

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebel-Löschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden. Teil 3: Literaturauswertung (Wassernebel-Löschanlagen, Entwicklung, Löschprinzipien, Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen, Anlagentechnik, Normung) und Brand- und Löschversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächen-Doppelfassade

108

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V – AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHRANGELEGENHEITEN

Forschungsbericht Nr. 108

Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebel-Löschanlagen
auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten
Fassaden.

- Teil 3: - Literaturlauswertung (Wassernebel-
löschanlagen - Entwicklung, Lösch-
prinzipien, Einsatzgebiete, Anwendungs-
grenzen, Anlagentechnik, Normung)
- Brand- und Löschversuche in einem Gebäude-
ausschnitt mit einer Ganzflächendoppel-
fassade

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
März 1998

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. LITERATURAUSWERTUNG	
WASSERNEBEL UND WASSERNEBELLÖSCHANLAGEN	4
2.1 LITERATUR VON 1942 BIS 1960	4
2.2 NEUERE LITERATUR BIS ZUR GEGENWART	15
3. NORMUNGSTÄTIGKEITEN	53
4. MARKTÜBERSICHT WASSERNEBELLÖSCHSYSTEME	57
5. BRANDVERSUCHE AN DOPPELFASSADE	59
5.1 VERSUCHSPROGRAMM	59
5.2 VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK	60
6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	61
6.1 VERSUCH 8: Ohne Wassernebellöschanlage	
Brandlast: Möbel, Vorhang am geöffneten Fenster	61
6.2 VERSUCH A: Mit Wassernebellöschanlage	
Brandlast: Möbel, Vorhang am geschlossenen Fenster	62
6.3 VERSUCH B: Mit Wassernebellöschanlage	
Brandlast: Holzständerwand und Holzkrippen, Vorhang am geschlossenen Fenster	62
6.4 VERSUCH C: Mit Wassernebellöschanlage	
Brandlast: Holzständerwand und Sofa, Vorhang am geschlossenen Fenster	63
6.5 VERSUCH D: Mit Wassernebellöschanlage	
Intervalllöschen	
Brandlast: Möbel, Vorhang am geöffneten Fenster	63
6.6 VERSUCH E: Mit Wassernebellöschanlage	
Intervalllöschen	
Brandlast: Möbel, Vorhang am geöffneten Fenster	63
7. VERSUCHSBEOBACHTUNGEN, MEßWERTE UND VERSUCHSERGEBNISSE	63
7.1 VERSUCH 8	63
7.2 VERSUCH A	67
7.3 VERSUCH B	68
7.4 VERSUCH C	69
7.5 VERSUCH D	70
7.6 VERSUCH E	71
8. VERGLEICH DER BEI DEN VERSUCHEN ERMITTELTEN MEßWERTE UND BEWERTUNG	72
9. ZUSAMMENFASSUNG	74
10. LITERATURVERZEICHNIS	76
11. TABELLEN	84
12. BILDER	108

1. EINLEITUNG

Doppelfassaden werden seit einiger Zeit verstärkt von Architekten und Planern aus klima-, energie- und schallschutztechnischen Gründen eingesetzt.

Hierbei handelt es sich um Fassadenkonstruktionen, bei denen vor einer konventionellen Fassade im Abstand von ca. 20 cm bis 2 m eine zweite hinterlüftete äußere Fassade aus Glas vorgesetzt wird. Durch Zu- und Abluftöffnungen kann Luft in den Fassadenzwischenraum gelangen bzw. entweichen. Eine natürliche Raumlüftung wird durch zu öffnende Fenster oder Lüftungsklappen in der Innenfassade möglich. Der Sonnenschutz ist im Fassadenzwischenraum angeordnet.

Gegenüber einer einschaligen Fassade weist eine Doppelfassade einige Vorteile auf. Durch die äußere Glasscheibe erhält man einen Wind- und Wetterschutz für Fensterlüftung sowie einen Sonnenschutz. Das Öffnen von Fenstern wird auch bei extremen Wettersituationen ermöglicht. Eine teure und energieaufwendige Vollklimatisierung des Gebäudes ist bei einer Doppelfassade mit zu öffnenden Fenstern nicht notwendig. An verkehrsreichen Straßen mit einem erhöhten Lärmpegel wird über eine Doppelfassade der Schallpegel insbesondere bei geöffneten Fenstern deutlich reduziert. Durch die im Fassadenzwischenraum erwärmte Luft lassen sich Energieeinsparungen während der Heizperiode durch Verminderung der Transmissions- und Lüftungsverluste erreichen.

In der Praxis haben sich einige Konstruktionsprinzipien für Doppelfassadenkonstruktionen nach ihrem Prinzip der Luftführung in der Fassade herauskristallisiert:

1.) Bei der Ganzflächendoppelfassade erfolgt die Luftführung im Fassadenzwischenraum über das gesamte Gebäude. Der Zwischenfas-sadenbereich weist abgesehen von den Randbereichen des Gebäudes keine vertikalen und horizontalen Abschottungen auf. Hierdurch grenzen sowohl horizontal als auch vertikal unterschiedliche Nutzungsbereiche an den Doppelfassadenbereich.

2.) Bei der Kanaldoppelfassade wechseln sich Kastenfenster mit vertikalen Abluftkanälen ab. Die Kastenfenster haben Zuluftöffnungen nach außen und Abluftöffnungen seitwärts zu den Abluftkanälen. Durch Auftrieb im Abluftkanal wird Luft im Zwischenraum nachgezogen und das Be- und Entlüften der Kastenfenster ermög-

licht.

3.) Die Kastendoppelfassade ist eine geschoßweise durchlüftete Fassade mit horizontalen Abschottungen je Geschoß und vertikalen Abschottungen je Fenster. Die Doppelfassade ist hierbei jeweils auf einen Raum begrenzt. Zu den Doppelfassaden der angrenzenden Nachbarräume bestehen keine direkten Verbindungen. Die Ventilation dieser Doppelfassaden erfolgt über Frischlufteinströmung im Bereich der unteren horizontalen Abschottung, das Ausströmen im Bereich der oberen horizontalen Abschottung jeweils getrennt für jeden Fensterkasten.

4.) Der Fall, daß wie bei 3.) horizontale Abschottungen im Bereich der Geschoßplatten vorliegen, vertikale Abschottungen jedoch lediglich über große Entfernungen vorgesehen sind, tritt ebenfalls auf. Bei dieser Variante grenzen damit mehrere unterschiedliche Räume (Nutzungseinheiten) an einen gemeinsamen Doppelfassadenbereich an. Die Ventilation dieser Doppelfassaden erfolgt über Frischlufteinströmung im Bereich der unteren horizontalen Abschottung, das Ausströmen im Bereich der oberen horizontalen Abschottung.

In den bisherigen experimentellen Untersuchungen von Kunkelmann /1, 2/ wurde der Ausschnitt einer Ganzflächendoppelfassade untersucht. Durch die Auftriebsströmung im Zwischenfassadenbereich ergab sich durch die fehlenden horizontalen Abschottungen bei dem betrachteten Doppelfassadentyp eine schnelle Rauch- und Flammenausbreitung im Zwischenfassadenbereich, wobei die Flammenlängen noch das darüberliegende Stockwerk überschreiten können.

An einem durch eine Wand angedeuteten Stockwerk über dem Brandraum traten an der Innenfassade Temperaturen und Wärmestrahlungen auf, welche z.B. zum Entzünden von Gardinen hinter einem Fenster ausreicht. Selbst bei großen Abständen (hier 1,2 m) ist bei entsprechend großer Brandlast durch die hohen Temperaturen und großen Flammenlängen mit einem Feuerüberschlag in darüberliegende Stockwerke und ein Versagen der ESG-Verglasung der Außenfassade mit großer Wahrscheinlichkeit zu rechnen. Durch die schlagartig heraustretenden Stichflammen beim Versagen der ESG-Verglasung sind Einsatzkräfte der Feuerwehr beim Anleitern und bei evtl. zu geringem Abstand zur Außenfassade enorm gefährdet. Beim Versagen der Scheiben fallen Bruchstücke sowohl in den Zwischenfassadenbereich als auch vor die Fassade, so daß auch

vorbeigehende Passanten gefährdet werden.

In Anbetracht dieses Kenntnisstandes soll in dieser Arbeit der Einsatzes ortsfester Niederdruck-Wassernebellöschanlagen im Brandraum auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden untersucht werden. Diese Löschanlage wurde gewählt, da zum einen mit einem geringeren Wasserschaden gerechnet werden kann als bei Sprinkleranlagen. Weiterhin können mit Wassernebel auch flüssige Brandstoffe und Kunststoffe ohne Schaummittelzusatz gelöscht werden. Die Niederdrucktechnik wurde im Hinblick auf einfache und kostengünstige Anlagentechnik und Montage gewählt.

2. LITERATURAUSWERTUNG WASSERNEBEL UND WASSERNEBELLÖSCHANLAGEN

2.1 LITERATUR VON 1942 BIS 1960

Hirst /3(1942)/ berichtet über die Löschung von brennenden Öllachen und Transformatorenbränden mit Wassernebel. Bei den Öllachen kommen mobile Löscheräte, bei den Transformatorenbränden stationäre Löschanlagen zum Einsatz. Die Betriebsdrücke der Löschanlagen liegen zwischen 1,4 bar bei den mobilen und 41,4 bar bei den stationären Anlagen.

Rasbash /4(1949)/ berichtet über den Einsatz von Wassersprühnebel zur Verbesserung der Sichtverhältnisse bei der Verrauchung beim Feuerwehreinsatz. Die Wirkungsweise des Wassersprühnebels beruht auf dem Ansaugen von Frischluft und dem Auswaschen von Partikeln aus dem Rauch. Als günstigster Tropfendurchmesser hat sich ein Wert von 290 μm bei einem Volumenstrom von 1,92 g.p.m. (= 7,27 l/min) erwiesen.

Rasbash und Skeet /5(1951)/ berichten über das Löschen von Kerosinbränden mit Sprühwasser. Die Brände wurden in einem Behälter mit 96 cm^2 Querschnittsfläche durchgeführt. Die Tropfengrößen lagen in einem Bereich zwischen 0,2 und 2 mm bei einem Wasserstrom von 10 g/min - 200 g/min und wurden in einer Zweistoffdüse (Luft, Wasser) erzeugt. Die unterschiedlichen Tropfengrößen wurden durch Variation des Luftstromes gebildet. Die Versuche haben ergeben, daß durch Wassertropfen mit einem Durchmesser größer 0,6 mm brennendes Kerosin annähernd bis zum Flammpunkt abgekühlt werden kann. Mit Tropfendurchmessern kleiner 0,6 mm wird die Löschung früher und mit weniger Wasser aufgrund der besseren Kühlwirkung erreicht. Die größte Löscheffektivität wurde bei Tropfendurchmessern von 0,4 mm erzielt. Durch 1,5 mm - Tropfen wurde die Abbrandrate vergrößert, wobei das Kerosin durch die auftreffenden Tropfen verspritzt wurde. Die Abbrandgeschwindigkeit wurde ebenfalls bei geringen Durchsätzen und Tropfengrößen zwischen 0,2 bis 0,4 mm vergrößert. Es kam zum Sprudeln beim Auftreffen auf die heiße Kerosinoberfläche. Die Löschzeiten lagen zwischen 1 min und 11 min 55 s je nach Durchsatz und Tropfengröße.

Radusch /6(1953)/ stellt Betrachtungen über die günstigste Tröpfchengröße zur Brandlöschung durch zerstäubtes Wasser und über die Reichweite eines Wasserstaubstrahles (Wassernebel) an.

Das Wasser zeichnet sich vor allen anderen Löschmitteln durch sein großes Wärmebindungsvermögen aus. Die hohe Verdampfungswärme des Wassers läßt der Kühlwirkung bei Löschen eine ausschlaggebende Rolle zukommen. Die kühlende Löschwirkung eines Wassertropfens kann man in zwei Teile zerlegen, deren Summe den eigentlichen Löscheffekt ergibt. Der erste Teil besteht in der Wärmebindung während des Fluges durch die heiße Gas- bzw. Flammenzone. Hierdurch werden die brennbaren Gase abgekühlt, die Flammen niedergeschlagen und somit durch Herabsetzung der Wärmestrahlung die Ausbreitung des Feuers stark eingeschränkt. Schließlich wird auf diese Weise den nachfolgenden Wassertröpfchen der Zugang zum Brandherd erleichtert. Die alte Regel, Wasser nicht oben in die Flammen zu spritzen, hat bei feinen Wassertröpfchen, wegen des starken Auftriebes in der oberen Flammenzone, ihre besondere Bedeutung. Da nun von einem Feuer aber auch Luft angesaugt wird, und zwar besonders in der unteren Brandzone, wird die Löschwirkung um so besser sein, je mehr man diesen Sog zur Heranführung des Wasserstaubes an den Brandherd ausnutzt. Der zweite Teil der Löschwirkung des Wassertropfens besteht in der Wärmebindung am Brennstoff selbst, nachdem der Brandherd erreicht worden ist. Hierbei spielt der Auftrieb und überhaupt die Luftbewegung keine wesentliche Rolle. Von der Herabsetzung der Brennbarkeit der brennbaren Gase durch Mischung mit dem entstehenden Wasserdampf sowie Luftverdrängung durch denselben am Brandherd, was nach Meinung von Radusch fraglos eine erhebliche Bedeutung hat, soll hier abgesehen werden. Radusch geht in seiner Arbeit außer auf die Berechnung der Tropfen-Verdampfungszeiten auch auf die Reichweite von Wasserstaubstrahlen ein. Wie bei allen Bewegungs- und Strömungsvorgängen muß man auch beim Wasserstaubstrahl zwischen Anlauf und stationärem Zustand unterscheiden. Der Anlauf erstreckt sich auf die Erregung eines Luftstromes durch die nach Öffnung aus der Düse austretenden Wassertropfen. Nur die allerersten Wassertropfen treffen auf ruhende Luft. Durch den entstehenden Luftstrom, der schnell einem stationären Zustand zustrebt, wird der Luftwiderstand herabgesetzt und somit die Reichweite der Wassertröpfchen erhöht. Randzone und Inneres des Wasserstaubstrahles werden verschieden stark beeinflusst. Radusch zieht u.a. folgende Schlußfolgerung aus seinen Untersuchungen: Die Verdampfungsgeschwindigkeit eines bewegten Wassertröpfchens ist vom Tropfendurchmesser und von der relativen Tropfengeschwindigkeit zur umgebenden Luft abhängig. Sie erreicht beim freifliegenden Wassertröpfchen einen Optimalwert, der zwischen den Tropfendurchmessern 0,1 und 1,0 mm liegen dürfte.

Fry und Smart /7(1953)/ geben einen Überblick über den damaligen Stand der Forschung und Entwicklung sowie den Einsatz von Wasserspray. Sie befassen sich mit den englischen Begriffen für Wasserspray "fog", "mist" und "spray", wobei die Wortwahl keiner exakten Definition entspricht. Weiterhin werden die Wassersprays eingeteilt in

Mehrzahl der Tropfendurchmesser	< 200 μm
" " "	200 - 400 μm
" " "	> 400 μm

Die Hauptlöscheffekte sind die Kühlung des brennenden Materials durch die Verdampfung der Wassertropfen sowie die Verdünnung der den Brand umgebenden Luft durch Wasserdampf. Es wird erwähnt, daß die besten Löschergebnisse erzielt werden, wenn wenigstens ein Teil der Tropfen genügend groß ist, um am Brandherd eine Löschwirkung zu erzielen und der Rest kleiner Tropfen über dem Brandherd verdampft und dadurch eine optimale Kühlwirkung in diesem Bereich bewirkt. Der Einsatz von Wasserspray ist sowohl bei festen als auch bei flüssigen Brandstoffen möglich. Es werden weitere Effekte des Wassersprays aufgeführt, wie Reduzierung der Wärmestrahlung, Kühlung der Luft, bessere Sichtverhältnisse durch Niederschlagen von Rauch beim Feuerwehreinsatz, Verminderung der Explosionsgefahr, Verminderung der Toxizität von Brandgasen und Verminderung der Schäden an elektrischen Anlagen. Weiterhin wird in der Arbeit auf die Theorie der Zerstäubung sowie auf die Wirkungsweise und Eigenschaften verschiedener Düsentypen beim Feuerwehreinsatz eingegangen.

Rasbash und Rogowski /8(1954)/ haben das Löschen von Flüssigkeitsbränden mit Sprühnebel untersucht. In den Versuchen wurde Alkohol, Benzol, Benzin, Kerosin, Gas- und Transformatorenöl untersucht. Es wurden 3 unterschiedliche Sprühnebel (Druck: 5,86 bar, Wasserbeaufschlagung: $1,6 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, mittlere massenbezogene Tropfendurchmesser: 0,28 mm, 0,39 mm, 0,49 mm) erzeugt. Die Flüssigkeiten wurden in einem zylindrischen Gefäß mit 30 cm Durchmesser verbrannt. Hierbei wurde nach unterschiedlichen Vorbrennzeiten im Bereich zwischen 1 s und 480 s abgelöscht. Bei den Versuchen wurde festgestellt, daß die Löschzeit bei einer Flüssigkeit mit niedrigerer Flüchtigkeit abnimmt. Bei Alkohol, Benzol, Benzin und Kerosin steigt die erforderliche Löschzeit mit zunehmender Tropfengröße. Bei Gas- und Transformatorenöl war die mittlere Löschzeit am kürzesten beim Sprühnebel mit den größten Tropfen. Mit zunehmender Vorbrennzeit nahm die Löschzeit bei Benzin, Benzol und Alkohol zu.

Folgende Löschmechanismen kommen zu Tragen:

1. Löschen der Flamme aufgrund des Wärmeaustausches mit dem Sprühnebel
2. Löschen der Flammen durch die Bildung von Wasserdampf an der heißen Flüssigkeitsoberfläche.
3. Kühlung der Flüssigkeit unter den Flammpunkt
4. bei Alkohol: Verdünnung der oberen Schichten mit Wasser, so daß der Alkohol nicht mehr zündfähig ist

Bei Benzin und Benzol kommen nur die ersten beiden Mechanismen in Betracht, wobei die besten Löschergebnisse mit dem Sprühnebel mit den kleinsten Wassertropfen erzielt wurde. Bei Gas- und Transformatorenöl werden die besten Löschergebnisse mit den größten Tropfen erzielt, da diese die Flammen durchdringen können und anschließend ausreichend Dampf an der heißen Flüssigkeitsoberfläche bilden können. Kerosin ist bezüglich des Löschverhaltens zwischen diesen beiden Gruppen einzuordnen. Bei einer kurzen Vorbrennzeit erwies sich das Spray mit den feinsten Tropfen als am vorteilhaftesten, bei großen Vorbrennzeiten das Spray mit den größten Tropfen.

