

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

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

Teil 5: Brandversuche im natürlichen Maßstab zur Beurteilung der entstehenden Brandrauchkonzentration und deren Abbau sowie die daraus resultierenden Maßnahmen zum Schutz von Rettungswegen

75

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

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

Forschungsbericht Nr. 75

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

Teil 5: Brandversuche im natürlichem Maßstab zur Beurteilung
der entstehenden Brandrauchkonzentration und deren
Abbau sowie die daraus resultierenden Maßnahmen zum
Schutz von Rettungswegen

von
Dipl.-Ing. Reiner John

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
September 1990

FA. Nr. 117 (2/87)

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung
2. Ergebnisse der Teile 2 bis 4 dieses Forschungsvorhabens
3. Brandrauchentwicklung bei Bränden in natürlichem Maßstab
 - 3.1 Brennende Feststoffe
 - 3.1.1 Wohnraumbrände
 - 3.1.2 Lagerbrände
 - 3.2 Brände in hermetisch von der Umgebung abgeschlossenen Gebäuden
 - 3.2.1 Holz als Brandgut
 - 3.2.2 Flüssigkeit als Brandgut
4. Brandrauch von Feststoff- und Flüssigkeitsbränden
5. Verdünnung von vorhandenen Brandrauch-Luftgemischen
 - 5.1 Bewertung von Brandrauch
 - 5.2 Bei Bränden entstehende Brandrauchkonzentration
 - 5.3 Optische Dichte und CO₂-Konzentration, Einfluß der Verdünnung durch Frischluft
 - 5.4 Änderung der Brandrauchkonzentration
 - 5.5 Spülung eines mit Brandrauch angefüllten Raumes
 - 5.6 Berechnung des Spülfaktors für die bei den Versuchen erhaltenen Werte
 - 5.7 Erforderliche Spülzeiten von verqualmten Räumen, um die in Räumen zulässigen Grenzwerte der Brandrauchkonzentration zu unterschreiten
 - 5.8 Verdünnung von einströmenden Brandrauch in einen Rettungsweg mit einem Frischluftstrom

6. Auswirkung der zeitlichen Abhängigkeit der Brandrauchentwicklung im Brandraum auf die Brandrauchkonzentration in Rettungswegen
 - 6.1 Zeitdauer zwischen Brandentstehung und der Bildung von optisch dichtem Brandrauch
 - 6.2 Zeitdauer zwischen der Brandentstehung und dem Wirksamwerden von Schutzmaßnahmen für Rettungswege
 - 6.3 Erforderliche Zuluftvolumenströme in Rettungswege
 - 6.4 Vorkehrungen für den Personenschutz
7. Zusammenfassung
8. Literatur
9. Bilder

FORMELZEICHEN

c	Konzentration von Brandrauch in der Raumluft
F_{sp}	Spülfaktor, siehe Gleichung (6)
K	siehe Gleichung (4) und (5)
Δt	Zeitdifferenz in min bzw. Stunden
T	Temperatur in °C
v	Verdünnung
V	Volumen in m ³
ΔV	Volumenänderung in m ³
\dot{V}	Volumenstrom in m ³ /h
B	Faktor nach /6/, siehe Gleichung (1)
β^*	Faktor für die Wirksamkeit einer Filteranlage allgemein
β^{**}	Faktor für die Wirksamkeit einer Filteranlage bezogen auf die "Luftumwälzrate"
σ	Extinktionskoeffizient 1/m

Indices

0	Anfangszustand
1	Endzustand
FL	Frischlufte
th	theoretisch
Δt	Konzentration nach der Zeitdifferenz Δt
st	stöchiometrisch

1. EINLEITUNG

Personenschäden mit Todesfolge im Verlauf eines Brandes sind nach /1/ fast ausschließlich auf die Einwirkung von Brandrauch zurückzuführen und bei kleinen und mittleren Bränden mit geringen Sachschäden im Wohn- und Schlafbereich (Wohnungen, Heimen, Hotels) zu beklagen. Nach der in /2/ aufgestellten Statistik für die Jahre 1979 bis 1985 ist in den USA der Anteil der Personen, die bei einem Brand durch Brandrauch getötet wurden, von 59 % stetig auf 67 % angestiegen.

Aus diesen Angaben folgt, daß das Problem "Brandrauch" eine für die Folgen eines Brandes wesentliche Ursache ist und daß der Einfluß des Brandrauches insbesondere auf die Personenschäden sehr hoch ist und weiter zunimmt.

2. ERGEBNISSE DER TEILE 2 BIS 4 DIESES FORSCHUNGSVORHABENS

In den Teilen 2 und 3 dieses Forschungsvorhabens wurde die optische Dichte des bei Bränden in einem Modellraum in Abhängigkeit vom Zuluftstrom in den Modellraum entstehenden Brandrauches sowie die sich bei der weiteren Verdünnung des entstandenen Brandrauches mit Luft einstellende optische Brandrauchdichte ermittelt. Diese optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches wurde, bezogen auf die Verdünnung des Brandrauches mit Luft, graphisch dargestellt. Bezugsgröße für die Verdünnung ist das bei stöchiometrischer Verbrennung entstehende Brandrauchvolumen (siehe /3/, Teil 2). Die Verdünnung ist danach eine Funktion des Volumens (Volumenstromes) des Brandrauch-Luftgemisches zum stöchiometrischen Volumen (Volumenstrom) bzw. der CO_2 -Konzentration des Brandrauch-Luftgemisches zur CO_2 -Konzentration bei der stöchiometrischer Verbrennung.

$$v = f(V/V_{\text{st}}) \text{ bzw. } v = f(\dot{V}/\dot{V}_{\text{st}}) \text{ oder } v = f(\text{CO}_2 \text{ BrL}/\text{CO}_2 \text{ st})$$

Aufgrund der in Teil 2 durchgeführten Versuche ergaben sich die im Bild 1 dargestellten Grenzlinien für die optische Dichte von Brandrauch-Luftgemischen beim Brand verschiedener Stoffe.

Die Ergebnisse der in /4/ beschriebenen Versuche in einem stillgelegten Kernkraftwerk mit Holzkrippen als Brandlast haben ergeben, daß, entgegen den Ergebnissen in dem Modellraum nach /3/ Teil 2, auch bei Holzbränden ein Brandrauch mit einer sehr hohen optischen Dichte entstehenden kann. Die bei Holzbränden nach /4/ erhaltenen höchsten optischen Dichten des Brandrauches lagen im Bereich der für Ölbrände bei den Versuchen nach /3/ Teil 2 ermittelten Werte. Die in Bild 1 angegebenen obere Grenzlinien 1 wurde bei allen bisher durchgeführten Brandversuchen mit unterschiedlichem Brandgut nicht überschritten und ist daher für die Bewertung der optischen Dichte des bei Bränden in Abhängigkeit von der Verdünnung auftretenden Brandrauches allgemein zugrunde zu legen.

Aus dieser oberen Grenzlinie, Gerade 1 im Bild 1, ergeben sich daher für alle Brandfälle die erforderlichen Verdünnungswerte für den entstehenden Brandrauch, um die in Rettungswegen noch zulässigen Grenzwerte für die optische Dichte nach /5/ einzuhalten.

In /3/, Teil 4, wurden die durch Brandrauchanteile in der Luft von Rettungswegen eintretende Sichtbehinderung und die damit einhergehenden Einflüsse auf das Erkennen und das Lesen der Beschilderung von Rettungswegen untersucht.

Dabei hat sich u.a. ergeben, daß neben der Leuchtdichte und dem Leuchtdichteunterschied von Kennzeichen auch die Zeit, in der im Normalfall das Kennzeichen beobachtet wird, einen wesentlichen Einfluß auf die erforderliche Größe von Kennzeichen hat. Ist Brandrauch in den Rettungsweg eingedrungen, so wird die Leuchtdichtedifferenz zwischen dem Symbol bzw. der Schrift eines Kennzeichens und dem Umfeld infolge der Absorption sowie durch den Streulichtanteil wesentlich verringert bzw. vollständig aufgehoben.

ben. Dazu kommt bei reizenden Brandrauchanteilen noch eine Verschlechterung des Sehvermögens des Auges infolge vermehrter Tränenbildung sowie u.U. auch Nervosität, die dann zu kürzeren Beobachtungszeiten der Hinweisschilder als im Normalfall führt. Durch Versuche mit verschiedenen Kennzeichen wurden die durch den Brandrauch hervorgerufenen Einflüsse auf die Erkennbarkeit von Kennzeichen untersucht und mit den theoretischen Werten verglichen. Aufgrund dieser Untersuchungen wurden Hinweise zur Verbesserung der Kennzeichnung von Rettungswegen gegeben.

3. BRANDRAUCHENTWICKLUNG BEI BRÄNDEN IN NATÜRLICHEM MAßSTAB

Der aus einem brennenden Raum austretenden Brandrauchvolumenstrom und dessen optische Dichte ist im wesentlichen von der Art und der Masse des brennenden Materials, von dem durch die Flamme aufgeheizten Material und dessen Temperatur, von der Zeitdauer des Brandes, den Ventilationsbedingungen und von der Art und Größe des Brandraumes abhängig.

Da sich die für die optische Dichte des austretenden Brandrauches wesentlichen Einflußgrößen im Verlauf des Brandes ständig ändern, ist im allgemeinen aufgrund theoretischer Ansätze keine genaue Vorhersage über den zu einer bestimmten Zeit nach der Brandentstehung aus einem Brandraum austretenden Brandrauch bezüglich dessen optischer Dichte und dessen Volumenstrom möglich. Dabei ist zu beachten, daß es sich bei dem aus einem Brandraum austretenden Brandrauch um ein Gemisch aus den bei der Verbrennung entstehenden Produkten, unverbrannten Gasen, Wasserdampf und Luft in den verschiedensten Zusammensetzungen handeln kann.

Aufgrund von durchgeführten Messungen bei realen Bränden können, bezogen auf die Art des Brandraumes, dessen Ventilationsöffnungen und der Art des Brandgutes, Abschätzungen durchgeführt werden, um in Abhängigkeit von der Branddauer den Volumenstrom und die optische Dichte des austretenden Brandrauches anzugeben. Mit diesen

Schätzwerten und den im Teil 4 nach /3/ durchgeführten Untersuchungen ist es möglich, die Zeit abzuschätzen, ab der mit Behinderungen und Orientierungsschwierigkeiten in Rettungswegen aufgrund von erhöhten Brandrauchkonzentrationen zu rechnen ist.

3.1 Brennende Feststoffe

3.1.1 Wohnraumbrände

Die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brände in einem mit Möbeln eingerichteten Brandraum von 12 m² (siehe Bild 2) bzw. 22 m² (siehe Bild 3) Grundfläche und 2,7 m Höhe, haben bezüglich des zeitlichen Austritts von optisch dichten Brandrauch aus dem Brandraum alle ein ähnliches Verhalten gezeigt.

Im Bild 4 ist für den Brandraum nach Bild 2, Grundfläche 12 m², die Temperatur im Brandraum und die optische Dichte des aus der Fensteröffnung austretenden Brandrauches beim Abbrand des mit verschiedenen brennbarer Materialien ausgestatteten Brandraumes über der Zeit nach dem Entzünden dargestellt. Im Fall 1, Kurven 1, befanden sich im Brandraum 385 kg Altmöbel in einer Art, die einer kleinen Wohnzimmereinrichtung entsprach (siehe Bild 2). In den Fällen 2 (Kurven 2) und 3 (Kurven 3) bestand das brennbare Material aus Holzkrippen, Holzbalken, weichen und harten Schaumstoffen, aufgespannten Gardinenstoff, Teppichboden und Linoleum. Diese Stoffe waren 0,3 m über dem Boden des Brandraumes auf einer nichtbrennbaren Platte angeordnet. Ihre Masse betrug bei der Modellbrandlast I 87 kg und bei der Modellbrandlast II 185 kg. Entzündet wurden die Materialien jeweils an einer Stelle mit ca. 0,3 l Brennspritus, der sich in einer Wanne mit einer Grundfläche von 20 cm x 30 cm unter einer Holzkrippe befand. Die Art und die Anordnung der verschiedenen Materialien der Modellbrandlast II ist im Bild 5 wiedergegeben.

Wie das Bild 4 zeigt, erfolgte eine sprunghaft Zunahme der optischen Dichte des aus der Fensteröffnung austretenden Brandrauchvolumenstromes in der Zeit, in der die Temperatur im Brandraum steil anstieg bzw. gerade ihr erstes Maximum erreichte. Die Versuchszeiten dafür lagen zwischen 6 min und 10 min.

Bei weiteren Brandversuchen mit Altmöbeln in dem Brandraum nach Bild 2, Grundfläche 12 m², ergaben sich Versuchszeiten bis zum Austritt von optisch dichtem Brandrauch, die zwischen 4 min und 9 min lagen.

Das Auftreten des optisch dichten Brandrauches erfolgte bei diesen Versuchen in der Zeit, in der die Temperaturen im Brandraum, Mittelwert aus 5 Meßstellen unterhalb der Brandraumdecke, zwischen 500 °C und 700 °C lag und der flash over gerade eingetreten war oder unmittelbar danach erfolgte. Die Zeiten bis zum Austritt von optisch dichtem Brandrauch sind von der Brandausbreitungsgeschwindigkeit und damit von der Geschwindigkeit des Aufheizens des Brandraumes abhängig.

Dieser Einfluß wird durch die Brandversuche in dem mit ca. 750 kg Altmöbeln eingerichteten Brandraum nach Bild 3, Grundfläche 22 m², bestätigt. Die Zeiten bis zum Beginn des Austrittes optisch dichten Brandrauches lagen dabei zwischen 7 min und 14 min.

3.1.2 Lagerbrände

Bei Brandversuchen in dem als Regallager eingerichteten Brandraum (siehe Bild 6), Grundfläche 22 m², wurde die Entstehung einer Brandphase, in der sich ein Brandrauch mit einer hohen optischen Dichte entwickelt, nicht beobachtet. Bei diesen Versuchen erfolgte eine etwa gleichmäßige Brandausbreitung ohne flash over. Der Brandraum war bei diesen Versuchen entsprechend dem Bild 6 mit Pappkartons, die in Regalboxen standen, eingerichtet. Die brennbare Masse, Kartons aus Wellpappe, in die mit Holzwolle bzw.

Hartschaumfüllmaterial verpackte Holzstücke eingelegt waren, betrug, wie bei einer Einrichtung dieses Raumes mit Altmöbeln entsprechend Bild 3, ca. 750 kg.

Bei diesen Versuchen wurde jeweils eine niedrigere mittlere Deckentemperatur gemessen als bei den Versuchen, bei denen Altmöbel als Brandlast verwendet wurden. Das Bild 7 zeigt einen typischen Verlauf der Temperatur, Mittelwert aus 5 Meßstellen unterhalb der Brandraumdecke, bei einem Brand in dem mit Altmöbel (Kurve 1) und dem als Lagerraum (Kurve 2) eingerichteten Brandraum entsprechend den Bildern 3 und 6. Der Zeitbereich, in dem bei dem Brandversuch mit Altmöbeln Brandrauch mit einer hohen optischen Dichte auftrat, ist mit in Bild 7 eingetragen. Die Zeitachsen dieser beiden Kurven sind versetzt eingezeichnet, da die Entzündungsphase in den beiden Fällen unterschiedlich lang dauerte. Bei dem Brandversuch "Lager" wurde im Gegensatz zu dem Brandversuch "Wohnzimmer" an 2 Stellen mit jeweils 0,5 l Brennspritus gezündet.

3.2 Brände in hermetisch von der Umgebung abgeschlossenen Gebäuden

Bei den im Rahmen des HDR-Sicherheitsprogramms in einem stillgelegten Kernkraftwerk durchgeführten Brandversuchen (siehe /4/) war das Versuchsgebäude, in dem die eigentlichen Brandräume untergebracht waren, hermetisch von der Umgebung abgeschlossen. Wegen des großen Luftvolumens des Versuchsgebäudes im Verhältnis zur jeweils eingesetzten brennbaren Masse trat in keinem Fall Sauerstoffmangel bei der Verbrennung auf, sodaß der Brandablauf wie bei einem Abbrand in Räumen mit Verbindungsöffnungen zur freien Umgebung erfolgte. Durch die hermetische Abtrennung zur freien Umgebung blieben aber alle Verbrennungsprodukte im Versuchsgebäude bis zur Spülung des Versuchsgebäudes mit Frischluft erhalten. Aufgrund dieser Versuche sind Untersuchungen u.a. über die beim Brand freigesetzten Stoffe, deren Konzentrationen und

den Abbau dieser Konzentration durch den Spülvorgang möglich, die im Fall der freien Verbindung eines Brandraumes mit der Umgebung nicht durchgeführt werden können.

3.2.1 Holz als Brandgut

Bei Brandversuchen mit Holzkrippen als Brandlast in einem Brandraum in dem o. g. Versuchsgebäude (siehe /4/) trat optisch dichter Brandrauch ab einer Versuchszeit von ca. 14 min auf. Wie das Bild 8 zeigt, begann die Bildung von optisch dichtem Brandrauch wie bei den o.g. Brandversuchen in der Phase des Brandes, in der im Brandraum nach einem steilen Temperaturanstieg eine Temperatur von ca. 800 °C erreicht wurde. Die im Bild 8 aufgetragene Temperatur ist bezüglich der Höhe nicht mit den in den vorhergehenden Bildern 4 und 6 aufgetragenen Temperaturwerten vergleichbar, da es sich hierbei um einen direkt über dem Brandgut gemessenen Einzelwert handelt.

Der im Bild 8 aufgetragene Extinktionskoeffizient gibt in diesem Fall nicht die optische Dichte des aus dem Brandraum austretenden Brandrauches wieder, sondern gilt für eine Stelle im Versuchsgebäude, an der sich der austretende Brandrauch bereits mit einem Teil der Raumluft vermischt hatte.

