

# BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme  
zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesund-  
heit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewähr-  
leistendes Maß

# 59

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

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

Forschungsbericht Nr. 59

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

Teil 3: Fortsetzung von Teil 2: Optische Brandrauchdichte.

von

Dipl.-Ing. Reiner John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik  
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe

Januar 1987

FA. Nr. 98 (2/83) und 103 (2/84)

## FORMELZEICHEN

$p_0$	= Luftdruck	mbar
$c$	= Konzentration	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$H_0$	= Brennwert	kJ/kg
$H_u$	= Heizwert	kJ/kg
$l$	= Länge	m
$n$	= Luftzahl	
$m$	= Masse	g bzw. kg
$\dot{m}$	= Massenstrom	kg/s
$R_f$	= Rußfaktor = $m_{CR} / m_{CB}$	
$t$	= Temperatur	°C
$v$	= Verdünnungsfaktor (siehe Gleichung (1))	
$\dot{V}$	= Volumenstrom	m <sup>3</sup> /s
$z$	= kritischer örtlicher Luftfaktor nach /4/	
$\epsilon$	= Absorbtionskoeffizient	
$\sigma$	= Extinktionskoeffizient	1/m
$\varphi$	= relative Feuchtigkeit der Luft	

## Indizes

B	Brandlast
BR	Brandrauch
CB	Kohlenstoff im Brandstoff
CR	Kohlenstoff im Ruß
f	feucht
FL	Frischlufte
ges	gesamt
ML	Mischlufte
L	Luft für Verbrennung
R	Ruß
RA	Ruß im Abgas
RW	Ruß an der Wand
st	stöchiometrisch
th	theoretisch
tr	trocken
ZL	Zuluft in den Verbrennungsraum

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

Teil 3: Fortsetzung von Teil 2: Optische Brandrauchdichte.

## 1. EINLEITUNG

Wie bereits in /1/ aufgeführt, ergeben sich bei einem Brand in einem Gebäude durch den dabei entstehenden Brandrauch die größten Gefahren für die sich im Gebäude aufhaltenden Personen sowie für die zum Retten und Löschen in das Gebäude vorgehenden Feuerwehkräfte.

Der Brandrauch kann sich infolge seiner höheren Temperatur gegenüber der Umgebungsluft sowie durch eventuell vorhandene Luftströmungen in weit vom Brandherd entfernt liegende Gebäudeteile ausbreiten. Es sind daher besondere Maßnahmen erforderlich, durch die eine Behinderung und Gefährdung von Personen auf den Rettungswegen ausgeschlossen wird. Diese Maßnahmen müssen unter allen wahrscheinlichen Möglichkeiten von Ereignissen bei einem Brand ihre Wirksamkeit beibehalten. Die Wirksamkeit darf z. B. nicht mit der Forderung verbunden sein, daß bestimmte Türen geschlossen sein müssen. Auch Türen, die mit einem Selbstschließer ausgestattet sind, können durch Gegenstände auf dem Boden oder bewußte Manipulation (Keil) am Schließen gehindert werden.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Einrichtungen zur Gewährleistung der Sicherheit in Rettungswegen im Brandfall ist es erforderlich, die maximal zulässige Brandrauchkonzentration in der Luft zu kennen, die noch keine nennenswerte Behinderung bzw. keine Gesundheitsgefährdung hervorruft. Die zulässige Brandrauchkonzentration in Rettungswegen wird in der Literatur durch den Extinktionskoeffizienten für die optische Dichte des Brand-

rauches angegeben. Ist in einem Brandfall damit zu rechnen, daß ein Teil des entstehenden Brandrauches in Rettungswege eindringen kann, so muß dieser Brandrauch, dessen optische Dichte in allen Brandfällen wesentlich über dem maximal zulässigen Wert liegt, durch eine Verdünnung mit Frischluft auf den in Rettungswegen zulässigen Extinktionskoeffizienten gesenkt werden.

Zur Ermittlung der dazu erforderlichen Verdünnungsfaktoren des entstehenden Brandrauches bei der Verbrennung verschiedener Stoffe wurden die in /1/ beschriebenen Untersuchungen weitergeführt.

## 2. ZUSAMMENFASSUNG DER IN /1/ DURCHGEFÜHRTEN UNTERSUCHUNGEN

In /1/ wurde mit der in Bild 1 dargestellten Versuchseinrichtung die optische Brandrauchdichte von brennendem Holz sowie brennendem Heizöl EL mit unterschiedlichen Meßmethoden ermittelt. Die Verbrennung der beiden Stoffe erfolgte bei unterschiedlichen Verbrennungsluftvolumenströmen. Die bei diesen Untersuchungen ermittelte optische Brandrauchdichte, dargestellt durch den Extinktionskoeffizient  $\sigma$ , ist in Abhängigkeit vom Verdünnungsgrad  $v$  in Bild 2 dargestellt. In dieser logarithmischen Darstellung ergibt sich für die Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  vom Verdünnungsgrad  $v$  je eine Gerade für das Brandgut Heizöl EL (Gerade 1) und Holz (Gerade 2). Der Verdünnungsgrad wird aus dem Verhältnis des theoretischen Abgasvolumenstromes zu dem Frischluftvolumenstrom berechnet. Im vorliegenden Fall, bei dem der Zuluftvolumenstrom  $\dot{V}_L$  dem Verbrennungsraum geregelt zugeführt und der Massenverlust beim Abbrand gemessen wird, ergibt sich  $v$  nach /1/ zu:

$$v = (\dot{V}_{ZL} - \dot{V}_{Lst}) / \dot{V}_{BRst} \quad (1)$$

$$\text{mit} \quad \begin{aligned} \dot{V}_{Lst} &= \dot{m}_B \cdot v_{Lst} \quad \text{und} \\ \dot{V}_{BRst} &= \dot{m}_B \cdot v_{BRst} \end{aligned}$$

Aufgrund der in /1/ erwähnten japanischen Untersuchungen beträgt der maximal zulässige Extinktionskoeffizient  $\sigma$  in einem mit Brandrauch angereicherten Rettungsweg für die Allgemeinheit  $\sigma = 0,15$  1/m. Für Personen, die an Brandrauch gewöhnt und mit den Örtlichkeiten vertraut sind, beträgt der Grenzwert  $\sigma = 0,5$  1/m. Diese Werte werden nach /1/ bei Brandrauch aus der Verbrennung von Holz bei einem Verdünnungsgrad  $v$  von 18,4 bzw. 5,5 und bei der Verbrennung von Heizöl bei einem Verdünnungsgrad  $v$  von 1380 bzw. 263 erreicht.

Die Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten vom Verdünnungsgrad entsprechend den Geraden 1 und 2 in Bild 2 kann durch die folgenden Beziehungen beschrieben werden.

für Heizöl (Gerade 1)

$$\sigma(1) = 27,04 \cdot 0,1923^{\log v} \quad (2)$$

für Holz (Gerade 2)

$$\sigma(2) = 3,02 \cdot 0,0889^{\log v} \quad (3)$$

Werden mit diesen Gleichungen die erforderlichen Verdünnungsgrade berechnet, die die Grenzwerte für den Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  der Brandrauch-Konzentration im Rettungsweg ergeben, so erhält man dafür die folgenden Werte.

Bei Holz als Brandgut:

für  $\sigma = 0,5$  1/m ist  $v = 5,5$

für  $\sigma = 0,15$  1/m ist  $v = 17,4$

Bei Heizöl EL als Brandgut:

für  $\sigma = 0,5$  1/m ist  $v = 263$

für  $\sigma = 0,15$  1/m ist  $v = 1410$

Diese nach den Gleichungen (2) und (3) berechneten Werte weichen etwas von den aus dem Bild 2 abgelesenen Werten nach /1/ ab. In Bild 2 sind diese berechneten Werte zusätzlich in Klammern mit angegeben. In den folgenden Bildern sind bei entsprechenden Darstellungen nur die berechneten Werte aufgeführt.

### 3. UNTERSUCHUNGEN ZUR ERMITTLUNG DER ERFORDERLICHEN VERDÜNNUNG VON BRANDRAUCH BEZÜGLICH DER OPTISCHEN BRANDRAUCHDICHTEN

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurde eine Übersicht über den Kenntnisstand der im Brandfall entstehenden festen und flüssigen Produkte erstellt sowie die optische Dichte des Brandrauches von weiteren brennbaren Stoffen und Stoffkombinationen in Abhängigkeit vom Verdünnungsgrad untersucht. Bei diesen Versuchen sind mit der Versuchsanordnung nach Bild 1 Holz zusammen mit Polystyrol mit Brandschutzausrüstung sowie Spanplatten unterschiedlicher Feuchtigkeit als brennbare Stoffe verwendet worden. Mit der Versuchsanordnung nach Bild 3 wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein Teilstrom des entstandenen Brandrauches abgesaugt und mit Frischluft verdünnt wurde.

Die verbrennungstechnischen Daten für die einzelnen brennbaren Stoffe bzw. Stoffkombinationen, die für die Berechnung des Verdünnungsgrades erforderlich sind, wurden mit Hilfe eines dafür erstellten Rechenprogramms ermittelt.

### 3.1 Rechenprogramm zur Ermittlung von Verbrennungsdaten aus der Elementarzusammensetzung der Brandstoffe

Da für die Ermittlung des Verdünnungsgrades des Brandrauches der theoretische Brandrauchvolumenstrom sowie der erforderliche Luftvolumenstrom zur stöchiometrischen Verbrennung wesentliche Grundgrößen sind, wurde ein Rechenprogramm entwickelt, mit dem aufgrund der im Brennstoff enthaltenen brennbaren Anteile alle Verbrennungsdaten berechnet werden können. Bei dieser Berechnung wird auch die im Brennstoff sowie in der Verbrennungsluft enthaltene Feuchtigkeit mit berücksichtigt. Alle für die Berechnung erforderlichen Kenngrößen und Beziehungen wurden nach /2/ angesetzt.