Radusch /9(1954)/ beschreibt den Wasserstaubstrahl (Wassernebel) als einen vom Düsenmundstück eines Wasserstaubstrahlrohres ausgehenden Strom von Wassertröpfchen, der Luftteilchen in seiner Bahn und deren Umgebung mitreißt und sich infolgedessen auf seinem Weg verbreitert. Im Gegensatz zum Voll- oder Sprühstrahl durchbricht der Wasserstaubstrahl die Flammen nicht sondern schlägt sie vielmehr nieder und löscht erst dann den für den Zugriff freigelegten Brandherd ab. Bezogen auf die Raumeinheit nimmt der Wassergehalt des Wasserstaubstrahles mit zunehmender Entfernung von der Düse ab. Ebenso verringert sich aufgrund des Luftwiderstandes die Geschwindigkeit der Wassertropfen. Wassermenge und Wasser-geschwindigkeit bestimmen die kinetische Energie des Wasserstaubstrahles. Die kinetische Energie und die Menge des Wassers sind in Verbindung mit der Größe der Wassertröpfchen und deren Verteilung innerhalb des Strahles maßgebend für das Löschvermögen des Wasserstaubstrahles. Als Wirkprinzipien für den Löschvorgang werden der Kühleffekt und die Sauerstoffverdrängung (erstickende Wirkung) aufgeführt. Der Wasserstaubstrahl muß eine ausreichende Menge Wasser enthalten, um in seinem Bereich mehr Wärme zu binden, als vom Feuer in der gleichen Zeit erzeugt wird. Weiterhin soll eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Wassers innerhalb des Strahles vorliegen. Der optimale Tropfendurchmesser beträgt 0,5 mm. Beim

Wasserstaub-Löschverfahren muß gegenüber den bisherigen Löschverfahren die Taktik geändert werden. Es gilt den Frischluftsoog am Brandherd für den Transport der Wassertröpfchen mit auszunutzen. Radusch vernachlässigt zunächst die Sauerstoffverdrängung bzw. die erstickende Wirkung des bei der Abkühlung des Brandes entstehenden Wasserdampfes und berücksichtigt nur den reinen Kühleffekt. Durch Zusammenhalten des Wasserstaubstrahles zur Vermeidung einer allzu starken Streuung des Strahles wird der Luftwiderstand vermindert und die Flugweite der Tröpfchen vergrößert. Nach Radusch wird bei richtiger Einschätzung der Verhältnisse der Einsatz eines guten Wasserstaubstrahles immer erfolgreich sein, Sonderlöschmittel in vielen Fällen entbehrlich zu machen, Wasserschäden zu vermeiden und den Löschwert knapper Wasservorräte beträchtlich erhöhen.

Nash und Rasbash /10(1955)/ geben Löschzeiten für Wasserspray bei einem vollentwickelten Brand für einen Modellraum ($28,3 \text{ m}^3$) als Funktion des Wasservolumenstromes an. In dem dargestellten Diagramm nimmt die Löschzeit kontinuierlich mit dem Volumenstrom ab. Das Diagramm zeigt einen mindest erforderlichen Volumenstrom, bei dessen Unterschreitung die Löschzeit unendlich groß wird. Über die Brandlast wird keine Aussage gemacht. In einem weiteren Diagramm wird die gesamte zum Löschen benötigte Wassermenge bezogen auf die Modellraumgröße von $28,3 \text{ m}^3$ als Funktion des Wasservolumenstromes dargestellt. Man erkennt, daß bei größerem Volumenstrom die Gesamtwassermenge abnimmt. Auf einer 2. Ordinate wird das Wasserdampfvolumen bezogen auf das Raumvolumen dargestellt. Ein weiteres Bild zeigt die erforderliche Gesamtwassermenge als Funktion des Volumenstromes bei unterschiedlichen Ventilationsöffnungen. Bei größerer Ventilationsöffnung ist eine größere Löschwassermenge erforderlich. Die zum Löschen erforderliche Mindestwassermenge nimmt bei einer größeren Ventilationsöffnung ebenfalls beträchtlich zu. Einen weiteren Einfluß auf die Löschwassermenge hat die Strahlform des Löschwassers. In 12 Versuchen wurde der Löschwasserbedarf für vollentwickelte Wohnzimmerbrände ($42,5 \text{ m}^3$) untersucht. Die Arbeit geht ebenfalls auf die Anwendung von Wassernebel bei Flüssigkeitsbränden (Alkohol, Benzol, Benzin, Kerosin, Gasöl, Transformatoröl) ein. Die Verringerung der Tropfengröße verbessert die Löschwirksamkeit eines Wassersprays solange die Tropfen den Brandherd erreichen können. Für 3 verschiedene Tropfengrößen (0,28 mm, 0,39 mm, 0,49 mm) werden die Löschzeiten für die verschiedenen flüssigen Brandstoffe angegeben, wobei die Vorbrennzeiten zwischen 2 und 8 Minuten lagen. Über die Unterschiede der

Löschwirksamkeit von verschiedenen Tropfengrößen als auch durch Ansaugen von Luft durch das Spray bei den verschiedenen Flüssigkeiten wird näher eingegangen. Der Einsatz von Schaummitteln bei der Bekämpfung von Benzinbränden wird ebenfalls behandelt.

Der Bericht der **Underwriters' Laboratories /11(1955)/** beschreibt eine Untersuchung der Grundprinzipien des Löschens eines Brandes mit Wasserspray. Die Tropfengrößenverteilung wurde mit mikroskopischen Methoden durch Auffangen der Tropfen in Rizinusöl oder in einer Mineralöl/Petroleum-Mischung ermittelt. Bei den Versuchen wurden 19 verschiedene Düsen oder Kombinationen von Düsen bei verschiedenen Wasserdrücken eingesetzt. Der Löscheffekt wurde an kleinen Bränden mit Benzin, Kerosin, Äthylalkohol oder Holz untersucht. Das Spray wurde sowohl vertikal als auch horizontal auf den Brand aufgebracht. Weiterhin wurden verschiedene Ventilationseinflüsse untersucht. Als Löschemanismen werden die Sauerstoffverdrängung in der Verbrennungszone als auch der Kühleffekt durch die verdampfenden Wassertropfen aufgeführt. Die Löscheffektivität stellte sich als bei kleinen Tropfen am größten heraus. Bei den Versuchen lagen die Betriebsdrücke zwischen 0,35 bar und 6,9 bar, die mittleren volumetrischen Tropfendurchmesser zwischen 110 μm und 1509 μm und die Wasserbeaufschlagungen zwischen 0,6 $\text{l/m}^2 \cdot \text{min}$ und 15 $\text{l/m}^2 \cdot \text{min}$. Die Versuchs- und Betriebsparameter für die verschiedenen Versuche und Brandlasten werden in Tabellenform wiedergegeben. Die Wassermenge muß dem jeweiligen Brand angepaßt sein. Es wird erwähnt, daß die Verdampfungsrate (Stofftransport) und der Kühleffekt (Wärmetransport) direkt proportional zur Wasseroberfläche sind. Es gibt eine untere Grenze für den Tropfendurchmesser, die gerade noch in der Lage ist die Rauchgasgegenströmung zu überwinden und den Brandherd zu erreichen. Tropfen die aufgrund ihrer Größe nicht vollständig verdampfen, können den noch nicht entzündeten Brandstoff kühlen. Für das Löschen von Benzin wurde ein Spray mit einem mittleren volumetrischen Tropfendurchmesser von 300 μm herausgefunden. Sprays mit sehr kleinen Tropfen im Bereich um 150 μm und kleiner, die vertikal nach unten auf den Benzinbrand gerichtet wurden führten zu keinem Löschen, da ein großer Teil durch die heißen Rauchgase abgelenkt wurden. Bei Sprays die mit dieser Tropfengröße horizontal aufgebracht wurden, wurde dagegen ein Löscherfolg erzielt. Kerosin- und Äthylalkoholbrände konnten durch Wasserspray einfacher gelöscht werden als Benzinbrände. Glut- und Schwelbrände im Innern der Holzstapel konnten nicht nachhaltig gelöscht werden, wodurch es nach Ausschalten der Löschanlage innerhalb weniger Minuten zur

Wiederentzündung kam. Flammenbrände auf dem Holz konnten dagegen schnell gelöscht werden. Dies ist damit zu erklären, daß Glut- und Schwelbrände im Gegensatz zu Flammenbränden auch noch bei niedrigeren Sauerstoffkonzentrationen brennen. Die Ventilationsbedingungen haben einen entscheidenden Einfluß auf das Löschen mit feinverteilten Wasser. Die Wirkung wird erhöht, wenn die Umgebung um den Brand begrenzt wird. Bei Benzinbränden ist es nicht möglich durch Kühlung des Brandstoffes zu löschen, da der Gefrierpunkt von Wasser weit über dem Flamm- bzw. Zündpunkt von Benzin liegt. Bei Löschen von Kerosinbränden wirken sich die erstickende Wirkung von Wasserdampf und die Kühlwirkung in der Verbrennungszone aus. Dämpfe von unverbranntem Kerosin entzündeten sich unmittelbar nach dem Ausschalten der Löschanlage. Bei gelöschten Kerosinbränden wurde zeitweise eine Kerosin/Wasseremulsion unter dem unverbrannten Kerosin beobachtet. Bei Brandstoffen, die in Wasser löslich sind wie z.B. Äthylalkohol kann eine Verdünnung bewirken, daß die Dämpfe nicht mehr entzündbar sind, allerdings ist hier die erstickende Wirkung des Wasserdampfes der entscheidende Löscheffekt.

Radusch /12(1956)/ zeigt den Einfluß der Tropfengröße auf die Verdampfungsgeschwindigkeit und die Wärmeübergangszahl. In der Arbeit werden theoretische Ansätze mit experimentellen Werten verglichen. Die experimentelle Bestimmung der Verdampfungsgeschwindigkeiten wurde in einer Versuchsanordnung ermittelt, bei der der Wassertropfen an einer Kapillare hängt und während der Verdampfung, durch geregelten Nachfluß von Wasser, immer auf gleicher Größe gehalten wird. Die Versuchsreihen wurden so durchgeführt, daß bei jeweils konstantem Tropfendurchmesser und konstanter Lufttemperatur die Zeiten gemessen wurden, in denen eine bestimmte Wassermenge in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit verdampft. Radusch hat bei seinen Untersuchungen herausgefunden, daß bei einem Tropfendurchmesser von 0,35 mm im Hinblick auf Löschwirkung und Löschtechnik ein relativ optimaler Wert für den Wärmeübergang erreicht wird.

Herterich /13(1956)/ berichtet über eine theoretische Studie für die Charakterisierung eines Wasserstaubstrahles (Wassernebel), wobei besonders auf die Definition der für die Kennzeichnung notwendigen Fachausdrücke näher eingegangen wird. Ziel der Arbeit ist es, bei den Untersuchungen von Wasserstaubstrahlen eine Vereinheitlichung zu erzielen, so daß Vergleiche zwischen den einzelnen Untersuchungsergebnissen möglich werden. Dieses bezieht sich z.B. auf Tropfengrößenangaben mit den dazugehörigen

Begriffsbestimmungen wo z.B. nach einer amerikanischen Arbeit nach sehr fein, fein, grob und sehr grob unterschieden wird, allerdings für die einzelnen Grenzen der Bereiche keine Werte angegeben werden. Die in der Praxis gebräuchlichen Wasserstaubstrahldüsen erzeugen keine Tropfen von einheitlicher gleicher Größe, sondern ein Tropfenspektrum, das oft einen erheblichen Streubereich aufweist. Um über den Zerstäubungsgrad einer Düse etwas aussagen zu können, wird vielfach der Begriff "mittlere Tropfengröße" oder "mittlerer Tropfendurchmesser" eingeführt. Der mittlere Tropfendurchmesser wird aus der Tropfenverteilungskurve ermittelt, die Aufschluß über die Zusammensetzung des Tropfenspektrums gibt. Der Begriff "mittlerer Tropfendurchmesser" ist jedoch ohne nähere Definition nicht eindeutig, weil aus dem Tropfenspektrum verschiedene Mittelwerte gebildet werden können, die sich unter Umständen wertmäßig erheblich unterscheiden. Es ist also notwendig, für den "mittleren Tropfendurchmesser" eine einheitliche Festlegung zur eindeutigen Charakterisierung des Zerstäubungsgrades einer Zerstäuberdüse zu treffen, damit Werte verschiedener Düsen ohne weiteres miteinander verglichen werden können. In der Arbeit werden verschiedene Tropfendurchmesser aufgeführt, wobei aber nach den Ausführungen von Herterich für die Löschwirkung des Wasserstaubes neben der Oberfläche auch das auf den Brandherd aufgebrachte Wasservolumen pro Zeiteinheit von entscheidender Bedeutung ist und somit der folgende Durchmesser für ihn am geeignetsten erscheint.

$$D = \frac{\sum i_n \cdot D_n^3}{\sum i_n \cdot D_n^2}$$

Dieser Durchmesser wird in anderen Literaturstellen mit Sauter-Durchmesser D_{32} bezeichnet (siehe auch Tabelle 3). Die Bestimmung der Wurfhöhe und der Wurfweite eines Vollstrahles begegnet schon gewissen Schwierigkeiten, obwohl hier wesentlich einfachere Verhältnisse als beim Staubstrahl vorliegen. Für die Gütebestimmung einer Staubstrahldüse ist jedoch neben der Festlegung des mittleren Tropfendurchmessers auch eine Aussage über die Art der Ausbreitung des zerstäubten Strahles nach dem Verlassen der Zerstäuberdüse notwendig. Herterich führt zur Charakterisierung hierzu einige Kenngrößen wie Abstand der mittleren Austrittsfläche der Staubstrahldüse vom Boden, Strahlwinkel, Düsenneigung, Wasserfluß der Zerstäuberdüse, spezifische Benetzung, Druckhöhe direkt vor der Staubstrahldüse, Wurfweite, Wurfbreite, Meßdauer, Strahlexzentrizität, Wurfbildebene, Wurfbildfläche,

Meßgefäßfläche und Wurfbildfaktor auf. Diese Kenngrößen werden in der Arbeit näher erläutert. Zur Charakterisierung des Wasserstaubstrahles ist es wichtig, die Tropfenverteilung im Strahl zu kennen, an welcher Stelle des Staubstrahles die Tropfenmessung und nach welcher Methode sie erfolgte, da sich das Tropfenbild über dem Flugweg nicht nur hinsichtlich der Dichte, sondern auch der Tropfengröße ständig ändert.

Nach **Farrenkopf /14(1957)/** ist das Wassernebellöschverfahren in Amerika bereits seit dem Jahr 1939 systematisch erforscht worden.

In **/15 (1958)/** wird über den Löscheinsatz mit Hochdruckwassernebel bei Bränden von auslaufenden Treibstoff auf Flughäfen, sowie bei Gras- und Buschbränden berichtet. Die zum Einsatz kommenden Löschanlagen haben folgende Betriebsbedingungen:

- * 40 gpm (151 l/min)
bei 1000 psi (69 bar)
- * 100 gpm (379 l/min)
bei 400 psi (28 bar)

Als Hauptwirkprinzip des Hochdruckwassernebels wird die Kühlwirkung angesehen wobei beim Löschen nur ein geringer Wasserschaden entsteht.

In einer Firmenschrift der **John Bean Division** aus dem Jahre 1958 **/16(1958)/** wird über mobile und stationäre Hochdruck-Wassernebellöschgeräte berichtet. Zum Einsatz kommen Kolben- und Plungerpumpen mit einem Druck von 58,6 bar an der Pumpe und 44,8 bar bis 51,7 bar am Strahlrohr. Als Löscheffekte des Wassernebels werden die Sauerstoffverdrängung, der Kühleffekt und Abtrennen der brennbaren Gase vom Brandstoff erwähnt. Einsatzgebiete werden bei Öllachenbränden, Tankbränden, Bränden in der Landwirtschaft (z.B. Heu), Bränden in elektrischen Anlagen, bei Bränden an Hochspannungsleitungen (15.000 V, Abstand zum Löschen ca. 1,5 m) und bei Fahrzeugbränden gesehen. Über die Tropfengrößen des eingesetzten Wassernebels wird keine Aussage gemacht.

Die **Joint Fire Research Organization** in Boreham Wood **/17.1(1960)/** hat das Löschen von vollentwickelten Zimmerbränden mit Hoch- und Niederdruck-Wassersprays untersucht. Die Düsendrücke lagen im Bereich zwischen 5,5 bar und 34,5 bar bei Durchsätzen zwischen 22,8 l/min und 113,8 l/min. Die mittleren massebezogenen Tropfendurchmesser der Sprays lagen je nach Volumenstrom und Druck zwischen 0,32 mm und 0,94 mm. Die Brände wurden

in einem ausreichend belüfteten Raum mit $49,55 \text{ m}^3$ Volumen (Grundfläche: $4,27 \text{ m} * 4,27 \text{ m}$) durchgeführt. Im Raum befanden sich folgende Ventilationsöffnungen: 2 Fensteröffnungen mit den Abmessungen von je $1,83 \text{ m} * 1,22 \text{ m}$ und 1 Tür mit den Abmessungen $1,83 \text{ m} * 0,91 \text{ m}$. Die Brandlast in Form von Holzverkleidungen und Möbel hatte einen Wärmeinhalt von 590600 kJ/m^2 ($52000 \text{ B.TH.U./ft}^2$). Die Zündung erfolgte mit 2 Zündwannen mit Benzin gleichzeitig an 2 verschiedenen Positionen im Raum. Der Lösch-einsatz erfolgte bei sämtlichen Versuchen 2 Minuten nach dem Flashover durch die Tür durch den jeweils gleichen Feuerwehrmann. Ein bemerkenswertes Ergebnis bei den Versuchen war der geringe Wasserverbrauch von ca. $31,8 \text{ l}$ bis zur Kontrolle und ca. $77,3 \text{ l}$ bis zum vollständigen Löschen des Brandes.