3.2.2 Flüssigkeit als Brandgut

Entsprechend den Brandversuchen mit Holz als Brandlast wurden bei weiteren im Rahmen des in /4/ beschriebenen HDR-Sicherheitsprogramms durchgeführten Brandversuchen im gleichen Versuchsgebäude, jedoch in einem anderen Brandraum, Brandversuche mit einem Mineralöl, Dichte 0,765 kg/l bei 20 °C, Heizwert 42.500 kJ/kg, als Brandlast durchgeführt. Im Gegensatz zu den Brandversuchen mit Holz als Brandlast trat bei diesen Versuchen praktisch unmittelbar nach der Entzündung des Öles ein Brandrauch mit einer hohen opti-

schen Dichte auf. Im Bild 9 ist die Temperatur und der Extinktionskoeffizient beim Abbrand von 224 l Öl in einer Wanne mit einer Grundfläche von 3 m² dargestellt. Das Bild 10 gilt für den Abbrand der gleichen Menge Öl in einer Wanne mit einer Grundfläche von 2 m².

Wie im Bild 8, so ist auch die in den Bildern 9 und 10 mit aufgetragene Temperatur bezüglich ihrer Höhe nicht mit den in den vorhergehenden Bildern 4 und 6 aufgetragenen Temperaturwerten vergleichbar, da es sich hier um einen Einzelwert handelt.

Der in den Bildern 9 und 10 aufgetragene Extinktionskoeffizient gibt nicht die optische Dichte des aus dem Brandraum austretenden Brandrauches, wie im Bild 8, wieder, sondern gilt für eine Stelle im Versuchsgebäude, an der sich der austretende Brandrauch bereits mit einem Teil der Raumluft vermischt hatte. Die Lage der Meßstellen der Meßwerte in den Bildern 9 und 10 ist bezüglich der Zuordnung zu dem Brandraum mit der des Bildes 8 vergleichbar.

4. BRANDRAUCH VON FESTSTOFF- UND FLÜSSIGKEITSBRÄNDEN

Im Gegensatz zu Feststoffbränden, bei denen sich die Zusammensetzung der aus den Feststoffen austretenden brennbaren gasförmigen Anteile zeitlich ändert, bleibt bei Bränden von Flüssigkeiten, insbesondere bei denen mit einem engen Siedebereich, die Zusammensetzung der brennbaren Gase während der gesamten Branddauer nahezu gleich. Daher wird der Verbrennungsablauf nur durch die sich infolge des Brandes ändernden äußeren Bedingungen beeinflusst. Dazu zählt insbesondere die Temperatur im Brandraum und die sich dadurch ergebende Änderung der Verdampfungsrate der brennenden Flüssigkeit und des Zuluftvolumenstromes in den Brandraum.

Treffen Flammen auf kalte Wände auf, so wird die Verbrennungsreaktion abgebrochen und es entsteht auch bei ausreichendem Sauer-

stoffangebot aus den nicht vollständig verbrannten Kohlenwasserstoffen Ruß (siehe /3/ Teil 3). Da Flüssigkeitsbrände sehr schnell ihre volle Ausdehnung erreichen, ergibt sich zumindest in der Anfangsphase des Brandes immer der Fall, daß die Flammen auch beim voll entwickelten Brand noch auf kalte Wände auftreffen. Dadurch wird die Verbrennungsreaktion in einem großen Bereich abgebrochen und es entsteht dementsprechend eine große Masse von Ruß. Aus diesem Grund ist bei allen Flüssigkeitsbränden unmittelbar nach deren Entzündung mit einem Brandrauch von hoher optischer Dichte zu rechnen. Im Verlauf des Brandes kann sich, abhängig u.a. von der Brandraumgröße im Verhältnis zur Flüssigkeitsoberfläche, der sich einstellenden Wandtemperaturen sowie dem Öffnungsquerschnitt des Brandraumes zur Umgebung, die optische Dichte des entstehenden Brandrauches wieder verringern. Im allgemeinen ist aber davon auszugehen, daß bei Flüssigkeitsbränden ein Brandrauch mit einer hohen optischen Dichte entsteht.

Mit einer verstärkten Rußbildung ist auch dann zu rechnen, wenn Flammen durch kalte Luftströmungen so abgekühlt werden, daß dadurch ebenfalls die Verbrennungsreaktion abgebrochen wird.

Bei Bränden von Feststoffen tritt eine entsprechend hohe Brandrauchdichte wie bei den Flüssigkeitsbränden dann auf, wenn der aus dem Feststoff bei einer hohen spezifischen Oberfläche austretende Strom von brennbaren Dämpfen infolge der Oberflächenaufheizung auf hohe Werte angestiegen ist. Dabei tritt bei relativ niedrigen Wandtemperaturen im Brandraum der gleiche Effekt wie bei Flüssigkeitsbränden auf, jedoch zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt nach dem Entzünden, da die Brandausbreitung und damit die Aufheizung des brennbaren Materials im Vergleich zu den Flüssigkeitsbränden wesentlich langsamer erfolgt.

Den Einfluß einer unterschiedlichen Wannengrundfläche beim Abbrand der gleichen Menge Öl auf die optische Dichte des entstehenden Brandrauches zeigt Bild 11. Diese Kurven wurden bei weiteren im Rahmen des in /4/ beschriebenen HDR-Sicherheitsprogramms durchge-

fürten Brandversuchen ermittelt. Die Extinktionskoeffizienten geben, wie bei den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Brandversuchen mit Holz, die optische Dichte an einer Stelle im Versuchsgebäude wieder, an der sich der entstandene Brandrauch bereits mit einem Teil der Raumluft vermischt hatte.

Die im Bild 11 dargestellten Kurven ergaben sich bei Brandversuchen, bei denen in einem Brandraum unter gleichen äußeren Bedingungen Öl in Wannen entzündet wurde. Bei dem Versuch 1 (Kurve 1) hatte die Wanne eine Grundfläche von 3 m^2 und bei Versuch 2 (Kurve 2) wurde die Grundfläche auf 2 m^2 verringert. Bei beiden Versuchen wurden in die Wannen jeweils 224 l Öl eingefüllt. Die Branddauer betrug bei dem Versuch 1 ca. 17 min und bei dem Versuch 2 ca. 25 min.

Bei Flüssigkeitsbränden muß aufgrund der oben durchgeführten Betrachtungen und aufgrund der in den Bildern 9 und 10 wiedergegebenen Meßergebnisse immer davon ausgegangen werden, daß unmittelbar nach der Entzündung der Flüssigkeit ein Brandrauch mit hoher optischer Dichte entsteht. Bei Feststoffbränden entsteht optisch dichter Brandrauch je nach Brandraumgröße erst ab ca 4 min bzw. 7 min nach dem Entzünden der Brandlast, siehe Abschnitt 3.1.1. bzw. 3.2.1.

5. VERDÜNNUNG VON VORHANDENEN BRANDRAUCH-LUFTGEMISCHEN

5.1 Bewertung von Brandrauch

Eine Bewertung von Brandrauch bezüglich seiner optischen Dichte und dem Anteil an gesundheitsgefährdenden Stoffen ist nur dann möglich, wenn die Entstehung des Brandrauches genau definiert werden kann. So ändert sich seine Zusammensetzung bei sonst gleichen Abbrandbedingungen erheblich durch die Einmischung mit Luft, entweder schon bei der Verbrennung oder beim Aufsteigen des Brandrauches über dem Brandherd. Bei den im Rahmen dieses For-

schungsvorhabens (siehe /3/) durchgeführten Teilen 2 und 3 wurde als Bezugsgröße das bei stöchiometrischer Verbrennung entstehende Brandrauchvolumen oder die dabei vorhandene CO₂-Konzentration als Bezugsgröße verwendet, um, wie im Bild 1, die optische Dichte des Brandrauches von verschiedenen Stoffen und unter unterschiedlichen Abbrandbedingungen zu bewerten.

Bei der Bewertung der spezifischen Eigenschaften des Brandrauches bezogen auf die Verdünnung ergeben sich die für den jeweilig verbrannten Stoff und durch die Art der Verbrennung bedingten Brandraucheigenschaften.

Die Bewertung der in den Bildern 9 und 10 aufgetragenen Extinktionskoeffizienten entsprechend der jeweiligen Verdünnung des Brandrauch-Luftgemisches zeigt das Bild 12. Die Verdünnung des Brandrauches wurde aufgrund der bei diesen Versuchen gemessenen CO₂-Konzentrationen und der bei stöchiometrischer Verbrennung des Öls auftretenden CO₂-Konzentration entsprechend /3/ Teil 2 ermittelt. Im Bild 12 sind die gemessenen Extinktionskoeffizienten über dem Verdünnungsgrad aufgetragen. Die Linien verbinden in zeitlicher Reihenfolge die einzelnen Meßpunkte. Die Pfeilrichtung zeigt die fortlaufende Zeit an. Aus dieser Darstellung ergibt sich die Änderung der optischen Eigenschaften des Brandrauches während der Versuchsdauer.

Die Abbrandbedingungen sind bei der Bewertung von Brandrauch besonders anzugeben, da die durch die Abbrandbedingungen hervorgerufenen Einflüsse durch den Bezug der Meßwerte auf die bei stöchiometrischer Verbrennung entstehenden Produkte nicht berücksichtigt werden.

5.2 Bei Bränden entstehende Brandrauchkonzentration

Der bei einem Brand entstehende Brandrauch hat in der Regel eine optische Dichte und eine Schadstoffkonzentration, die wesentlich

über den für den Aufenthalt von Personen zulässigen Werten liegen. Dringt Brandrauch in Rettungswege ein, so muß daher dieser Brandrauchanteil so verdünnt werden, daß die zulässige Konzentration bezüglich der Sichtverhältnisse und der Gesundheitsgefährdung nicht überschritten wird. Nach /5/ beträgt der maximal zulässige Wert des Extinktionskoeffizient in Rettungswegen 0,15 1/m.

Die erforderlichen Verdünnungsverhältnisse von Brandrauch mit Frischluft, durch die der nach /5/ zulässige Maximalwert der optischen Dichte eines Brandrauch-Luftgemisches unterschritten wird, sind in /3/, Teil 2 und 3 ermittelt worden.

Die Zumischung von Frischluft in den Brandrauch kann je nach den vorliegenden baulichen Gegebenheiten und der Lage des zu schützenden Rettungsweges unterschiedlich erfolgen. Eine Verdünnung des Brandrauches entsteht durch die Einmischung von Frischluft in den über dem Brandherd aufsteigenden Brandrauch. Im Fall von hermetisch zur Umgebung abgeschlossenen Gebäuden vermischt sich der entstehende Brandrauch mit dem noch verbleibenden Luftanteil innerhalb des Gebäudes. Bei den in der in /4/ beschriebenen Anlage durchgeführten Brandversuchen ergab sich eine starke Zirkulation der Luft innerhalb des Gebäudes, in die sich der aus dem Brandraum austretende Brandrauch einmischte. Um den Brandrauch ausreichend zu verdünnen, ist jedoch in der Regel eine mechanische betriebene Lüftungsanlage erforderlich.

Eine Bewertung des bei Bränden entstehenden Brandrauches bezüglich seiner optischen Dichte, bezogen auf die Verdünnung, war bisher nur bei Kleinversuchen möglich. Bei Großversuchen waren die dazu erforderlichen Messungen des auftretenden Brandrauches bezüglich seiner mittleren optischen Dichte und Verdünnung nicht möglich.

5.3 Optische Dichte und CO₂-Konzentration, Einfluß der Verdünnung durch Frischluft

Die bei Modellversuchen ermittelten Werte für die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches sind in /3/ Teil 2 und 3 aufgeführt. Entsprechende Werte von Großversuchen haben sich bei den Messungen im Rahmen des HDR - Sicherheitsprogramms (siehe /4/) ergeben, da das Versuchsgebäude hermetisch gegenüber der Umgebung abgeschlossen war bzw. definiert gespült wurde. Bei den in /4/ beschriebenen Versuchen sowie den später in dieser Anlage mit Öl als Brandlast durchgeführten Versuchen kann daher der Anstieg der optischen Dichte des Brandrauch-Luftgemisches im Gebäude sowie deren Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration während des Brandes und in der Zeit nach dem Brand untersucht werden. In den Bildern 13 bis 16 ist für einige Versuche die optische Dichte, dargestellt durch den Extinktionskoeffizient, und die CO₂-Konzentration des Brandrauch-Luftgemisches über der Versuchszeit aufgetragen. Die in diesen Bildern aufgetragenen Werte entsprechen in der Zeit ab ca. 15 min nach dem Ende des Brandes dem Mittelwert innerhalb des Gebäudes. Alle in den Bildern 13 bis 16 aufgeführten Werte wurden an der selben Stelle im Gebäude gemessen.

Das Bild 13 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO₂-Konzentration sowie der optischen Dichte des Brandrauch-Luftgemisches bei einem der Versuche nach /4/. Bei diesem Versuch wurden 169 kg Holz in Form von Krippen verbrannt. Die Massenverlustrate betrug in der Hauptbrandphase 5,0 kg/min. Das Versuchsgebäude war während der ganzen im Bild 13 dargestellten Versuchszeit hermetisch von der freien Umgebung abgetrennt. Interne Lüftungsanlagen wurden nicht betrieben.

Den beim Abbrand von 224 l, entsprechend 169,2 kg Öl, in einer Wanne mit einer Grundfläche von 3 m² registrierten Verlauf der CO₂-Konzentration und der optischen Dichte zeigt das Bild 14. Bei diesem Versuch war das Versuchsgebäude bis zu einer Zeit von 114 min hermetisch gegenüber der freien Umgebung abgeschlossen.

Danach wurde das Gebäude mit 20.000 m³/h Luft gespült. In der Zeit bis 114 min waren zwei verschiedene Umluftfilteranlagen in Betrieb. Bis zur Zeit von 30 min wurde die Umluftfilteranlage I mit einem Volumenstrom von 2.500 m³/h und von 30 min bis 114 min die Umluftfilteranlage II mit einem Volumenstrom von 12.000 m³/h betrieben.

Die entsprechenden Werte für den Abbrand der gleichen Masse Öl, 224 l bzw. 169,2 kg, im selben Brandraum, jedoch in einer Wanne mit einer Grundfläche von nur 2 m² zeigt das Bild 15. Bei diesem Versuch war das Gebäude bis zu einer Zeit von 74 min hermetisch von der freien Umgebung abgeschlossen. In dieser Zeit wurde die Umluftfilteranlage I mit 2.500 m³/h betrieben. Ab 114 min wurde das Versuchsgebäude mit einem Frischluftvolumenstrom von 20.000 m³/h gespült.

Die im Bild 16 dargestellten Meßwerte wurden bei einem Versuch ermittelt, der bis auf die Art der Spülung dem vorher beschriebenen Versuch (siehe Bild 15) entsprach. Bei dem hier durchgeführten Versuch wurden 224 l Öl (169,2 kg) in einer Wanne mit einer Grundfläche von 2 m² verbrannt. Der Spülluftvolumenstrom des Versuchsgebäude betrug konstant 20.000 m³/h.

Bei dem Versuch 1 (siehe Bild 13) war das Versuchsgebäude hermetisch gegenüber der freien Umgebung abgeschlossen. Alle beim Brand entstandenen Produkte blieben im Gebäude. Eine Veränderung z.B. der CO₂-Konzentration durch Frischluft trat daher nicht ein.

Aus dem Bild 13 geht hervor, daß die CO₂-Konzentration nach einem Anstieg auf den Maximalwert von 1,20 Vol.-% bei einer Versuchszeit von 28 min wieder zurück ging. Ab einer Versuchszeit von 36 min bis zu einer Zeit von 66 min stieg die CO₂-Konzentration kontinuierlich wieder bis auf 1,26 Vol.-% an. Bis zu einer Versuchszeit von 90 min blieb dieser Wert konstant. Der Anstieg der CO₂-Konzentration ist im wesentlichen auf das langsame Ausbrennen der Holzreste bis zur Versuchszeit von ca. 60 min zurückzuführen.

Die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisch stieg bei dem Versuch 1 (siehe Bild 13) bei einer Versuchszeit von ca. 15 min steil an, erreichte das Maximum mit einem Wert des Extinktionskoeffizient von 2,4 1/m bei einer Versuchszeit von 25 min und sank danach bis auf den Wert 1,5 1/m bei einer Versuchszeit von 35 min ab. Von dieser Zeit an bis zum Ende der Datenaufzeichnung bei 90 min sank die optische Dichte kontinuierlich auf den Wert 1,28 1/m ab. Da in diesem Fall keine Spülluft eintrat, ist die Abnahme der optischen Dichte auf eine Verringerung der Rußteilchen im Brandrauch-Luftgemisch infolge von Ablagerungen an den Wänden und auf dem Boden sowie durch eine Agglomeration der Rußteilchen zurückzuführen.

Bei dem Versuch 2 (siehe Bild 14) war das Versuchsgebäude bis zur Versuchszeit von 114 min hermetisch gegenüber der freien Umgebung abgeschlossen. Eine Veränderung z.B. der CO₂-Konzentration durch Frischluft trat daher in diesem Zeitbereich nicht ein. In der Zeit von 30 min bis 90 min wurde die Umluftfilteranlage II betrieben, durch die ein Teil der im Brandrauch-Luftgemisch vorhandenen Feststoffe ausgefiltert wurde. Ab einer Versuchszeit von 114 min wurde der Versuchsgebäude mit 20.000 m³/h Frischluft gespült.