Ausgangsdaten für die Berechnung ist der Massenanteil an C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und S des reinen brennbaren Materials, der Feuchtigkeitsgehalt und der Anteil an nicht brennbaren Substanzen.

Um die Bedingungen, unter denen die Verbrennung abläuft, vollständig zu beschreiben, müssen auch Angaben über

den Luftüberschuß  $n$ ,  
die relative Feuchtigkeit  $\phi_L$  der Verbrennungsluft,  
den Luftdruck  $p_0$  sowie  
die Temperatur  $t_L$  der Verbrennungsluft

einggegeben werden.

Aus diesen Daten werden mit dem erstellten Rechenprogramm folgende Werte berechnet:

1. Der Brennwert  $H_0$  und der Heizwert  $H_u$  für 1 kg Brennstoff im Rohzustand sowie im wasserfreien Zustand.



2. Der theoretische Sauerstoffbedarf  $V_{Ost}$  und der Luftbedarf  $V_{Lst}$  bei stöchiometrischer Verbrennung, wobei der Verbrennungsluftbedarf  $V_{Lst}$  auch für trockene Luft ermittelt wird.
3. Der Brandrauchvolumenstrom  $V_{BRstf}$  bei stöchiometrischer Verbrennung bezogen auf den feuchten Zustand d.h. mit den Wasserdampfanteilen sowie auf den trockenen Zustand  $V_{BRsttr}$  für 1 kg Brennstoff im Rohzustand sowie im wasser- und aschefreien Zustand.
4. Die Zusammensetzung des Brandrauchvolumenstromes bei stöchiometrischer Verbrennung bezogen auf die Anteile von  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$  und  $N_2$  sowie  $H_2O$  in Volumen- und Massenanteilen. Der Wasseranteil wird aufgeteilt in den Anteil, der bei der Wasserstoffverbrennung entsteht und in den Anteil, der durch die Feuchtigkeit der Verbrennungsluft bzw. des Brennstoffes auftritt.

#### 4. BEI EINEM BRAND ENTSTEHENDE FESTE UND FLÜSSIGE PRODUKTE

Die optische Dichte von Brandrauch wird durch die nicht verbrannten Bestandteile im Brandrauch hervorgerufen. Bei Temperaturen unter 100 °C erfolgt eine zusätzliche Trübung durch kondensierenden Wasserdampf. Im folgenden wird der Ablauf eines Brandes in bezug auf die dabei entstehenden Produkte untersucht. Diese bei einem Brand entstehenden Produkte sind neben der chemischen Zusammensetzung des brennenden Stoffes auch vom Massenstrom der vorhandenen bzw. zuströmenden Luft, den Mischungsverhältnissen der brennbaren Gase mit der Luft und der Geometrie des Brandraumes sowie den Temperaturen der Wände abhängig, auf die die Brandgase auftreffen. Bei den Mischungsverhältnissen hat ausschließlich die örtliche Mischung und nicht ein Mittelwert den entscheidenden Einfluß. Durch die o.g. Größen wird der Reaktionsablauf zwischen den brennbaren Stoffen und dem Sauerstoff der Luft beeinflusst.

Geht man davon aus, daß ein abgegrenzter Bereich brennt, so erfolgt aus der ablaufenden Verbrennung eine Wärmeübertragung auf die Umgebung dieses Bereichs. Infolge der Wärmezufuhr durch Strahlung und/oder Konvektion heizt sich der angrenzende Bereich auf. Je nach der dort vorherrschenden Stoffart, die aufgeheizt wird, können dabei Dämpfe bzw. Schwelgase freigesetzt werden.

Diese Dämpfe bzw. Schwelgase können

- a) in der Abluft mitgeführt werden und bei niedriger Temperatur wieder kondensieren. Monomere von Kunststoffen können auch wieder polymerisieren,
- b) durch hohe Temperaturen in Radikale gespalten werden ohne zu verbrennen und dabei Ruß und andere Produkte bilden,
- c) bei örtlichem Sauerstoffmangel unvollständig verbrennen und daher Ruß und andere Produkte bilden,
- d) bei ausreichendem Sauerstoffangebot brennen. An kalten Wänden oder durch Halogene wird die noch nicht vollständig abgeschlossene Reaktion abgebrochen, wobei Ruß und andere Produkte entstehen oder
- e) bei ausreichendem örtlichen Sauerstoffangebot vollständig verbrennen. Dieser Vorgang setzt eine intensive Mischung der brennbaren Gase und der Verbrennungsluft voraus.

#### 4.1 Dämpfe und Schwelgase

Dämpfe und Schwelgase werden beim Erwärmen von Flüssigkeiten und Feststoffen, soweit diese flüchtige Bestandteile aufweisen, freigesetzt. Dabei sind thermoplastische Kunststoffe etwa den Flüssigkeiten gleichzusetzen. Je nach Stoffart und Temperatur zersetzen sich die entstehenden Dämpfe und Schwelgase. Die Masse der entstehenden Dämpfe und Schwelgase ist wiederum von der Stoffart

und der Temperatur abhängig. Bei Flüssigkeiten und thermoplastischen Kunststoffen kann die ganze Masse des Stoffes in den gasförmigen Zustand überführt werden. Duroplastische Kunststoffe können durch Wärme nur bedingt in den gasförmigen Zustand übergeführt werden. Bei Holz und Kohle kann der Anteil der flüchtigen Bestandteile bis ca. 80% betragen. An Flächen, deren Temperatur unterhalb der Siedetemperatur der einzelnen Fraktionen liegen, kondensieren diese Dämpfe und Schwelgase wieder. Dabei ist es auch möglich, daß monomere gasförmige Kunststoffbestandteile wieder polymerisieren. Die Temperaturbereiche für die Zersetzung von Kunststoffen liegen nach /3/ in einem Temperaturbereich zwischen 170 °C und 540 °C.

#### 4.2 Ruß

##### 4.2.1 Allgemeine Betrachtungen über die Rußbildung

Bei einer unvollkommenen Verbrennung bilden sich neben Ruß nach /4/ auch  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  und  $\text{CH}_4$  in merklichen Mengen. Die vor der Verbrennung aus dem Brandgut austretenden höheren Kohlenwasserstoffe werden durch hohe Temperaturen praktisch restlos gespalten. Dieser Fall tritt ein, wenn die höheren Kohlenwasserstoffe in die heißen Abgase aus der Verbrennung eingemischt werden.

Unvollkommen verläuft eine Verbrennung dann, wenn örtlich ein Sauerstoffmangel infolge unvollständiger Durchmischung oder ungenügender Luftzufuhr vorliegt. Da sich die Mischungsverhältnisse immer auf die örtlichen Gegebenheiten beziehen, kann im Abgas trotz unvollständiger Verbrennung noch Sauerstoff vorhanden sein. Ergibt eine Massenbilanz, daß in den brennbaren Gasen vor der Verbrennung mehr Kohlenstoff enthalten ist als in den Abgasen nach der Verbrennung, so hat sich als Folge einer teilweise unvollständigen Verbrennung Ruß gebildet. Die Art der entstehenden Verbrennungsgase ist sehr stark von dem örtlichen Luftfaktor  $z$  abhängig. Nach /4/ gibt es einen örtlichen Luftfaktor  $z$ , bei dem die Verbrennung gerade noch ohne Rußbildung abläuft. Dieser

Wert  $z$  ist von dem brennbaren Gas sowie der örtlichen Temperatur abhängig. Mit abnehmender Temperatur steigt der Wert  $z$  wesentlich an. Für ein Gemisch aus  $1/3$  CH und  $2/3$  CO beträgt nach /4/ bei  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  der Wert  $z = 0,2$ , bei  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt dieser Wert  $z$  bereits  $0,85$ . Daraus folgt, daß bei einer vorgegebenen Verbrennung die Rußbildung von der Temperatur des Brenngas-Luftgemisches abhängig ist. Die Temperatur wird gesenkt, wenn das Brenngas-Luftgemisch auf kalte Wände auftrifft oder durch Frischluft abgekühlt wird. Je weiter die Temperatur gesenkt wird, desto mehr Ruß bildet sich.

Die Masse des entstehenden Rußes hängt nach /5/ auch vom Verhältnis Kohlenstoff zu Wasserstoff sowie dem Molekülaufbau des aus dem Brandstoff entstehenden Gases ab. Mit wachsendem Verhältnis Kohlenstoff zu Wasserstoff nimmt die Rußbildung zu.

Werden bei der Verbrennung Halogene wie z.B. Fluor, Chlor oder Brom frei, so bewirken diese Elemente einen Abbruch der Verbrennungsreaktion. Dieser Abbruch führt entweder direkt oder indirekt durch die Temperatursenkung zu einer Rußbildung.

Chemisch entspricht Ruß der Formel  $\text{C}_8\text{H}$ . Nach /5/ wurden jedoch auch Rußzusammensetzungen der Formel  $\text{C}_6\text{H}$  gefunden. Die Rußteilchen bestehen nach /5/ aus kugelförmigen Einzelelementen, die sich zu flockenartigen Gebilden aus 100 bis 1000 und mehr Einzelkugeln aneinander lagern. Nach /6/ haben die bei der Verschwelung entstehenden Teilchen des "weißen Rauchs" Durchmesser von  $1,0\text{ }\mu\text{m}$  bis  $1,5\text{ }\mu\text{m}$ . Der bei der Verbrennung entstehende "schwarze Rauch" besteht aus Teilchen mit einem Durchmesser von  $1\text{ }\mu\text{m}$  bis  $10\text{ }\mu\text{m}$  bei der Verbrennung von Holz und  $1\text{ }\mu\text{m}$  bis  $20\text{ }\mu\text{m}$  bei der Verbrennung von Kunststoffen.