Herterich /17.2(1960)/ gibt in seinem Buch eine Gesamtdarstellung über Wasser als Löschmittel (Eigenschaften, Zerstäubungsarten, Löschemechanismen, Anwendungsgrenzen). Nach Herterich ist es zur einheitlichen Festlegung des Zerstäubungsgrades einer Düse notwendig, für den mittleren Tropfendurchmesser eine Definition zu wählen, die dem Wesen des Sprühstrahles für den Brandschutz am besten gerecht wird. Er zeigt, wie nach verschiedenen Definitionen an Hand eines Tropfenspektrums ermittelten mittleren Tropfendurchmesser voneinander abweichen können. Im aufgeführten Beispiel ergibt sich eine Abweichung von bis zu 35% . Für die Sprühstrahltechnik in der Brandbekämpfung wird der Sauter-Durchmesser als zweckmäßige Definition für den mittleren Tropfendurchmesser angesehen, da für die Löschwirkung des Sprühstrahles neben der Oberfläche auch das dem Brandherd zugeführte Wasservolumen je Zeiteinheit von entscheidender Bedeutung ist. Bezüglich der Löschwirkung von Sprühstrahlen ist festgestellt worden, daß bei festen Brandstoffen (Holzkrippen) der Flammenbrand leicht gelöscht werden kann, daß dagegen die Ablöschung des Glutbrandes schwierig ist. Als günstigste Tropfengröße ergaben sich Werte zwischen $300 \mu\text{m}$ und $400 \mu\text{m}$. Bei horizontaler Anwendung des Sprühstrahles ergaben sich kürzere Zeiten zur Ablöschung des Flammenbrandes als bei der vertikalen Beaufschlagung. Dieses ist auch für flüssige Brandstoffe gültig. Brennbare Flüssigkeiten mit einer Siedetemperatur $< 80^\circ\text{C}$ können bei Anwendung zerstäubten Wassers wirksam nur durch Flammenlöschung (Stickeffekt) und nicht durch Flüssigkeitskühlung gelöscht werden, da die Wassertropfen beim Durchstoßen durch die Flammenzone eine Temperatur bis zu 80°C annehmen. Die Löschung der Flammen ist um so wirksamer, je größer die Wasserdampfbildung in der Flammenzone ist. Voraussetzung hierfür ist, daß der Sprühstrahl

in der Lage ist, den Auftrieb des Brandes zu überwinden. Brenn-
bare Flüssigkeiten mit einer Siedetemperatur $> 80^{\circ}\text{C}$ können mit-
tels Sprühstrahlen sowohl durch Flammenlöschung (Stickeffekt)
als auch durch Flüssigkeitskühlung gelöscht werden. Zur Flüssig-
keitskühlung sind größere Tröpfchen wirksamer als bei der Flam-
menlöschung, da sie die Flammenzone besser durchschlagen und so
bis zur Flüssigkeit vordringen. Als günstigste Tropfengrößen
wurden Werte zwischen $400\ \mu\text{m}$ und $600\ \mu\text{m}$ ermittelt. Bei Gasbrän-
den können mit Sprühstrahlen nur Löscherfolge erzielt werden,
wenn die Gase mit geringer Geschwindigkeit austreten. Bei Brän-
den mit Hochdruckgasen in größerem Umfang ist mit Wasser im
allgemeinen kein Erfolg zu erzielen. Der Verfasser geht weiter-
hin kurz auf Wasserdampf als Löschmittel ein. Wasserdampf-Lösch-
anlagen werden mit Niederdruckdampf betrieben, der über Rohrlei-
tungen den gefährdeten Räumen zugeführt wird. Die Löschwirkung
des Dampfes beruht im wesentlichen auf der Verdrängung der Luft,
in geringem Maße der Kühlung. Wirksam ist Wasserdampf beim Ein-
leiten in geschlossene Räume, sofern Glutbrände (feste Brand-
stoffe) vorhanden sind. Bei Räumen mit Flammenbränden (flüssige
Brandstoffe) ist Dampf weniger wirksam.

2.2 NEUERE LITERATUR BIS ZUR GEGENWART

Schulze /18(1985)/ berichtet über die Wasservernebelungsanlage der Firma Herzog. Hierbei handelt es sich um ortsfest installierte Sprühwasser-Feuerlöschanlagen, die, in Löschsektionen gegliedert, aus offenen Düsen im Dauer- oder Intervallbetrieb Wasser in fein verteilter Form versprühen. Erwähnt werden die Löschmechanismen Kühleffekt, Wasserbenetzung und Herabsetzung der Sauerstoffkonzentration. Diese Kombination führt innerhalb kurzer Zeit zum Verlöschen der Flammen, jedoch nicht zum Löschen des Glutbrandes. Sind die Flammen erloschen, dann bringt eine weitere Wasserzufuhr keinen nennenswerten Löscheffekt, zumindest nicht in einem vertretbaren Verhältnis zur aufgebrauchten Wassermenge. Deshalb wurde das System der Intervallschaltung entwickelt. Durch Versuche wurde nachgewiesen, daß je nach Lagergut eine Intervallzyklus von 1 min löschen - 1 min aussetzen bzw. 1 min löschen - 2 min aussetzen ausreicht, um die Mehrzahl der in Lagern befindlichen Stoffe zu löschen. Bereits nach dem zweiten bis dritten Löschzyklus tritt eine Temperatursenkung auf solche Werte ein, die eine Gefährdung der vom Brand nicht betroffenen Lagerteile und der Baukonstruktion ausschließen. Nach dem dritten bis vierten Löschzyklus hat der Brand meist schon soviel an Energie verloren, daß eine Brandausbreitung in dieser Phase auch ohne Feuerlöschanlage nicht mehr möglich ist. Die Intervallschaltung führt zu einer Wassereinsparung und damit zu einer größeren Versorgungssicherheit der Löschwasserversorgung, zur Verringerung der notwendigen Wasserbevorratung und zur Verminderung des Wasserschadens. Die beschriebene Wasservernebelungsanlage wird durch einen Auslöseschlauch sektionensweise ausgelöst. Auf die Vorteile des Auslöseschlauches gegenüber Sprinklerauslöselementen und Brandmeldern wird eingegangen. Schulze berichtet weiterhin über Brand- und Löschversuche in Lägern, die im Jahr 1982 am Institut für Bergbausicherheit in Freiberg durchgeführt wurden. Nach Schulze sind Wasservernebelungsanlagen vor allem bei solchen Objekten zu empfehlen, bei denen eine räumliche Brandbekämpfung unumgänglich ist. Das sind Regallager, Kabelkanäle, Kabelräume und Kabelschächte. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind u.a. auf Seeschiffen sowie an Bandbrücken in kohlen- und koksstaubgefährdeten Betrieben.

Schulze und Walther /19(1985)/ berichten über die bereits in /18/ aufgeführten Brand- und Löschversuche in Lägern, die im Jahr 1982 am Institut für Bergbausicherheit in Freiberg durchgeführt wurden. In einem 10 m * 20 m großen Versuchsraum

mit 5 m Höhe wurden Versuche an einem Regallager durchgeführt. Die genauen Abmessungen werden angegeben. Als Löschanlage wurde eine Wasservernebelungsanlage der Firma Herzog verwendet. Zur Brandmeldung und zum Auslösen der Löschanlage wurden verschiedene Brandmelder, Auslöseschläuche als auch Sprinkler mit Auslöseelementen verwendet. Als Brandlast wurden Holzpaletten, Kartons und Polystyrolformteile verwendet. In den Versuchen wurde u.a. der Dauerlöschbetrieb als auch das Intervalllöschbetrieb untersucht. Weiterhin wurde ein Vergleichsversuch mit Sprinklern durchgeführt. Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, daß alle untersuchten Sprühsysteme bei automatischer Auslösung der Feuerlöschanlage den Brand auf die Löschsektion begrenzt haben. Bei gleicher Düsen- bzw. Sprinkleranordnung und -anzahl und einer Versuchszeit von 30 min wurden beim Sprinklerversuch über 10,5 m³ Wasser und beim Parallelversuch mit Wasservernebeldüsen im Intervallbetrieb 4 m³ Wasser verbraucht. Beim Sprinklerversuch lag der Abbrand um 30 bis 40 % höher.

Götz, Szimeth, Händler /20(1990)/ berichten über einen Brand- und Löschversuch mit einem Hochdruckstrahlrohr (230 bar) in einem Raum der Größe 2,5 m * 5 m * 2,5 m hoch. An der Stirnseite befand sich ein offener Zugang (0,9 m * 2 m), an der gegenüberliegenden Seite eine Beobachtungsöffnung (0,5 * 0,7 m). Als Brandlast wurden ca. 174 kg Möbel und Einrichtungsgegenstände verwendet. Die Vorbrennzeit betrug ca. 11 Minuten. Nach ca. 4 Minuten war der Brand weitgehend, abgesehen von zahlreichen Glutnestern aufgrund Löschwassermangels, gelöscht. Durch den hohen Druck erhält das Löschwasser eine große spezifische Oberfläche, die sich positiv auf das Wärmebindungsvermögen auswirkt. Als negativ muß jedoch festgestellt werden, daß die durch den Hochdruck erzeugten kleinen Wassertropfen eine zu geringe Masse haben, um befriedigende Wurfweiten zu erzielen. Ein befriedigender Löscherfolg war nur aus einem Abstand von höchstens 20 cm zum brennenden Objekt möglich. Das Ablöschen des Brandobjektes gestaltete sich insgesamt schwieriger, als es bei einem Hochdruckrohr mit 40 bar-Technik (größere Wurfweite und Möglichkeit der Vernebelung) der Fall gewesen wäre.

Kohl, Kretzschmar und Pleß /21(1990)/ berichten über das Wasseraerosol-Löschverfahren. Das Verfahren beruht auf der geeigneten Kombination des Schubstrahles einer Flugzeugturbine mit Wasserstrahlen. Der Schubstrahl der Flugzeugturbine kann durch einen anderen Strahl mit dem notwendigen Massenstrom ersetzt werden. Das Wasseraerosol-Löschverfahren kann bei folgenden

Einsatzgebieten angewendet werden:

- Brandbekämpfung von Freistrahlfammen großer Dimension in Bodennähe und in großen Höhen (z.B. Erdgassondenbrände, Wasserstoffflammen mit 25 m Höhe)
- Kühlung extrem großer Flächen zum Schutz vor Wärmeübertragung und damit zur Verhinderung der Brandausbreitung
- Niederschlagung und Verdünnung von brennbaren oder toxischen Gasen
- Benetzung bei der Bekämpfung von großen kontaminierten Flächen
- Waldbrandbekämpfung

Ryderman /22(1993)/ berichtet, daß Wassernebel zwar als wirksames Löschmittel schon seit langer Zeit bekannt ist, jedoch erst durch den Halonausstieg nach dem Montreal Protokoll an Bedeutung erlangte. Einen weiteren Schub erhielten Wassernebellöschanlagen dadurch, daß die International Maritime Organization (IMO) 1996 beschlossen hatte, daß neue Passagierschiffe mit Wasserlöschanlagen ausgerüstet werden müssen.

Mawhinney /23(1993)/ beschreibt Auslegungskriterien für Wassernebellöschanlagen in Maschinenräumen von Schiffen. Diese Kriterien basieren auf Versuchsergebnissen die vom National Fire Laboratory in Kanada im Auftrag der kanadischen Marine durchgeführt wurden. Der Autor geht auf die Löschmechanismen des Wassernebels Wärmeentzug, Sauerstoffverdrängung und Abschirmung der brennenden und nichtbrennenden Oberflächen von der Wärmestrahlung ein. Nach Mawhinney wird die Löschwirksamkeit des Wassernebels durch die Tropfengrößenverteilung, die Volumenstromdichte, den Impuls des Sprühnebels und durch Löschmittelzusätze bestimmt. Es wird festgestellt, daß Sprühnebel, deren Verteilungskurve unterhalb der 400 μm Marke liegt ($D_{V0.9} < 400 \mu\text{m}$) für Wassernebellöschanlagen geeignet sind. Zur Charakterisierung des Sprühnebels sind mindestens die drei volumetrischen Durchmesser $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$ und $D_{V0.9}$ erforderlich (s.a. Tabelle 3). Diese Werte sollen in 1 m Entfernung von der Düse auf der Sprühkegelachse bei Betriebsdruck gemessen werden. Weitere Kenngrößen sind der Sprühwinkel, der Sprühkegeldurchmesser in 1 m Entfernung von der Düse, die Sprühkegelquerschnittsfläche in 1 m Entfernung von der Düse und der Volumenstrom als Funktion des Druckes. Für das Löschen eines Brandes ist es wichtig, daß der Sprühnebel genügend Energie dem Brand selbst, den Wänden und den Umgebungsbauteilen entzieht. Hierfür ist die Kenntnis der normierten Volumenstromdichte = Volumenstrom (l/min) bezogen auf

die Fläche (m^2) in 1 m Abstand (horizontal oder vertikal) von der Düse ($\Rightarrow [l/min/m^2]$) erforderlich. Zur Charakterisierung des Sprühnebelimpulses wird die Düse in 1,2 m Höhe mit horizontaler Sprührichtung angeordnet. Der Hauptteil der Tropfen bewegt sich auf parabolischen Bahnkurven zum Boden. Hierbei wird nun die größte auf den Boden projizierte Entfernung der Tropfen von der Düse gemessen. Bezüglich der Druckstufen unterteilt Mawhinney in

Niederdruck (1 bar bis 17 bar)

Mitteldruck (17 bar bis 34 bar)

Hochdruck (34 bar bis 280 bar)

Er geht weiterhin auf die Vor- und Nachteile von Niederdruck-, Hochdruck- und Zweistoffsystemen ein. Die Entscheidung, welches System zum Einsatz kommt, hängt von brandschutztechnischen und ökonomischen Gesichtspunkten ab. Es wurde herausgefunden, daß zwar der Volumenstrom durch eine Wassernebeldüse geringer als der bei einem Standardsprinkler ist, daß aber durch den Einsatz von vielen Wassernebeldüsen bei großen Räumen der Wasserverbrauch unwirtschaftlich wird. Für den Einsatz bei der Marine wurde daher das Schutzvolumen auf $200 m^3$ für eine Totalflutung begrenzt. Eine Alternative ist die Unterteilung in Löschsektionen, allerdings ist hierfür aber eine komplizierte Brandmeldeanlage erforderlich. In den Untersuchungen wurde weiterhin festgestellt, daß durch den Einsatz von Meerwasser (2,5 Gew. % NaCl) Brände von Dieselöl in Wannen 40 bis 50 % schneller gelöscht wurden als mit Frischwasser.

Arvidson /24(1993)/ berichtet über Brand- und Löschversuche in $12 m^2$ großen Schiffskabinen mit Bettaufbauten. Es wurden hierbei verschiedene Wassernebeldüsen bei Betriebsdrücken zwischen 4 bar und 130 bar bei einem konstanten Volumenstrom von 10,1 l/min eingesetzt. Die Tropfendurchmesser der Düsen lagen zwischen $205 \mu m$ und $303 \mu m$ (jeweils $D_{V0.9}$), zwischen $122 \mu m$ und $177 \mu m$ (jeweils $D_{V0.5}$) und zwischen $72 \mu m$ und $104 \mu m$ (jeweils $D_{V0.1}$). Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß durch eine Erhöhung des Druckes der maximale Wärmestrom des Brandes reduziert wurde, wenn der Brandherd von den Düsen weiter entfernt lag oder der Brand von dem oberen Bett verdeckt wurde. Wenn der Brandherd näher bei den Düsen war und nicht abgedeckt wurde, war der Löscherfolg mit niedrigen Drücken vergleichbar bzw. geringfügig besser. Dieses wird durch den größeren Sprühkegel der Niederdruckdüsen und dem damit verbundenen stärkeren Befeuchten der Betten erklärt. Bei den Versuchen betrug der maximale Wärmestrom ca. 100 kW bis 750 kW. Neben den Schiffskabinen wurden 2 Versuche mit Holzkrippen, Möbelattrappen und brennbaren Wandverklei-

dungen untersucht. Hierbei brannten die Holzkrippen vollständig und die Möbelattrappen fast vollständig ab. Die Wandverkleidung wurde geringfügig beschädigt.

Cousin /25(1993)/ berichtet über drei Untersuchungen an der Fire Research Station in Borehamwood. Die eine Untersuchung wurde im Auftrag der zivilen Luftfahrtbehörde durchgeführt und befaßt sich mit Sprühwasserlöschsystemen für den Kabinenbereich von Passagierflugzeugen. Diese wurden an einem Versuchsstand ähnlich dem Rumpf einer Boeing 707 durchgeführt. Die verwendeten Düsen hatten einen Durchsatz von ca. 1 l/min und 0,7 l/min bei einem Betriebsdruck von 3 bar. Die zweite Untersuchung befaßt sich mit dem Gebrauch von feinem Wassersprühnebel als Halon-Ersatz bei geschlossenen Räumen z.B. Computer-Schränken. Der Versuchsraum hatte ein Volumen von 1 m³. Es wurden sowohl Einstoff- als auch Zweistoffdüsen eingesetzt. Bei den Einstoffdüsen wurde der Druck zwischen 3 bar und 9 bar variiert. Bei 3 bar wurden mittlere volumetrischer Tropfendurchmesser von 200 µm bis 300 µm gemessen. Der Durchsatz lag bei 0,24 l/min bis 0,75 l/min bei den Einstoffdüsen und 0,75 l/min bei den Zweistoffdüsen. Bei den Einstoffdüsen wurden bei 6 bar und 9 bar bessere Löschergebnisse erzielt als bei 3 bar. Die Zweistoffdüsen wurden bei verschiedenen Wasser- und Luftdrücken betrieben, u.a. bei einem Luftdruck von 8 bar. Die Zweistoffdüsen ergaben ein besseres Löschergebnis als die Einstoffdüsen. Durch Hindernisse für den Sprühnebel wurden die Löschergebnisse verschlechtert. Die dritte Studie befaßt sich mit den Einflüssen von Düsentyp, Ventilation, Brandgröße, Tropfengröße und Tropfengeschwindigkeit auf die Löschwirksamkeit bei Bränden in großen Räumen. Der Versuchsraum hat die Abmessungen 3,7 m * 3,7 m * 2,4 m Höhe. Im Raum befinden sich 2 Ventilationsöffnungen mit je 2 m² Fläche. Es wurden sowohl Ein- als auch Zweistoffdüsen (Luft/Wasser) verwendet. Der maximale Betriebsdruck der Düsen betrug 10 bar. Als Brandherde wurden Kerosinlachenbrände mit 100 kW, 220 kW und 500 kW bei 60 s Vorbrennzeit bis zum Löscheinsatz verwendet. Bei den Versuchen zeigten die Zweistoffdüsen den besten Löscherfolg. Die Zweistoffdüsen zeigten jedoch eine vorübergehende Vergrößerung der Flamme und zwar besonders bei höherem Druck. Bei Einstoffdüsen war dieser Effekt auch vorhanden, jedoch in einem geringeren Ausmaß. Bei den untersuchten verschiedenen Ventilationsbedingungen konnte kein kritischer Einfluß festgestellt werden. Bei den Versuchen stellte sich der Düsentyp mit den kleinsten Tropfen und den größten Tropfengeschwindigkeiten als am erfolgreichsten heraus. Dies war der Fall bei einer Zweistoffdüse mit 3,4 bar