Aus dem Bild 14 geht hervor, daß die CO₂-Konzentration nach einem Anstieg auf den Maximalwert von 3,60 Vol.-% bei einer Versuchszeit von 18 min wieder zurückging. Bei einer Versuchszeit von 21 min betrug die CO₂-Konzentration 2,90 Vol.-%. Bis zum Abschalten der Umluftfilteranlage I in der 30. Minute war der CO₂-Wert weiter auf 2,84 Vol.-% abgesunken. In der Zeit, in der die Umluftfilteranlage II betrieben wurde, verringerte sich die CO₂-Konzentration von 2,84 Vol.-% auf 2,56 Vol.-%. Diese Abnahme der CO₂-Konzentration kann durch eine weiter Vermischung der Brandgase mit der im Versuchsgebäude in nicht vollständig abgetrennten Räumen vorhandenen Luft sowie durch Wandeffekte in der Umluftfilteranlage hervorgerufen worden sein. Eine Aussage, welcher Anteil überwiegt, ist z. Zt. nicht möglich. Nach dem Einschalten der Spülluft in der 114. Minute sank die CO₂-Konzentration innerhalb von 6 min von

2,50 Vol.-% auf 2,05 Vol.-% ab.

Die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches hatte einen ähnlichen Verlauf wie die CO₂-Konzentration. Der Maximalwert des Extinktionskoeffizient betrug 3,1 1/m bei einer Versuchszeit von 18 min. Während der Betriebszeit der Umluftfilteranlage II sank der Extinktionskoeffizient von 2,00 1/m auf 0,92 1/m ab. Danach sank der Wert weiter auf 0,81 1/m bei einer Versuchszeit von 114 min ab. Ebenso wie die CO₂-Konzentration sank auch die optische Dichte nach dem Einschalten der Spülluft deutlich von 0,81 1/m auf 0,58 1/m ab.

Bei dem Versuch 3 (siehe Bild 15) verbrannte die gleiche Menge Öl wie bei dem Versuch 2. Die Grundfläche der Wanne betrug hierbei jedoch nur 2 m² gegenüber 3 m² bei dem vorhergenannten Versuch. Bis zu einer Versuchszeit von 74 min wurde das Versuchsgebäude gegenüber der freien Umgebung hermetisch abgeschlossen und die Umluftfilteranlage I betrieben. Ab dieser Zeit wurde das Versuchsgebäude mit einem Frischluftvolumenstrom von 20.000 m³/h gespült.

Aus dem Bild 15 geht hervor, daß die CO₂-Konzentration nach einem Anstieg auf den Maximalwert von 3,45 Vol.-% bei einer Versuchszeit von 26 min wieder zurück ging. Bei einer Versuchszeit von 30 min betrug die CO₂-Konzentration 2,84 Vol.-%. In der folgenden Zeit verringerte sich die CO₂-Konzentration bis zum Spülen des Versuchsgebäudes stetig auf 2,56 Vol.-%. Dieser Verlauf entspricht genau dem des vorher beschriebenen Versuchs 2 in Bild 14. Auch der Maximalwert dieses Versuches stimmt mit dem des vorher angeführten Versuches in etwa überein, wobei jedoch die Versuchsdauer bis zum Erreichen des Maximalwertes infolge der kleineren Abbrandrate, bedingt durch die kleinere Wanne, von 18 min auf 26 min anstieg. Nach dem Einschalten der Spülluft sank die CO₂-Konzentration innerhalb von 40 min von 2,56 Vol.-% auf 0,90 Vol.-% ab.

Die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches während der Brandphase wies im Gegensatz zur CO_2 -Konzentration bei diesem Versuch zwei Maximalwerte auf (siehe Bild 15). Der Erste trat bei einer Versuchszeit von 2 min mit einem Wert des Extinktionskoeffizient von 1,3 1/m und der zweite bei einer Versuchszeit von 26 min mit einem Wert von 1,0 1/m auf. In der übrigen Zeit lag die optische Dichte immer unter dem Wert 0,6 1/m. Bei der Versuchszeit von 30 min betrug der Extinktionskoeffizient 0,52 1/m und verringerte sich bis zur 74. Minute auf 0,39 1/m. Infolge der danach einsetzenden zusätzlichen Spülung sank der Extinktionskoeffizient bei einer Versuchszeit von 120 min auf 0,12 1/m ab.

Die im Bild 16 wiedergegebenen Kurven wurden bei dem Versuch 4 aufgenommen, bei dem wie bei den beiden vorhergehenden Versuchen 224 l (169,2 kg) Öl in einer Wanne mit einer Grundfläche von 2 m² verbrannten. Bei diesem Versuch wurde das Versuchsgebäude jedoch während der ganzen Versuchszeit mit einem Luftvolumenstrom von 20.000 m³/h gespült.

Aus dem Bild 16 geht hervor, daß die CO_2 -Konzentration ähnlich wie bei Versuch 3 anstieg. Der Maximalwert lag mit 2,85 Vol.-% bei einer Versuchszeit von ca. 24 min, bei der das Öl in der Wanne gerade verbrannt war (Brand Ende), infolge des hohen Spülluftvolumenstromes niedriger als bei Versuch 3. Die CO_2 -Konzentration verringerte sich von diesem Wert kontinuierlich bis auf den Wert 0,23 Vol.-% bei einer Versuchszeit von 120 min.

Die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches lag bei diesem Versuch zu der Zeit von 24 min, Brand Ende, höher als zur entsprechenden Zeit bei Versuch 3 und hatte einen ähnlichen Verlauf wie die CO_2 -Konzentration. Es traten jedoch auch hierbei zwei Maximalwerte bei 3 min mit einem Wert des Extinktionskoeffizient von 1,8 1/m und bei 23 min mit 4,1 1/m auf. Ab einer Versuchszeit von 28 min sank der Wert des Extinktionskoeffizient von 0,93 1/m auf 0,09 1/m bei 120 min ab.

5.4 Änderung der Brandrauchkonzentration

Bei der Bewertung der 4 hier angeführten Brandversuche im Reaktorsicherheitsgebäude des stillgelegten Kernkraftwerkes (siehe /4/) ist die bei jedem Versuch andersartig geschaltete Lüftung zu berücksichtigen.

Bei dem Versuch 1, Brandlast 169 kg Holz in Form von Krippen, war während der ganzen im Bild 13 dargestellten Versuchszeit das Versuchsgebäude, das ein freies Volumen von 9.200 m³ hat, hermetisch gegenüber der Umgebung abgeschlossen.

Bei dem Versuch 2 (siehe Bild 14), Brandlast 224 l Öl in einer Wanne mit einer Grundfläche von 3 m², war das Versuchsgebäude bis zu einer Zeit von 114 min hermetisch gegenüber der freien Umgebung abgeschlossen. Danach wurde das Gebäude mit 20.000 m³/h Luft gespült. In der Zeit bis 114 min waren zwei verschiedene Umluftfilteranlagen in Betrieb.

Bei dem Versuch 3 (siehe Bild 15), Brandlast 224 l Öl in einer Wanne mit einer Grundfläche von 2 m², war das Versuchsgebäude bis zu einer Zeit von 74 min hermetisch von der freien Umgebung abgeschlossen. In dieser Zeit wurde die Umluftfilteranlage I betrieben. Ab der 114. Minute wurde das Versuchsgebäude mit einem Frischluftvolumenstrom von 20.000 m³/h gespült.

Bei dem Versuch 4 (siehe Bild 16), Brandlast 224 l Öl in einer Wanne mit einer Grundfläche von 2 m² wie bei Versuch 3, wurde das Versuchsgebäude während der ganzen in Bild 16 angegebenen Zeit mit 20.000 m³/h Luft gespült.

Bei allen im Reaktorsicherheitsgebäude durchgeführten Brandversuchen hat sich gezeigt, daß ca. 10 min nach dem Ende der Brandphase die Meßwerte an allen 12 CO₂-Meßstellen sehr eng beieinander lagen und daß die in den Bildern 13 bis 16 dargestellten CO₂-Meßwerte der mittleren CO₂-Konzentration im Versuchsgebäude entspra-

chen. Diese Meßwerte können daher für weitere Betrachtungen als Bezugsgröße herangezogen werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß sich ohne Spülung oder Filtrierung die optischen Dichte eines Brandrauch-Luftgemisches nur wenig verändert. Bei dem Versuch 1, mit Holz als Brandlast, verringerte sich innerhalb von 60 min der Extinktionskoeffizient von 1,48 1/m auf 1,26 1/m. Auch mit der Umluftfilteranlage I, Luftvolumenstrom 2.500 m³/h, wurde bei dem hier vorhandenen Gebäude nur eine geringe Abnahme des Extinktionskoeffizient erreicht. Bei dem Versuch 3 (siehe Bild 15) ergab sich innerhalb von 50 min eine Absenkung des Extinktionskoeffizient von 0,52 1/m auf 0,37 1/m. Mit der Umluftfilteranlage II, Luftvolumenstrom 12.000 m³/h, wurde beim Versuch 2 (siehe Bild 14), eine stärkere Verringerung der optischen Dichte erreicht. Die optisch Dichte des Brandrauches wurde dabei innerhalb von 60 min von 2,00 1/m auf 0,92 1/m abgesenkt.

Eine deutliche Verringerung der Brandrauchdichte im Versuchsbäude, die sich auf die optische Dichte und die CO₂-Konzentration bezieht, wurde nur durch die Spülung mit einem Frischluftvolumenstrom von 20.000 m³/h wie bei dem Versuch 4 (siehe Bild 16) erreicht.

Die Änderung der optischen Dichte in Abhängigkeit von der Zeit ist für ruhenden Brandrauch in /6/ untersucht worden. Danach ist die Abnahme der optischen Dichte von der Art des Brandgutes, der optischen Anfangsdichte des Brandrauch-Luftgemisches sowie von der Zeitdauer abhängig. Mit zunehmender Zeitdauer nach der Entstehung des Brandrauches wird die Abnahme der optischen Dichte pro Zeiteinheit immer geringer. Dieser Effekt ist um so größer, je größer die ursprüngliche Dichte des Brandrauch-Luftgemisches war. Die Änderung der optischen Dichte mit der Zeit kann nach /6/ mit der Beziehung

$$1/\sigma - 1/\sigma_0 = \beta \cdot \Delta t \quad (1)$$

berechnet werden. Der Faktor β ist nach /6/ von dem Brandgut und der optischen Anfangsdichte des Brandrauches abhängig.

Bei der Anwendung der Gleichung (1) auf die bei den hier durchgeführten Versuchen erhaltenen Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die in /6/ angegebenen Daten bei Versuchen mit ruhendem Brandrauch ermittelt wurden. Durch eine Strömung des Brandrauch-Luftgemisches wird der Effekt des Absatzens der Rußteilchen gestört bzw. ganz aufgehoben. Bei höheren Werten für die optische Dichte des ursprünglichen Brandrauch-Luftgemisches ist dieser Absatzeffekt nach /6/ jedoch relativ klein.

Eine Berechnung der Änderung der optischen Dichte des Brandrauch-Luftgemisches nach Gleichung (1) ergibt mit einem Faktor β nach /6/ von 0,01 m/min für Rauch von verschweltem Holz bei der optischen Dichte von $\sigma_0 = 1,50$ 1/m für den Versuch 1 (siehe Bild 13) und einer Zeitdauer von 60 min einen Wert von $\sigma = 0,79$ 1/m. Dieser nach Gleichung (1) berechnete Wert liegt aber wesentlich niedriger als der bei einer Versuchszeit von 90 min gemessene Wert von 1,28 1/m. Berechnet man nach Gleichung (1) den Faktor β mit den bei den Versuch 1 (siehe Bild 13) erhaltenen Meßwerten, so ergibt sich bei den Extinktionskoeffizienten $\sigma_0 = 1,50$ 1/m und $\sigma = 1,28$ 1/m und der Zeitdifferenz zwischen den beiden Meßwerten von $\Delta t = 60$ min der Faktor β zu 0,0019 m/min.

Die in /6/ angegebenen Faktoren β können aufgrund dieses Ergebnisses nicht für den hier vorliegenden Fall angewendet werden. Die zeitliche Abnahme der optischen Dichte des hier vorhandenen und im Versuchsgebäude zirkulierenden Brandrauch-Luftgemisches ist wesentlich geringer als der für ruhenden Brandrauch, der nach /6/ bei der Verschwelung von Holz entstanden ist.

Die in Gleichung (1) aufgestellte Beziehung könnte aber zur Bewertung der Wirksamkeit von Filteranlagen, wie z.B. der bei dem Versuch 2 eingesetzten Umluftfilteranlage II, herangezogen werden. Während der Betriebsdauer der Anlage in der Zeit von 30 min bis

90 min hatte sich der Extinktionskoeffizient von 2,00 1/m auf 0,92 verringert. Für diese Werte der optischen Dichte ergibt sich entsprechend Gleichung (1) der Wert

$$\beta^* = 0,0098 \text{ m/min}$$

Bezieht man das in der Zeit von 60 min von der Umluftfilteranlage durchgesetzte Luftvolumen von 12.000 m³ auf das Raumvolumen von 9.200 m³, so erhält man eine "Luftumwälzrate", entsprechend der Luftwechselrate, von 1,30. Bezieht man diese "Luftumwälzrate" mit in den Faktor β^* ein, so erhält man einen auf die "Luftumwälzrate" bezogenen Faktor

$$\beta^{**} = 0,0075 \text{ m/min.}$$

Mit diesem Faktor β^{**} kann die Wirksamkeit einer Umluftfilteranlage im Vergleich zur Spülung des Gebäudes oder anderer Maßnahmen zum Abbau der optischen Dichte bewertet werden.

5.5 Spülung eines mit Brandrauch angefüllten Raumes

Wird ein Raum, dessen Luft mit Brandrauch der Konzentration c_0 angereicherter ist, mit Frischluft gespült, so verringert sich die vorhandene Brandrauchkonzentration. Die Abnahme der Brandrauchkonzentration ist bei gegebenem Raumvolumen, der vorhandenen Brandrauchkonzentration und dem Spülluftvolumenstrom von der Strömungsart der Frischluft in dem zu spülenden Raum abhängig.

Die wirksamste Spülung tritt auf, wenn mit einer Kolbenströmung der Frischluft das vorhandene Brandrauch-Luftgemisch aus dem Raum herausgedrückt würde. Dabei wäre mit einem einmaligen Luftwechsel der Raum vollständig rauchfrei. Diese Strömungsart liegt aber im allgemeinen nicht vor. Für die folgende Berechnung wird angenommen, dass sich die einströmende Frischluft mit dem vorhandenen Brandrauch-Luftgemisch vollständig vermischt und dann abströmt. Weiter-

hin wird angenommen, daß im Raum jederzeit eine vollständige Mischung stattfindet und dadurch eine gleichmäßige Konzentration vorliegt.

Wird dem Raum mit dem Volumen V das Frischluftvolumen ΔV zugeführt, so verringert sich die Konzentration des Brandrauches in der Luft von c_0 auf c_1 , entsprechend der folgenden Gleichung.

$$c_1 = c_0 \cdot V / (V + \Delta V) \quad (2)$$

Wird unter diesen Annahmen ein Raum, dessen Luft mit Brandrauch angereichert ist, mit einem Frischluftvolumen \dot{V}_{FL} gespült, so verringert sich die Brandrauchkonzentration nach der Zeit Δt entsprechen der folgenden Gleichung:

$$c_{\Delta t th} = c_0 \cdot 1 / (1 + (K_{th} / n))^n \quad (3)$$

mit n gegen unendlich ($n \leq 100$) und

$$K_{th} = \dot{V}_{FL} \cdot \Delta t / V \quad (4)$$

Da die oben angenommenen Voraussetzungen im tatsächlichen Fall nicht erreicht werden, wird ein Spülfaktor F_{sp} zur Bewertung der Effektivität der Spülung eingeführt. Damit ergibt sich K nach Gleichung (4) zu:

$$K = F_{sp} \cdot \dot{V}_{FL} \cdot \Delta t / V \quad (5)$$

und die Gleichung (3) geht über in

$$c_{\Delta t} = c_0 \cdot 1 / (1 + (K / n))^n \quad (6)$$

Nimmt K den Wert 1 an, so entspricht der Grenzwert von

$$(1 + K / n)^n \quad (7)$$

mit n gegen Unendlich

dem Wert $e = 2,7183$, der Basis der natürlichen Logarithmen, und die Gleichung (6) geht über in die Form

$$c_{\Delta t} = c_0 \cdot 1 / e. \quad (8)$$

Die oben betrachteten Änderung der Brandrauchkonzentration gilt für alle Schadstoffanteile in der Raumluft, wie z.B. für die Konzentration von CO_2 und für die Anzahl der Partikel in dem Brandrauch-Luftgemisch, sofern sich in dem betrachteten Zeitraum keine Partikel absetzen oder agglomerieren. Ist die optische Dichte des Brandrauches proportional zu der Anzahl der Partikel, so wird auch die Änderung des Extinktionskoeffizienten durch die o. g. Gleichungen beschrieben.

5.6 Berechnung des Spülfaktors für die bei den Versuchen erhaltenen Werte

Bei dem Versuch 3, Öl als Brandgut (siehe Bild 15), wurde das Versuchsgebäude ab einer Versuchszeit von 80 min mit einem Frischluftvolumenstrom von $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ gespült. Für diesen Zeitabschnitt ergeben sich die folgenden Spülfaktoren.

Bezogen auf die CO_2 -Konzentration, die sich in dieser Zeit von 2,56 % auf 0,90 % verringerte:

$$F_{sp} = 0,69.$$

Bezogen auf den Extinktionskoeffizienten, der sich in dieser Zeit von 0,37 1/m auf 0,13 1/m verringerte:

$$F_{sp} = 0,72$$

Bei dem Versuch 4 (siehe Bild 16) wurde das Versuchsgebäude konstant mit einem Volumenstrom von 20.000 m³/h mit Frischluft gespült. Für die dabei erhaltenen Meßwerte wurde ebenfalls der Spülluftfaktor für verschiedenen Zeitbereiche berechnet. Für die jeweils ca. 30 min langen Zeitbereiche wurden folgende Spülluftfaktoren ermittelt.