#### 4.2.2 Rußbildung bei der Spaltung von Kohlenwasserstoffen

Bei hohen Temperaturen werden die in den Dämpfen bzw. Schwelgasen enthaltenen höheren Kohlenwasserstoffverbindungen in niedrigere

Verbindungen aufgespalten. Dieser Prozeß läuft in nennenswertem Umfang bereits bei Temperaturen unter 500 °C ab. Nach /4/ beträgt bei einer Erwärmung von Methan auf 500 °C der Rußfaktor  $R_f = 0,25$ . Der Rußfaktor gibt das Verhältnis des im Ruß enthaltenen Massenanteils Kohlenstoff zu dem im zugeführten brennbaren Gas vorhandenen Massenanteils Kohlenstoff an. Bei 600 °C liegt dieser Wert von  $R_f$  bereits bei 0,45 und erreicht bei 800 °C einen Wert von  $R_f = 0,60$ .

#### 4.2.3 Rußbildung bei der Verbrennung

Eine Rußbildung bei der Verbrennung tritt immer dann ein, wenn die bei dem Verbrennungsablauf gebildeten Zwischenprodukte nicht weiter mit dem Luftsauerstoff reagieren und sich aneinanderalagern. Der Abbruch dieser Reaktion kann entstehen durch Sauerstoffmangel, Senkung der Gastemperatur oder durch Reaktionen der Zwischenprodukte mit anderen Stoffen wie z.B. Halogenen.

Zur Beurteilung der Auswirkung verschiedener Einflußgrößen auf die Rußbildung werden im Folgenden einige Verfahren zur technischen Erzeugung von Ruß aufgeführt.

#### 4.2.4 Technische Erzeugung von Ruß

Bei der technischen Erzeugung von Ruß werden die Einflußgrößen Sauerstoffmangel und Temperaturabsenkung zur Steuerung der anfallenden Rußmenge eingesetzt.

Im folgenden sind einige Verfahren zur Rußerzeugung aus /7/ aufgeführt. Die dabei aufgeführten Angaben über die Rußausbeute beziehen sich auf den Kohlenstoffanteil des Rußes zu dem Kohlenstoffanteil der zugeführten Stoffe und werden durch den Rußfaktor  $R_f$  ausgedrückt.

#### Deutscher Gußruß:

Steinkohlenteerprodukte werden im Trägerstrom verdampft und dieser Dampf in Form von kleinen Diffusionsflammen verbrannt. Die Flammen schlagen gegen eine wassergefüllte Trommel mit einer Temperatur von 100 °C. Maximale Ausbeute 60% (Rf = 0,60).

#### Gas-Furnace-Verfahren:

Erdgas, z.T. mit höheren Kohlenwasserstoffen angereichert, verbrennt in Form von großen Diffusionsflammen bei einem Verhältnis Gas-Luft-Volumen von 1:5. Die Brandgase werden, nach dem sie eine 15 m bis 30 m lange Rohrleitung durchströmt haben, durch Einspritzen von Wasser auf ca. 200 °C abgekühlt. Ausbeute 25% bis 37% (Rf = 0,25 bis 0,37).

#### Öl-Furnace-Verfahren:

Hochsiedende Fraktionen der Erdölraffinerie werden vorgeheizt, mit Düsen vernebelt und bei Luftunterschuss in Brennkammern bei 1400 °C bis 1500 °C verbrannt und unmittelbar danach durch Wassereinspritzung auf 200 °C bis 250 °C abgekühlt. Ausbeute 35% bis 60% (Rf = 0,35 bis 0,60).

#### Ruß aus Erdgas:

Spaltung von Erdgas in erhitzten Kammern. In den Kammern wird ca. 5 min lang ein Erdgas-Luftgemisch verbrannt bis diese eine Temperatur von ca. 1400 °C erreicht haben. Danach wird reines Erdgas eingeblasen. Das austretende Spaltgas wird mit Wasser abgekühlt. Bei einer Temperatur von ca. 900 °C werden die Kammern erneut aufgeheizt. Ausbeute ca. 40% (Rf = 0,40).

#### 4.2.5 Bei Brandversuchen ermittelte Rußmassen

Aufgrund der Literaturrecherche hat sich ergeben, daß nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden, um die Rußmassen sowie die

Dampf- und Schwelgasmassen bei einem Brand zu ermitteln.

Nach /8/ wurden u.a. in einem Raum mit 6 m x 9 m Grundfläche und 7,6 m Höhe unterschiedliche Massen eines Gemisches aus 70% Kerosin und 30% Tributylphosphat entzündet. In diesem Raum konnte keine Frischluft einströmen. Gemessen wurde u.a. der aus dem Raum abströmende Rauchgasvolumenstrom und der Rußanteil. Der Rußniederschlag an den Wänden wurde ebenfalls ermittelt. Als Mittelwert ergibt sich nach /8/ aus diesen Versuchen ein Rußgehalt in dem ausgetretenen Brandrauch von durchschnittlich 1,6 g/m<sup>3</sup>. An den Seitenwänden, dem Boden sowie am Rand der Decke wurde ein Rußniederschlag von ca. 0,1 g/m<sup>2</sup> bis 0,2 g/m<sup>2</sup>, an der Decke im Bereich der auftreffenden Flamme 0,2 g/m<sup>2</sup> bis 0,6 g/m<sup>2</sup> ermittelt. Bei diesen Versuchen wurden im Durchschnitt 12,8 kg Flüssigkeit verbrannt, das durchschnittliche Volumen des austretenden Brandrauches betrug 126 m<sup>3</sup>. Geht man davon aus, daß im Brandrauch, der aus dem Brandraum abströmt, sowie in dem Brandrauch, der im Brandraum verbleibt, der gleiche Rußanteil von 1,6 g/m<sup>3</sup> enthalten ist, so ergibt sich bei einem Brandraumvolumen von 410 m<sup>3</sup> und einem mittleren austretenden Brandrauchvolumen von 126 m<sup>3</sup> eine Rußmasse von

$$m_{RA} = 858 \text{ g.}$$

Rußablagerungen an den Wänden  $m_{RW}$

Mittlere Rußablagerung an den Seitenwänden	0,15 g/m <sup>2</sup>
Mittlere Rußablagerung an der Decke	0,4 g/m <sup>2</sup>

Mit dieser Rußablagerung und den Flächen der Seitenwände und der Decke ergibt sich die an den Wänden und der Decke insgesamt niedergeschlagene Rußmasse zu

$$m_{RW} = 64 \text{ g}$$

Damit beträgt der Gesamtrußanfall

$$m_R = 858 \text{ g} + 64 \text{ g} = 922 \text{ g}$$

Bei einer verbrannten Masse von 12,8 kg mit einem geschätzten Kohlenstoffanteil von 85 % (10,9 kg) ergibt sich ein Rußfaktor

$$R_f = 0,922 \text{ kg} / (12,8 \text{ kg} * 0,85) = 0,085$$

Bei weiteren Versuchen wurden nach /8/ die im Filter abgelagerte Massen mit 180 g und 300 g gemessen. Bei einem Brandrauchvolumen von 95 m<sup>3</sup> und 114 m<sup>3</sup>, das bei diesen Versuchen aus dem Brandraum abströmte, ergibt sich ein Rußanteil im Brandrauch von 1,89 g/m<sup>3</sup> und 2,63 g/m<sup>3</sup>.

Bei dem im abgeströmten Brandrauchvolumen enthaltenen Ruß, sowie unter der Annahme, daß in dem im Brandraum verbliebenen Brandrauch die gleiche Rußkonzentration vorliegt, ergibt sich eine insgesamt entstandene maximale Rußmasse von

$$m_{RA} = 1378 \text{ g}$$

Einschließlich des an den Wänden abgelagerten Rußes von

$$m_{RW} = 64 \text{ g}$$

ergibt sich für den Versuch mit dem höchsten Rußanteil eine Rußmasse von

$$m_R = 1442 \text{ g}$$

=====



Daraus ergibt sich bei einem Kohlenstoffanteil im Brennstoff von 10,9 kg ein Rußfaktor von

$$R_f = 0,132$$

Dieser Wert liegt damit deutlich über dem zuvor berechneten Durchschnittswert von  $R_f = 0,085$ . Die sich an den Wänden abgelagerte Rußmasse  $m_{RW} = 64$  g entspricht, bezogen auf die gesamte entstandene Rußmasse  $m_R$  von 922 g bzw. 1442 g, 6,9 % bzw. 4,4 %.

Bei den Untersuchungen von Tewarson in /9/ wurde bei der Verbrennung kleiner Proben von Polystyrol und Polymethacrylsäureester (z.B. Plexiglas) u.a. der Anteil des Rußes und der Monomeren im Abgas ermittelt. Bezogen auf den Massenverlust beim Abbrand des Brandgutes ergab sich für Polystyrol ein Massenanteil von 18,9% Ruß und 21,1% Monomere im Abgas. Bei der Verbrennung von Polymethacrylsäureester ergaben sich Werte für den Rußanteil von 3,5% und für den Monomeranteil von 18,3%.

Bei einem Anteil von 92,3% Kohlenstoff im Polystyrol ergibt sich ein Rußfaktor für Polystyrol von  $R_f = 0,205$ . Für Polymethacrylsäureester beträgt bei einem Kohlenstoffanteil von 55,8% der Rußfaktor  $R_f = 0,063$ .

Bei den Untersuchungen von Brenden und Le Van in /10/ wurde beim Abbrand von Sperrholz im Abgas ein Rußgehalt von 26% bezogen auf die Masse des verbrannten Holzes ermittelt. Bei einem Kohlenstoffanteil von 50% im Holz beträgt der Rußfaktor  $R_f = 0,52$ .

Nach /5/ sind in Diffusionsflammen im Mittel 10 g/m<sup>3</sup>, örtlich bis 30 g/m<sup>3</sup> Ruß zu finden. Dies entspricht einer auf die verbrannte Masse bezogenen Rußmenge von 10% bzw. 30%. Bei einem angenommenen Kohlenstoffanteil von 75% (Methan) ergibt sich ein Rußfaktor  $R_f$  von 0,13 bzw. 0,40 für diesen Fall.