Luftdruck und 3 bar Wasserdruck ($D_{V0.9} < 255 \mu\text{m}$, $D_{V0.1} < 99 \mu\text{m}$,
mittlere Tropfengeschwindigkeit: 3,03 m/s)

Bill und Croce /26(1993)/ berichten zunächst über frühere Versuche mit Wassernebel. In den 40iger Jahren untersuchte die Factory Mutual Engineering Division den Löscheinsatz bei Benzinbränden mit einer Gesamtwärmefreisetzung von 19 MW. Es wurden 4 Sprühdüsen (9,5 mm) bei einem Betriebsdruck 6,89 bar und einem Volumenstrom von 439 l/min eingesetzt und mit Standard-Sprinklern mit einem Volumenstrom von 908 l/min verglichen. Die höhere Löschwirksamkeit der Sprühdüsen wird durch das bessere Wärmeabsorptionsvermögen der feinen Tropfen und das Einsaugen der Tropfen durch den Brand erklärt. In den 60iger Jahren führte die FMRC-Prüfstelle Versuche mit 1,2 m und 2,4 m hohen Palettenlagern in einem Raum mit 24 m * 18 m * 5 m durch. Es wurden hier ebenfalls die Löschwirksamkeit von 9,5 mm Sprühdüsen (Betriebsdruck: 6,89 bar) im Vergleich zu Standard-Sprinklern untersucht. Es wurden sowohl Düsen mit großem Kegelwinkel (180°) als auch mit kleinem Kegelwinkel (65°) durchgeführt. Die Ergebnisse waren nicht überzeugend, jedoch wurden folgende Beobachtungen gemacht:

- durch die feinen Tropfen wird mehr Wärme absorbiert
- Tropfen der Düse mit dem großen Kegelwinkel werden nur wenig in den Brand eingesaugt
- die Düse mit kleinem Kegelwinkel (größerer Impuls der Tropfen) löscht den Brand besser als mit dem großen Kegelwinkel

Im Jahre 1975 wurde die Kühlwirkung von Sprinklern mit kleinen Öffnungen bei Hexanlachenbränden (0,9 m Durchmesser) in einem Raum mit den Abmessungen 3 m * 3,6 m * 2,4 m untersucht. Durch den Einsatz verschiedener Düsendurchmesser zwischen 4,2 mm und 11,1 mm wurde festgestellt, daß mit abnehmender mittlerer Tropfengröße bei konstantem Volumenstrom die Wärmefreisetzung abnimmt. Gegenwärtige Arbeitsgebiete sind die Löschmechanismen bei Wassernebel, der Schutz von Gasturbinen, der Schutz von Telefonzentralen, Einsatz von Wassernebel in Schiffen (Kabinen, Korridore, Versammlungsstätten (Restaurants, Theater, Kasinos u.s.w.), Maschinenräume)).

Holmstedt /27(1993)/ erwähnt zunächst die Anforderungen an Löschmittel und Löschanlagen in Bezug auf den Menschen, den Brand und die Umwelt. Er kommt zu den Schlußfolgerungen, daß Wassernebel nur dann als Löschmittel für eine Totalflutung, wie z.B. Löschgase eingesetzt werden kann, wenn der massenbezogene mittlere Tropfendurchmesser kleiner $20 \mu\text{m}$ ist. Ein Wassernebel mit diesen Tropfen hat eine große Löscheffektivität, wobei beim

Einsatz von Halon 1301 ungefähr gewichtsmäßig die doppelte Menge benötigt werden würde. Wassernebel dieser Größe hat jedoch nur eine geringe Fähigkeit, alle Bereiche der Verbrennungszone zu erreichen. Wassernebel hat seinen Einsatzbereich dort wo weder gasförmige Löschmittel noch konventionelle Sprinkler zufriedenstellend arbeiten.

Wighus, Aune, Drangsholt, Stensaas /28(1993)/ berichten über drei Versuchsserien bei SINTEF NBL in Norwegen. In der ersten Versuchsserie wurden verschiedene Zweistoffdüsen (Luft/Wasser, Betriebsdruck 5 bar, 5 l/min (Mittl. volumenbezogener Tropfendurchmesser: 125 μm - 240 μm), 10 l/min (197 μm - 220 μm), 20 l/min (233 μm - 253 μm)) an Gasbränden (Wärmefreisetzung: 1 MW), Flüssigkeitssprühbränden (1 MW), Lachenbränden (0,6 m²) und Bränden an flüssigkeitsgetränkten Isolierstoffen (Dicke: 25 mm) bei verschiedenen Ventilationsbedingungen getestet. Diese Versuche wurden in einem 30 m³ großen Raum durchgeführt. In der zweiten Versuchsserie wurden Brand- und Löschversuche in einer 70 m³ großen Turbinenhaube durchgeführt. Die eingesetzten Zweistoffdüsen hatten folgende Betriebsparameter: 5 l/min - 12 l/min pro Düse, Gesamtvolumenstrom: 15,4 l/min bis 135,6 l/min, Anzahl der Düsen: 2 - 12, Luftdruck 3 bar bis 5 bar, Wasserdruck 1,8 bar bis 7,4 bar, mittlerer volumetrischer Durchmesser: 166 μm bis 220 μm). In der dritten Versuchsserie wurde in einem 140 m³ großen Raum ein Generatorenraum simuliert und die Löschwirksamkeit verschiedener Anzahlen und Typen von Wassernebeldüsen bei verschiedenen Diesellachen- und Dieselsprühbränden. Die Autoren gehen weiterhin auf die Löschmechanismen bei Öl- und Gasbränden ein. Zum einen spielt die Flammenlöschung eine Rolle, zum anderen die Inertisierung der Atmosphäre im Raum. Ein Löscherfolg wird erzielt, wenn in der Verbrennungszone eine kritische Kombination aus Temperatur und Sauerstoffgehalt erreicht wird. Bei Flüssigkeits- und Gasbränden reicht es normalerweise aus, diese kritische Kombination für eine kurze Zeit aufrechtzuerhalten. Wenn der Brandstoff während dieses instationären Löschezustandes von allen Zündquellen ferngehalten wird, wird ein dauerhafter Löschezustand erzielt. Bei der Inertisierung eines Raumes ist es erforderlich, daß der gesamte Raum diese kritische Kombination aus Raumtemperatur und Sauerstoffkonzentration aufweist. Dieser inerte Zustand muß solange aufrechterhalten bleiben, solange die Gefahr einer Rückzündung besteht. Es wurde herausgefunden, daß bei den Versuchen in der zweiten Versuchsserie (Turbinenhaube) die kritische Sauerstoffkonzentration zum Löschen 15 % - 18 % beträgt, d.h. daß ca. 15 % - 30 % des ur-

sprünglichen Sauerstoffgehaltes durch andere inerte Gase ersetzt wird. Die Summe der hauptsächlich inertisierenden Komponenten CO_2 und Wasserdampf ist von der Brandgröße, dem Raumvolumen und den Ventilationsbedingungen abhängig. Ein großer Brand wird sehr schnell den verfügbaren Sauerstoff verbrauchen und ohne Sauerstoffzufuhr zum Selbstverlöschen führen. Bei mittlerer Brandgröße und Temperaturen von über 100°C im Brandraum werden die heißen Rauchgase durch die kleinen Tropfen gekühlt und Dampf gebildet. Dieser Dampf führt zusammen mit dem CO_2 aus der Verbrennung zu einer Inertisierung und zum Löscherfolg. Die Sauerstoffkonzentration liegt hierbei über dem Sauerstoffgehalt der Selbstverlöschung ohne Wasserspray. Bei einem kleinen Brand in einem großen Raum wird der Brand selbst bei dauerndem Löscheintritt nicht durch Inertisierung gelöscht. Die Temperaturen liegen unter 100°C , wodurch nur eine geringe Wasserdampfmenge produziert wird. Der inertisierende Effekt wird in diesem Temperaturbereich durch Leckageöffnungen und Kondensation von Wasserdampf reduziert. Kleine Brände sind durch Wassernebel schlecht zu löschen, ausgenommen wenn dieser direkt auf den Brandherd trifft. Es wurde festgestellt, daß eine Wassernebellöschanlage dann als Totalflutungs-Löschanlage fungieren kann, wenn der Brand groß im Vergleich zum Raum ist. Bei früheren SINTEF Versuchen im gleichen 30 m^3 großen Versuchsraum (Raumhöhe: ca. 4 m) wurde herausgefunden, daß zum Löschen eines 1 MW großen Feuers eines Propanbrenners bei einem mittleren Tropfendurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ eine minimale Löschwassermenge von 8 - 10 l/min erforderlich ist. Bei größeren Tropfendurchmessern ist eine größere Wassermenge erforderlich. Bei ca. $1200\ \mu\text{m}$ wurden ca. 40 l/min benötigt. Bei den Brand- und Löschversuchen an Turbinenhauben wurde festgestellt, daß eine eingeschränkte Ventilation zum Selbstverlöschen aufgrund Sauerstoffmangels führen kann. Zu Beginn des Löschvorganges entsteht ein kurzer Unterdruck in der Turbinenhaube was zu einem Ansaugen von Frischluft führt. Im weiteren Verlauf führt die Verdampfung des Löschwassers zu einer Sauerstoffverdrängung und zur Erzeugung eines Überdruckes, der die frische Luft davon abhält, in den Raum einzudringen. Es hat sich weiterhin gezeigt, daß die Löschdauer und die Löschintervalle für den Löscherfolg von Bedeutung sind. Die optimale Löschdauer hängt vom Raumvolumen ab und nimmt mit der Raumgröße zu. Ist bei noch nicht vollständig gelöschtem Brand die Löschpause zwischen zwei Löschintervallen zu klein, hat das Feuer nicht genügend Zeit, die Wärme freizusetzen, die für die Verdampfung von mehr Wasser und damit zur Inertisierung des Raumes erforderlich. Bei den kleinen Bränden wurde zum Beispiel folgen-

der Löscheinsatz erfolgreich durchgeführt: 120 s löschen, 120 s Pause, 120 s löschen. Einen weiteren Einfluß auf den Löscherfolg haben die Art und Position des Brandherdes. Ein Sprühbrand erzeugt eine stärkere Turbulenz und Vermischung in einem Raum als ein Lachenbrand oder ein Brand an Isolierstoffen. Diese Vorgänge fördern eine rasche Brandausbreitung. Die Lage des Brandes zu den Sprühdüsen, Wänden und Objekten beeinflussen die Wechselwirkung zwischen den Wassertropfen und der Flammenzone. Dies wird dann kritisch, wenn das Wasser auf kalte Oberflächen trifft, bevor eine Wechselwirkung zwischen den Flammen stattfindet. Einen weiteren Einfluß haben die Sprühdüsen mit den Einflußgrößen Tropfengeschwindigkeit, Sprührichtung und Impuls. Geringe Austrittsgeschwindigkeiten der Wassertropfen führen zu einer geringeren Vermischung als hohe Geschwindigkeiten. Bei den durchgeführten Versuchen wurde festgestellt, daß bei den großen Bränden im 70 m^3 - Versuchsraum $0,06 \text{ l/m}^3$ - $0,07 \text{ l/m}^3$ und bei den kleinen Bränden $0,4 \text{ l/m}^3$ - $0,6 \text{ l/m}^3$ als minimale Löschwassermenge benötigt wurden. Bei geschlossenen Lüftungsklappen wurde durch den Brand ein Überdruck von ca. 50 Pa im Raum gemessen, kurz nach Löschbeginn wurde ein Unterdruck von 250 Pa bis 350 Pa gemessen. Danach gleicht sich der Druck dem Umgebungsdruck an.

Simpson und Smith /29(1993)/ haben aufgrund der Bedenken gegenüber dem Einsatz von Löschwasser bei elektrischen Anlagen aufgrund der Leitfähigkeit den Einsatz von Wassernebel bei Schaltanlagen in der Telekommunikation untersucht, wobei diese mit 50 V/10 A Gleichstrom betrieben wurden. Es wurden sowohl Zweistoffdüsen (Luft/Wasser) als auch Einstoff-Hochdruckdüsen im Druckbereich von 2 bar bis 100 bar verwendet. Ohne Löschanlage wurden 10 Minuten nach der Zündung Temperaturen von 1000°C mit 2 m bis 4 m hohen Flammen erreicht. Hierbei ergaben sich schwere Schäden an der Anlage. Mit der Löschanlage war der Brand in ca. 2 s mit weniger als 1 l Wasser gelöscht. Es ergaben sich keine Unterschiede zwischen Hochdruck-Einstoffdüsen und Zweistoffdüsen, jedoch ergibt sich bei letzteren ein wesentlich höherer anlagentechnischer Aufwand aufgrund der Wasser- und Gasversorgung. Durch den Einsatz der Löschanlage wurde die Telekommunikationsanlage nicht beschädigt und war nach dem Trocknen wieder einsatzfähig. In weiteren Untersuchungen wurde herausgefunden, daß nur 5 % der Schaltschränke die ursprüngliche Konfiguration von elektrischen Bauteilen aus der Planungsphase aufweisen. Gleichzeitig können zusätzliche Luftströmungen durch Zwangsbelüftung auftreten, die das Löschen beeinflussen. Hierfür wurde ein vollautomatisches Brandmelde- und Löschesystem entwickelt.

Tuomissaari /30(1993)/ führte Löschversuche in einem Raum mit einer Ventilationsöffnung nach dem Flashover durch. Als Brandlast wurden Holzkrippen verwendet. Die Wärmefreisetzung betrug zu diesem Zeitpunkt 3,5 MW bis 4,5 MW. Zum Löschen wurden 4 verschiedene handelsübliche Strahlrohrdüsen (3 Automatikdüsen, 1 konventionelle Düse) und eine bisher noch nicht verwendete Hochdruckdüse verwendet. Bei den handelsüblichen Düsen betrug der Tropfendurchmesser zwischen 0,2 mm und 0,4 mm, bei den Wassernebeldüsen zwischen 0,1 mm und 0,2 mm. Die Versuchsergebnisse wurden mit dem Computersimulationsmodell Fire Demand (FD) verglichen. Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, daß mit den Hochdruckdüsen zwar ein Gasbrand mit der Hälfte der Löschwassermenge von handelsüblichen Düsen gelöscht werden konnte, jedoch Holzkrippenbrände nicht vollständig abgelöscht werden konnten. Das Computermodell versagte vollständig bei der Simulation der Nebeldüsen, obwohl bei handelsüblichen Düsen gute Berechnungsergebnisse erzielt wurden.

Jacobsen /31(1993)/ befaßt sich mit dem Einsatz von Wassernebellöschanlagen auf Schiffen, wie der Einsatz in Aufenthaltsräumen, Maschinen- und Pumpenräumen im Frachtbereich.

Bill /32(1993)/ untersucht die brandschutztechnischen Erfordernisse beim Einsatz von Wassernebel auf Passagierschiffen insbesondere bei Aufenthaltsräumen, Schlaf- und Diensträumen. Er geht hier u.a. auf die Löschmechanismen, durchgeführte Brandversuche und Abnahmeversuche der IMO für diese Löschanlagen ein.

Nach Klein /33(1993/ ist die Löschwirkung von Wassernebellöschanlagen auf keinen Fall mit der von Gas-Löschanlagen zu vergleichen. Bei CO₂-, Inergen- und Argon-Löschanlagen wird in gefluteten Räumen

- die Löschmittelkonzentration in kurzer Zeit, ca. 1 Minute, aufgebaut,
- die Raumluft wird gut durchwirbelt und durchmischt
- die Sauerstoffkonzentration sinkt nahezu homogen im ganzen Raum unter z.B. 14 %
- der löschfähige Zustand bleibt über längere Zeit, z.B. 20 Minuten erhalten
- auch in verdeckten Bereichen fällt die Sauerstoffkonzentration, so daß der Brand erlischt
- auch Glutbrände können durch ausreichend lange Sauerstoffreduktion beherrscht werden

Bei Gas-Löschanlagen ist der löschfähige Zustand zeitlich

stabil. Bei Wassernebellöschanlagen ist der löschtfähige Zustand flüchtig. Stellt man die Wassernebellöschanlage ab, ist der löschtfähige Zustand sekundenschnell verschwunden. Der löschtfähige Zustand kann nur im Sprühkegelbereich an der Düse erzeugt werden, nicht aber im ganzen Raum. Dies ist nur dann möglich, wenn die Düsenwirkbereiche ausreichend überlappen und die Wirkweite der Düsen ausreicht, den Raum zu durchdringen. Nach Klein /33/ setzen die Wassertropfen und der entstehende Wasserdampf den Sauerstoffgehalt und die Temperatur in der Verbrennungszone herab, so daß die Verbrennung unterbunden wird. Je feiner die Wassertropfen sind, um so besser ist der Impulsaustausch mit der umgebenden Luft; dadurch werden sehr feine Tropfen z.B. auf weniger als 1 m Distanz völlig abgebremst bzw. sie beschleunigen die umgebende Luft so, daß der aus einem Luft/Wassertropfengemisch bestehende Strahlkegel bald keine löschtwirksame Zusammensetzung mehr aufweist, sondern durch die mitgerissene Luft das Feuer noch anfacht. Versuche bei Feuerwehren haben ergeben, daß bei Einsatz der 230 bar Technik die löschtwirksame Distanz nur bis 1,5 m von der Düse reichte. Ein Löschangriff bei Zimmerbränden war damit nur möglich, wenn die Düse auf der Lanze platziert wurde. Zuviel angesaugte Luft fachte das Feuer noch an und die Feuerwehrleute waren durch rückströmenden Dampf und Rauchgase gefährdet. Diese Aussagen können durch Versuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bestätigt werden.

Bei Strahlrohren mit niedrigerem Druck (40 bar an der Pumpe, ca. 15 bar am Strahlrohr) kann durch einen gewissen Anteil größerer Tropfen eine Bahn in die Umgebungsluft geschossen werden, feine Tropfen folgen dieser Bahn. Hierdurch wird eine Wirkdistanz von ca. 5 m erreicht. Weiterhin berichtet Klein /33/ über den Einsatz einer Wassernebellöschanlage vom System Herzog (Niederdruck) bei Kabelkanälen. Bei dieser Anlage wurde nachgewiesen, daß ein Löscherfolg mit der Hälfte der vom VdS in den Richtlinien für Sprühwasserlöschanlagen geforderten Wasserbeaufschlagung gelöscht werden konnte.