Anfangszeit min		30	40	60	80
	CO ₂	0,73	0,65	0,61	0,57
F _{sp}	optische Dichte	0,85	0,74	0,67	0,63

Aus diesen Werten folgt, daß der Spülfaktor mit sinkender Brandrauchkonzentration kleiner wird und daß die optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches etwas schneller sinkt als die CO₂-Konzentration in der Raumluft. Der höhere Wert des Spülfaktors für die optische Dichte kann aber auch darauf zurückgeführt werden, daß sich bei der im Versuchsgebäude vorhandenen Strömung Rußteilchen absetzen und agglomerieren.

5.7 Erforderliche Spülzeiten von verqualmten Räumen, um die in Räumen zulässigen Grenzwerte der Brandrauchkonzentration zu unterschreiten

Die Brandrauchkonzentration in einem Raum wird durch die Spülung dieses Raumes mit Frischluft verringert. Das Ziel dieser Spülung ist es, möglichst schnell den Zustand zu erreichen, bei dem im Raum ein Aufenthalt ohne Gesundheitsgefährdung und ohne Beein-

trächtigung der Sicht möglich ist.

Wie aus der Gleichung (6) zu erkennen ist, sinkt die Brandrauchkonzentration um so stärker ab, je größer der Wert K wird. Der Wert K ergibt sich nach Gleichung (5) aus dem Spülluftvolumenstrom, dem Raumvolumen, dem Spülfaktor, der die Beladung der Spülluft mit Brandrauch im Verhältnis zur Brandrauchkonzentration im gespülten Raum angibt, sowie die Zeitdauer der Spülung in Stunden. Das Verhältnis \dot{V}_{FL} / V ist darin die stündliche Luftwechselzahl.

Aufgrund der im Versuchsgebäude mit Öl durchgeführten Brandversuche 3 und 4 ergibt sich aus allen im Abschnitt 5.6 berechneten und aufgeführten Spülfaktoren ein Mittelwert von ca. 0,72 bezogen auf die optische Dichte und von 0,65 bezogen auf die CO_2 -Konzentration. Da die Spülluftfaktoren mit sinkender Brandrauchkonzentration abnehmen, ist bei der Berechnung der Spüldauer nur mit einem Wert von 0,60 bezogen auf die optische Dichte und 0,55 bezogen auf die CO_2 -Konzentration zu rechnen. Diese Werte gelten bei Berechnungen für die erforderlichen Spülzeiten verqualmter Räume aber nur, wenn, wie im vorliegenden Fall, eine gute Durchmischung der Spülluft mit der vorhandenen Raumluft gegeben ist.

Legt man die bei den Versuchen vorhandenen Verhältnisse zugrunde, so ergeben sich die im folgenden berechneten Zeiten, nach denen die Brandrauchkonzentration in der Raumluft soweit verdünnt ist, daß sich bezüglich der Sichtverhältnisse keine Behinderungen ergeben und eine Gesundheitsgefährdung ausgeschlossen werden kann.

Der Grenzwert für einen durch Brandrauch unbehinderten Aufenthalt in einem Raum liegt nach /5/ vor, wenn der Extinktionskoeffizient den Wert von 0,15 1/m nicht überschreitet. Durch die Spülung des Versuchsgebäudes, Raumvolumen 9.200 m^3 , mit einem Frischluftstrom von $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei einem angenommenen Anfangswert des Extinktionskoeffizienten von 2,2 1/m wird der Grenzwert des Extinktionskoeffizienten von 0,15 1/m nach einer Spüldauer von 2,1 Std.

erreicht. Bei diesem Frischluftvolumenstrom von $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und dem Raumvolumen von 9.200 m^3 beträgt die Luftwechselzahl 2,17.

Wäre die Brandrauchkonzentration im Versuchsraum so hoch, daß eine 263fachen Verdünnung bzw. 1410fachen Verdünnung (siehe /3/ Teile 3) erforderlich ist, so ergäbe sich bis zum Erreichen der erforderlichen Verdünnung unter den o.g. Bedingungen eine Spüldauer von 4,3 Std. bzw. 5,6 Std..

Wir der Spülluftvolumenstrom unter sonst gleichen Verhältnissen und bei gleichbleibenden Spülfaktor verändert, so ändert sich die Spüldauer bis zum Erreichen des gleichen Endwertes wegen der Beziehung in Gleichung (5) reziprok dazu. Eine Verdoppelung des Spülluftvolumenstromes, im vorliegenden Fall von $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $40.000 \text{ m}^3/\text{h}$, ergibt daher eine Halbierung der Spüldauer.

Allgemein kann die Zeitdauer bis zur Abnahme der Brandrauchkonzentration auf den unteren Grenzwert z. B. der optischen Dichte von $0,15 \text{ l/m}$ nur iterativ nach den Gleichungen (5) und (6) mit $n \geq 100$ berechnet werden, wenn das Raumvolumen und der Spülluftvolumenstrom bekannt sind und für den Spülfaktor aufgrund der hier erhaltenen Ergebnisse unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Mischungsverhältnisse der Spülluft mit der Raumluft ein Wert abgeschätzt wird. Kann der Wert von c_0 nicht ermittelt werden, so ist bei einem Brandfall, der bezüglich des Raumvolumens und der verbrannten Masse den im Reaktorsicherheitsgebäude durchgeführten Versuchen entspricht, für die optische Rauchdichte der Wert des Extinktionskoeffizient mit 5 l/m einzusetzen.

Abschätzungen über die Änderungen der Brandrauchdichte in Abhängigkeit von der Spüldauer können über den Zeitbereich durchgeführt werden, der bei den jeweils vorhandenen Bedingungen zu dem Wert von $K = 1$ nach Gleichung (5) führt. Aus dieser Beziehung ergibt sich dann:

$$\Delta t = V / (F_{sp} * \dot{V}_{FL}) \quad (9)$$

In dieser Zeit verringert sich die Brandrauchkonzentration im gespülten Raum um den Faktor $1/e$ entsprechend Gleichung (8), der mit $ca. 1/2,8 = 0,36$ angenommen werden kann.

Im betrachteten Fall beträgt die Zeitdauer, in der sich die Brandrauchkonzentration um den Faktor $1/2,8$ verringert,

$$\Delta t = 9.200 \text{ m}^3 / (0,6 * 20.000 \text{ m}^3/\text{h}) = 0,77 \text{ h.}$$

Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, daß sich die Brandrauchkonzentration im Versuchsgebäude innerhalb von jeweils 0,77 h bzw. ca. 46 min vom Extinktionskoeffizienten $2,2 \text{ l/m}$ auf $0,79 \text{ l/m}$ und nach weiteren 46 min auf $0,28 \text{ l/m}$ usw. verringert.

5.8 Verdünnung von einströmenden Brandrauch in einen Rettungsweg mit einem Frischluftstrom

Um Rettungswegen unbehinderte benutzen zu können, darf auch im Brandfall eine zulässige Brandrauchkonzentration nicht überschritten werden. Der Grenzwert des Extinktionskoeffizienten liegt, wie bereits führt dargelegt, bei einem Wert von $0,15 \text{ l/m}$. Dringt Brandrauch in den Rettungsweg ein, so muß dessen Konzentration mit Frischluft soweit verringert werden, daß der o. g. Wert nicht überschritten wird.

Entsprechend Bild 1 muß der Brandrauch mindestens um den Faktor 1410 verdünnt werden. Dies bedeutet, daß für jeden in den Rettungsweg einströmenden Kubikmeter unverdünnten Brandrauches auch $ca. 1400 \text{ m}^3$ Luft zu dessen Verdünnung zuströmen müssen. Dabei wird davon ausgegangen, daß in diesem Fall wegen des geringen Strömungsquerschnittes und der sich dadurch ergebenden vollständigen Vermischung in einem Rettungsweg der Spülfaktor den Wert 1 annimmt. Verringert sich dieser Wert, so ist entsprechend der Spülluftvolumenstrom zu erhöhen.

Da zur Verdünnung des in Rettungswege einströmenden Brandrauches sehr hohe Frischluftvolumenströme erforderlich sind, kann das Verfahren aus praktischen Gründen nur bei relativ kleinen Brandrauchvolumenströmen bzw. kleinen Öffnungsquerschnitten zwischen Brandraum und Rettungsweg angewendet werden.

6. AUSWIRKUNG DER ZEITLICHEN ABHÄNGIGKEIT DER BRANDRAUCHENTWICKLUNG IM BRANDRAUM AUF DIE BRANDRAUCHKONZENTRATION IN RETTUNGSWEGEN

Die Brandrauchkonzentration in Rettungswegen steigt proportional zu der Brandrauchentwicklung im Brandraum an, sofern keine besonderen technischen Einrichtungen vorhanden sind, die dies verhindern oder begrenzen. Diese Aussage beruht darauf, daß alle Räume, in denen ein Brand entstehen kann, von Fluren und Gängen aus betreten werden können und daß diese Wege die Rettungswege im Brandfall sind und Abtrennungen von Brandräumen zu Rettungswegen durch Türen i.a. nicht als rauchdichte Abschlüsse im Brandfall angesehen werden können. Bei Türen muß davon ausgegangen werden, daß diese nicht ständig geschlossen sind und, im Fall der geschlossenen Tür, sich ihre Verhalten bezüglich der Brandrauchdurchlässigkeit im Verlauf des Brandes im allgemeinen verschlechtert. Es muß daher immer davon ausgegangen werden, daß in einem Brandfall Brandrauch in Rettungswege eindringt.

Die durch das Eindringen von Brandrauch in Rettungswege entstehende Gefährdung für die Personen im Rettungsweg ist u.a. von den vorhandenen bzw. im Verlauf des Brandes zu erwartenden Öffnungsquerschnitten zwischen Brandraum und Rettungsweg, den Luftvolumen und den evt. vorhandenen Luftströmungen im Rettungsweg sowie von der Art und Nutzung des Gebäudes abhängig. Eine weitere Einflußgröße auf den Brandrauchvolumenstrom, der in den Rettungsweg eindringt, ist die während des Brandablaufes steigende Temperaturdifferenz zwischen Brandraum und Rettungsweg, wodurch auch der Brandrauchvolumenstrom in den Rettungsweg ansteigt.

6.1 Zeitdauer zwischen Brandentstehung und der Bildung von optisch dichtem Brandrauch

Die Zeitdauer zwischen der Brandentstehung und der Bildung von optisch dichtem Brandrauch ist, wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, im wesentlichen von brennenden Material abhängig. Während bei brennenden festen Stoffen nach deren Entzündung durch kleine Zündquellen eine Zeit bis zum Entstehen von optisch dichtem Brandrauch von mindestens 4 min bei kleinen Brandräumen und 7 min bei größeren Brandräumen vergeht, ist nach dem Entzünden von brennbaren Flüssigkeiten sofort mit optisch dichtem Brandrauch zu rechnen. Da es im allgemeinen nicht vorhersehbar ist, welcher Stoff entzündet wird, ist immer mit der sofortigen Entstehung von optisch dichten Brandrauch nach der Entzündung zu rechnen, da auch eine Brandstiftung unter Benutzung einer größeren Menge brennbarer Flüssigkeit mit in die Beurteilung der möglichen brennbaren Stoffe einbezogen werden muß.

6.2 Zeitdauer zwischen der Brandentstehung und dem Wirksamwerden von Schutzmaßnahmen für Rettungswege

Die Zeitdauer, die zwischen der Brandentstehung und dem Wirksamwerden von Schutzmaßnahmen gegen eine zu hohe Brandrauchkonzentration in Rettungswegen vergeht, ergibt sich aus dem Anteil, der von der Brandentstehung bis zur Brandmeldung vergeht, und aus dem Anteil, der nach dem Auslösen von technischen Einrichtungen bis zu deren wirksamer Funktion erforderlich ist.

Die Zeitdauer zwischen Brandentstehung und Brandmeldung wird durch die Art, Anzahl und Anordnung der Brandmelder bestimmt. Um diese Zeitdauer so kurz wie möglich zu halten, müssen bei der Planung der Anordnung und der Art der Brandmelder auch die im Gebäude durch Lüftungsanlagen hervorgerufenen Strömungen und ihr Einfluß auf das Ansprechverhalten der jeweiligen Brandmelder mit berücksichtigt werden.

Durch die Brandmeldung werden von der Brandmeldezentrale aus die vorhandenen Einrichtungen angesteuert, die u.a. eine Ausbreitung des Brandrauches auf die an den Brandraum angrenzende Bereiche verhindern und Rettungswege mit Frischluft spülen bzw. Druckänderungen hervorrufen, durch die ein Einströmen von Brandrauch in die zu schützenden Bereiche verhindert wird. Zwischen der Ansteuerung der ersten Einrichtung und dem Erreichen der vollen Wirksamkeit aller Anlagen ist eine längere Zeit erforderlich, da mechanisch betätigte Klappen u.ä. Stellzeiten benötigen und einige Schaltungen erst nacheinander ablaufen können. Auch diese Zeitdauer zwischen dem ersten Schaltimpuls und dem Erreichen der vollen Wirksamkeit aller Schutzsysteme muß, z.B. durch schnelle Stellantriebe, so kurz wie möglich gehalten werden.

Ein weiterer Faktor, der ebenfalls zu einer verspäteten Auslösung führt, sind Brandmelder, die zur Verringerung von Fehlalarmen auf einen hohen Schwellenwert eingestellt sind. Ein entstandener Brand wird dadurch erst gemeldet, wenn er sich bereits ausgebreitet hat. Diese Zeitverzögerung kann für Personen schon zu einer erheblichen Gefährdung führen, da z.B. bei Flüssigkeitsbränden sofort Brandrauch mit einer hohen optischen Dichte entsteht. Auch durch das Einmischen des entstehenden Brandrauches in ein großes Luftvolumen werden innerhalb von wenigen Sekunden die zulässigen Grenzwerte überschritten, wie die Versuche nach /4/ zeigen.

Der o.g. Zeitverzug zwischen einer Brandentstehung und der Brandmeldung infolge des hohen Schwellenwertes eines Brandmelders und die daraus resultierende zusätzliche Gefährdung von Personen kann z. B. dadurch verringert oder auch ganz vermieden werden, wenn die bei einer Brandmeldung ausgelösten Funktionen in zwei Bereiche aufgeteilt werden.

Beim Ansprechen eines sehr empfindlich eingestellten Brandmelders werden bereits diejenigen Funktionen des Brandschutzsystems ausgelöst, die zu keiner wesentlichen Störung des normalen Betriebsablaufes führen, wie z. B. das Verändern der Zu- und Abluftklappen

für die Klimaanlage und die Spülluft sowie das Schließen der mechanisch offengehaltenen Türen. Das Zuschalten von besonderen Lüftungsanlagen, sofern sie nicht bereits vorher ohne eine Störung des Betriebsablaufes erfolgen kann, und eine im Brandfall erforderliche Betriebsunterbrechung erfolgt mit der allgemeinen Brandalarmierung der im Gebäude befindlichen Personen erst beim Auslösen eines zweiten auf den normalen Wert eingestellten Brandmelders. Je nach der Art der Brandmeldeanlage ist die erste Stufe der Brandschutzsysteme auch beim Ansprechen des 1. Melders eines Mehrschleifensystems oder bei einer geringen Erhöhung der Normalwerte bei einer rechnergesteuerten Brandmeldeanlage einzuschalten.

Durch diese Systeme wird verhindert, daß der insbesondere bei Flüssigkeitsbränden in der Anfangsphase eines Brandes entstehende Brandrauch in die durch Brandlüftungssysteme geschützte Bereiche eindringt, bevor diese Systeme voll betriebsbereit sind bzw., im Fall der Druckänderungen, ihren Endwert erreicht haben.

6.3 Erforderliche Zuluftvolumenströme in Rettungswege

Für die Beurteilung der erforderlichen Spülluftvolumenströme in Rettungswegen zur Einhaltung gefahrloser Brandrauchkonzentration ist der in den Rettungsweg einströmenden Brandrauchvolumenstrom und dessen Art bezüglich der optischen Dichte und der Schadstoffkonzentration wesentlich. Da diese Werte nicht vorhersehbar sind, müssen immer die in /3/ Teil 3 angegebenen Verdünnungen zugrunde gelegt werden. Der in den Rettungsweg einströmende Brandrauchvolumenstrom ist von der Druckdifferenz zwischen dem Brandraum und dem Rettungsweg sowie den Querschnittsflächen der Öffnungen zwischen diesen beiden Räumen abhängig. Die Berechnung der Druckdifferenz zwischen einem Brandraum und einem Rettungsweg ist von sehr vielen Einflußgrößen abhängig und kann nach /7/, /8/ und /9/ durchgeführt werden.

Ist der Zuluftvolumenstrom in den Rettungsweg aufgrund des ermittelten Brandrauchvolumenstromes und der erforderlichen Verdünnung bestimmt worden, so ist zusätzlich zu prüfen, ob auch mit einem mit einem kurzzeitig stärkeren Brandraucheinbruch in den Treppenraum, z. B. durch das Öffnen von Türen während der Räumung des Gebäudes, zu rechnen ist. Im Rettungsweg ergäbe sich daraus eine erhöhte Brandrauchkonzentration, die durch eine Spülung wieder auf den noch zulässigen Wert verdünnt werden muß. Für diese Spülung ist daher der aufgrund des einströmenden Brandrauchvolumenstromes berechnete Zuluftvolumenstrom zu erhöhen.