Aus den oben aufgeführten Beispielen ergibt sich, daß die Entstehung unverbrannter Brennstoffprodukte durch verschiedene Rand-

bedingungen hervorgerufen wird, die bei realen Brandfällen nicht vorhersehbar bzw. nicht beeinflussbar sind. Die für die Rußerzeugung maßgebenden Einflußgrößen wie Sauerstoffmangel und Temperaturänderungen treten auch bei einem natürlichen Brand in einer großen Anzahl von Variationen auf. Im allgemeinen Fall muß daher von der maximalen Rußentstehung ausgegangen werden, die bei einem Rußfaktor von ca.  $R_f = 0,5$  liegt.

## 5. DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE

Entsprechend den in /1/ beschriebenen Versuchen mit Holz und Heizöl EL wurden weitere Versuche zur Ermittlung der optischen Brandrauchdichte in Abhängigkeit von der Verdünnung mit Luft in der Versuchsanordnung nach Bild 1 durchgeführt.

### 5.1 Brandgut Spanplatten

Aus Spanplatten mit Melamin-Formaldehydharz als Bindemittel, wurden quadratische Stäbe mit den Abmessungen 20 mm x 20 mm Querschnitt und 400 mm Länge gesägt und zu Krippen aufgesetzt. Die Krippe bestand aus 7 Lagen mit je 4 Stäben. Unter dieser Krippe lagen seitlich je 2 Stäbe, um die Zündwanne mit 100 ml Brennspritus unterzustellen. Die Versuche wurden sowohl mit Stäben im Rohzustand als auch im wasserfreien Zustand durchgeführt.

Die ohne zusätzliche Trocknung verwendeten Spanplattenstäbe hatten eine Feuchtigkeit von ca. 5 %. Bei einem Teil der Versuche wurden die Stäbe bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (Feuchtigkeit 0 %). Nach dem in Abschnitt 3. beschriebenen Rechenprogramm ergaben sich für diese Spanplattenstäbe folgende Verbrennungskenngrößen:

Tabelle 1 Verbrennungskenngrößen für Spanplatten

	Brennwert	Heizwert	Luftbedarf	Brandrauchvolumen	
	Ho	Hu	$V_{Lst}$	$V_{BRsttr}$	$V_{BRstf}$
	kJ/kg	kJ/kg	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg
Spanplatte					
5 % Feuchte	18 860	17 550	4,48	4,22	4,93
Spanplatte					
0 % Feuchte	19 860	18 600	4,26	4,44	5,12

Der in der Tabelle 1 angegebene Luftbedarf bezieht sich auf die bei den Versuchen vorhandene feuchte Luft. Im Mittel wies die Luft bei den Versuchen folgende Zustandsgrößen auf:

$$\begin{aligned} \varphi_L &= 80 \% \\ t_L &= 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ p_0 &= 1000 \text{ mbar.} \end{aligned}$$

Bei den Werten für das entstehende feuchte Brandrauchvolumen ist die in der Verbrennungsluft enthaltene Feuchtigkeit mit berücksichtigt.

Der beim Abbrand dieser Krippen unter verschiedenen Zuluftvolumenströmen erzeugte Brandrauch hat in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad  $v$  die in dem Bild 4 eingezeichneten Extinktionskoeffizienten  $\sigma$ . Die Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  von dem Verdünnungsgrad  $v$  wird durch die Gerade 3 wiedergegeben. Die Gerade 3 bzw. die Meßwerte liegen zwischen den Geraden 1 und 2 für Heizöl EL und Holz als Brandgut nach /1/ (siehe Bild 2).

## 5.2 Brandgut Holz mit Polystyrol

Weitere Versuche wurden mit einem Brandgut durchgeführt, das aus Holz und Polystyrol zusammengesetzt war. Das mit einer Brandschutzausrüstung versehene Polystyrol (schwerentflammbar nach DIN 4102) wurde dabei sowohl in geschäumter Form als auch geschmolzen eingesetzt. Im letzteren Fall wurde das in einem Behälter geschmolzene Polystyrol auf eine Holzkrippe gestellt, die anschließend entzündet wurde.

Die bei diesen Versuchen in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad erhaltenen Extinktionskoeffizienten sind in Bild 5 dargestellt. Die Gerade 4 gibt im Mittel die Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  vom Verdünnungsgrad  $v$  für dieses Brandgut wieder.

Von dieser Geraden 4 weicht der Punkt P4 im Bild 5 stark ab. Dieser Meßwert ergab sich als Mittelwert für einen Versuch, bei dem auf eine Lage von Holzwolle etwa die gleiche Masse Polystyrolschaumstücke gelegt wurde. Zum Vergleich sind auch hier die Geraden 1 und 2 für das Brandgut Heizöl und Holz nach /1/ mit in das Bild 5 eingezeichnet.

## 5.3 Brandgut Holz in einem großen hermetisch abgeschlossenen Raum

Bei Brandversuchen nach /11/ in einem stillgelegten Kernkraftwerk wurden u.a. Holzkrippen als Brandlast verwendet. Bei 3 Versuchen wurden 79 kg, 110 kg und 169 kg Holz als Brandlast verwendet. Die Abbrandraten, zeitlicher Mittelwert während des Abbrandes von 80% auf 20% der Masse des Brandgutes, betragen 3,36 kg/min bei Versuch 1, 4,98 kg/min bei Versuch 2 und 7,98 kg/min bei Versuch 3.

Bei diesen Versuchen wurde aufgrund der gemessenen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen (siehe /11/) sowie aufgrund der stöchiometrischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Verdünnungsgrad  $v$  berechnet. Aus den Meßwerten für die optische Brandrauchdichte sowie des ermittelten Verdünnungsgrades wurden die in Bild 6 wiedergegebenen Meßwerte

1.1 bis 1.3 für den Versuch 1, 2.1 bis 2.3 für den Versuch 2 und 3.1 bis 3.3 für den Versuch 3 berechnet.

Die Abhängigkeit dieses Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  von dem Verdünnung  $v$  kann für diese Meßwerte durch die Gerade 5 wiedergegeben werden. Zum Vergleich der Lage dieser Meßwerte sind auch in Bild 6 die Geraden 1 und 2 für Heizöl EL und Holz als Brandgut nach /1/ eingezeichnet.

Da diese Versuche in einem hermetisch abgeschlossenen Raum erfolgten, konnte über eine Kohlenstoffbilanz, Masse C im Holz vor der Verbrennung und Masse C im CO- und CO<sub>2</sub>-Anteil der Raumluft, der Rußfaktor bei den drei Versuchen ermittelt werden. Der Rußfaktor betrug bei dem Versuch 1  $R_f = 0,23$ , bei dem Versuch 2  $R_f = 0,25$  und bei dem Versuch 3  $R_f = 0,26$ .

#### 5.4 Verdünnung des Brandrauchs durch zusätzliche Frischluft

Bei den in der Versuchsanordnung nach Bild 1 durchgeführten Versuche wurde dem Verbrennungsraum in Abhängigkeit von der Abbrandrate unterschiedlich große Zuluftvolumenströme zugeführt und die sich dabei ergebende optische Brandrauchdichte an den Stellen 11 und 12 (siehe Bild 1) ermittelt. In der in Bild 3 dargestellten Versuchsanordnung wurde ein Teilstrom des aus dem Verbrennungsraum austretenden Brandrauchs abgesaugt und mit Frischluft verdünnt. Diese Versuche wurden mit Heizöl als Brandgut durchgeführt. Der aus dem Verbrennungsraum austretende Brandrauch hatte bei diesen Versuchen eine optische Dichte, die im Bereich von  $\sigma = 5 \text{ 1/m}$  bis  $\sigma = 15 \text{ 1/m}$  lag. Dieser Brandrauch wurde mit Frischluft im Verhältnis von 1 : 200 bis 1 : 2000 verdünnt. Die dabei erhaltene optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches in Abhängigkeit von der gesamten Verdünnung, entsprechend der Beziehung

$$v_{\text{ges}} = \frac{\dot{V}_{\text{FL}} + \frac{v}{v+1} \cdot \dot{V}_{\text{BR}}}{\frac{1}{v+1} \cdot \dot{V}_{\text{BR}}} \quad (4)$$

mit  $v$  nach Gleichung (1).  $\dot{V}_{\text{BR}}$  ist darin der abgesaugte Brandrauchvolumenstrom.

Die Ergebnisse sind für die durchgeführten Versuche in Bild 7 eingetragen. Durch die Gerade 6 wird im Mittel die Abhängigkeit der optischen Dichte des Brandrauchs von der Verdünnung wiedergegeben. Die Gerade 6 ergibt bei gleicher Verdünnung niedrigere Werte für die optische Brandrauchdichte als nach der Geraden 1.

## 6. VERSUCHSERGEBNISSE

Die in den Bildern 4 bis 6 eingezeichneten Geraden weisen zunächst aufgrund ihrer unterschiedlichen Steigungen auf eine verschiedene Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  von dem Verdünnungsgrad  $v$  hin.

Die Geraden 3 bis 5 in den Bildern 4 bis 6 weisen einen wesentlich stärkeren Einfluß der Verdünnung auf den Extinktionskoeffizienten auf, als dies bei den Geraden 1 und 2 der Fall ist. Eine eingehende Beurteilung dieses Sachverhaltes ist jedoch nur dann möglich, wenn die in Abschnitt 4 dargelegten Bedingungen, unter denen die bei einem Brand entstehenden festen und flüssigen Produkte beinflusst werden, berücksichtigt werden.

Aufgrund der dort beschriebenen Einflüsse folgt, daß sich ähnliche Rußmengen nur dann bilden, wenn bei gleichem Brandablauf und gleichen Brandstoffen auch die gleichen Bedingungen bezüglich der räumlichen Anordnung, der Umgebungstemperaturen, des Zuluftvolumenstromes und der Mischungsverhältnisse zwischen brennbaren Gasen und Frischluft herrschen.

Bei den Versuchen nach /1/, bei denen die Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  vom Verdünnungsgrad  $v$  für das Brandgut Heizöl EL und Holz nach der Versuchsanordnung entsprechend Bild 1 ermittelt wurde, ergäbe sich die in Bild 2 durch die Geraden 1 und 2 dargestellte Abhängigkeit. Bei diesen Versuchen wurde sowohl die Abbrandrate als auch der Zuluftvolumenstrom in den Verbrennungsraum geändert. Die Abbrandbedingungen sind dadurch nur in relativ engen Grenzen verändert worden.