Covelli /34(1993)/ hat die thermodynamischen Voraussetzungen untersucht, die ein Wassernebel erfüllen muß, um ein Feuer zu löschen. Bei der Feinzerstäubung von Wasser können zwei Effekte zu einer Brandlöschung führen:

- Kühlwirkung (Wärmebindung)
- Verdrängung von Sauerstoff (Inertisierung)

Gemäß den VdS-Richtlinien sind z.B. zur Löschung von Bränden in elektrischen Schalträumen oder für elektrische Anlagen im Löschtbereich Sauerstoffkonzentrationen unter 11 Vol-% erforderlich.

Falls beim Einsatz von Wassernebel die Verminderung des O_2 -Gehaltes eine Löschung bewirken soll, so muß soviel Wasser verdampfen, daß der Sauerstoffgehalt in der Luft um den Brandherd (elektrische Einrichtungen) ebenfalls im Bereich von 11 Vol-% liegt. In seinen Berechnungen kommt Covelli zu dem Schluß, daß durch Feinzerstäubung von Wasser der Brand aufgrund der Sauerstoffverdrängung (Inertisierung) nur dann gelöscht wird, wenn die Zuluft bei $85^\circ C$ mit 100 % relativer Feuchtigkeit gesättigt wird. Dieses Luft/Dampfgemisch enthält pro m^3 Gasgemisch etwa 150 g Wasserdampf und speichert ca. 340 kJ Wärme. Diese Bedingungen an die angeströmte Luft zu einem Feuer sind nur in abgeschlossenen Löschbereichen möglich, die keine Frischluft zulassen. Es muß weiterhin ein genügend großer Energiefluß vom Brandherd zu den verdunstenden oder verdampfenden Tropfen vorliegen. Unter diesen Voraussetzungen findet jedoch eine O_2 -Verarmung auch ohne Dampfverdrängung statt. Die Kühlwirkung von Wassertropfen wird beim Durchdringen der aufsteigenden Brandgase im freien Fall und durch Mitschleppen in der anströmenden Luft zum Brandherd erreicht. Covelli betrachtet nur das Mitschleppen von Tröpfchen in der Zuluft zum Brandherd. Er nimmt hierbei an, daß das Feuer erlischt, falls die Kühlwirkung der zuströmenden Luft und der mitgeschleppten Tropfen der Abbrandleistung entspricht. Zur Ermittlung der notwendigen Wassermenge benützt er hierfür ein Brandsimulationsmodell des VdS. Dieses Modell berechnet mit Hilfe einer Impulsgleichung und einem Freistrahlmmodell aufgrund der Elementaranalyse des Brandgutes die folgenden thermodynamischen Größen Abbrandrate, Abbrandleistung, Luftbedarf, Temperatur in der Reaktionszone und Aufstiegsgeschwindigkeit der Brandgase. Covelli kommt in seinen Untersuchungen zu weiteren Schlußfolgerungen: Falls die in der Zuluft zum Brandherd mitgeschleppten Tröpfchen eine Löschung bewirken sollten, sind Tropfengehalte über 170 g/m^3 Luft notwendig. Bei Wärmefreisetzungen größer 1 MW sind über 350 g/m^3 Luft erforderlich. Ein Wassernebel, der über mehrere Sekunden stabil bleibt, hat folgende Eigenschaften: Nebeltröpfchen, die von der Zuluft mitgeschleppt werden, sind kleiner als $50 \mu m$. Der maximale Tropfengehalt eines quasistabilen Nebels, liegt im Bereich von 100 g/m^3 . Stabile Wassernebel, wie sie in der Natur in Form von Wolken vorkommen, weisen Tropfengehalte um 3 g/m^3 auf. Bei größeren Tropfendichten agglomerieren die luftgetragenen Tröpfchen zu größeren Tropfen und die Wolke regnet aus. Aufgrund der Aerosolphysik ist es in den meisten technischen Anwendungen unmöglich, quasistabile Nebel zu erzeugen, die über mehrere Sekunden mehr als 100 g/m^3 enthalten. Dies wurde in Untersuchungen, die beim CSNI Workshop für nuklea-

re Sicherheitsforschung 1990 vorgestellt wurden festgestellt. Ein mit Düsen erzeugter Nebel, der mit der Zuluft in die Brandreaktionszone geschleppt wird, vermag einen Brand nicht zu löschen. Weiter wurde die Löschwirkung von Wassersprays untersucht, bei denen die Tropfen die aufsteigenden Brandgase durchdringen und den Brandherd erreichen können. (s. auch Kunkelmann /38/). Er kommt hierbei u.a. zu den Ergebnissen, daß der maximale Abstand zwischen Düse und Brandebene von der Tropfengröße beherrscht wird. Die Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse bringt hierbei weniger Vorteile als eine große Tropfenmasse. Der Düsendurchsatz und der Sprühwinkel müssen auf die Heizleistung des Brandes abgestimmt sein. Im Vergleich mit Halon als Löschmittel kommt Covelli zu folgenden weiteren Erkenntnissen: Ein Wassernebel wirkt nicht ähnlich wie ein Löschgas. Ein Wassernebel löscht nicht "um die Ecke".

Eggenberger /35(1994)/ teilt Wassernebellöschanlagen in Niederdruckanlagen bis max. 40 bar und Hochdruckanlagen von 40 bar - 300 bar ein. Weiterhin geht er auf Zweistoffdüsen im Niederdruckbereich ein. Bei letzteren liegt der Tropfendurchmesser je nach Düsentyp zwischen 10 μm und 200 μm bei einem Wasserdruck von 2 bar bis 5 bar (2,5 l/min - 10 l/min) und einem Gasdruck von 3 bar bis 7 bar (0,15 l/min - 5 l/min). Bei den einzelnen Anlagentypen geht Eggenberger auf die Vor- und Nachteile bzgl. Anlagentechnik, Investitionskosten etc. ein. Als Löscheffekte werden der Kühleffekt, Inertisierung- oder Stickeffekt, der Verdünnungseffekt und der katalytische Effekt durch Erhöhung der Löschmittelkonzentration in der Flammenmischzone aufgeführt. Es wird erwähnt, daß für den Menschen bei einem mit Wassernebel gefüllten Raum keine Erstickungsgefahr besteht, daß jedoch in unmittelbarer Umgebung des Brandherdes Verbrühungsgefahr aufgrund der schlagartigen Dampfbildung besteht.

Mawhinney /36(1994)/ untersucht Wassernebellöschanlagen für Telekommunikations- und Versorgungsbetriebe. Der Einsatz von Halon im Brandschutzbereich macht eine forcierte Suche nach alternativen Ersatzstoffen notwendig. Im Beitrag werden Untersuchungen hinsichtlich der Anwendbarkeit von Wassernebel bei der Bekämpfung von Bränden in Telekommunikationsbetrieben und Versorgungsbetrieben beschrieben. Durch den Wassernebel entstehen zwar keine irreversiblen Schäden, jedoch sollte durch Einteilung in Löschsektionen und möglichst genaue Brandlokalisierung und -meldung nicht mehr als zur Brandbekämpfung notwendig benäht werden. Bei den Untersuchungen treten folgende Fragestellungen

auf:

- Sollen die Anlagen vor dem Löscheinsatz stromlos gemacht werden ?
- Reicht gefiltertes Löschwasser aus oder muß demineralisiertes verwendet werden ?
- Führt der Chlorwasserstoff aus brennenden Kunststoffen durch Lösung im Wasser zu erhöhter Korrosion?

Es werden Voruntersuchungen bezüglich der Einsatzfähigkeit von Wassernebel zum Löschen eines in Brand geratenen Schaltschranks beschrieben. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, daß der Löschvorgang am effektivsten in geschlossenen Schaltschränken mit geringer Ventilation ist. Bei dichtgepackten Schaltschränken führt der Wassernebel nur zu einer Brandkontrolle und nicht zum Löschen. Wassernebel arbeitet am effektivsten wenn dieser innerhalb des Schaltschranks und nicht durch Einhüllen des Schaltschranks von außen zum Einsatz kommt.

Nach **Portz /37(1994)/** verdampfen die kleineren Tropfen eines Wassernebels in der Flammenzone eines Brandes schlagartig, größere Tropfen verdampfen zum Teil. Dadurch werden in der Flammenzone drei Löscheffekte wirksam:

- Kühlung durch Erwärmen und Verdampfen der Wassertropfen
- Verdünnen des Luftsauerstoffes
- Heterogene Inhibition (Wandeffekt)

Portz beschreibt das Verlöschen eines Brandes an Hand einem Modell zur Beschreibung der Wärmebilanz einer exothermen, heterogenen Reaktion. Das Unterschreiten der Löschtemperatur, unterhalb derer es zum Verlöschen der Flamme kommt erfolgt beim Löschen mit Wassernebel durch Vergrößerung der Wärmeabfuhr und Verkleinern der Wärmefreisetzung. Die Vergrößerung der Wärmeabfuhr erfolgt durch Erwärmen und Verdampfen der Wassertropfen sowie durch die Überhitzung des Wasserdampfes. Die Verkleinerung der Wärmefreisetzung erfolgt durch Senken der Brandgas- und Sauerstoffkonzentration in der Luft (Verdünnen) sowie durch Erhöhen der Aktivierungsenergie (Inhibition). Bei der Brandbekämpfung mittels eines Sprühstrahles wird ein Teil des Wassers verdampft und daher ein gewisser Anteil der Verdampfungsenergie zur Wärmebindung genutzt. Der Wasserdampf wird aber nicht für die Brandbekämpfung wirksam. Bei Verwendung von Wassernebel, dessen Tropfen so klein sind, daß sie schlagartig in der Flamme verdampfen, wird zusätzlich der Wasserdampf auf die Temperatur der Flammenzone erwärmt. Dadurch wird die Wärmekapazität des Wasserdampfes genutzt. Nach Portz läßt sich die Löschwirksamkeit daher mindestens verdoppeln. Beim Verdampfen des Wassers tritt

eine Volumenvergrößerung auf etwa das 1700 fache auf. Dadurch tritt eine Verdünnung der Luft und der Brandstoffdämpfe auf. Die Verdünnung der Luft kann bis zur Inertisierung der Atmosphäre erfolgen. Die Verdünnung der Brandstoffdämpfe unter die untere Explosionsgrenze wird aber in der Regel nicht erreicht. Die Tropfen des Wassernebels können weiterhin als heterogene Inhibitoren wirken. Hierunter ist die kettenabbrechende Wirkung kühler Oberflächen (Wandeffekt) zu verstehen, wie sie auch von Flammendurchschlagsicherungen oder Löschpulver bekannt sind. Im Kontakt mit der Oberfläche der Wassertropfen verlieren die bei der Verbrennung gebildeten, besonders energiereichen, freien Radikale H, OH, und O einen Teil ihrer Energie, so daß Rekombinationen eintreten, die zum Kettenabbruch führen. Durch Sedimentation der Wassertropfen tritt als Nebenlöschwirkung eine Unterbrechung des Stoff- und Energietransportes auf der Brandstoffoberfläche wie bei herkömmlichen Wasserlöschverfahren auf. Die Nutzung dieses Effektes erfolgt bei größerer Löschmittelzugabe und verhindert eine Rückzündung, auch wenn die Atmosphäre nicht mehr inertisiert ist. Für z.B. Rundholzstapel gibt Portz hierfür eine Löschintensität von $1,2 - 2,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ und für Gummi $6 - 8,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ an. Im Gegensatz zu herkömmlichen Sprühstrahlen löscht Wassernebel vor allem in der Flamme. Im Vergleich zu Löschgasen errechnet Portz für einen n-Hexan-Brand nach der Theorie der adiabaten Löschtemperatur eine theoretische minimale Kohlendioxidkonzentration von $0,778 \text{ kg m}^{-3}$, bei Wassernebel eine theoretische minimale Konzentration von $0,326 \text{ kg m}^{-3}$. Um die theoretisch mögliche Wirksamkeit zu erreichen, ist allerdings eine optimale Tropfengröße und eine ausgewogene Düsenanordnung notwendig. Nach Portz kann Wassernebel mit den Löschmitteln Kohlendioxid, Argon, Inergen, Stickstoff und Halonen mithalten bzw. ist diesen sogar überlegen. Im Vergleich von Hochdrucksprühnebel mit Löschpulver kann nach Portz der Wassernebel in der Löschwirkung besser sein, wenn es gelingt, Tropfendurchmesser zu erzeugen, die noch unter denen von Löschpulver (Mittlerer volumetrischer Tropfendurchmesser: $30 - 40 \mu\text{m}$) liegen. Außerdem sind beim Wassernebel Synergieeffekte durch Zusammenwirkung von Kühlung, Verdünnung und Inhibition zu erwarten. Für brennbare Gase und Flüssigkeiten (Alkane) sind nach Portz Löschkonzentrationen von ca. $0,2$ bis $0,7 \text{ kg Wasser pro m}^3$ erforderlich. Schwer löschtbare Stoffe wie Wasserstoff oder Schwefelkohlenstoffe sind wie auch bei der Löschung mit Kohlendioxid mit größeren Sicherheitsfaktoren zu belasten.

Kunkelmann /38(1995)/ berichtet über ein mehrjähriges For-

schungsprogramm an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. In diesem wurde die Brandausbreitung und der Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen untersucht. Dazu wurden experimentelle Arbeiten durchgeführt, die durch theoretische Betrachtungen und numerische Simulationen sowie dem Studium der in- und ausländischen Literatur ergänzt wurden. In einer großen Anzahl von Brand- und Löschversuchen wurde die Flammenausbreitung und Wärmefreisetzung bei unterschiedlichen Lageraufbauten, Brandlasten und Sprinklertypen untersucht. Die hier gewonnenen Ergebnisse sind dazu geeignet, Lageraufbauten und Löschanlagen zu projektieren und numerische Simulationen zu kalibrieren. Weiterhin können thermische Belastungen von Gebäude- und Lagerbauteilen im Brandfall abgeschätzt werden. Bei der numerischen Simulation wurden die Wechselwirkungen eines mono- und polydispersen Tropfenschwarmes mit Tropfendurchmessern zwischen 0,2 mm und 4,0 mm mit einer Flammensäule/Heißgasströmung untersucht. Hierbei wurde der Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch zwischen der Flammensäule/Heißgasströmung und dem Tropfenschwarm berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse wurden mit experimentell ermittelten Daten z.B. der Wasserbeaufschlagung verglichen. Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsmessungen mit einem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator für verschiedene Sprinklertypen fanden als Anfangsbedingungen Eingang in die Berechnungen. Es wurde festgestellt, daß Tropfen mit 1 mm Durchmesser nicht in der Lage sind, einen Brandherd in 3 m bzw. 4 m vertikaler Entfernung von der Düse bei einer größeren Wärmefreisetzung als ca. 400 kW bzw. 200 kW zu erreichen. Durch die Rauchgasgegenströmung kehren diese und kleinere Tropfen ihre Bewegungsrichtung um bzw. wesentlich kleinere Tropfen wie z.B. 0,2 mm verdampfen. Die untersuchten größeren Tropfen mit 2 mm und 4 mm Durchmesser sind in der Lage den Brandherd zu erreichen. Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß das System Sprinkler/Brand durch eine große Anzahl von Einflußgrößen bezüglich der Brandausbreitung, der Sprinkleranlage und der Wechselwirkungen zwischen Sprinkler/Brand/Umgebung gekennzeichnet ist. Numerische Beschreibungen des Brand- und Löschauflaufes scheitern zum Teil daran, daß die dafür wesentlichen Vorgaben nicht bekannt sind, da Probleme bezüglich der meßtechnischen Erfassung von wichtigen Brandkenngrößen vorliegen. Die physikalisch/chemischen Größen sind zum Teil nur mit unzureichender Meßgenauigkeit erfaßbar oder gegenwärtig überhaupt nicht meßtechnisch erfaßbar, wie z.B. Tropfengrößenmessungen sowie die Bestimmung des Tropfengehaltes und der Feuchtigkeit in einer Brandgasströmung bzw. Flamme bei einem realen Brand. Dies hat

Auswirkungen auf numerische Simulationen. Hier fehlen dann die erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen oder aber die Meßgenauigkeit der Meßgröße ist so unzureichend, daß sich diese Fehler bei numerischen Iterationen vervielfachen. Bei numerischen Simulationen ist zu beachten, daß bei der Brandausbreitung und dem Löscheinsatz 3dimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen Tropfenschwarm/Brandlast, zwischen Rauchgas/Flamme und Brandlast und zwischen Rauchgas/Flamme und Tropfenschwarm ablaufen. Umfassungsbauteile und Ventilationsbedingungen haben ebenfalls einen entscheidenden Einfluß. Diese Problematik kann mit Zonenmodellen nicht hinreichend gelöst werden. Feldmodelle wären unter Berücksichtigung aller relevanten Anfangs- und Randbedingungen in der Lage, die Problematik zu beschreiben.

John und Kunkelmann /39(1995)/ haben die Löschwirksamkeit einer Wassernebellöschanlage System Herzog (Niederdruck) in einem Hochregallager untersucht. Die Brand- und Löschversuche wurden an einem Regalausschnitt eines Hochregallagers (Länge: 6,14 m lang, Breite: 2,5 m, Höhe: 9,5 m, Höhe der obersten Regalebene: 8,25 m), in dem eine gemischte Brandlast aus Behältern aus Polypropylen unterschiedlicher Größe mit (Plastikgehäuseteile, Teile von Elektromotoren, Kabel, Elektronikschrott) und ohne Füllung, Verpackungskartons, Metallkörbe und Metallboxen auf Euro-Holzpaletten 800 mm * 1200 mm gelagert war durchgeführt. Die Auslösung der Löschanlage erfolgte durch einen hydrothermischen Linienmelder, einem unter Druck stehenden wassergefüllten Schlauch, der im Brandfall zerstört wird und das Löschwasser in der jeweiligen Löschsektion freigibt. Die Auslösung erfolgte nach ca. 1,5 bis 2 min nach der Entzündung des Brandgutes. Das Löschen erfolgte im Intervallbetrieb. Die Versuche haben gezeigt, daß mit diesem Wassernebel-löschverfahren die o.g. Lagergüter im Brandfall ohne Schaummittelzusatz nahezu vollständig abgelöscht werden können.