6.4 Vorkehrungen für den Personenschutz

Als wesentliche Vorkehrung für den Personenschutz ist neben der Beachtung der allgemeinen Brandschutzmaßnahmen für Gebäude eine frühest mögliche Alarmierung der sich im Gebäude aufhaltenden Personen erforderlich. Dies gilt insbesondere für die Gebäude, in denen ein unmittelbarer Zugang zur freien Umgebung aus jedem Aufenthaltsraum nicht gegeben ist und die, bedingt durch die geringe Höhe o. ä., nicht zum Einbau von besonderen Systemen zur Rauchfreihaltung von Rettungswegen verpflichtet sind. Dabei handelt es sich besonders um die in /1/ angegebenen kleine Hotels, Wohnheime und Mehrfamilienhäuser. In diesen Fällen kann durch eine rechtzeitige Alarmierung ein wesentlicher Beitrag zur Sicherheit der Personen im Brandfall geleistet werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Personenschäden mit Todesfolge im Verlauf eines Brandes sind fast ausschließlich auf die Einwirkung von Brandrauch zurückzuführen und bei kleinen und mittleren Bränden mit geringen Sachschäden im Wohn- und Schlafbereich (Wohnungen, Heimen, Hotels) zu beklagen. Das Problem "Brandrauch" ist eine für die Folgen eines Brandes wesentliche Ursache. Der Einfluß des Brandrauches insbesondere

auf die Personenschäden ist sehr hoch und nimmt weiter zu.

In der hier vorliegenden Arbeit wurde die Entstehung von optisch dichtem Brandrauch bei Bränden in natürlichem Maßstab untersucht. Dazu wurden Versuche in Brandräumen mit unterschiedlichen brennbaren Materialien durchgeführt. Ein Teil dieser Versuche erfolgte in Brandräumen, die sich in einem hermetisch von der Umgebung abgeschlossenen Versuchsgebäude, einem stillgelegten Kernkraftwerk, befanden. Es wurde speziell die Wirksamkeit der Spülung von verqualmten Räumen mit Frischluft untersucht und eine Methode zur Berechnung der Spülzeiten bis zum Unterschreiten der in Rettungswegen zulässigen Grenzwerte der Brandrauchkonzentration angegeben.

Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, daß für einen wirksamen Schutz der Rettungswege vor einem Brandraucheintritt die Zeit zwischen Brandentstehung und Wirksamwerden der Schutzmaßnahmen so kurz wie möglich gehalten werden muß. Ausführungstechnische Maßnahmen, durch die diese Forderung unter Berücksichtigung der allgemeinen Forderungen gegen Fehlalarme erfüllt werden kann, werden beschrieben.

8. LITERATUR

- /1/ Klingsohr, K: Brandrauch- Einsatzerfahrungen der
Feuerwehr
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung
(1987) H. 3, S 91-95
- /2/ Harwood, B and John R.H. Jr.
What kills in fires: Smoke inhalation or
burns?
Fire-Journal (1989) H. (Mai/June)
S. 29-34
- /3/ John, R.:
Ermittlung der erforderlichen Luftvolu-
menströme zur Verdünnung von Rauchgasen
auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit
in Rettungswegen gewährleistendes Maß
Teil 1: Planung und Bau der Versuchs
einrichtung
Forschungsbericht Nr. 46, März 1982

Teil 2: Optische Brandrauchdichte
Forschungsbericht Nr. 50, Dezember 1983

Teil 3: Optische Brandrauchdichte
Forschungsbericht Nr. 59, Januar 1987

Teil 4: Brandrauch und Sichtbarkeit von
Hinweisschildern in Rettungs-
wegen
Forschungsbericht Nr. 59, Januar 1987
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien
der Bundesländer, Arbeitskreis V -
Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

/4/

Brandversuche am HDR:

VFDB-Zeitschrift 35(1986), H. 3,

Müller K.

Versuchsaufbau und eingesetzt Meßtechnik
S.100-102

Dobbernack, R.

Ergebnisse und theoretische Begleitung
der Versuche
S. 102-107

John, R.

Ergebnisse der Rauchgasverteilung und -
konzentration
S. 107-111

/5/ Jin, T.:

Studies of emotional instability in smoke
from fires
Journal of Fire and Flammability
Vol. 12 (1981) April, S 130-142

/6/ 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

/7/ John, R.

Brand- und Löschversuche mit gasförmigen
Löschmitteln in Räumen natürliche Größe
Teil 4: Ermittlung der Volumenströme
zur Rauchfreihaltung von
Rettungswegen
Forschungsbericht Nr. 39, Januar 1980
Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien
der Bundesländer, Arbeitskreis V -
Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

/8/ John, R.

Lüftungssysteme zur Rauchfreihaltung von
Treppenräumen

Ki Klima + Kälteingenieur

7 (1979) Heft 11, S. 455-461

/9/ John, R.

Berechnung von Druckbelüftungsanlagen zu
Rauchfreihaltung von Rettungswegen im
Brandfall

Ki Klima + Kälteingenieur

8 (1980) Heft 7-8, S. 307-311

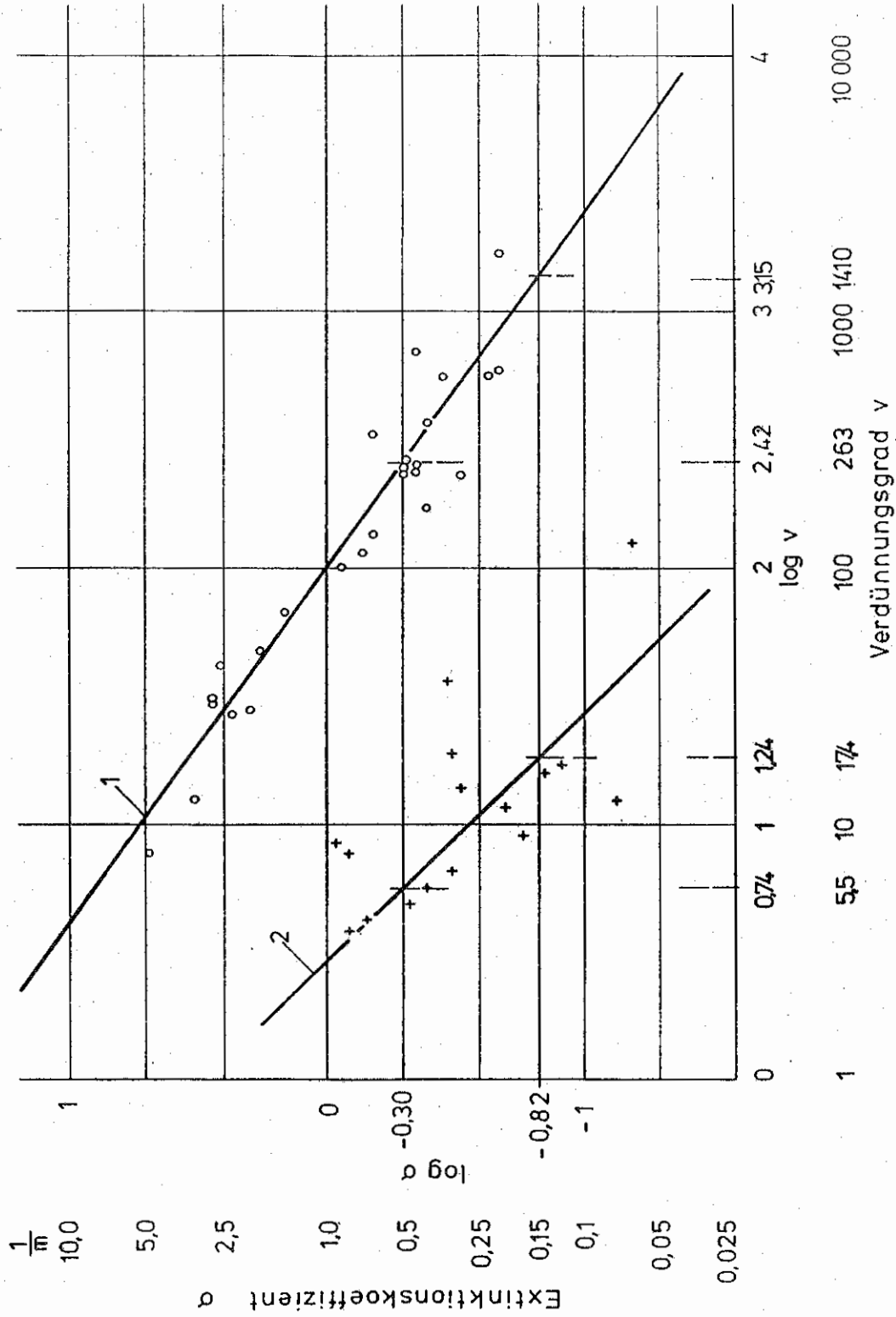


Bild 1: Abhängigkeit der optischen Dichte von der Verdünnung v bei der Verbrennung von Heizöl (1) und Holz (2) nach /3/ Teil 2

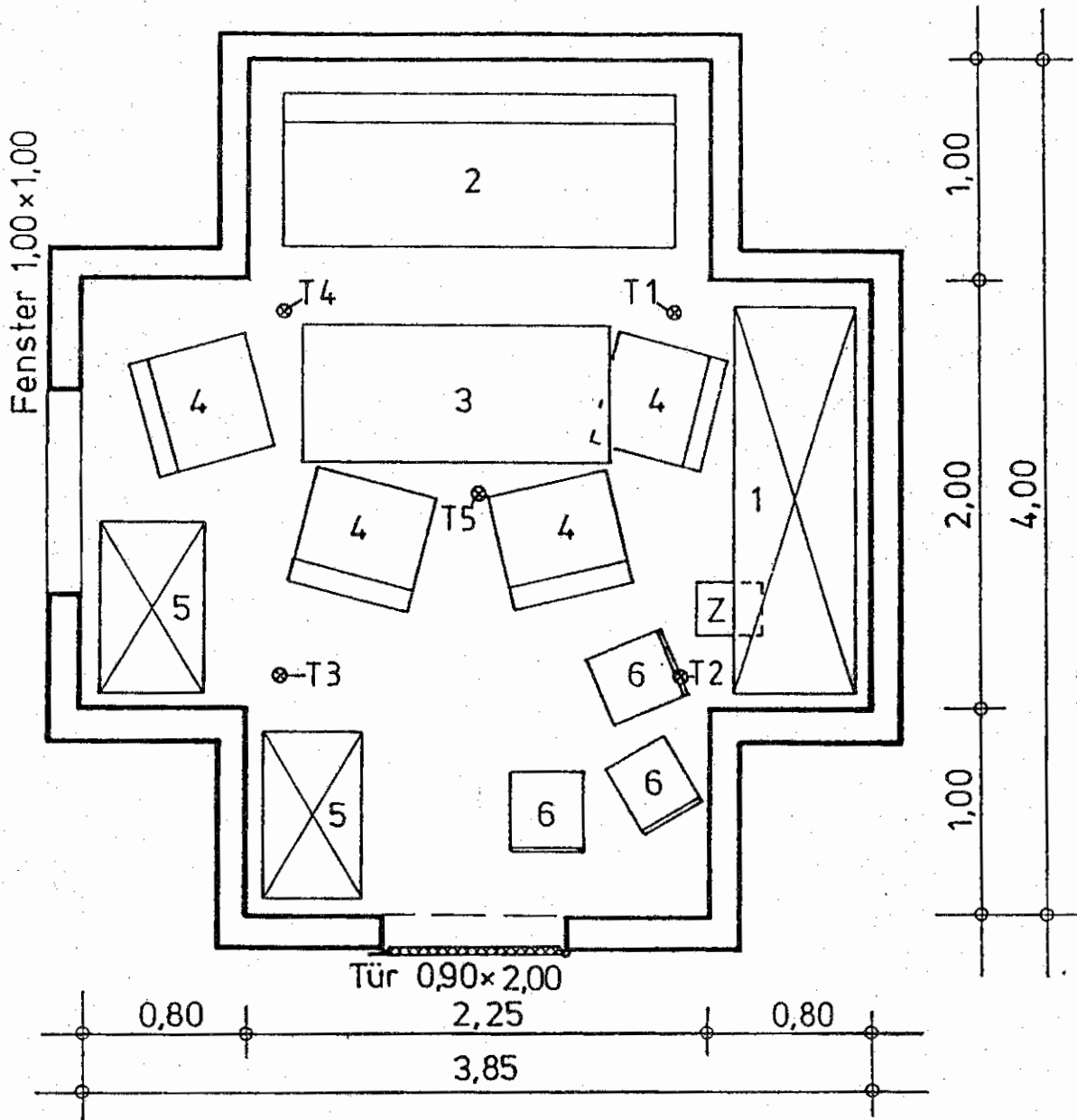


Bild 2: Brandraum mit 12 m² Grundfläche als Wohnraum eingerichtet

- | | |
|--|----------|
| 1 Schrank | 2 Sofa |
| 3 Tisch | 4 Sessel |
| 5 Kommode | 6 Stuhl |
| T1 - T5 Thermoelemente, 5 cm unterhalb der Decke | |
| z Zündwanne mit 0,5 l Spiritus | |

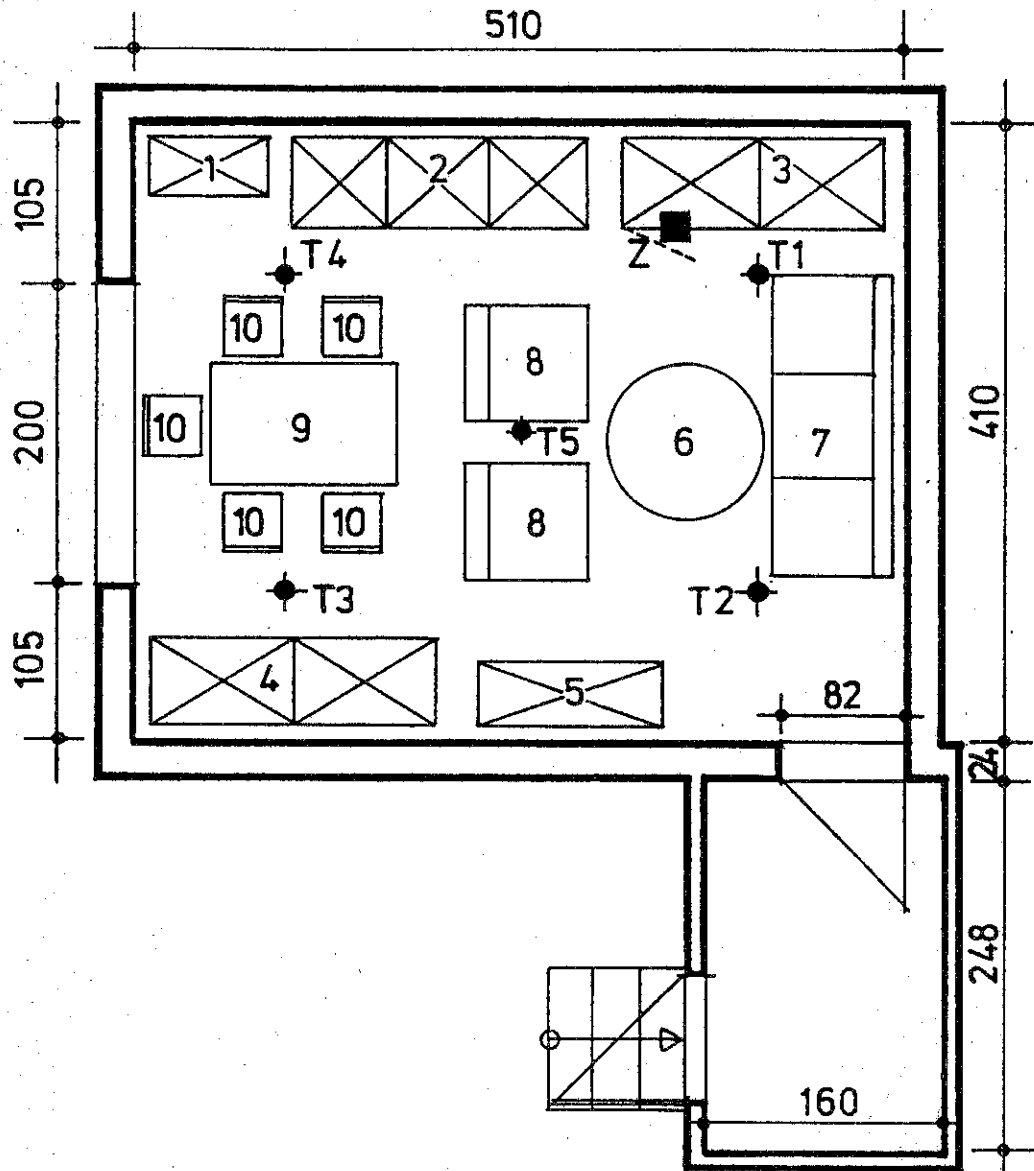


Bild 3: Brandraum mit 22 m² Grundfläche als Wohnraum eingerichtet

- | | |
|---|--------------|
| 1 - 5 Schrank | 6 Couchtisch |
| 7 Sofa | 8 Sessel |
| 9 Eßtisch | 10 Stuhl |
| T1 - T 5 Thermoelemente, 5 cm unterhalb der Decke | |
| Z Zündwanne mit 0,5 l Spiritus | |