Bei den folgenden, ebenfalls mit der Versuchsanordnung nach Bild 1 durchgeführten Versuchen wurde bei einer gegebenen Anordnung des Brandgutes mit etwa konstanten Abbrandbedingungen zur Änderung des Verdünnungsgrades der Zuluftvolumenstrom in den Verbrennungsraum in weiten Grenzen geändert. Dadurch ergaben sich Temperaturänderungen im Verbrennungsraum und am Brandgut selbst, die zu stark veränderten Randbedingungen und damit zu einer Änderung der Art und Menge der festen und flüssigen Anteile im Brandrauch führten. Dies gilt auch für die Versuchsbedingungen, die zu den Meßergebnissen nach Bild 6 geführt haben.

Der in diesem Fall aus dem Brandraum bzw. Flur, siehe /11/, austretende Brandrauchvolumenstrom hatte bei den unterschiedlichen Brandlasten entsprechend verschieden hohe Temperaturen. Am Ausgang des Flures wurde der Brandrauchvolumenstrom durch die im Gebäude zirkulierende Luft stark abgekühlt. Bei allen Geraden, mit Ausnahme der Geraden 1 und 2, ist daher die starke Änderung der Randbedingungen zu berücksichtigen. Die Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten  $\sigma$  vom Verdünnungsgrad  $v$  gibt in diesen Fällen, Gerade 3 bis Gerade 6, nur die Verhältnisse bei den jeweils herrschenden Randbedingungen wieder und kann nicht unmittelbar mit den Steigungen der Geraden 1 und 2 verglichen werden.

Eine Beurteilung der Lage der Meßwerte zeigte, daß mit Ausnahme des Punktes P4 in Bild 5 alle Werte zwischen der Geraden 1 und 2 liegen. Die Gerade 1 kann daher als obere Grenzlinie für die optische Dichte des Brandrauches in Abhängigkeit von der Verdünnung betrachtet werden.

Die Untersuchungen über den im Brandrauch enthaltenen Rußanteil haben aufgrund von Literaturangaben ergeben, daß bis zu 50% des im Brandgut enthaltenen Kohlenstoffes als Ruß im Brandrauch enthalten sein kann. Bei Versuchen mit Holz als Brandgut wurden Anteile bis 26% ( $R_f = 0,26$ ) ermittelt. Dieser hohe Rußanteil führt dazu, daß für die Beurteilung der optischen Dichte des Brandrauches in jedem Brandfall unabhängig von dem Brandstoff von den Verhältnissen wie bei einem Brand von Heizöl EL entsprechend der Geraden 1 in Bild 2 ausgegangen werden muß.

Bei der nachträglichen Verdünnung des entstandenen Brandrauches mit Frischluft, entsprechend der Versuchsanordnung nach Bild 3, ergaben sich die im Bild 7 eingezeichneten Meßwerte. Diese Meßwerte sind durch die Gerade 6 angenähert wiedergegeben.

Zum Vergleich ist in Bild 7 die Gerade 7 eingezeichnet. Diese Gerade entspricht einer Verdünnung der Brandrauchkonzentration  $c$  entsprechend dem Verdünnungsgrad  $v$ , wobei die Bedingungen für das Lambert-Beersche Gesetz zugrunde gelegt wurden.

$$\sigma \cdot l = \epsilon \cdot l \cdot c \quad (5)$$

$$\sigma = \epsilon \cdot c.$$

Bleibt  $\epsilon$  konstant, so gilt

$$\sigma_1 / \sigma_2 = (c_1 / c_2).$$

Mit  $c = 1/v$  wird

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot (v_1 / v_2).$$



Ein Vergleich der Steigungen der im Bild 7 eingezeichneten Geraden 1, 2 und 6 mit der Steigung der Geraden 7 ergibt folgende Feststellungen.

Die Steigung der Geraden 1 ist flacher als die der Vergleichsgeraden 7. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, daß mit zunehmendem Luftüberschuß bei der Verbrennung von Heizöl EL die Temperatur im Verbrennungsraum sinkt und dadurch entsprechend Abschnitt 4.2.3 mehr Ruß bei der Verbrennung entsteht. Der Extinktionskoeffizient sinkt daher bei zunehmender Verdünnung weniger ab, als es nach dem Lambert-Beerschen Gesetz erfolgen würde.

Die Steigung der Geraden 2 entspricht etwa der Vergleichsgeraden 7. Daraus folgt, daß bei der Verbrennung von Holz mit zunehmendem Luftüberschuß der Extinktionskoeffizient genauso zurückgeht wie es der Verdünnung nach dem Lambert-Beerschen Gesetz entspricht. Daraus folgt, daß mit zunehmendem Luftüberschuß bei der Verbrennung die gleiche Anzahl an Partikel, Ruß und Kondensatprodukte, entstehen.

Die durch die Meßwerte des nachträglich mit Frischluft verdünnten Brandrauches gelegte Gerade 6 besitzt eine etwas flachere Steigung wie die der Geraden 7. Dies bedeutet, daß die optische Dichte des Brandrauches nicht proportional zu der Brandrauchkonzentration abnimmt. Aus dieser Tatsache folgt, daß in der hier für die nachträgliche Verdünnung erforderlichen Zeit eine Veränderung der im Brandrauch enthaltenen Partikel z. B. durch Kondensation oder Agglomeration auftreten. Der Brandrauch war vor der Verdünnung mit Frischluft an der Absaugstelle aus dem Verbrennungsraum schon soweit abgekühlt, daß eine weitere Temperaturabsenkung keine Auswirkung auf die Rußbildung hatte.

Für eine Abschätzung der optischen Brandrauchdichte durch eine nachträgliche Verdünnung mit Frischluft ergibt sich folgende Beziehung

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot (v_1 + 1) / (v_2 + 1) \quad (6)$$

Aus diesen Untersuchungen folgt, daß die optische Dichte des im Brandfall entstehenden Brandrauchs neben den Stoffeigenschaften des Brandgutes, wie z. B. Brandschutzausrüstung, auch die räumlichen Verhältnisse sowie die Abkühlung des Brandrauches durch Frischluft und durch kalte Wände eine ganz entscheidende Rolle spielen. Ist die Abkühlung des Brandrauches auf Temperaturen von unter ca. 200 oC abgeschlossen, so tritt bei einer weiteren Abkühlung nur eine geringe Veränderung der Anzahl und Größe der Rußpartikel innerhalb eines Zeitraumes von ca. 30 min nach /12/ ein. Die weitere Verdünnung mit Frischluft erfolgt entsprechend der Gleichung (6).

Wie die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Versuche mit Holz als Brandlast gezeigt haben, entsteht Brandrauch mit einem sehr hohen Rußanteil, wenn heißer Brandrauch durch einen Frischluftstrom stark abgekühlt wird. Bei den Versuchen wurde der Brandrauch durch die Zumischung mit Frischluft auf Temperaturen von ca. 120 oC (kleinste Abbrandrate) bis 160 oC (größte Abbrandrate) abgekühlt. Bei diesem Vorgang entstehen erhebliche Mengen an Ruß. Daher wird dieses Verfahren auch zur technischen Rußgewinnung eingesetzt (siehe Abschnitt 4.2.4). Die optische Dichte des bei den Versuchen nach Abschnitt 5.3 entstandenen Brandrauch-Luftgemisches hatte bei gleichem Verdünnungsgrad Werte, die denen von Ölbränden nahe kommen, wie Bild 6 erkennen läßt.

Da die bei den Versuchen nach Abschnitt 5.3 erfolgte Abkühlung des Brandrauches auch bei tatsächlichen Brandfällen auftritt - Brandrauch tritt durch Öffnungen vom Brandraum in Rettungswege ein und wird infolge der Spülung der Rettungswege abgekühlt - muß für alle brennbaren Materialien eine Beurteilung der optischen Brandrauchdichte in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad nach der Geraden 1 in dem Bild 2 erfolgen.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Einrichtungen zur Gewährleistung der Sicherheit in Rettungswegen im Brandfall ist es erforderlich, die maximal zulässige Brandrauchkonzentration in der Luft zu kennen, die noch keine nennenswerte Behinderung bzw. keine Gesundheitsgefährdung hervorruft. Die maximal zulässige Brandrauchkonzentration in Rettungswegen wird in der Literatur durch den Extinktionskoeffizienten für die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches angegeben. Die optische Dichte des Brandrauches, die in allen Brandfällen wesentlich über dem maximal zulässigen Wert liegt, muß durch eine Verdünnung mit Frischluft auf den in Rettungswegen zulässigen Extinktionskoeffizienten gesenkt werden.

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurde eine Übersicht über den Kenntnisstand der im Brandfall entstehenden festen und flüssigen Produkte erstellt, sowie die optische Dichte des Brandrauches von weiteren brennbaren Stoffen und Stoffkombinationen in Abhängigkeit vom Verdünnungsgrad untersucht. Bei diesen Versuchen ist Holz zusammen mit Polystyrol mit Brandschutzausrüstung, sowie Spanplatten unterschiedlicher Feuchtigkeit als brennbare Stoffe verwendet worden. Mit einer geänderten Versuchsanordnung wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein Teilstrom des entstandenen Brandrauches abgesaugt und mit Frischluft verdünnt wurde.

Die Untersuchungen über den im Brandrauch enthaltenen Rußanteil haben aufgrund von Literaturangaben ergeben, daß bis zu 50% des im Brandgut enthaltenen Kohlenstoffes als Ruß im Brandrauch enthalten sein kann. Bei Versuchen mit Holz als Brandgut wurden Anteile bis 26% ( $R_f = 0,26$ ) ermittelt. Dieser hohe Rußanteil führt dazu, daß für die Beurteilung der optischen Dichte des Brandrauches in jedem Brandfall unabhängig von dem Brandstoff von den Verhältnissen wie bei einem Ölbrand ausgegangen werden muß.