Smith /40(1995)/ stellt die physikalischen und brandlöschenden Eigenschaften von Wassernebel dar. In Versuchen in 8 m³ und 28 m³ großen Räumen mit ventilationsgesteuerten Bränden wurde festgestellt, daß der Löscherfolg leichter erzielt wird bei größeren Vorbrennzeiten und der damit verbundenen geringeren Sauerstoffkonzentration. Aufgrund der hohen Oberflächenspannung sind spezielle Düsen zur Erzeugung des Wassernebels erforderlich. Der Autor geht hierbei auf Hohlkegel-, Vollkegel- und Flachdüsen mit ihren speziellen Eigenschaften ein. Es kommen sowohl Einstoff-

als auch Zweistoffdüsen mit Luft oder Stickstoff als Zerstäubungsmedium zum Einsatz. Der Vorteil bei Zweistoffdüsen liegt darin, daß bei relativ niedrigen Betriebsdrücken (5 - 6 bar) kleine Tropfen erzielt werden. Der Nachteil liegt bei hohen Anlagenkosten u.a. durch die zusätzliche Gasversorgung und das hohe Gewicht. Sprinkleranlagen und Vernebelungsanlagen werden miteinander verglichen. Es wird über Versuche berichtet, die in Flugzeugkabinen, in Flugzeugfrachträumen und innerhalb von Gebäuden technischer Anlagen durchgeführt wurden.

Downie, Polymeropoulos und Gogos /41(1995)/ untersuchen die Wechselwirkungen des Wassernebels einer Hohlkegeldüse mit einer auftriebsbehafteten Methandiffusionsflamme. Die Versuche wurden in einem 2 m * 2 m * 2 m großen Glaskasten durchgeführt. Die Düse (89° Hohlkegel, Massenstrom: 0,013 kg/s, 3,8 bar, Sauter-Durchmesser der Sprühtropfen: 250 µm - 270 µm) befand sich in Höhe 1,87 m direkt über dem Gasbrenner (25 cm * 25 cm). Der Brenner wurde mit 26,5, 40,0 und 53,0 kW Leistung betrieben. Gemessen wurden die Temperaturen in verschiedenen Höhen über dem Brenner, die Wärmestrahlung und die mittlere CO- und O₂-Konzentration. Die Messungen mit und ohne Wassernebel ergaben keine Änderung der Flammentemperaturen über dem Brenner. Die Brenner-temperatur selbst wurde durch Abnahme der Wärmestrahlung der Flammen und durch Benetzung und Verdampfen von Wassertropfen direkt am Brenner erniedrigt, die nahe am Brenner eingesaugt wurden. Videoaufnahmen zeigten, daß die Wassertropfen aufgrund der großen Flammengeschwindigkeit nur in die äußeren Flammenbereiche und Brennerbereiche eindrangen. Weiterhin nahm durch Einsatz des Wassernebels die O₂-Konzentration über dem Brenner ab und die CO-Konzentration zu. Dies wird damit begründet, daß der Wasserdampf die Verbrennungsreaktion beeinflusst und daß durch die abwärtsgerichtete Strömung verstärkt Verbrennungsprodukte eingesaugt werden. Der Sprühkegel wurde mit steigender Wärme-freisetzung des Brenners von 89° auf bis zu 102° aufgeweitet.

Log und Ekrene /42(1995)/ untersuchen die Löscheigenschaften von Wassernebel bei Bränden der Brandklasse A. Es ist hierbei bekannt, daß Wassernebel nicht das beste Löschmittel für diesen Einsatzzweck ist. Holzkrippen brennen bei relativ kleinen Bränden im Vergleich zur Raumgröße bei Einsatz von Wassernebel relativ ungestört ab, falls keine Düsen mit einem hohen Austritts-impuls verwendet werden, deren Wassernebel in die Krippen eindringen können. Wassernebel aus Düsen mit niedrigem Anfangs-impuls kann verwendet werden, wenn ein geringer Wasserschaden

z.B. bei historischen Gebäuden, gewünscht wird. Durch benässen kann die Brandausbreitung verringert und der Brand kontrolliert werden. Log und Ekrene /42/ untersuchen die Löschwirkung von Wassernebel auf einen mit Holz gefüllten Behälter. Für das Löschen werden Einstoffdüsen (Tropfenspektrum: $D_{v0,1} = 35 \mu\text{m}$, $D_{v0,9} = 100 \mu\text{m}$, 10 bar, 0,3 l/min/Düse) mit einem Düsenabstand von 3,5 m über der Brandlast verwendet. Auf dem Boden wird eine Wasserbeaufschlagung von $0,5 \text{ l/m}^2 \text{ min}$ erzielt bei einem Volumenanteil von 20 g/m^3 . Der Abbrand erfolgt unter nicht-ventilationsgesteuerten Bedingungen. Bei diesem Versuchsaufbau wurde eine gute Löschwirkung erzielt.

Die Untersuchungen von **Schatz /43(1996)/** hatten zum Ziel, das Brand- und Löschverhalten bei unterschiedlichen Stoffen in einem Lagerausschnitt eines Hochregallagers (Länge: 6,14 m, Breite: 2,54 m, Höhe: 9,5 m) festzustellen und zu vergleichen. Das verwendete Lagermaterial bestand einerseits aus Pappkartons und andererseits aus einwandigen Kunststoffkästen aus Polypropylen, die in der Industrie eine weite Verbreitung gefunden haben. Diese Brandlast wurde auf Euro-Holzpaletten im Regal eingelagert. Der Löscheintritt erfolgte mit einer manuell ausgelösten Niederdruck-Wassernebellöschanlage (System Herzog). Die Versuche haben gezeigt, daß durch diese Löschanlage bei beiden Versuchen ein Brand im Entwicklungsstadium innerhalb von wenigen Minuten soweit eingedämmt werden kann, daß nur noch kleine Brandstellen vorhanden waren. Eine Brandausbreitung nach dem Löscheintritt auf andere Paletten im Hochregal wurde verhindert. Die Temperaturen fielen kurze Zeit nach Löscheintritt an den Meßstellen soweit ab, daß die umgebenden Paletten nicht mehr gezündet wurden. Es bildeten sich jedoch in einzelnen Paletten kleine Brandnester aus. Ein vollständiges Löschen war aufgrund dieser innenliegenden Brandnester nicht möglich. Diese Stellen wurden durch die Feuerwehr mit dem Strahlrohr vollständig abgelöscht.

Großöhmic und Fuchs /44(1996)/ berichten über Brand- und Löschversuche im Hochregallager unter Verwendung einer Niederdruck-Wasservernebelungsanlage (System Herzog). Als Brandlast wurden Verpackungsmaterial der Brandklasse A, hölzerne Euro-Norm-Paletten und Kleinladungsträger (KLT) aus Polyäthylen verwendet. Die Sprühköpfe mit Herzog-Dralldüsen waren horizontal angeordnet. Als Auslöseelement wurde ein hydrothermischer Linienmelder verwendet. Hierbei handelt es sich um einen unter Druck stehenden wassergefüllten Auslöseschlauch (gewebegestützter Kunststoff) bei dem ein Druckabfall eintritt, wenn dieser vom Brand beschä-

digt wird. Hierdurch öffnet ein Membranventil und Löschwasser wird in die jeweilige Löschsektion durch die getrennte Löschwasserleitung eingespeist und der Löschvorgang beginnt. Um eine Fehlauflösung durch mechanische Beschädigung des Auslöseschlauches oder der Verbindungselemente zu vermeiden, sollte die Löschwasserfreigabe durch eine "UND-Verknüpfung" zu einer Brandmeldeanlage erfolgen. Bei den Versuchen wurde die vorgegebene Brandlast in allen Fällen sicher beherrscht. Durch Intervallbetrieb der Löschanlage konnte bei gleicher Löschleistung die benötigte Löschwassermenge um mindestens ein Drittel reduziert werden. Beim Intervallbetrieb ist vom Einsetzen des Wassernebels bis zur ersten Intervallpause der vom Brand betroffene Lagerabschnitt noch nicht gelöscht. Die unmittelbare Umgebung der betroffenen Löschsektion ist allerdings dann bereits an ihrer Oberfläche so befeuchtet, daß ein Entflammen in der Intervallpause nur sehr schwer möglich ist. Im betroffenen Abschnitt wird in der Intervallpause das Brandgeschehen an Intensität wieder zunehmen. Dabei wird der zur Verfügung stehende Brennstoff thermisch umgesetzt womit wieder Freiraum für den wieder einsetzenden Wassernebel geschaffen wird.

Großöhmig /45(1996)/ berichtet über weitere ausgeführte Niederdruck-Wasservernebelungsanlagen System Herzog in Hochregallägern im Kraftwerksbereich und bei industriellen Anwendungen.

Von **SINTEF-NBL/Norwegen /46(1996)/** wurden Versuche mit Wassernebellöschanlagen mit dem Ziel durchgeführt, die Kenntnisse über das Verfahren zu vertiefen und Modelle für die Berechnung des Löscheffekts sowie Berechnungsmodelle für die Projektierung und Testmethoden zu entwickeln. Die Versuche und ihre Ergebnisse werden genannt. Es wurde deutlich, daß vor allem die Testmethoden vereinfacht werden müssen, die derzeit in Großversuchen bestehen. Generell wurde festgestellt, daß die Anlagen auf Grund ihrer Wirkung (Kombination von Kühlung und Inertisierung) als Ersatz für Halon- oder Inertgasanlagen, aber weniger als Ersatz für Sprinkleranlagen anzusehen sind. Um effektiv löschen zu können, muß die Ventilation im Brandbereich gering sein und die Umwandlung von Wassernebel zu Wasserdampf durch direkten Flammenkontakt der Tröpfchen erfolgen.

Schremmer /47(1996)/ gibt in seiner Dissertation eine weitreichende theoretische und experimentelle Untersuchung über Wasservernebelungsanlagen. Er schlägt in seiner Arbeit folgende Unter-

teilung diffuser Wasserstrahlen vor:

Mittlerer Tropfendurchmesser [μm]	Bezeichnung der Strahlart
≤ 10	Wasseraerosol
$> 10 \dots \leq 100$	Wassernebel
$> 100 \dots \leq 400$	Wassersprühnebel
$> 400 \dots \leq 1000$	Sprühwasser
$> 1000 \dots \leq 6000$	Grobsprühwasser (Sprinklerspray)

Schremmer bezieht sich in seinen Untersuchungen hauptsächlich auf den mittleren Tropfengrößenbereich von $10 \mu\text{m}$ bis $400 \mu\text{m}$. In der Arbeit findet sich in Tabellenform eine Zusammenstellung verschiedener Autoren für die günstigste Tropfengröße für das Löschen von brennbaren Flüssigkeiten und festen Brandstoffen. Aufgrund der Literaturuntersuchungen und der eigenen Löschversuche von Schremmer können in Abhängigkeit von der Brandklasse für die festen und flüssigen Brandstoffe sowie unter Berücksichtigung der Gefahrklassen für die brennbaren Flüssigkeiten folgende optimalen Tropfengrößenbereiche angegeben werden:

- Brandklasse A: $400 \dots 600 \mu\text{m}$
- Brandklasse B: $100 \dots 350 \mu\text{m}$
- Gefahrklasse A: $100 \dots 350 \mu\text{m}$
- Gefahrklasse A: $100 \dots 350 \mu\text{m}$

Bei Fetten und Ölen ergeben sich für die Brandlöschung niedrigsiedender Flüssigkeiten optimale Tropfengrößen im Bereich von $280 \mu\text{m} \dots 500 \mu\text{m}$ sowie für höhersiedende Flüssigkeiten von $450 \mu\text{m} \dots 600 \mu\text{m}$. Die größtmögliche Absorption der Wärmestrahlung (bis zu 85 %) erfolgt mit Tropfendurchmessern von $75 \mu\text{m} \dots 100 \mu\text{m}$. Je kleiner die Tropfengröße, desto höher wird der Anteil der Reflexion. Für unter Flammenbildung brennende Stoffe der Brandklasse C kann als optimale Tropfengröße ein Bereich von $\leq 100 \mu\text{m}$ angegeben werden.

Wasseraerosole, Wassernebel und Wassersprühnebel sollten aufgrund unerwünschter chemischer Reaktionen u.a. nicht angewendet werden bei:

- Leichtmetalle, wie Magnesium, Titan, Aluminium, Beryllium (Wasserstoffbildung => Knallgasbildung)
- Leichtmetalle, wie Natrium, Kalium, Lithium, Calcium, Cäsium, Rubidium, Barium, Strontium (Wasserstoffbildung und Wärmebildung)
- Metallhydride (Wasserstoffbildung)
- großflächig glühender Kohlenstoff, wie Koks (Wasserstoffbildung)
- glühender Stahl (Wasserstoffbildung)

Auf der Grundlage der physikalischen Eigenschaften des Wassers ergeben sich hinsichtlich des Einsatzes von Wasseraerosolen, Wassernebeln oder Wassersprühnebeln folgende Aspekte:

- die Einsatzfähigkeit der Löschmittel aufgrund ihrer geringen elektrischen Leitfähigkeit.
- die Anwendung in Objekten mit quellfähigen und wasseraufsaugenden Materialien sowie begrenzter statischer Belastbarkeit,
- der Einsatz der Löschmittel zur Brandlöschung brennbarer Flüssigkeiten des Durchwärmungstypes I oder II (Siedeverzug) und der Gefahrklasse AI ... AIII sowie B nach VBF
- die Möglichkeit der Brandlöschung gasförmiger, unter Flammenbildung brennbarer Stoffe (Brandklasse C) bei Austritt unter einem relativ geringen Druck,
- die Anwendung von feinst zerteiltem Wasser bei Staubbränden oder heißen Betriebsmitteloberflächen, die durch starke lokale Abkühlungen infolge Materialspannungen zerstört werden können,
- die Einsetzbarkeit von stationären Objekt- oder Raum-Feuerlöschanlagen für spezielle Brandrisiken, in denen heute vorwiegend stationäre Inertgas-, Pulver-, Schaum-, Sprühwasser- oder Sprinkler-Feuerlöschanlagen eingesetzt werden oder die Ergänzung für Einsatzbereiche der Sprinkler- oder Sprühwasserfeuerlöschanlagen

Die elektrische Leitfähigkeit des Wassers beim Löschen von unter Spannung stehenden, elektrischen Anlagen ist von folgenden Faktoren abhängig:

- * vom Grad der Zerteilung des Wasserstrahles
- * vom Elektrolytgehalt des Wassers
- * vom Abstand zum stromführenden Teil
- * von der Höhe der anliegenden Spannung

- * vom Betriebsnenndruck an der Löschmittelauswurfs-
vorrichtung
- * von der Temperatur des Wassers

Die besten Bedingungen im Bezug auf eine geringe Leitfähigkeit sind bei den Wasseraerosolen, Wassernebeln oder Wassersprühnebeln zu finden, da die Wassertropfen im Löschmittelstrahl durch die Luft voneinander getrennt sind und es dadurch zum Verlust der elektrischen Leitfähigkeit kommt. D.h. mit fortschreitender Zerteilung des Löschwassers verringert sich die elektrische Leitfähigkeit.

Die Einteilung der stationären und halbautomatischen Wasser-aerosol-, Wassernebel- und Wassersprühnebel-Feuerlöschanlagen kann nach verschiedenen Klassifizierungsmerkmalen vorgenommen werden:

- dem Automatisierungsgrad
 - ** automatisch
 - * Aktivierung durch Brandmelder und mit Selbstabschaltung der Löschmittelzufuhr
 - * Aktivierung durch Brandmelder ohne Selbstabschaltung
 - ** halbautomatisch
 - * Branderkennung und Brandmeldung automatisch
manuelle Inbetriebnahme, keine Selbstabschaltung der Löschmittelzufuhr
 - * Branderkennung und Brandmeldung visuell,
Brandmeldung optisch oder akustisch
manuelle Inbetriebnahme und keine Selbstabschaltung der Löschmittelzufuhr
- dem Schutzziel
 - ** Anlagen für die Brandlöschung
 - ** Anlagen für die Brandkontrolle
 - ** Anlagen für die Brandsperre
 - ** Anlagen zur Wärmeeinbindung
- dem Wirkungsprinzip
 - ** Anlagen mit Volumen- bzw. Raumwirkung in geschlossenen und teilgeschlossenen Räumen mit natürlicher Lüftung (Raum-Feuerlöschanlage)
 - ** Anlagen mit selektiver Volumen- bzw. Raumwirkung auf ein Objekt (Objekt-Feuerlöschanlage mit und ohne Löschsektion)
 - * in geschlossenen und teilgeschlossenen Räumen mit natürlicher Lüftung
 - * im Freien

- ** Anlagen mit selektiver Volumen- bzw. Raumwirkung durch die Auslösung einzelner Löschmittelauswurfsvorrichtungen in geschlossenen und teilgeschlossenen Räumen mit natürlicher Lüftung (Raum-Feuerlöschanlage mit Löschsektion)
- dem Zerteilungsgrad des Wassers (gemäß vorstehender Tabelle)
- der Löschmittelart
 - ** Wasseraerosol, Wasserdampf oder Wassersprühnebel ohne löschwirksame Zusätze
 - ** Wasseraerosol, Wasserdampf oder Wassersprühnebel mit Netzmittel-, Schaummittel- oder Salzzusätzen
 - ** Kombinierte Luft bzw. Inertgas/Wasseraerosol-, Wasserdampf- oder Wassersprühnebel-Löschmittelgemische
 - ** Kombinierte Luft bzw. Inertgas/Wasseraerosol-, Wasserdampf- oder Wassersprühnebel-Löschmittelgemische mit Netzmittel-, Schaummittel- oder Salzzusätzen
- der Löschintensität
 - ** Anlagen mit großer Löschmittelauswurfsmenge ($> 50 \text{ l/s}$)
 - ** Anlagen mit mittlerer Löschmittelauswurfsmenge von $> 5 \text{ l/s}$ bis $\leq 50 \text{ l/s}$
 - ** Anlagen mit kleiner Löschmittelauswurfsmenge ($\leq 5 \text{ l/s}$)
- der Ansprechdauer
 - ** sehr schnell reagierende Anlagen mit einer Ansprechdauer bis zu $0,1 \text{ s}$
 - ** schnell reagierende Anlagen mit einer Ansprechdauer $\leq 5 \text{ s}$
 - ** mittelschnell reagierende Anlagen mit einer Ansprechdauer $\leq 60 \text{ s}$
 - ** normal reagierende Anlagen mit einer Ansprechdauer $\leq 180 \text{ s}$
 - ** träge reagierende Anlagen mit einer Ansprechdauer $> 180 \text{ s} \leq 300 \text{ s}$
- der Löschzeit
 - ** schnell löschende Anlagen bei einer Löschdauer $\leq 10 \text{ s}$
 - ** Anlagen mit einer mittleren Löschdauer bei einer Löschzeit $\leq 300 \text{ s}$
 - ** langsam löschende Anlagen bei einer Löschdauer $> 300 \text{ s}$
- der Betriebszeit der Anlage
 - ** Anlagen mit Impulswirkung bei einer Löschmittelfreisetzungszeit von $\leq 30 \text{ s}$
 - ** Anlagen mit Kurzzeitwirkung bei einer Löschmittelfreisetzungszeit von $\leq 15 \text{ min}$