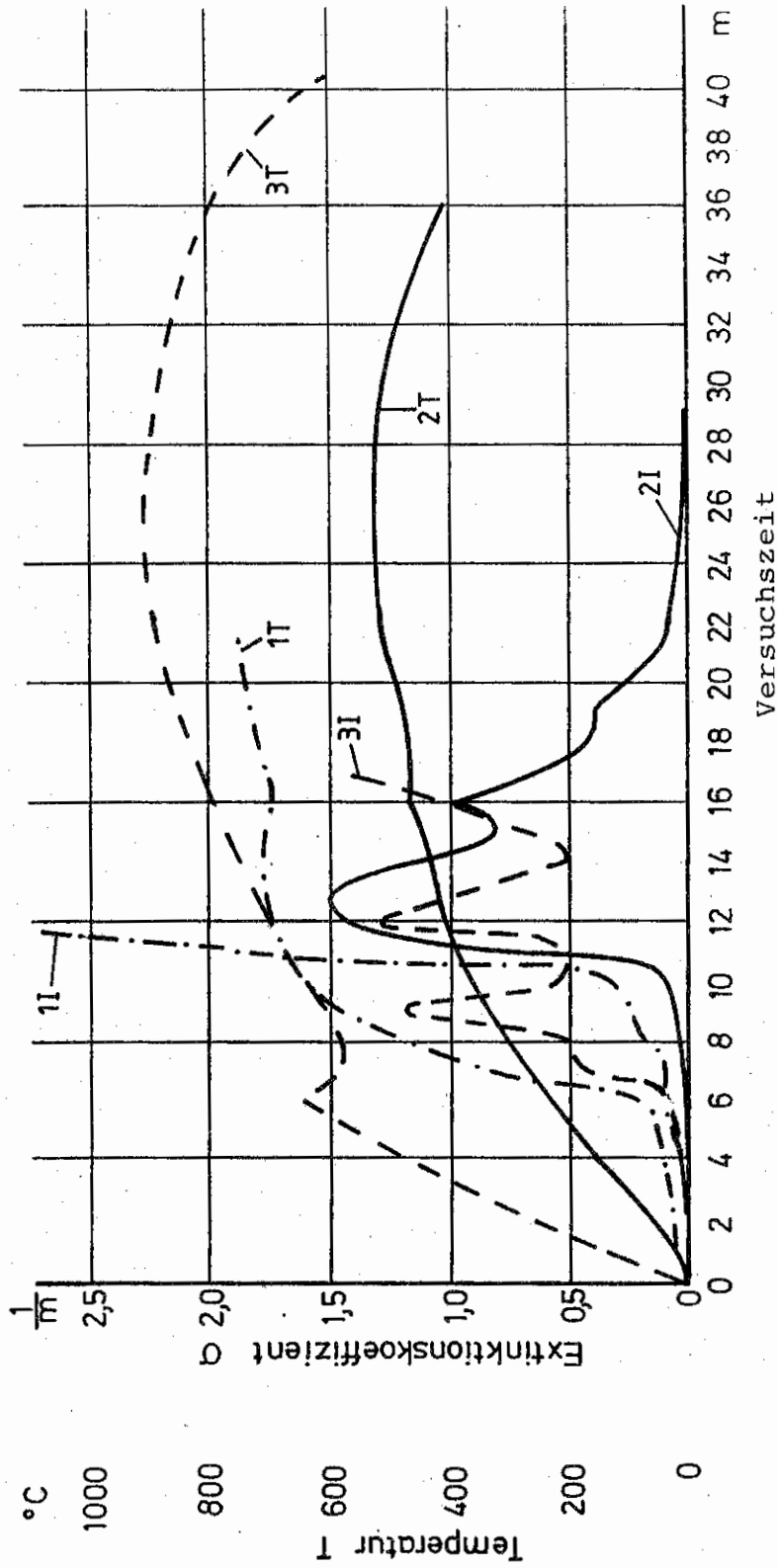


Bild 4: Temperatur T im Brandraum und optische Dichte des aus dem Fenster austretenden Brandrauchs

- Kurven 1 Brandrauch Altmöbel
- Kurven 2 Modellbrandlast I
- Kurven 3 Modellbrandlast II

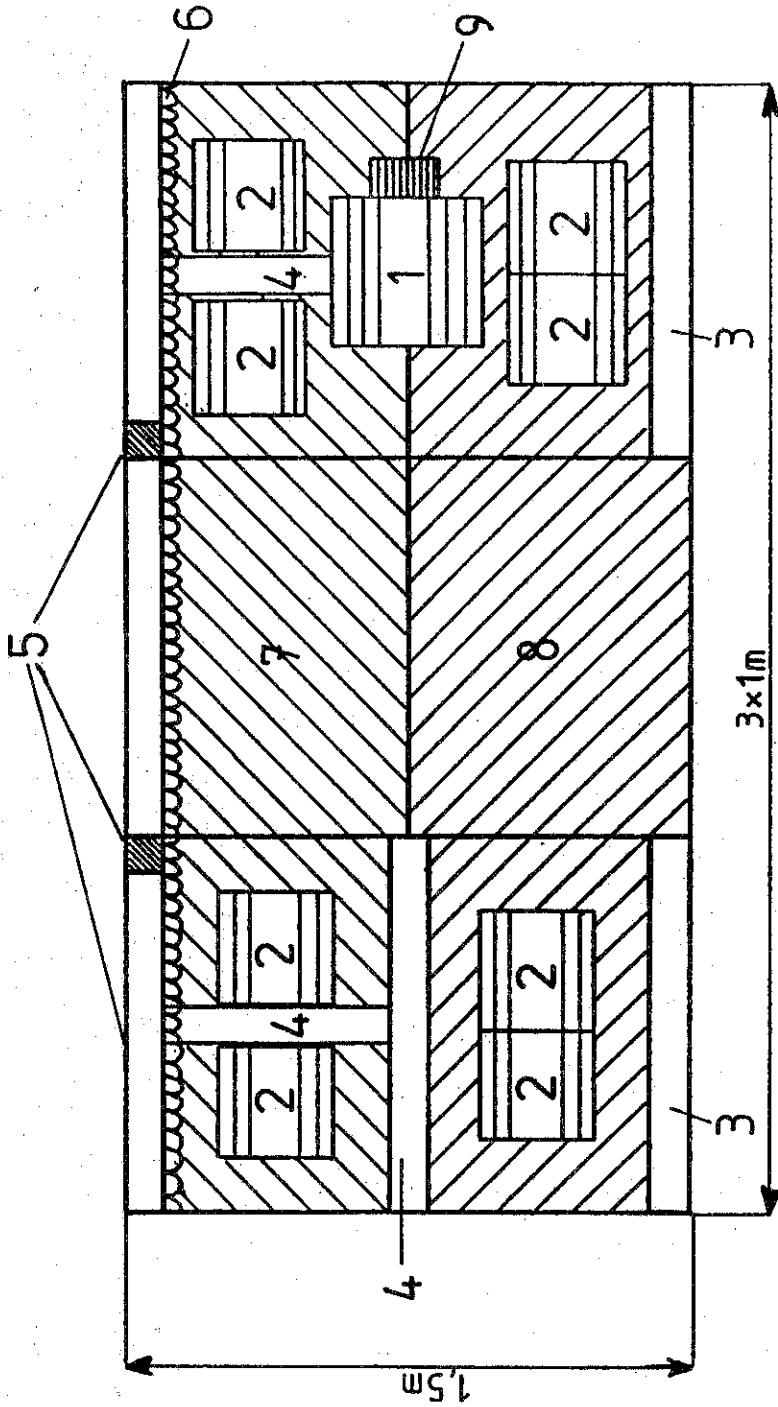
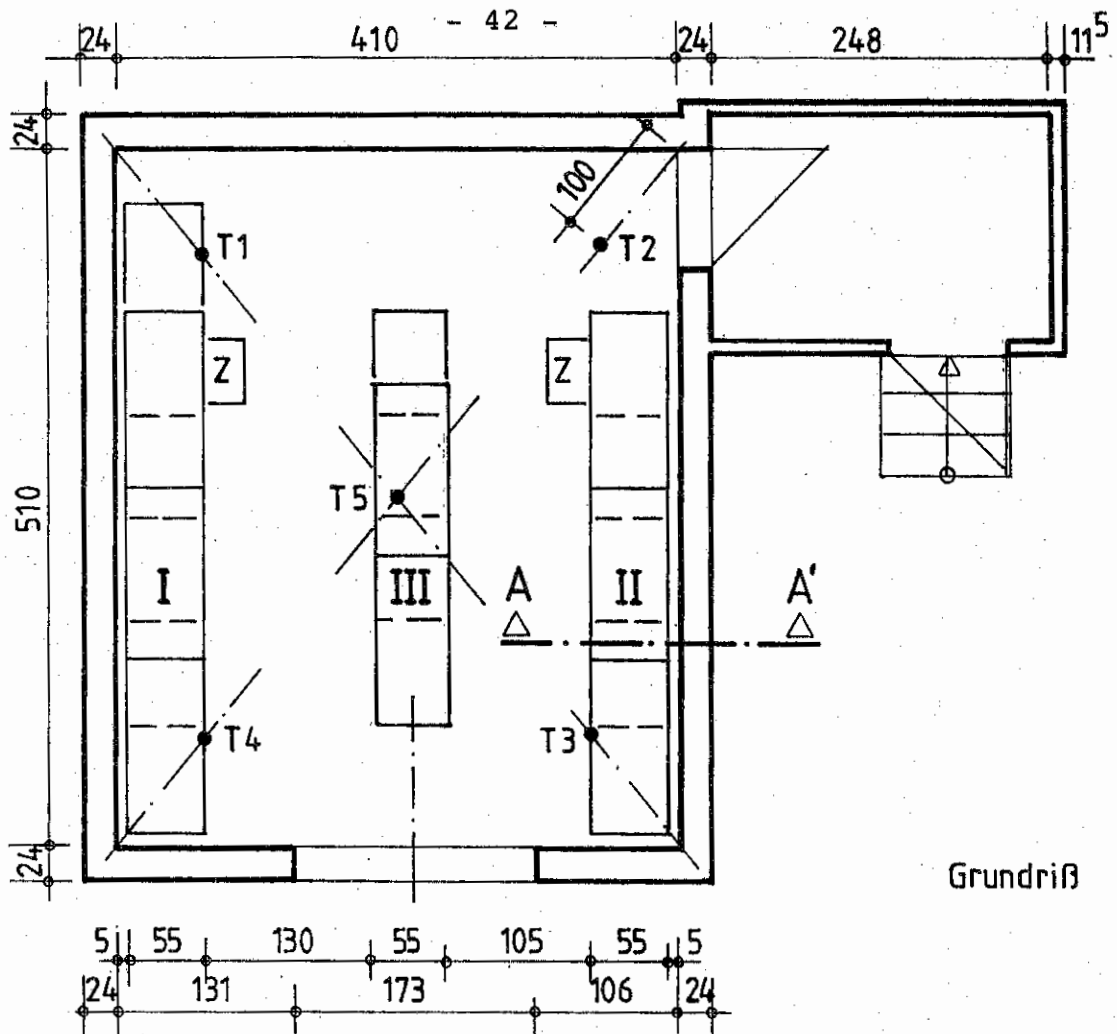


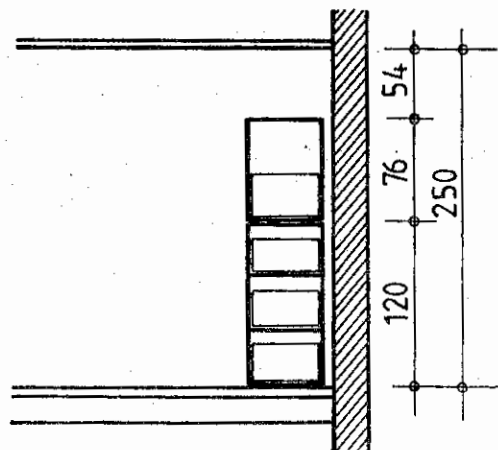
Bild 5: Art und Anordnung der Materialien bei der Modellbrandlast II, Brandlast 185 kg

- 1 Zündkrippe, Kiefernholzstäbe 20 mm x 20 mm x 400 mm, 25 Lagen, je Lage 5 Stäbe
- 2 Krippe nach DIN 14406, Stäbe 40 mm x 40 mm x 300 mm, 15 Lagen, je Lage 4 Stäbe
- 3 Schaumstoff weich 4 Schaumstoff hart 5 Holzbalken 7 Linoleum
- 6 Teppichboden 9 Zündwanne mit 0,3 l Spiritus



Grundriß

alle Maße in cm



Schnitt A-A'

Bild 6: Brandraum mit 22 m² Grundfläche als Lagerraum eingerichtet, Brandlast 750 kg

I, II, II Gitterboxen mit Lagergut
 T1 - T5 Thermolemente, 5 cm unterhalb der Decke
 Z Zündstelle, Karton, gefüllt mit Holzwole und
 0,3 l Spiritus

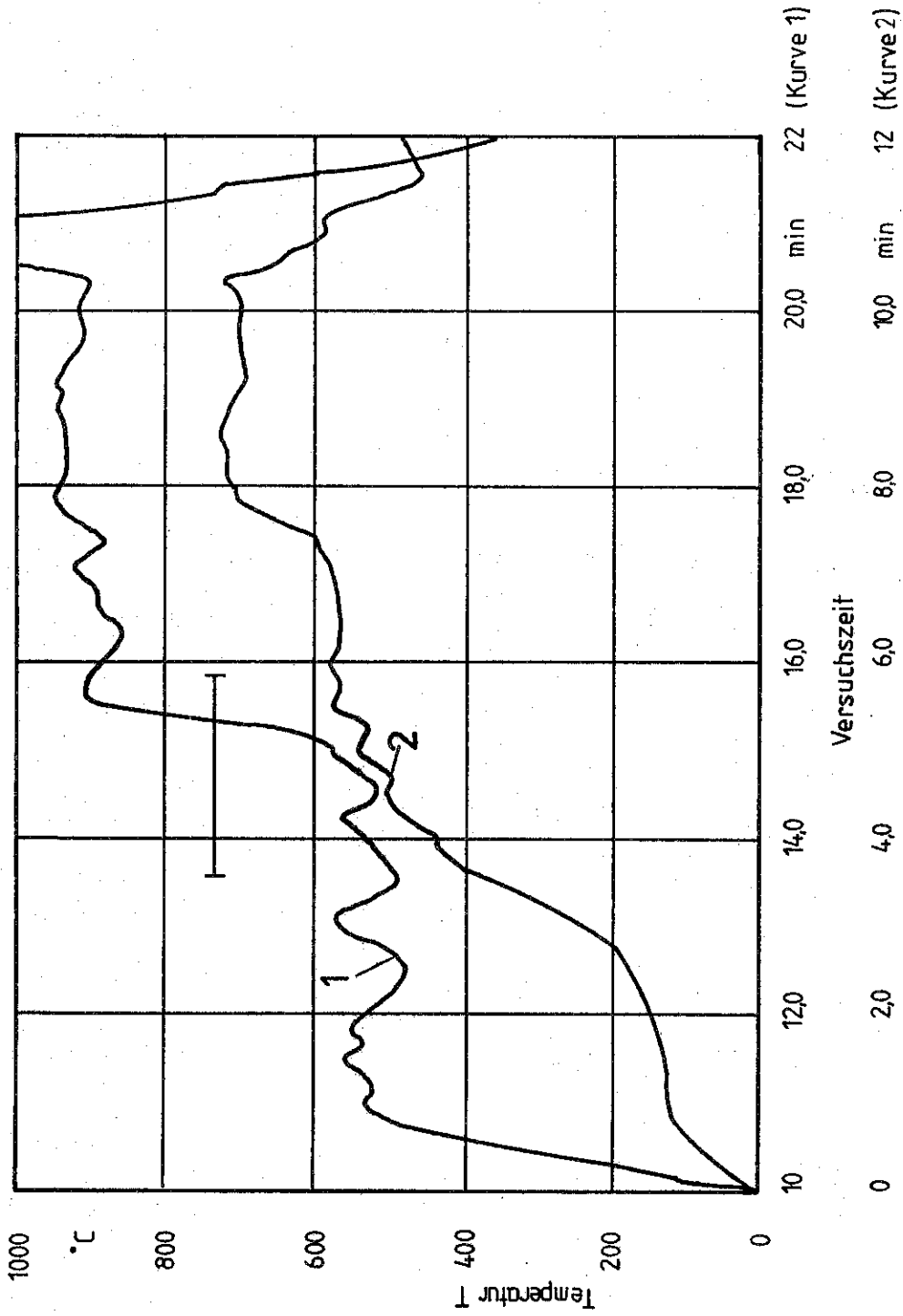


Bild 7: Temperaturverlauf im Brandraum

- 1 Brandversuch nach Bild 3 (Wohnungsbrand)
- 2 Brandversuch nach Bild 6 (Lagerbrand)
- Zeitbereich, in dem bei dem Wohnungsbrand optisch dichter Brandrauch auftrat

