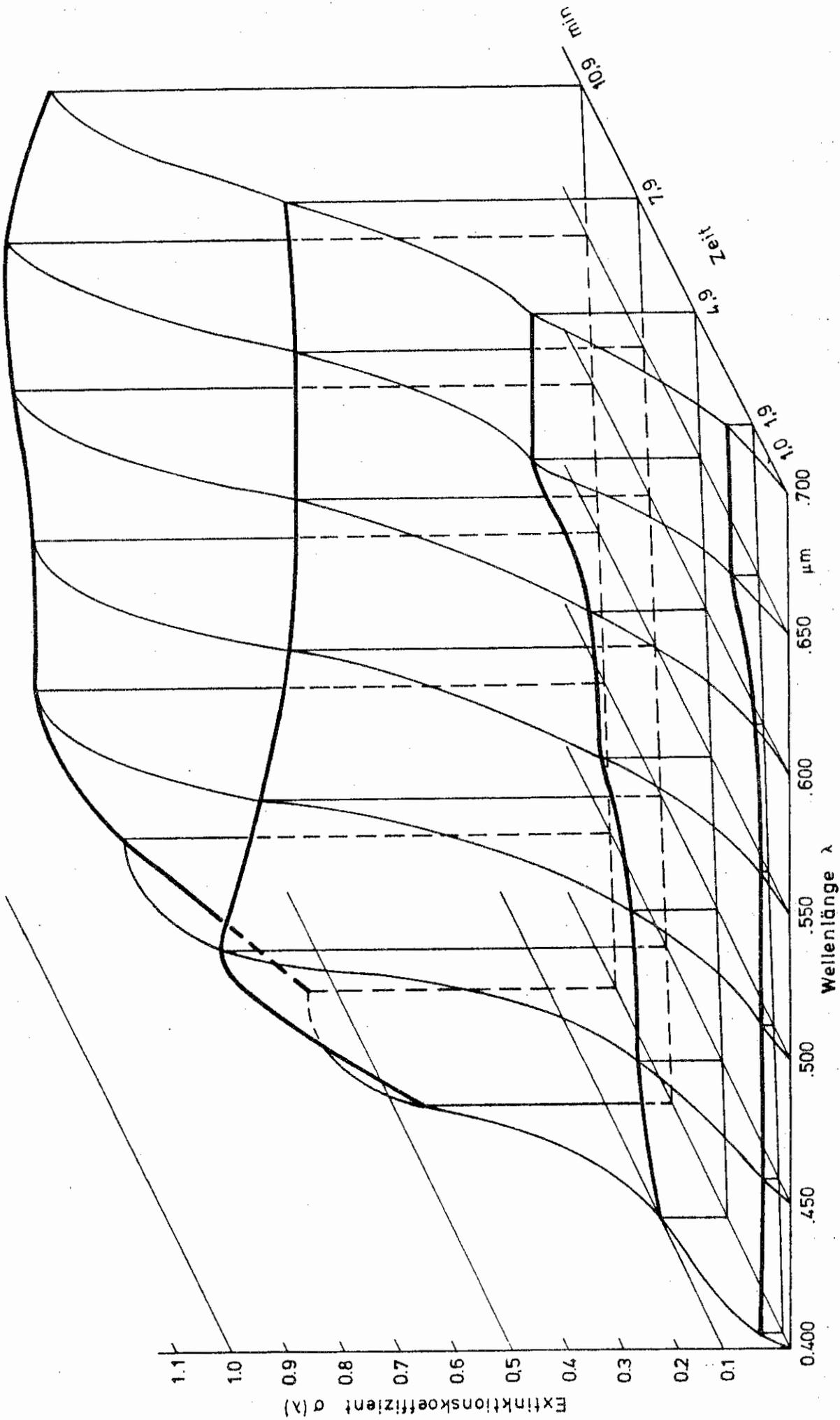


Bild 16: Extinktionskoeffizient  $\sigma(\lambda)$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Branddauer beim Abbrand von Holz in Form von Holzkruppen.