- ** Anlagen mit Langzeitwirkung bei einer Löschmittelfreisetzungszeit von > 15 min
- der Aufbringungsart des Löschmittels auf den Brandherd
 - ** Anlagen, die das Löschmittel nur durch die Schwerkraft dem Brandherd zuführen
 - ** Anlagen, die das Löschmittel nur im Zuluftstrom dem Brandherd zuführen
 - ** Anlagen, die das Löschmittel kombiniert über den Zuluftstrom und Schwerkraftaufbringung dem Brandherd zuführen
- der Zuführungsart des Löschmittels zu den Löschmittelauswurfsvorrichtungen
 - ** Anlagen mit einer zentralen kontinuierlichen Löschmittelzufuhr
 - ** Anlagen mit einer begrenzten Wasserversorgung und gesonderten Zuführung
 - ** Anlagen mit einer kombinierten Zuführung
- nach der zur Anwendung kommenden Löschmittelauswurfsvorrichtung
 - ** Anlagen mit Einstoffdüsen bzw. Mehrstoffdüsen
- dem Betriebsnenndruck der Anlage
 - ** Niederdruck-Feuerlöschanlagen mit einem Betriebsnenndruck $\leq 1,6$ MPa
 - ** Mitteldruck-Feuerlöschanlagen mit einem Betriebsnenndruck $> 1,6$ MPa ≤ 4 MPa
 - ** Mitteldruck-Feuerlöschanlagen mit einem Betriebsnenndruck > 4 Mpa

Nach Schremmer ist es für einen geringen Brand- und Folgeschaden notwendig, die stationäre automatische Wasser-Feuerlöschanlage so zu dimensionieren und gestalten, daß ein möglicher Brand bereits in seiner Entstehungsphase erkannt und bekämpft werden kann. Da der Einsatz von stationären automatischen Wasseraerosol-, Wassernebel- oder Wassersprühnebel-Feuerlöschanlagen überwiegend in geschlossenen Räumen oder Gebäuden erfolgen wird, wird in den Ausführungen von Schremmer als Ausgangspunkt der Betrachtungen nur auf die Struktur eines Brandes und die Brandausbreitung in geschlossenen Räumen oder Gebäuden eingegangen. In seiner Arbeit geht Schremmer auf die Wechselwirkung von Wasseraerosol-, Wassernebel- und Wassersprühnebel-Tropfenschwärmen mit einer Flammensäule/Heißgasströmung ein. Das von der Düse erzeugte Tropfenspektrum, die Größe des Anfangsimpulses und die Verteilung der Tropfen des Löschmittelstrahles am Brandherd sind Einflußgrößen, die die

Intensität der Wärme und Stoffaustauschprozesse entscheidend mitbestimmen.

Schremmer /47/ führt folgende Löscheffekte auf:

- heterogene Inhibition in der Mischungszone der Flamme durch die Erzeugung eines Wandeffektes mit einem Löschmittelstrahl entsprechender Tropfendichte durch Energieentzug, (Die Wirkung einer heterogenen Inhibition besteht darin, daß die eine Verbrennung aufrechterhaltenden energiereichen Radikale (heiße Radikale) der Kettenreaktion gebunden und damit aus der Reaktionskette entfernt werden. Dadurch wird ein Kettenabbruch hervorgerufen und die Flamme verlöscht. Diese Vorgänge können durch hochenergetische kleine Wassertropfen in dichter Verteilung innerhalb des Löschmittelstrahles hervorgerufen werden. Die Oberflächen der Wassertropfen treten als energiearme Radikale (kalte Radikale) in die Verbrennungsreaktion ein. Beim Kontakt, d.h. Zusammenstoß der kalten Radikale mit den heißen Radikalen der Verbrennung, kommt es zu einer Energieabgabe der besonders energiereichen, freien Radikale H (Wasserstoff), OH (Hydroxylgruppe) und O (Sauerstoff). Dieser Effekt wird als Wandeffekt bezeichnet. Nach den Untersuchungen von Schremmer kann die heterogene Inhibition vor allem im Mitteldruck- und Hochdruckbereich erzielt werden. Im Niederdruckbereich können energiereiche Tropfen schwärme nur bei Anwendung von Zweistoffdüsen erzielt werden.)
- Ausbildung einer lokalen Inertisierung am Brandherd infolge Verdampfung,
- Kühlwirkung durch Verdampfung in der Reaktionszone und an der Grenzfläche Flammensäule/Heißgasströmung
- Verdünnung der Reaktionszone durch Verdampfung und einer entsprechenden Teilchendichte an Wassertropfen
- Verhinderung der Strahlungswärmerückkopplung durch Sedimentation der Wassertropfen in der Verbrennungszone oder durch Erreichung des Trenneffektes

Um die verschiedenen Löscheffekte bei der Anwendung von Wasseraerosolen, Wassernebeln oder Wassersprühnebeln im Schutzbereich effektiv erzeugen zu können, muß das Löschmittel eine entsprechende Dichte aufweisen. D.h. es muß sich eine bestimmte Masse an Tropfen in möglichst homogener Verteilung innerhalb des Tropfenschwarmvolumens befinden. Nach eigenen Unter-

suchungen von Schremmer ergab sich eine von der Wärme unabhängige Mindestlöschwassermenge im Löschmittelstrahl von 0,4 bis 0,6 l/m³. Bei mehreren gleichzeitig in einer Löschsektion sprühenden Löschdüsen, d.h. bei einer allseitigen Einhausung des Brandherdes mit dem Löschmittel, können schon geringere Tropfenschwarmdichten ausreichend sein, da Wasseraerosole, Wassernebel und Wassersprühnebel raum- bzw. volumenwirksam sind. Da die Löscheffekte der Wasseraerosole, Wassernebel oder Wassersprühnebel in Abhängigkeit vom Raumvolumen des zu schützenden Bereiches betrachtet werden müssen, hat die Ermittlung die Ermittlung der Tropfenschwarmdichte durch die Vermessung des Sprühbildvolumens einer Löschmittelauswurfsvorrichtung bzw. Düse unter Beachtung der horizontalen und/oder vertikalen Einbaulage zum Brandherd zu erfolgen. Da es für die Praxis Probleme bereitet, die volumenbezogene Wasserverteilung im Tropfenschwarm möglichst genau zu ermitteln, kann als Grundlage für eine Aussage bezüglich der Homogenität der Wasserverteilung eines Tropfenschwarmes die flächenbezogene Wasserbeaufschlagung zugrunde gelegt werden. Schremmer /47/ bestätigt die Aussagen von Kunkelmann /38/, daß Löschwasser mit Tropfen $\leq 1000 \mu\text{m}$ durch Schwerkraft nur bei kleinen Wärmefreisetzungen auf den Brandherd aufgebracht werden können. Kleinere Tropfen sollten dagegen im Zuluftstrom, also seitlich zum Brandherd zugeführt werden. Schremmer geht in seiner Arbeit auch auf die Modellierung von Bränden in Räumen ein und erwähnt hierbei die verschiedenen Modelle (Feldmodell, Zonenmodell [Ein-, Zwei- und Mehrzonenmodell]). Nach seiner Analyse bzgl. der Beschreibung der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Flammensäule/Heißgasströmung stellt er fest, daß deren Brauchbarkeit für Tropfen mit einem Durchmesser von $10 \mu\text{m} - 400 \mu\text{m}$ für tendenzielle Aussagen gegeben ist. Die Ursache liegt zum einen in der Annahme verschiedener Randbedingungen, die größtenteils noch nicht bzw. nur wenig erforscht sind. Ein anderes Problem für die praktische Anwendung besteht in der Zugrundelegung verschiedener Modellgrenzen:

- Annahme bestimmter Brandszenarien
- Freisetzung von Monoschwärmen mit einem konstanten einheitlichen Tropfendurchmesser
- Annahme eines homogenen Tropfenschwarmes mit geordneten Tropfenbahnen, in dem keine Wechselwirkungen der Tropfen untereinander stattfinden
- konstante räumlich und zeitlich begrenzte Brandparameter
- vollständige Verbrennung des Brandstoffes ohne Einschränkung

bzw. Verringerung der Luftzufuhr zum Brandherd

- Vernachlässigung des Einflusses turbulenter Strömungen der aufsteigenden Heißgase auf die Fallbewegung der Einzeltropfen im Tropfenschwarm
- vom Brand freigesetzte Wärme ≤ 2 MW
- der Abstand der Löschdüse zum Brandherd ist oft auf eine bestimmte Höhe begrenzt
- keine Berücksichtigung der Raumgeometrie und der Raumöffnungen auf den Brandherd

Nach den Untersuchungen von Schremmer /47/ streben die Tropfen ab einem Düsendruck von 60 bar bis 70 bar einem Grenzwert für die niedrigste erreichbare Tropfengröße entgegen. Eine weitere Steigerung des Düsendruckes bringt bezüglich einer Verringerung der Tropfengröße keine nennenswerten Vorteile, da hier das Aufwand/Nutzenverhältnis zu ungünstigen Werten verschoben wird, d.h. der hier zu betreibende technische Aufwand steht in keinem Verhältnis zum erforderlichen Technik- und Energiebedarf für die Erzeugung kleinster Wassertropfen. Durch Zweistoffdüsen können kleinere Tropfen als bei Einstoffdüsen erzeugt werden. Beim Einsatz der Zweistoffdüsen können Wassernebel ab einem Gas/Flüssigkeitsmassenverhältnis von ca. 0,6 erzeugt werden. Ein enges Tropfenspektrum im Wassernebelgebiet ist dabei bei einem Gas/Flüssigkeitsmassenverhältnis von ≥ 1 vorhanden. In der Praxis sollten Verhältnisse, die über 1 liegen, aufgrund des Aufwand/Nutzenverhältnisses nicht zur Anwendung kommen. Bei Zweistoffdüsen können Wassernebel mit geringeren Tropfendurchmessern erzeugt werden.

Schremmer /47/ hat ergänzend zu seinen theoretischen Untersuchungen Brand- und Löschversuche mit verschiedenen Niederdruck-Feuerlöschanlagen durchgeführt. Stationäre Mittel- und Hochdruck-Feuerlöschanlagen wurden nicht weiter getestet, da Niederdruckanlagen folgende Vorteile aufweisen:

- * auf bewährte Anlagentechnik von konventionellen Wasser-Feuerlöschanlagen kann zurückgegriffen werden
- * Direktanschluß an Stadt- und Brauchwassernetze bzw. an die Wasserversorgung von Sprinkler- und Sprühwasser-Feuerlöschanlagen möglich
- * geringere Verstopfungsgefahr bei den Düsen
z.B. keine Anlagenkomponenten aus Edelstahl, keine separate Wasserversorgung und Feinstfilter erforderlich
- * Aufgrund der relativ engen Strahlwinkel der Einzeldüsen

ist es für die Erzielung möglichst geringer Montagekosten für Mittel- und Hochdruck-Wasservernebelungsanlage zweckmäßig, Bündeldüsen, d.h. Löschdüsen, bestehend aus mehreren Einzeldüsen einzusetzen. Bei gleichem Schutzvolumen der Feuerlöschanlage erhöhen sich dadurch die Anlagenkosten auf das 2 bis 4-fache gegenüber einer Niederdruck-Wasservernebelungsanlage

* Möglichkeit einer Feuerwehr-Noteinspeisung

Der Vorteil des Einsatzes stationärer automatischer Mittel- und Hochdruck-Wasservernebelungsanlagen liegt durch die kleineren Bauteilgrößen in einem geringeren Anlagengewicht und Platzbedarf. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch den Einsatz geringerer Löschwassermengen und damit auch geringerem Löschwasserschaden. Die Erarbeitung einheitlicher Richtlinien bezüglich der Projektierung von Wasservernebelungsanlagen kann sich nur auf die Schaffung von Prüfkriterien in Abhängigkeit vom Betriebsnennndruck beziehen, da in den jeweiligen Nennndruckbereichen immer andere Bedingungen für die Erzeugung der Löscheffekte vorhanden sind. Aufgrund der Vielfalt an Löschmittelauswurfsvorrichtungen sind nur Angaben zu den Grundanforderungen möglich.

Bei den experimentellen Arbeiten von Schremmer wurden folgende Löschversuche durchgeführt:

* Löschversuche für Maschinenräume

- Holznormbrandstapel
- Brand einer unter Hochdruck austretenden brennbaren Flüssigkeit
- Flüssigkeitwannenbrand
- Verdeckter Fließbrand
- Kombinationsbrandversuche aus diesen Einzelobjekten

* Löschversuche für den Gasturbinenschutz

- Brand einer unter Hochdruck austretenden brennbaren Flüssigkeit
- Brände auf mit brennbarer Flüssigkeit getränkter Isolationen
- Flüssigkeitwannenbrände

* Löschversuche an einer Tiefdruckrotationsmaschine

- Flüssigkeitwannenbrand

Die Versuche wurden mit und ohne Belüftung des Brandraumes (Lüfter: 160 m³ Luft/min) durchgeführt. Weiterhin wurde zum

Teil das Schaummittels AFFF zum Löschwasser zugemischt. Durch Herabsetzung der Oberflächenspannung des Wassers kommt es bei der Freisetzung des Tropfenschwärmes zu einer Verringerung der Tropfengrößen. In der Dissertation von Schremmer /47/ werden die Versuchsaufbauten in Form von Maßskizzen und Rohrleitungsisometrien dargestellt. Bei den jeweiligen Versuchen wurden folgende Brandstoffe verwendet:

Kiefernholz (Feuchtegehalt 10 % bis 15 %)
Heizöl
Aceton
Petroleum
n-Heptan
Toluol

Für die jeweiligen Brandstoffe werden sichere Temperaturgrenzen angegeben, unterhalb denen eine Möglichkeit der Rückzündung des Brandstoffes an heißen Oberflächen oder durch eine Selbsterwärmung/Selbstentzündung nicht möglich ist.

Die Versuchsergebnisse werden in Tabellenform wiedergegeben, wobei bei sich hierin Angaben finden über Vorbrennzeiten, Löschzeiten, Gesamtwasserlöschung, löschwirksame Wassermenge und verbrannte Brandstoffmenge. Die größten Wassermengen ergaben sich bei Holznormbrandstapeln (tiefsitzende Glutbrände). Bezüglich der Meinung verschiedener Hersteller von Hochdruck-Feuerlöschanlagen, daß im Druckbereich von 40 bis 300 bar erzeugter Wassernebel gasähnlich in verdeckten Raumbereichen ausbreitet und dabei einen Brand löscht stellt Schremmer fest, daß beim Auftreffen des Wassernebels auf Ecken, Kanten und Hohlräume am Brandobjekt, die sich außerhalb bzw. in peripheren Bereichen des Wassernebels befinden, durch die höheren Strömungsgeschwindigkeiten eine Intensivierung des Flammenbrandes eintreten kann. Weiterhin kommt es beim Auftreffen auf ein Sprühhindernis zu einem starken Impulsabbau und infolge der kleinen Tropfendurchmesser zu einer verringerten Transportfähigkeit. Hinsichtlich der Löschwirksamkeit von Kühlung und Inertisierung beim Wassernebel unterscheidet Schremmer drei verschiedene Energiebereiche:

Bereich 1: Vom Brand freigesetzte Wärme ≤ 400 kW

Bereich 2: Vom Brand freigesetzte Wärme > 400 kW ... < 1000 kW

Bereich 3: Vom Brand freigesetzte Wärme ≥ 1000 kW

Bei den durchgeführten Löschversuchen hat sich gezeigt, daß sich die Löschzeiten, wenn die vom Brand freigesetzte Wärme während der Vorbrennzeit in den Energiebereichen 1 und 2 lag, gegenüber dem Energiebereich 3 um den Faktor 2 bis 3 in Abhängigkeit vom Brandstoff und unter Berücksichtigung der Testbedingungen erhöhen können. Im Energiebereich 1 wird die Unterbrechung des Stoff- und Energietransportes auf die Brandstoffoberfläche durch die Sedimentation der Wassertropfen und damit letztendlich nur der Kühleffekt des aus kleinen Wassertropfen bestehenden Tropfenschwarmes als Hauptlöscheffekt erlangt. Es findet nur eine geringe Verdampfung in der Reaktionszone der Flamme sowie in deren Umgebung statt. Die Verdampfung am Brandherd reicht nicht aus, um die Luft und aus dem Brandstoff austretenden Dämpfe so zu verdünnen, daß eine zusätzliche Inertisierung der Umgebungsatmosphäre erfolgt. Die Verkleinerung der Wärmefreisetzung durch eine heterogene Inhibition wird aufgrund des in diesem Energiebereich oftmals vorhandenen kleinen Flammenvolumens nicht effektiv ausgebildet. Im Energiebereich 2 überwiegt ebenfalls der im Energiebereich 1 auftretende Löscheffekt. Aufgrund der höheren vom Brand freigesetzten Wärme wird aber der Anteil des Verdünnungseffektes der Luft und Brandstoffdämpfe mit Zunahme der Wärme immer weiter gesteigert. So kann eine lokale Inertisierung mit zur Brandlöschung beitragen. Ebenfalls erhöht sich die Wirkung der heterogenen Inhibition auf die Brandlöschung. Im Energiebereich 3 wird als Hauptlöscheffekt die Verdünnung der Luft und der aus dem Brandstoff austretenden Dämpfe bis zur Inertisierung effektiv wirksam. Alle weiteren Löscheffekte, wie die Kühlwirkung durch Verdampfung und die heterogene Inhibition, können ebenfalls in diesem Energiebereich mit Zunahme der vom Brand freigesetzten Wärme immer besser und schneller erreicht werden. Der Anteil einer Unterbrechung des Stoff- und Energietransportes auf die Brandstoffoberfläche durch die Sedimentation der Wassertropfen tritt immer mehr in den Hintergrund und ist damit nur noch ein Nebenlöscheffekt. Dieser Löscheffekt wird erst bei der eigentlichen Flammenlöschung mit Verringerung der Wärmefreisetzung wieder erzeugt. Voraussetzung dazu ist, daß schlagartige Flammenlöschung stattfindet. D.h. im Energiebereich 3 werden die Kühlwirkung, Verdünnung und die heterogene Inhibition in der Flammenzone wirksam. Die Löschzeiten sowie die Reduzierung der zur Brandlöschung erforderlichen Löschwassermenge, besonders bei Entstehungsbränden im Energiebereich 1 und 2 können nach Schremmer /47/ wie folgt verringert werden:

- Objekt-Feuerlöschanlagen sind Raumschutzanlagen, wenn möglich, vorzuziehen. Dabei können auch die Objekt-Feuerschutzanlagen sektionsweise untergliedert sein
- Raumschutzanlagen mit einem Volumen $\geq 1000 \text{ m}^3$ sind immer in Löschsektionen zu unterteilen.
- Der mittlere Tropfendurchmesser des durch eine Löschdüse freigesetzten Tropfenschwarmes sollte in einem für den zu löschenden Brandstoff optimalen Tropfengrößenbereich liegen.
- Die mittlere Tropfenschwarmdichte eines Löschmittelstrahles sollte mindestens $\geq 0,60 \text{ l/m}^3$ betragen. Je höher die Tropfenschwarmdichte, desto besser ist die Löschwirkung.
- Die Aufbringung des Wassernebels zum Brandherd sollte in Kombination mit der Zuluft und über die Schwerkraftaufbringung erfolgen.
- Intervallbetrieb oder intermittierender Betrieb der stationären Feuerlöschanlage. Diese Betriebsweisen dürfen aber nur in Ausnahmefällen und bei bestimmten spezifischen brandschutztechnischen Randbedingungen zur Anwendung kommen.
- Verdeckte Raumbereiche mit separaten Düsen schützen bzw. eine Düsenanordnung zu diesem Raumbereich wählen, die eine löschwirksame Löschwasserbeaufschlagung in jedem Fall garantiert.
- Die Erzeugung von Löschmittelstrahlen mit einer möglichst hohen kinetischen Energie, Tropfenschwarmdichte und Tropfendgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Betriebsnenndruckes an der Löschdüse.
- Die Luftgeschwindigkeiten im Wirkungsbereich der stationären Feuerlöschanlagen dürfen nicht größer als 5 m/s bei Niederdruck-Löschanlagen und 3 m/s bei Mitteldruck- und Hochdruck-Löschanlagen sein. Von Vorteil ist immer eine Abschaltung der Be- und Entlüftung.