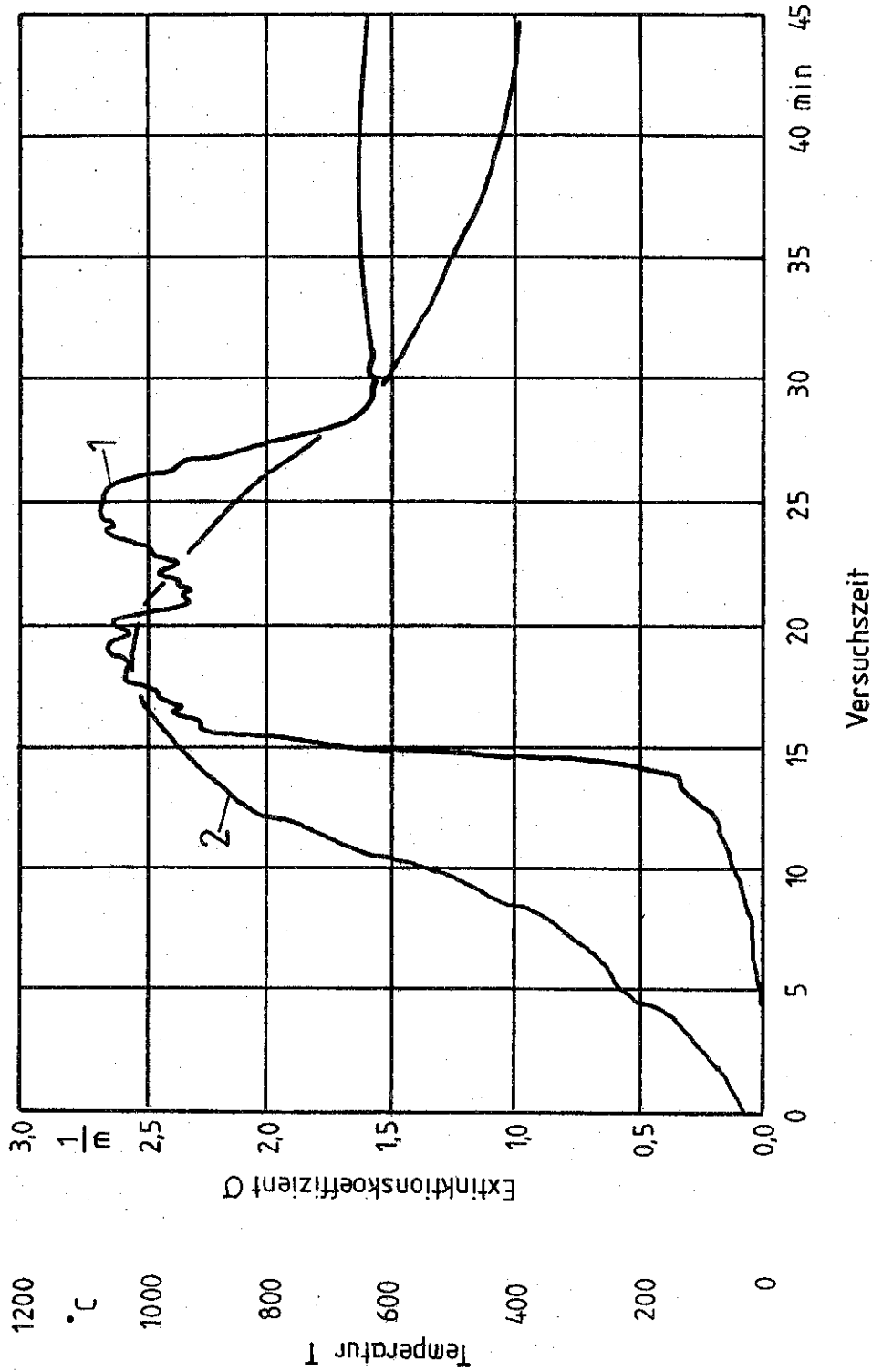


Bild 8: Optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches (1) und der Temperatur im Brandraum (2) bei einem Holzbrandversuch nach /4/

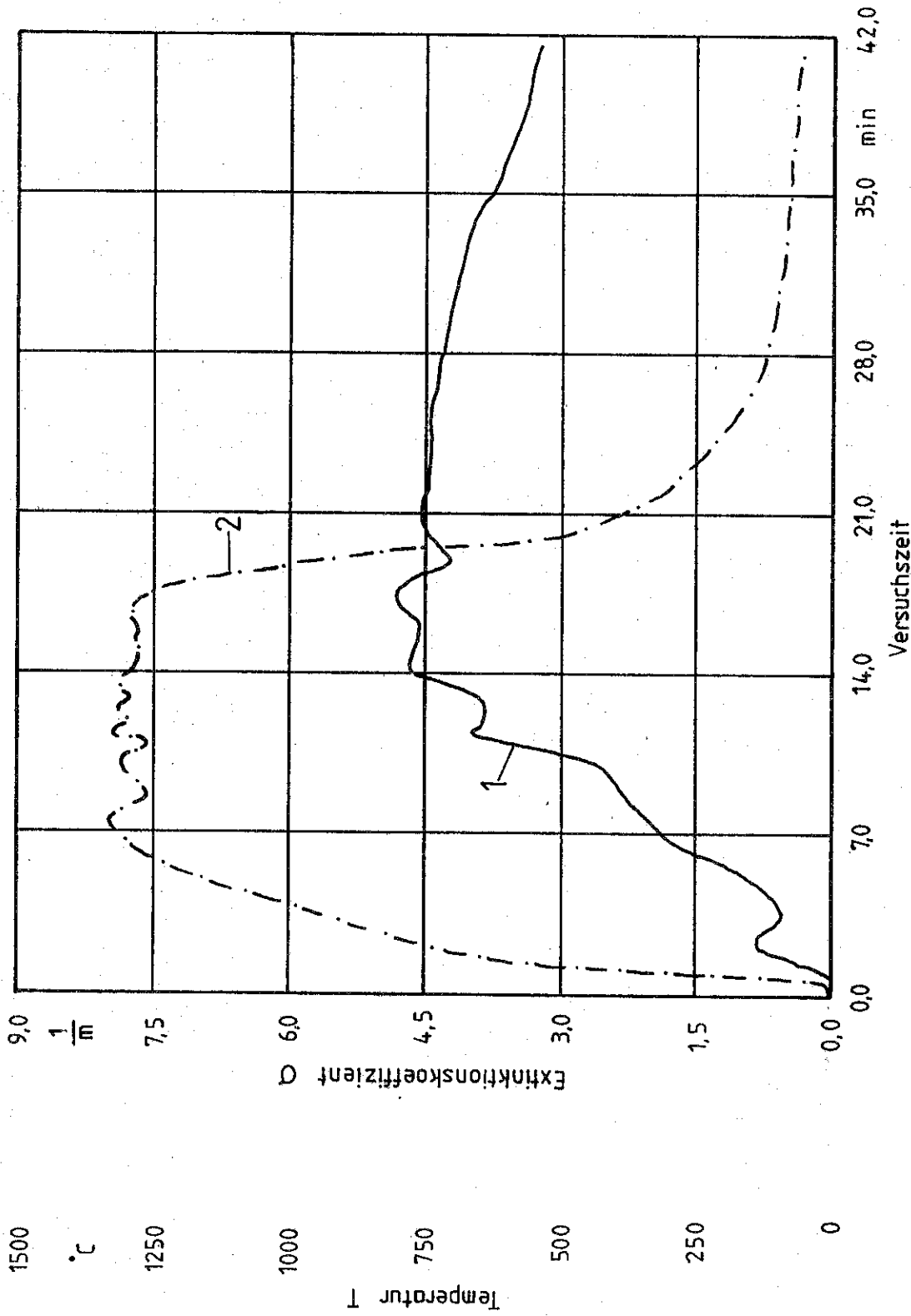


Bild 9: Optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches (1) und der Temperatur im Brandraum (2) beim Abbrand von 224 l Öl in einer Wanne mit 3 m² Grundfläche

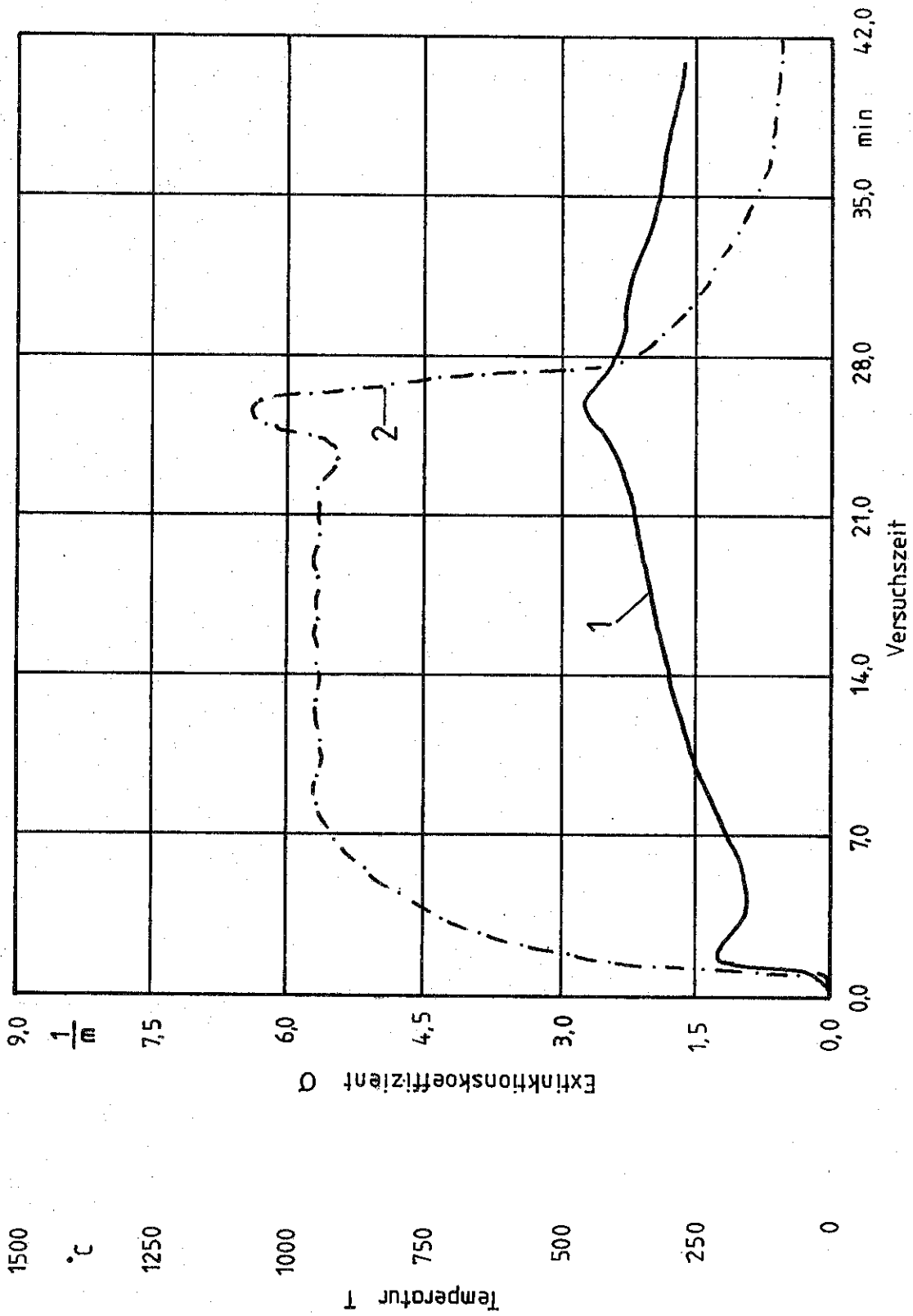


Bild 10: Optische Dichte des Brandrauch-Luftgemisches (1) und der Temperatur im Brandraum (2) beim Abbrand von 224 l Öl in einer Wanne mit 2 m² Grundfläche

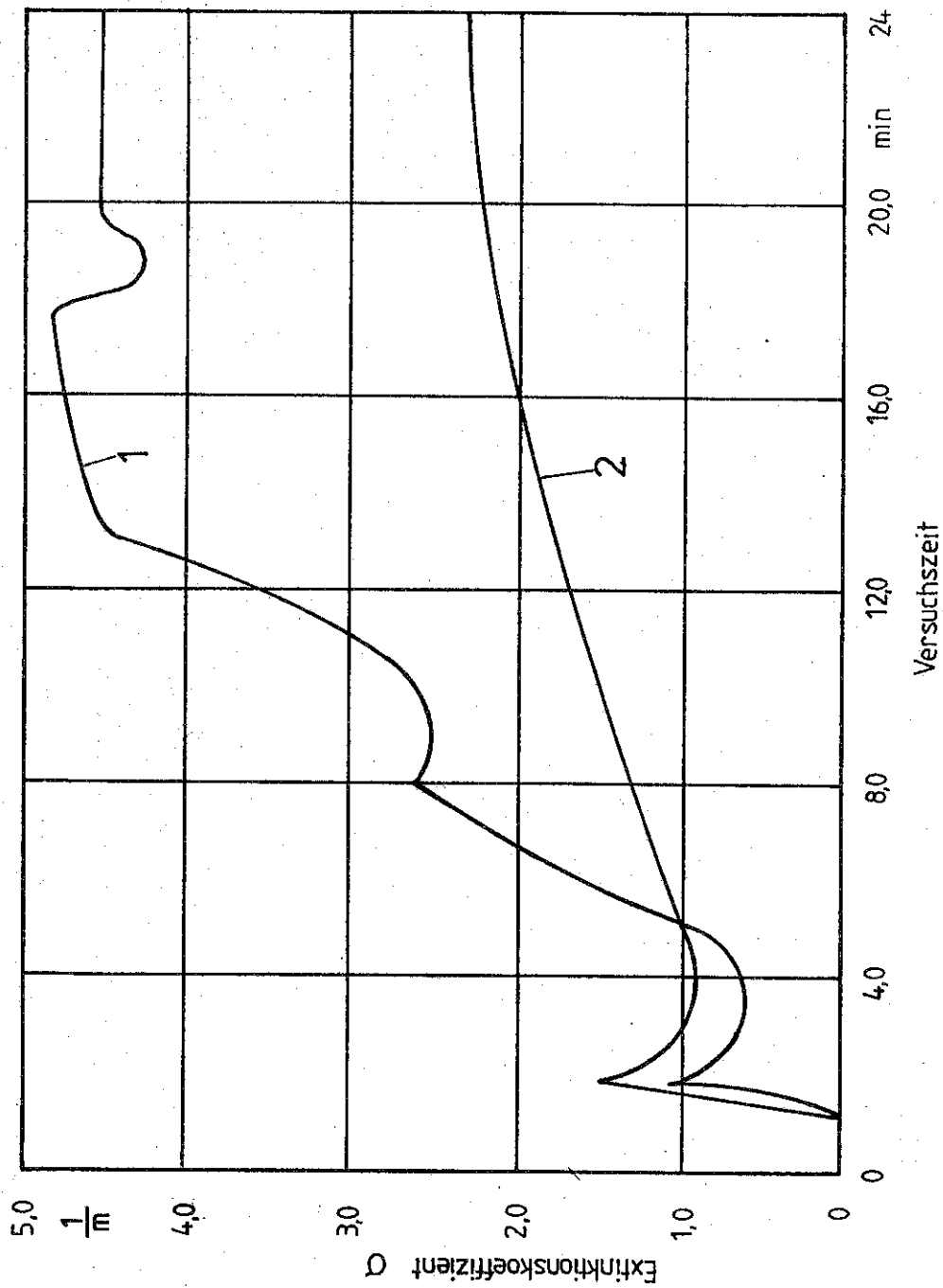


Bild 11: Optische Dichte des entstehenden Brandrauch-Luftgemisches im Versuchsgebäude beim Abbrand von 224 l Öl

- 1 Wannengrundfläche 3 m²
- 2 Wannengrundfläche 2 m²

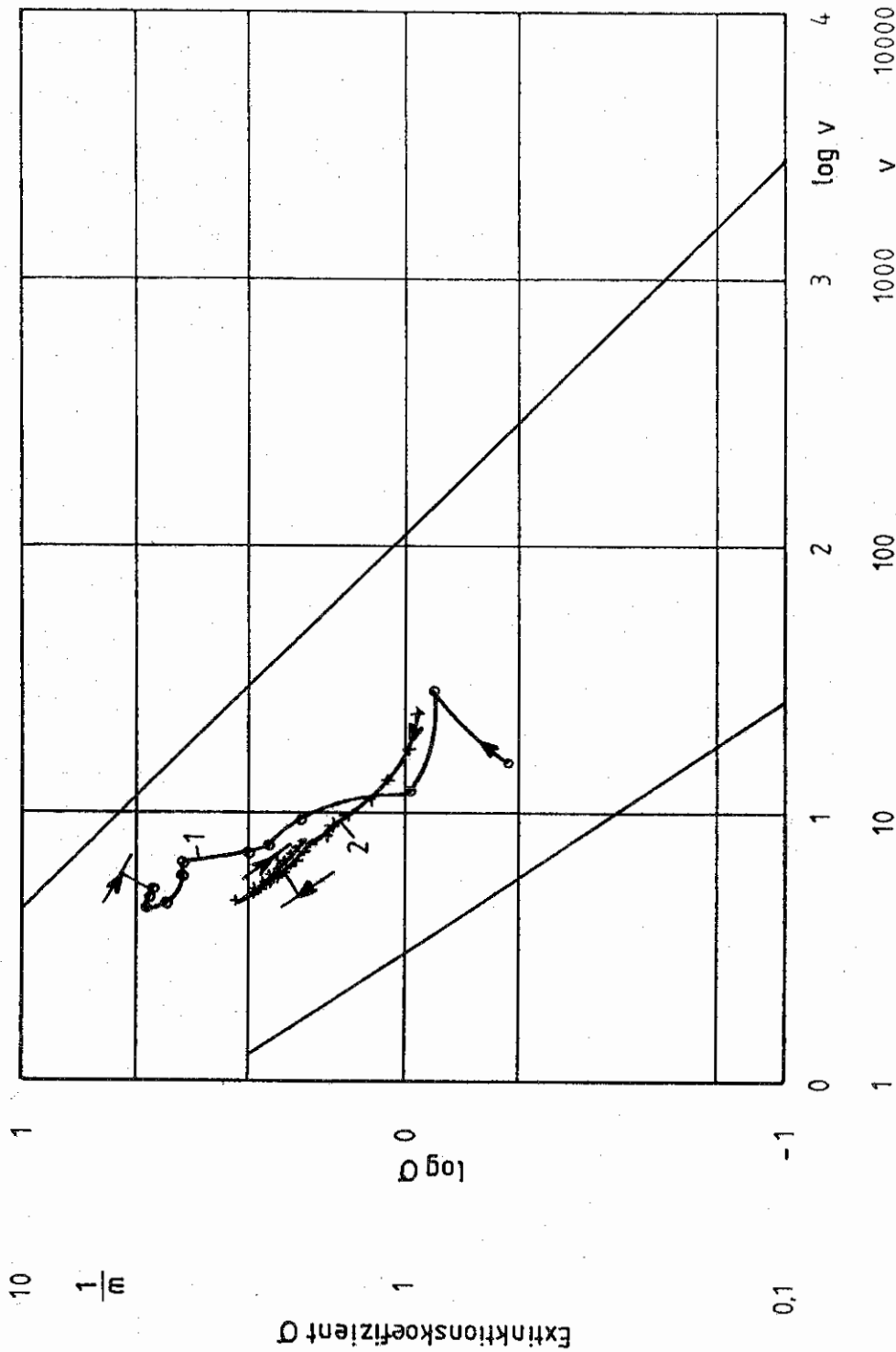


Bild 12: Verlauf der optischen Dichte des Brandrauch-Luftgemisches während des Abbrandes von 224 l Öl