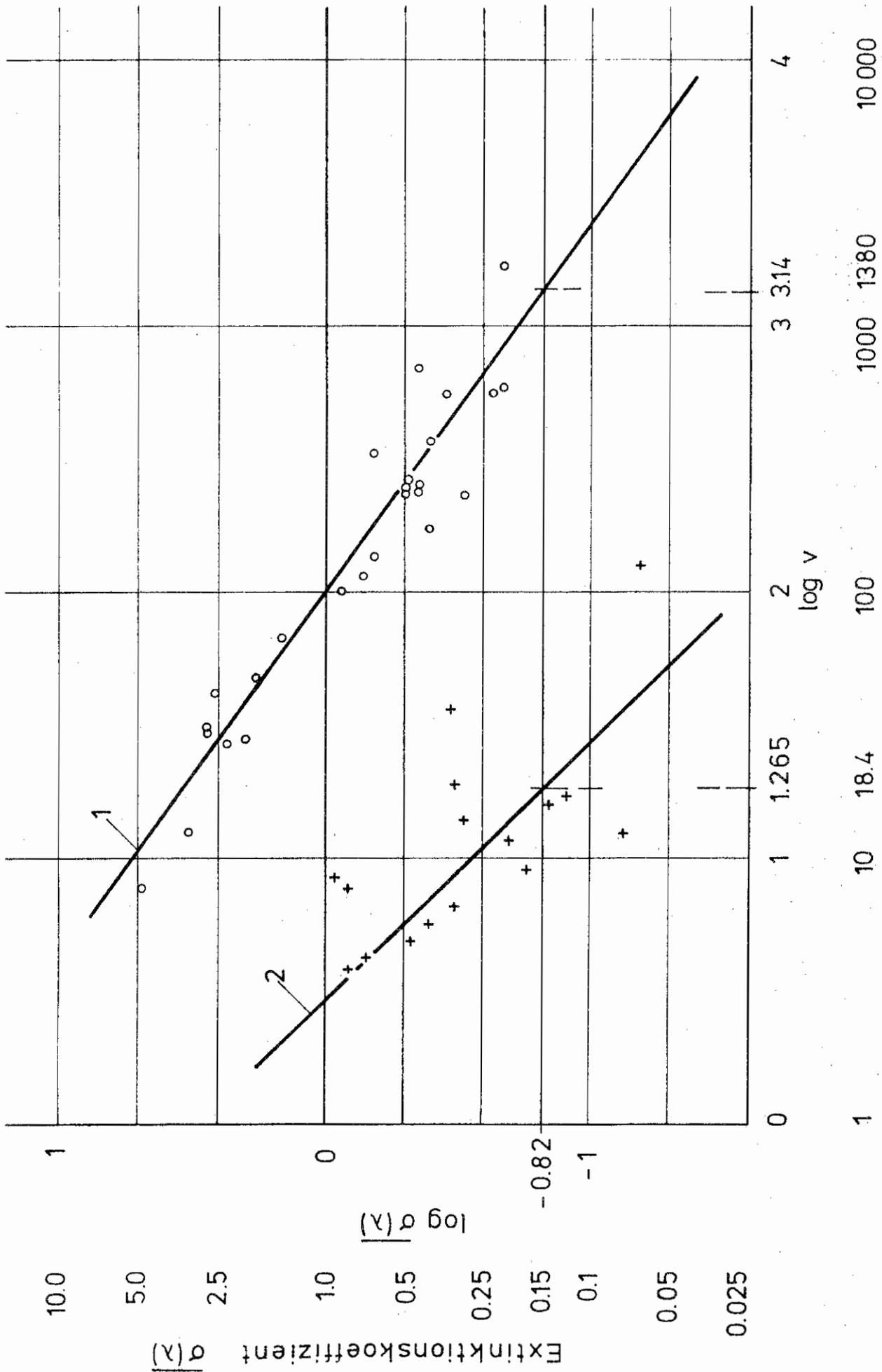


Bild 17: Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten vom Verdünnungsgrad  $n$  bei der Verbrennung von Heizöl EL (1) und Holz (2)