8. LITERATUR

- /1/ John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein die Sicht und Gesundheit in Rettungswegen gewährleistendes Maß  
Teil 2: Optische Brandrauchdichte  
Forschungsbericht Nr.50, Dez. 1983  
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V -  
Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"
- /2/ Gumz, W. Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik  
Berlin, Göttingen, Heidelberg  
Verlag Springer 1962
- /3/ Troitzsch, I.: Brandverhalten von Kunststoffen  
München, Wien, Verlag C.Hanser  
1982
- /4/ Bosnjakovic, F.: Wärmediagramme für Vergasung, Verbrennung und Rußbildung  
Berlin, Göttingen, Heidelberg  
Verlag Springer 1956
- /5/ Günther, R.: Verbrennung und Feuerung  
Berlin, Heidelberg, New York  
Verlag Springer 1974
- /6/ Jin, T.: Visibility through fire smoke  
Part 2, Visibility of monochromatic lights through fire smoke  
Report of Fire Research Institute of Japan  
Serial No.33, March 1971, S.31-48

- /7/ Ullmann: Encyklopädie der technischen  
Chemie  
München, Berlin, Verlag Urban  
und Schwarzenberg 1963
- /8/ Lösungsmittelbrandversuche in  
einem 400 m<sup>3</sup> großen Raum  
unveröffentlichter Versuchsbericht
- /9/ Tewarson, A.: Heat release rates from samples of  
polymethylmethacrylat and polystyrene  
burning in normal air  
Fire and Materials  
Heft 1, S.90-96, 1976
- /10/ Brenden, J. and  
Le Van, S.L.: Smoke accumulation  
2. Predictive parameters for plywood  
Journal of Fire Sciences, 2 (1984),  
Nr. 4, S.276-285;
- /11/ Müller, K. Brandversuche am HDR
- Dobbernack, R. Versuchsaufbau und eingesetzte Meßtechnik  
Ergebnisse und theoretische Begleitung der  
Versuche
- John, R. Ergebnisse der Rauchgasverteilung und  
-Konzentrationsmessungen  
VFDB-Zeitschrift 35 (1986) H.3 S. 100-111
- /12/ 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

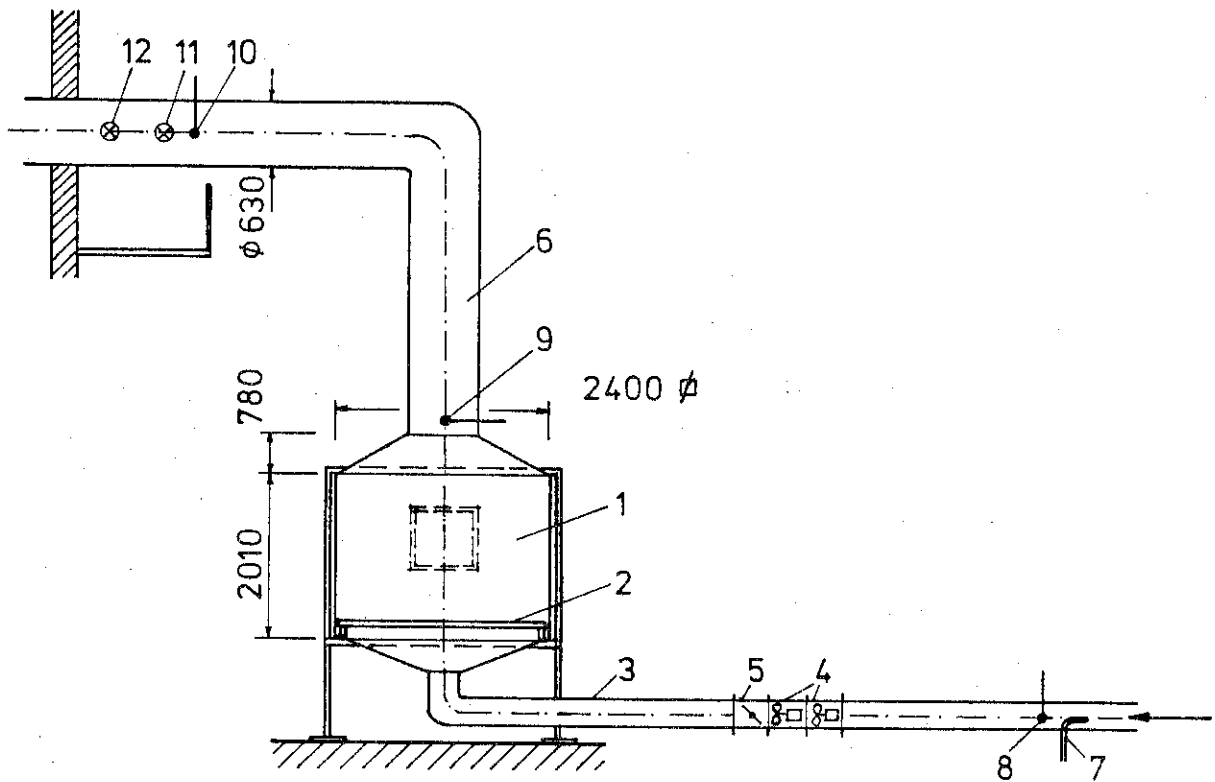


Bild 1: Schema der Versuchsanlage nach /1/

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

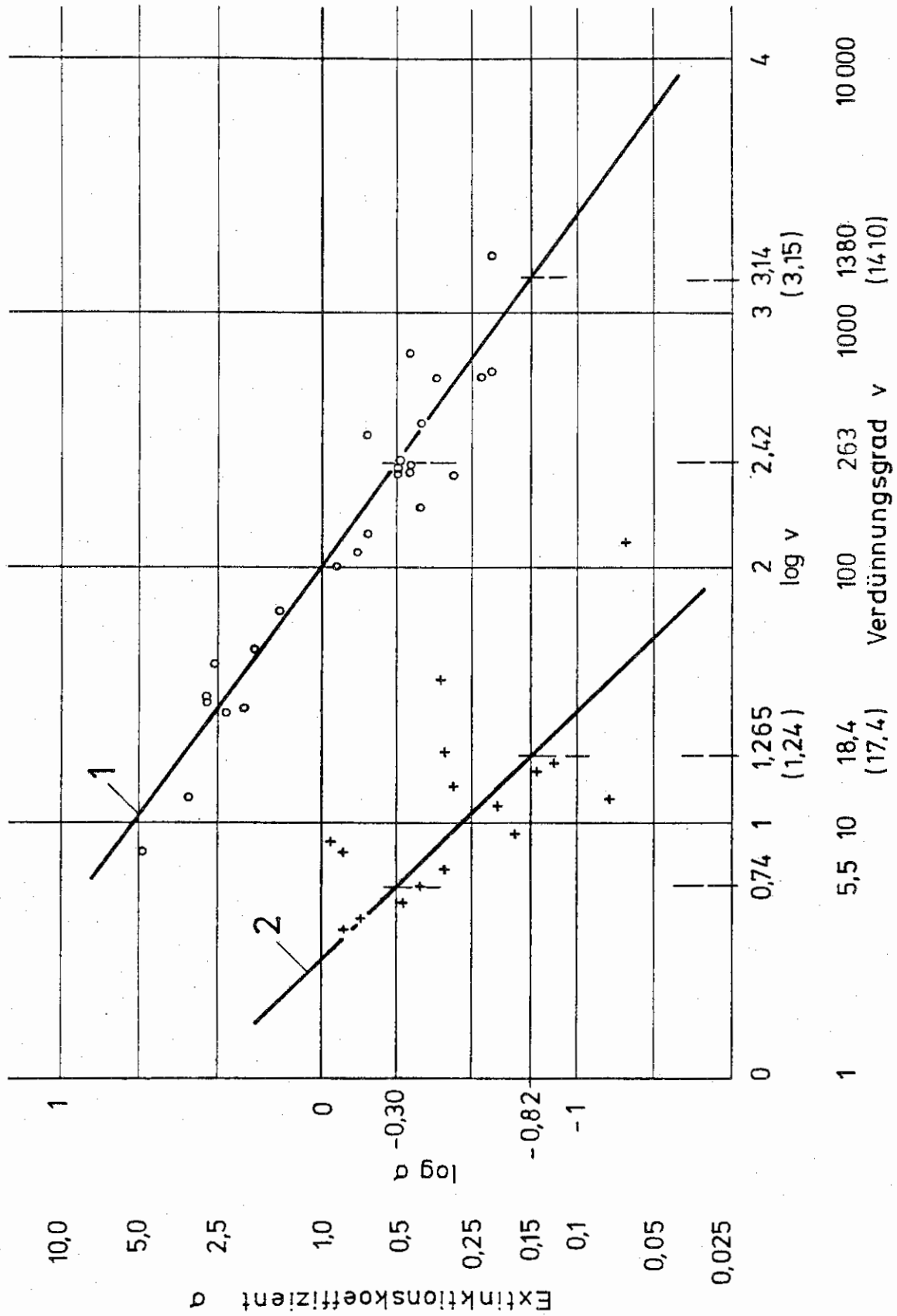


Bild 2: Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit vom Verdünnungsgrad für das Brandgut Heizöl EL (Gerade 1) und Holz (Gerade 2) nach /1/