- 1 in einer Wanne mit 3 m² Grundfläche
- 2 in einer Wanne mit 2 m² Grundfläche

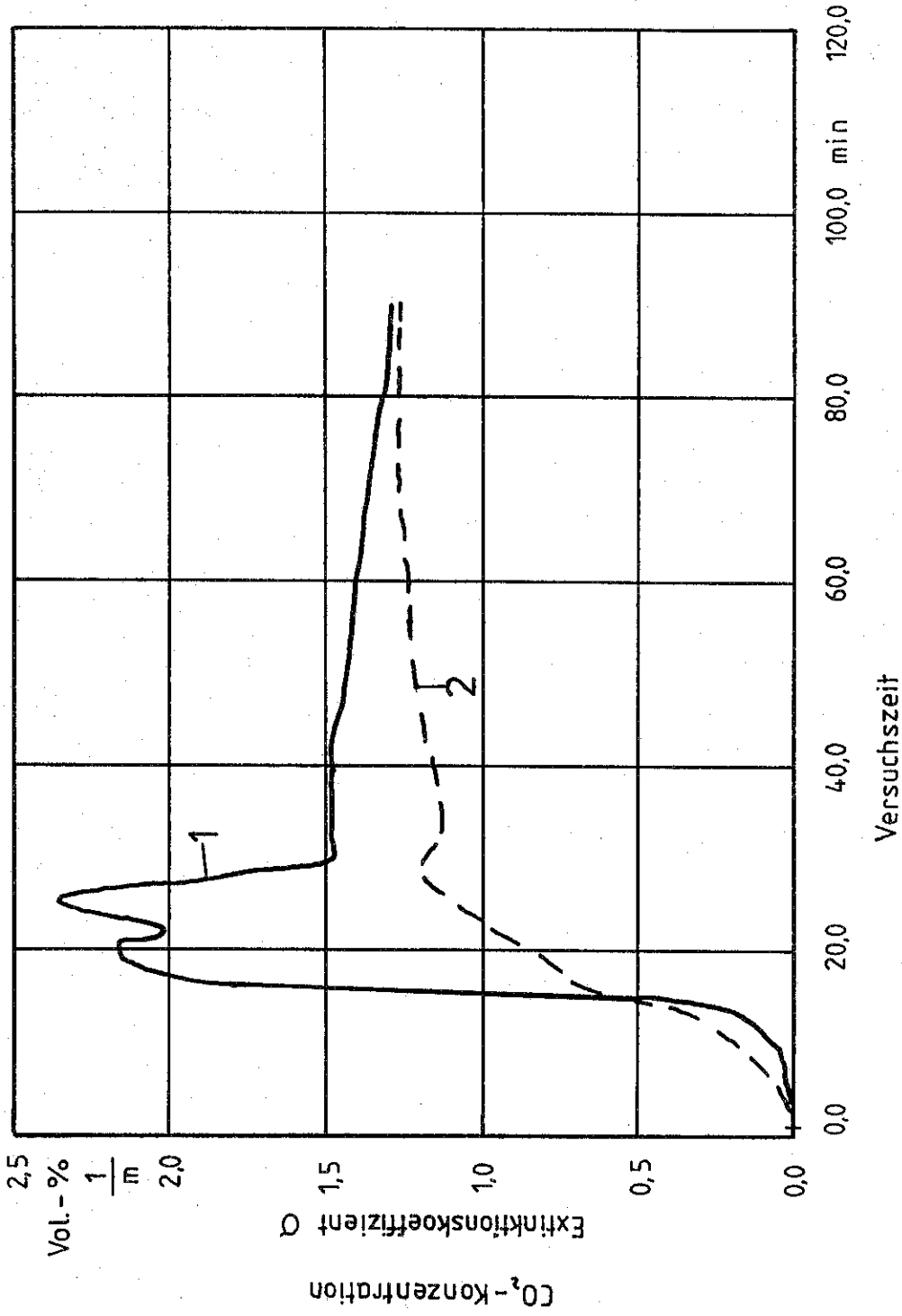


Bild 13: Optische Dichte (1) und CO₂-Konzentration (2) des Brandrauch-Luftgemisches bei einem Brandversuch
Brandgut 169 kg Holz in Form von Holzkruppen
Versuchsgebäude gegenüber der freien Umgebung hermetisch verschlossen
keine Spülung oder Umluftanlage in Betrieb

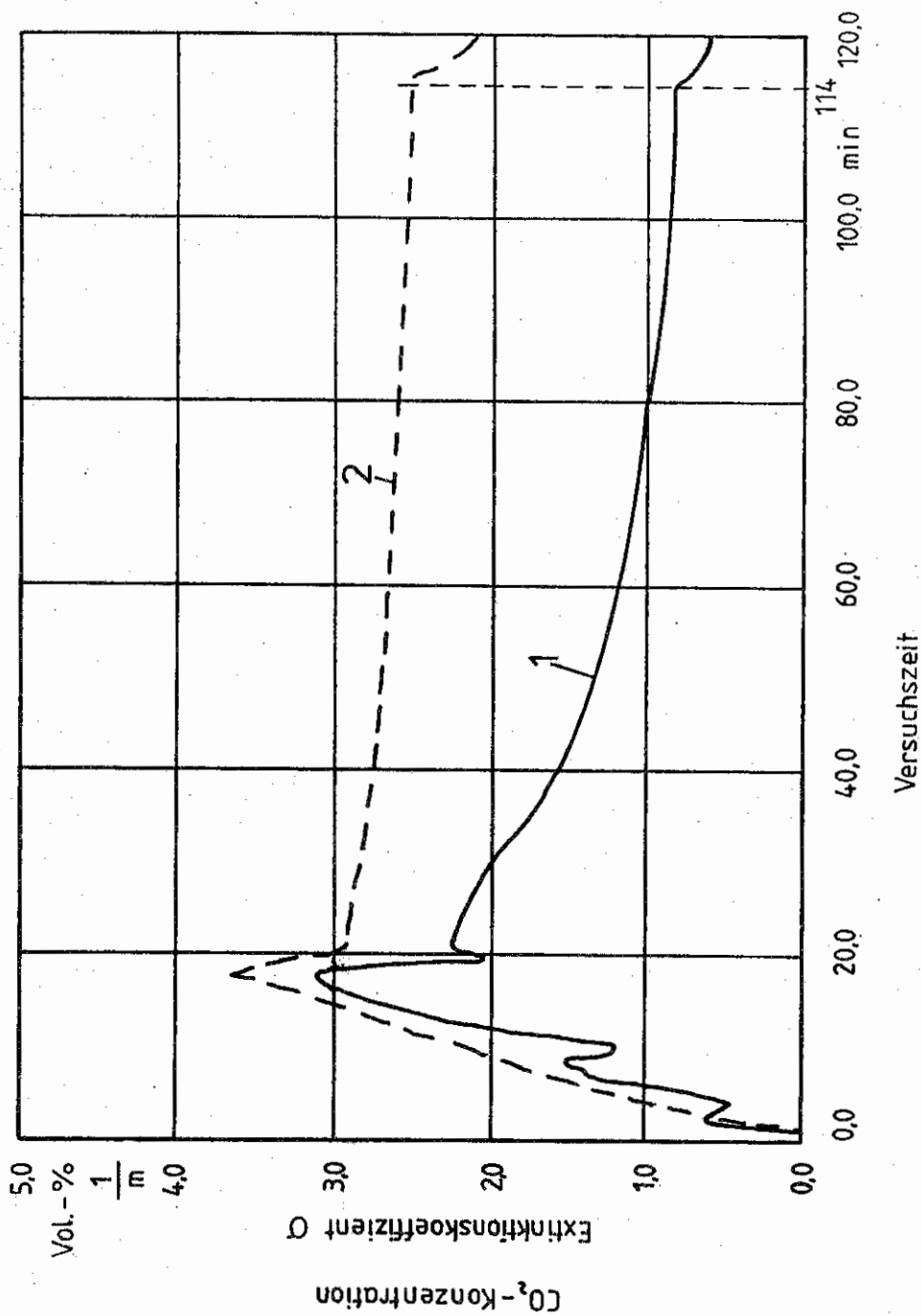


Bild 14: Optische Dichte (1) und CO₂-Konzentration (2) des Braandrauch-Luftgemisches bei einem Brandversuch

Brandgut 224 l Öl in einer Wanne mit 3 m² Grundfläche
bis 114 min: Versuchsgebäude gegenüber der freien Umgebung hermetisch
verschlossen, interne Umluftanlage in Betrieb
ab 114 min: Spülung des Versuchsgebäudes mit 20.000 m³/h Frischluft

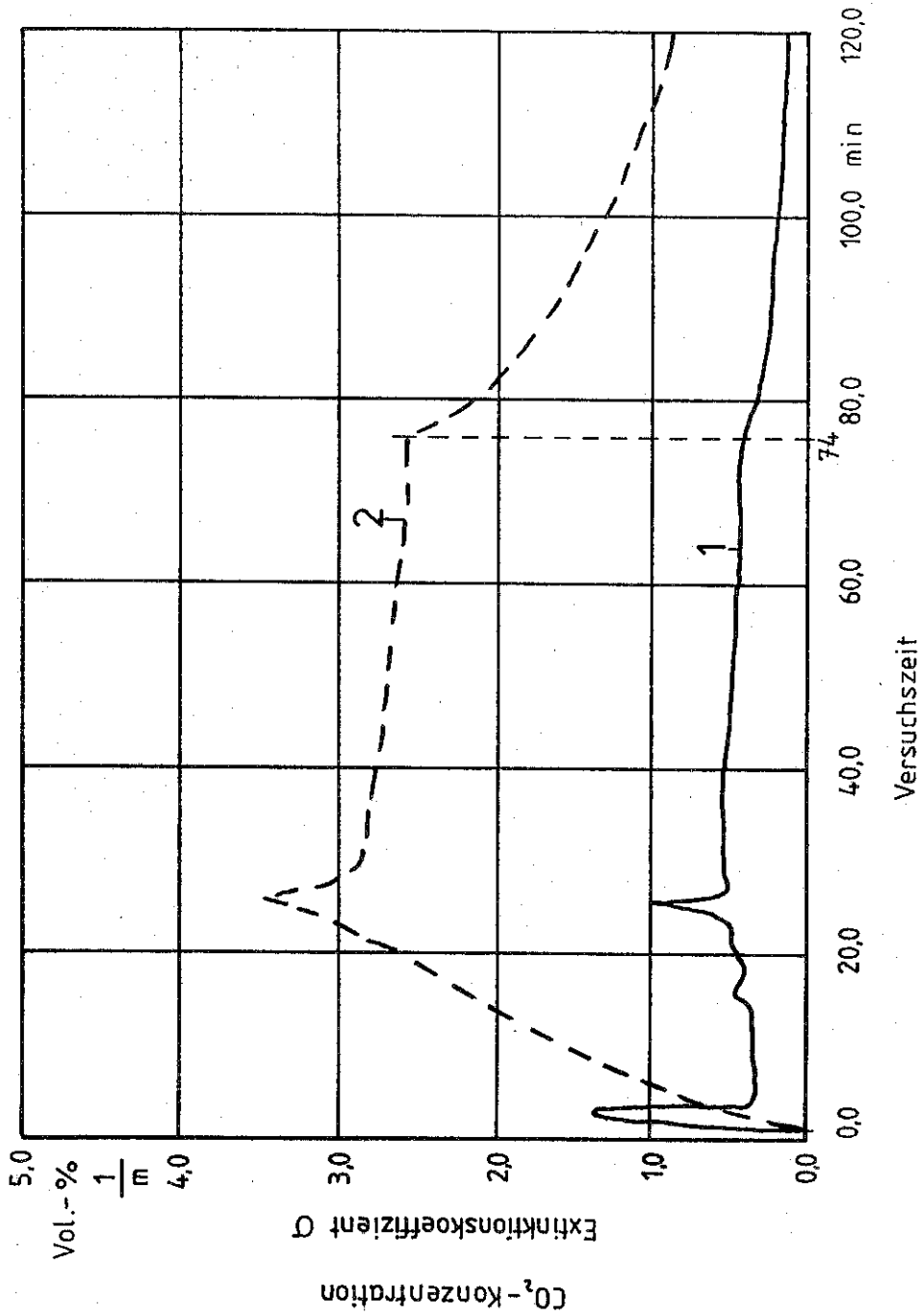


Bild 15: Optische Dichte (1) und CO₂-Konzentration (2) des Brandrauch-Luftgemisches bei einem Brandversuch

Brandgut 224 l Öl in einer Wanne mit 2 m² Grundfläche
bis 74 min: Versuchsgebäude gegenüber der freien Umgebung hermetisch
verschlossen, interne Umluftanlage in Betrieb
ab 74 min: Spülung des Versuchsgebäudes mit 20.000 m³/h Frischluft

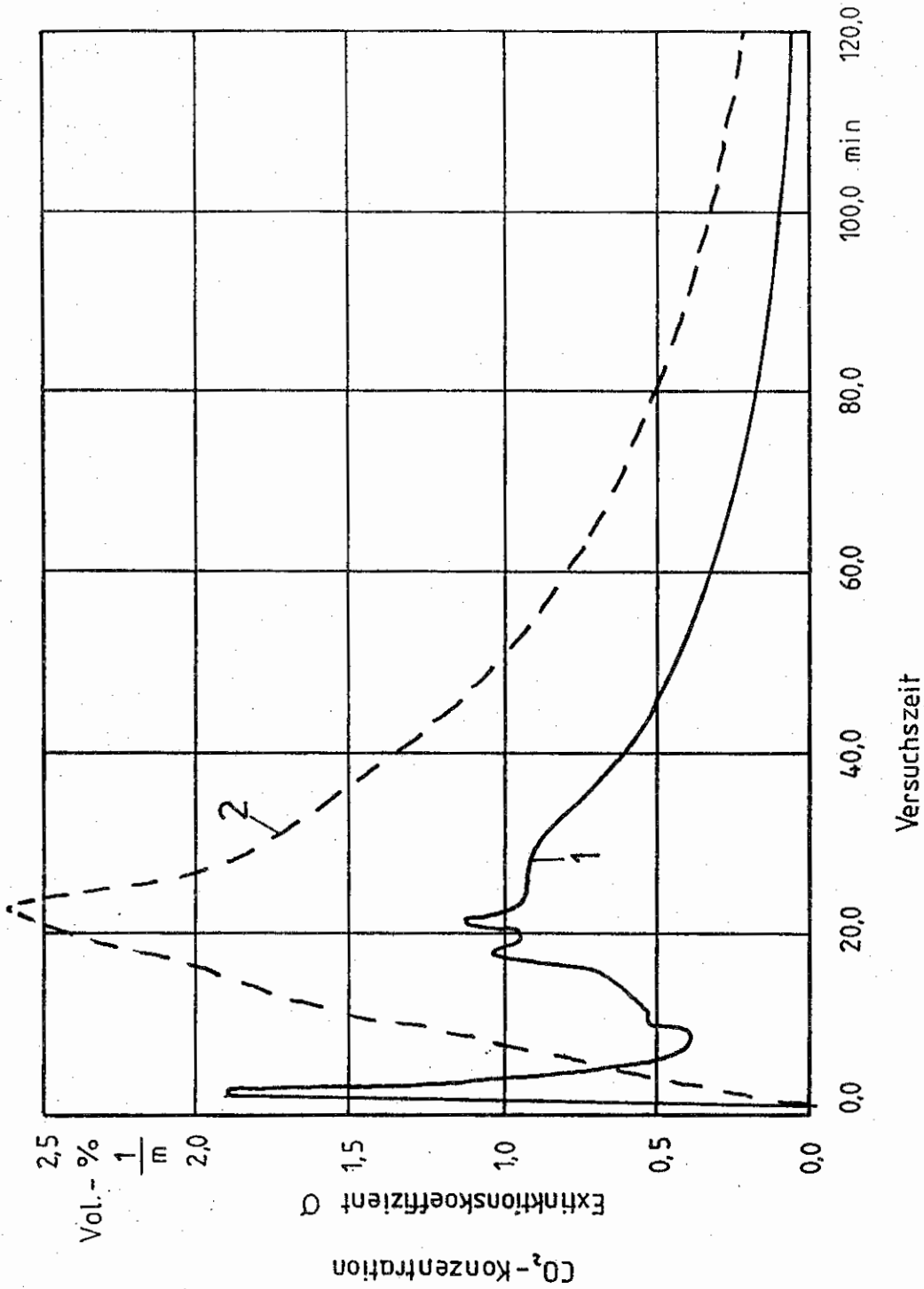


Bild 16: Optische Dichte (1) und CO₂-Konzentration (2) des Brandrauch-Luftgemisches bei einem Brandversuch

Brandgut 224 l Öl in einer Wanne mit 2 m² Grundfläche
Während der ganzen Versuchszeit Spülung des Versuchsgebäudes
mit 20.000 m³/h Frischluft