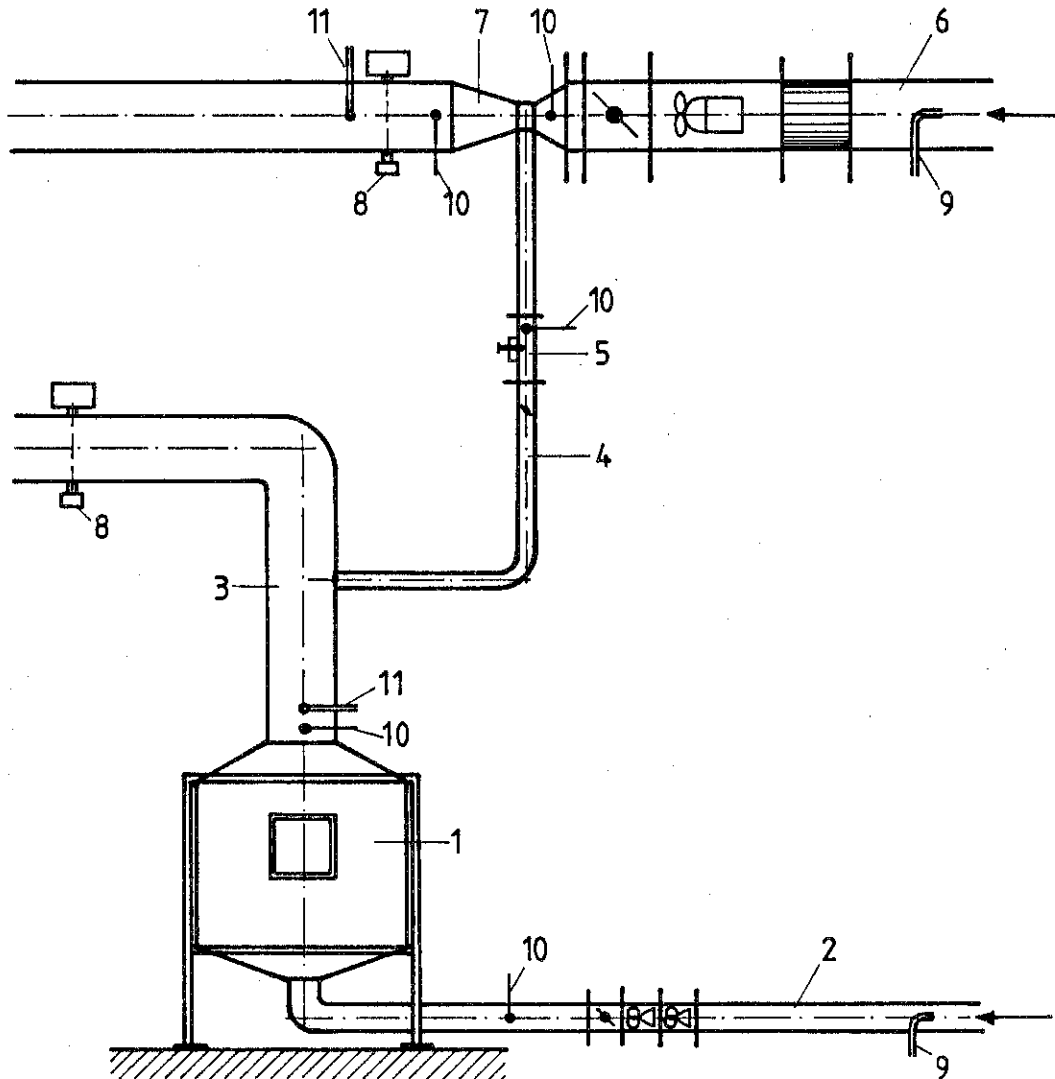


Bild 3: Versuchsanordnung für die Verdünnung des entstandenen Brandrauches mit Frischluft

- 1 Verbrennungsraum
- 2 Zuluftleitung in den Verbrennungsraum
- 3 Brandrauchableitung
- 4 Brandrauchteilstrom
- 5 Volumenmeßgerät für Brandrauchteilstrom
- 6 Frischluft zur Verdünnung
- 7 Venturidüse
- 8 Meßstrecke für optische Brandrauchdichte
- 9 Meßstelle für dynamischen Druck
- 10 Temperaturmeßstellen
- 11 Absaugstelle für Brandrauch



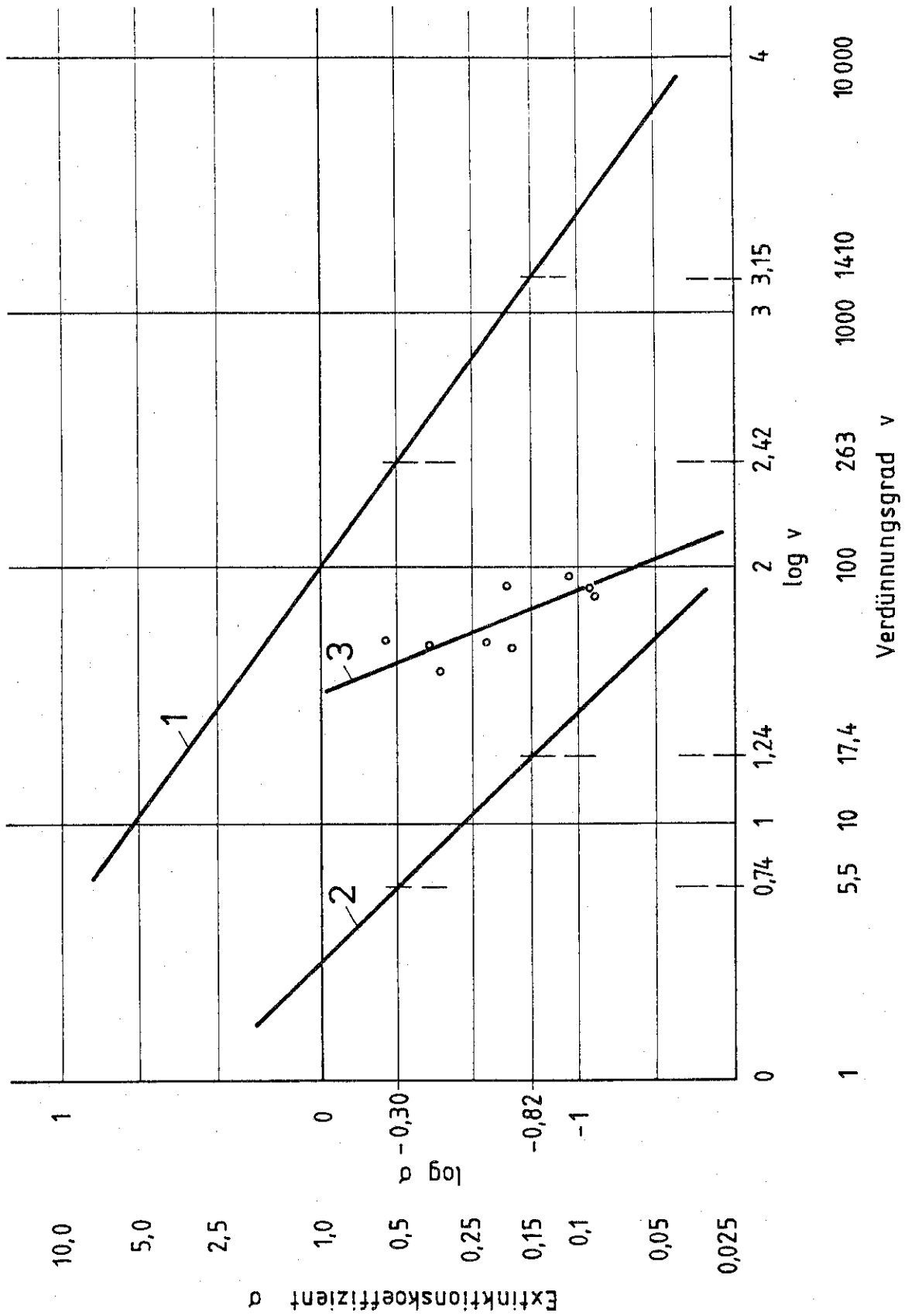


Bild 4: Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit vom Verdünnungsgrad für das Brandgut Spanplatten

Gerade 3 Approximation der Meßwerte

Gerade 1 und 2 nach /1/ für Heizöl EL und Holz

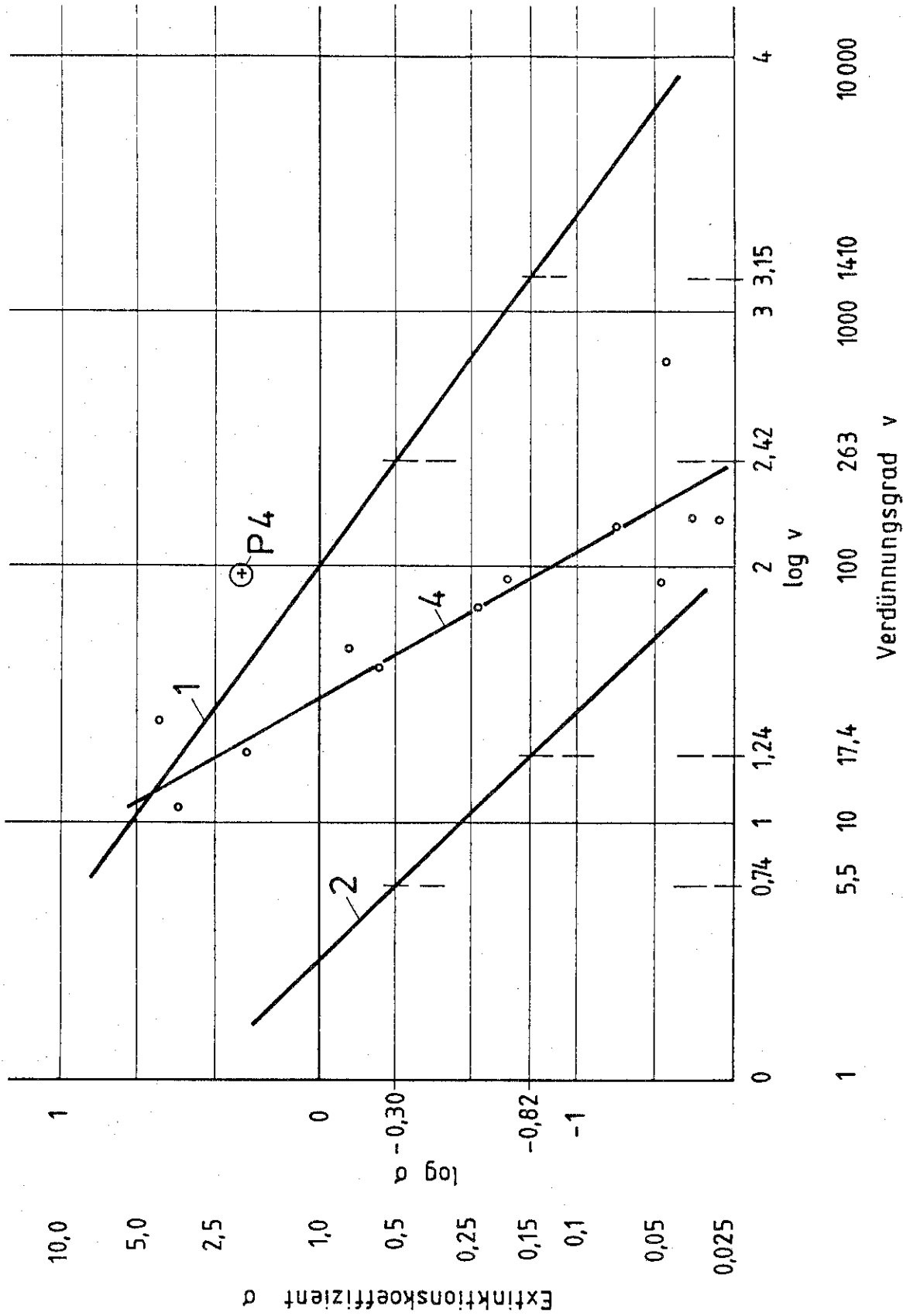


Bild 5: Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit vom Verdünnungsgrad  
 Gerade 4 Approximation der Meßwerte für das Brandgutgemisch aus Holz und Polystyrol  
 Punkt P4 Meßwert für das Brandgutgemisch aus Holzwolle und Polystyrol  
 Gerade 1 und 2 nach /1/ für Heizöl FL und Holz

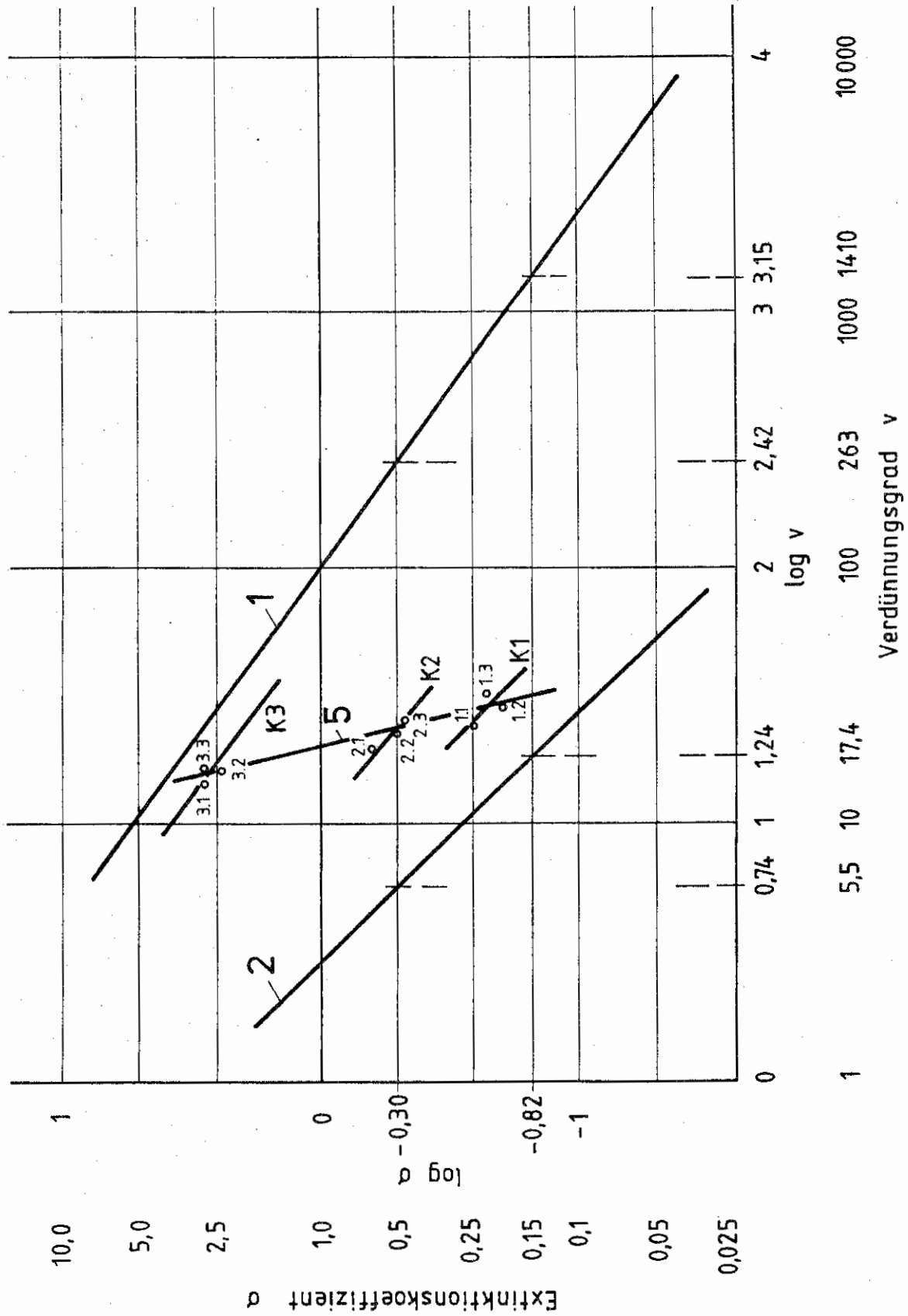


Bild 6: Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten vom Verdünnungsgrad für das Brandgut Holz bei Versuchen nach /11/ Gerade 5 Approximation der Meßwerte

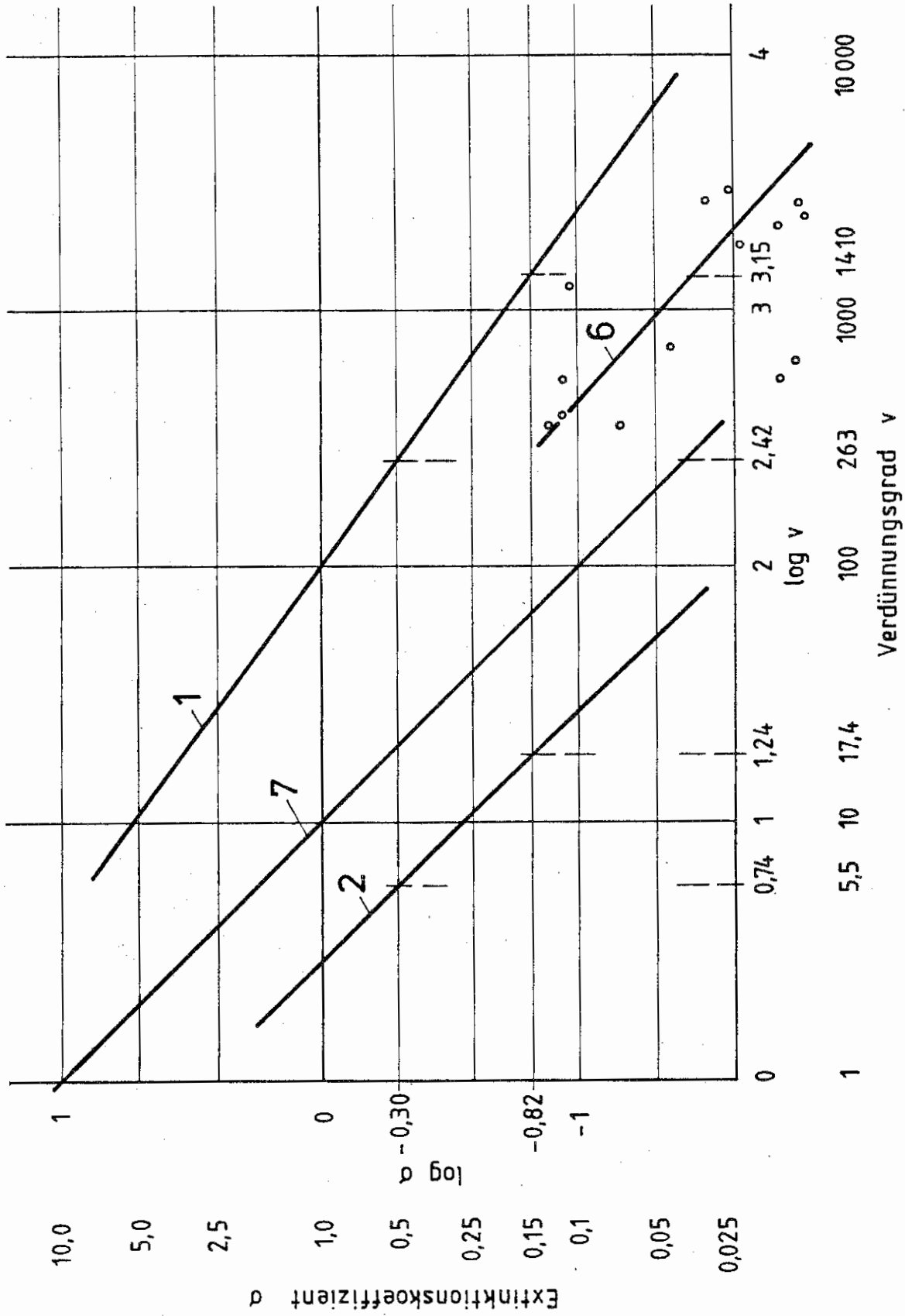


Bild 7: Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit von dem Verdünnungsgrad für das Brandgut Heizöl EL  
 Verdünnung des entstandenen Brandrauchs mit Frischluft (Versuchsordnung nach Bild 3)  
 Gerade 6 Approximation der Meßwerte  
 Gerade 1 und 2 nach /1/ für Heizöl EL und Holz