Schremmer sieht bei der Untersuchung von Wasservernebelungsanlagen noch eine Reihe zu lösender Probleme:

- die mathematische Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Polytropfenschwärmen mit mehr als zwei verschiedenen Tropfenschwärmen
- die Erarbeitung von Lösungsansätzen zur Bestimmung der Sauerstoffkonzentration bei der Inertisierung durch den verdampfenden Löschmittelstrahl am Brandherd und deren Anteil an der Gesamtlöschwirkung des Wassers unter Berücksichtigung der brandstoffspezifischen energetischen und raumgeometrischen Verhältnisse
- die Erweiterung der Modellgrenzen für Feld- und Zonen-

modelle, mit denen Löschmittelstrahlen als Monotropfenschwarm mit einer Tropfengröße von $\leq 200 \mu\text{m}$ bei ihrer Wechselwirkung mit der aufsteigenden Flammensäule/Heißgasströmung beschrieben werden können

- die Durchführung weiterer Versuche im halbtechnischen und technischen Maßstab zur Erweiterung des Einsatzbereiches stationärer automatischer Wasservernebelungsanlagen

Starke, Wienecke, Grabski /48(1996)/ haben verschiedene Sprühstrahlrohre und Pistolenstrahlrohre der Feuerwehren bezüglich der mittleren Tropfendurchmesser und Tropfengeschwindigkeiten mit einem Phasen-Doppler-Partikel-Analysator (PDA) ohne Brand untersucht. Die Meßtechnik wurde beschrieben und auf statistische Größen und Verteilungen eingegangen. Die mittleren Tropfendurchmesser lagen im Bereich zwischen 0,1 mm und 0,4 mm. Die wesentliche Löschwirkung des Wassers beruht auf dem Kühleffekt. Es muß jedoch gesichert sein, daß die Sprühstrahlen auch an die brennende Oberfläche gelangen, um diesen Effekt voll auszunutzen. Unterhalb eines Tropfendurchmessers von $\leq 0,1 \text{ mm}$ sollte von feinverteiltem Wasser gesprochen werden. Typische Wassernebel mit kleineren Tropfendurchmessern wurden nicht untersucht.

Kim, Jang und Kim /49(1996)/ untersuchen die Abbrandgeschwindigkeit und den Löscheintritt eines kleinen Benzin-Lachenbrandes bei vertikal nach unten gerichteten Sprühstrahlen. Das Benzin befindet sich in einer Schale mit 10 cm Durchmesser und 1 cm Höhe. Der Düsenabstand beträgt 45 cm. Bei den Versuchen werden Hohl- und Vollkegeldüsen eingesetzt. Der Volumenstrom beträgt zwischen 0,04 und 0,76 l/min bei einem Druck von 7 bar. Der Sauter-Durchmesser der Düsen beträgt zwischen ca. 30 μm und 60 μm . Es zeigte sich, daß die Abbrandgeschwindigkeit des Benzins bei einem genau über dem Flammenkörper platzierten Sprühstrahl größer als bei freiem Abbrennen ist. Demnach können Sprühstrahlen einen Benzinbrand verstärken. Außerdem wurde festgestellt, daß sehr kleine Wassertropfen eine geringere Löschwirkung zeigen, da sie die Treibstoffoberfläche auf dem Weg durch den Flammenkörper nicht erreichen. Festgestellt wurde ebenso, daß der Löschmechanismus für kleine Treibstoffbrände auf der Abkühlung der Flüssigkeitsoberfläche und der Verminderung der Verdunstung beruht und nicht auf der Abkühlung des Flammen selbst.

Die Landesanstalt für Arbeitsschutz NRW und das Landesumweltamt NRW /50(1996)/ haben in 2 Versuchsreihen Brand- und Löschversuche mit brennbaren VbF-Flüssigkeiten (Spiritus (Gefahrklasse B), Waschbenzin (Gefahrklasse AI)) in Regallageranordnung durchgeführt. Zum Löschen wurde sowohl eine CO₂-Löschanlage als auch eine Hochdruck-Wassernebellöschanlage eingesetzt. Der Brandversuchsraum 1 hatte folgende technische Daten: Abmessungen 4 m * 4 m * 3,95 m hoch, CO₂-Löschanlage mit 4 Düsen, (Druckflaschen mit je 30 kg Inhalt, manuelle Auslösung), 2 Abluftventilatoren, Hochdruck-Wassernebellöschanlage (Betriebsdruck: 100 bar, 5 Düsenköpfe, jeweils mit maximal 5 Einzeldüsen bestückt, Gesamtwasserdurchsatz zwischen 6,88 l/min und 13,75 l/min, manuelle Auslösung). Die Brandlasten lagen im Bereich zwischen 2 l und 60 l Spiritus (u.a. Plastikflaschen in Kartons) bzw. 24 l Waschbenzin (Kartonagen mit Büchsen). Der Brandversuchsraum 2 hatte folgende technische Daten: Abmessungen 7,3 m * 7,9 m * 5,3 m hoch, Hochdruck-Wassernebellöschanlage (Betriebsdruck: 100 bar, 16 Düsenköpfe, jeweils mit maximal 5 Einzeldüsen bestückt, Gesamtwasserdurchsatz 33 l/min), mehrere natürliche Abluftöffnungen. Die Brandlasten lagen im Bereich zwischen 120 und 200 l Spiritus (u.a. Plastikflaschen in Kartons) bzw. 105 bis 204 l Waschbenzin (Kartonagen mit Büchsen). Die Löschdüsen wurden in beiden Versuchsräumen im Deckenbereich über dem Lager angeordnet. Die Tropfengrößenverteilung liegt bei den für die Versuche ausgewählten beiden Düsen etwa im Bereich 10 µm - 125 µm bzw. 15 µm - 200 µm mit mittleren Tropfendurchmessern von ca. 60 µm bis 80 µm. Es wird erwähnt, daß bei den Löschversuchen bei Einsatz von CO₂ die Sauerstoffkonzentration in der Raumluft auf Werte zwischen 14 und 16 Vol. %, bei Einsatz von Hochdruckwassernebel auf 16 - 18 Vol. % absank, bei der ein Verlöschen des Brandes erreicht wurde. Dies wird durch den zusätzlich auftretenden Kühleffekt bei Wassernebel erklärt. Es wird erwähnt, daß beim Menschen ein Sauerstoffanteil von mindestens 15 Vol. % in der Atemluft vorhanden sein muß. Es wird weiterhin aufgeführt, daß sich der Löscheffekt bei Wassernebel zu etwa 80 % aus Inertisierung und etwa 20 % aus Kühlung zusammensetzt. Die Löschzeiten lagen bei den durchgeführten Brandversuchen sowohl beim Einsatz von CO₂ als auch bei Wassernebel im Bereich zwischen 1 und 4 Minuten.

Mawhinney und Richardson /51(1996)/ geben eine Zusammenstellung internationaler Forschungsinstitute, Universitäten, Hersteller, Firmen und Organisationen, die sich mit der For-

schung, Entwicklung und Normung auf dem Gebiet der Wassernebeltechnologie beschäftigen. Die bisherigen Arbeiten werden kurz beschrieben und die Ansprechpartner genannt.

Pleß und Meissner /52(1996/ haben Hochdrucknebel bei der Bekämpfung von glutbildenden Brandstoffen untersucht. Das Löschen von Flammen (Gaswolken oder Flüssigkeitssprays) mit feinverteilten Wassertropfen muß als Ergebnis des Wärmeüberganges an Tropfen und der Inertisierung durch Wasserdampf angesehen werden. Die Inertisierung bleibt dabei stets eine Folgereaktion, die erst bei hohen Wasserdampfkonzentrationen wirksam wird. Diese ist räumlich gebunden und tritt dem Wärmeübergang auf das Löschwasser zeitlich nachgeordnet ein. Aus Literaturuntersuchungen haben die Autoren herausgefunden, daß 450 g feinstverteiltes Löschwasser je m³ Flammenvolumen erforderlich sind, um mittels Sprühstrahlen Flammenbrände zu löschen. Die Volumenlöschung (Löschen in der Flamme) über festen oder flüssigen Brandstoffen erfordert immer, das gesamte Flammenvolumen vollständig einzuhüllen. Die Volumenlöschung kann effizient nur durch Einbringen des Löschmittels mit der Strömung der Luft realisiert werden. Der Eintritt der Wassertropfen muß damit im Bereich der Ansaugzonen für die Luft erfolgen. In diesem Bereich sind sie kalten Gasen ausgesetzt. Der Wärmeübergang kann hier nur durch Strahlung erfolgen. Dies ist nur in Sonderfällen möglich und kann im mobilen Löscheinsetz bei beliebigen Brandflächen aufgrund der komplizierten Flammenstrukturen nicht erreicht werden. Nur kleinere Brandflächen bis ca. 4 m² können unter günstigen Bedingungen beherrscht werden. Für die Brandlöschung brennender Feststoffe oder Flüssigkeitsflächen sollte die Löschwirkung des Löschwassers an der Oberfläche des brennbaren Stoffes genutzt werden (Oberflächenlöschung). Die Oberfläche des brennbaren Stoffes wird durch das Löschwasser soweit abgekühlt, daß keine oder nur geringe Mengen brennbarer Gase und Dämpfe in die Flammenzone einströmen können. Zusätzlich wird der kondensierten Phasengrenze soviel Energie entzogen, daß sich ein Flüssigkeitsfilm ausbilden kann. Flüssigkeitsfilme wirken als Diffusionsgrenzsichten und vermindern den Übergang von Gasen und Dämpfen. Damit müssen die Flammen zwangsläufig verlöschen. Durch die sich bewegenden Wassertropfen wird aus der Umgebung Luft angesaugt und im Strahl mitgerissen. Die Geschwindigkeit der Luft im Strahl kann maximal die Geschwindigkeit der Wassertropfen erreichen. So wird mit einem Wasser- und Hochdrucknebelstrahl dem Brandobjekt neben verteiltem Wasser auch Luft

mit Geschwindigkeiten von 10 bis 60 m/s zugeführt. Deshalb müssen Brände mit Glutbildung an den Oberflächen besonders hohe Anforderungen für das Löschen unter Verwendung von Hochdrucknebel darstellen. Für die Untersuchungen wurde ein mobiles Hochdrucklöschgerät verwendet (max. Düsendruck ca. 220 bar, Durchsatz bei 200 bar: ca. 18 l/min, bei 60 bar ca. 10 - 12 l/min). Neben reinem Wasser wurden unterschiedliche Löschmittelzusätze, u.a. AFFF-Schaummittel verwendet. Brände an Normholzstapeln konnten bei hohen Düsendrücken (180 bar) sowohl mit reinem Wasser als auch mit Wasser mit Zusätzen nicht gelöscht werden. Die Ursache für die ungenügende Löschwirkung lag zum einen in der mechanischen Wirkung des Wasserstrahles (Verteilung der Glutteile) und zum anderen an der im Strahl mitgeführten Luft, was zu einer Entfachung der Glut an den Holzoberflächen führte (heterogene Verbrennungsreaktion an der Phasengrenzfläche wird verstärkt). Bei weiteren Versuchen wurde der Druck soweit verringert, daß sowohl mechanisch als auch von der Löschwirkung günstige Bedingungen erreicht wurden. Die Versuchsergebnisse zeigten, daß der Normholzstapel durch ein Wasserspray mit 60 bar gelöscht werden konnte. Infolge der geringen Benetzbarkeit der Oberfläche aufgrund der Oberflächenspannung von Wasser konnte die Glut nur langsam abgekühlt werden, wodurch es zu häufigen Rückzündungen kam. Durch den Zusatz von Tensiden und Salzen konnte die Löschwirkung des Sprays verbessert werden. Die günstigste Löschwirkung wurde aber durch die Kombination von Tensiden und Salzen erreicht.

Schremmer /53(1996)/ gibt einen Überblick über den Stand der Technik der Wasservernebelung, die Einsatzgebiete und vergleicht diese mit den Sprinkleranlagen. Bezüglich der Kosten ergeben sich keine entscheidenden Kostenvorteile durch die Anwendung der Feinsprühtechnik gegenüber der Sprinkler-Feuerlöschtechnik. Kostenintensiv sind für die Installation einer stationären Wassernebel- oder Wassersprühnebel-Feuerlöschanlage die notwendige größere Anzahl an Spezialdüsen, insbesondere bei der Mittel- und Hochdrucktechnik, an Steuerungsarmaturen durch die notwendige Unterteilung größerer Anlagen in mehrere Löschsektionen, der Einsatz spezieller Rohre und Rohrfügetechniken für höhere Druckbereiche sowie die Anwendung separater Wasserbevorratungen mit Druckerzeuger für die Hochdrucktechnik. Ein weiterer Kostenpunkt ist die oft erforderliche komplexe mechanische oder elektrisch/elektronische Branddetektion zur Ansteuerung der Löschanlagen sowie der komplexere anlagen-

technische Aufbau. Im Normalfall kann man davon ausgehen, daß sich für die Nieder-, Mittel- und Hochdrucklöschanlagen gegenüber der vom Grundaufbau vergleichbaren Sprinkler- und Sprühwasserfeuerlöschtechnik ohne Berücksichtigung der Löschwasserversorgung 30 bis 50 % höhere Anlagenkosten ergeben können. Diesen Mehrkosten stehen eine niedrigere Gesamtlöschwassermenge gegenüber. Dabei reduziert sich die Größe der erforderlichen Löschwasserversorgung, die Größe des Löschwasserrückhaltevolumens und die Menge des zu entsorgenden kontaminierten Löschwassers. Durch die Möglichkeit des Einsatzes von Wasser für Brandstoffe, die mit Grobsprühwasser (Sprinklersprays) oder Sprühwasser nicht zu löschen sind, ergeben sich weitere anwenderspezifische Vorzüge.

Bürgel /54(1996)/ geht auf die Wirkprinzipien (Kühleffekt, Stick- und Inertisierungseffekt, katalytischer Effekt), die Druckstufen, die Zerstäubungsarten und die Einsatzmöglichkeiten von Mikrowasser-Löschanlagen besonders im Hinblick auf die Anwendung bei Kraftwerken ein. Diese Löschanlagen können angewendet werden bei Kabelkanälen, in Hochregallagern und Lagerbereichen, in Computer-Räumen, Kontrollräumen, Schaltanlagen-Räumen Schmierölbereichen und bei ölgefüllten Transformatoren in kleineren Innenräumen.

Nach **Rempe /55(1997)/** beruht die Hauptlöschwirkung des Wassernebels auf der Kühlwirkung von heißen Gasen und Dämpfen (Flammen) sowie brennender, glutbildender Oberflächen. Die Inhibitor- wie auch die erstickende Wirkung spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Böke /56(1997)/ gibt einen Überblick über die Wirkungsweise von Feinsprüh-Löschanlagen und geht hierbei auf die Tropfenbewegung, die Wärmeübertragung und die Brandmodellierung ein. Für die Betrachtung der Wirksamkeit sind die aufgeführten Abläufe miteinander zu verknüpfen, um eine Aussage über die Wirksamkeit machen zu können. Tropfengröße, Tropfengeschwindigkeit, Brandgastemperatur und Brandgasgeschwindigkeit sowie Lufteinmischung sind nicht als konstante Größen, sondern zeit- und ortsabhängig zu errechnen. Zwischen diesen Größen bestehen zusätzlich noch Wechselwirkungen. Von den aufgeführten Prozessen sind die Wärmeübertragung und der Verbrennungsprozeß abhängig. Nach Böke /56/ sind weiterhin die betrieblichen Prozesse zu untersuchen, um die Übertragung der theoretischen Ergebnisse auf die praktischen Bedingungen sicherzustellen.

Mögliches Auftreten von Glutbränden, Betriebsabläufe, die brennbares Material aus oder in den Gefahrenbereich befördern, Strömungsbedingungen der Umgebungsluft sind bei dem Schutzkonzept zu berücksichtigen. Auf diese Wechselwirkungen und Einflußgrößen wird auch in den Arbeiten von Kunkelmann /38/ näher eingegangen. Weiterhin sind die Einwirkungen, wie z.B. Verschmutzung, Vibrationen oder Korrosion, die durch betriebliche Prozesse bedingt sind, bei den Anforderungen an die Bauteile der Löschanlage zu berücksichtigen. Böke /56/ betont, daß der Vorteil dieser Löschtechnik, kleine Tropfen zu erzeugen, die Anwendung sehr sensibel für Störungen macht. Können die Düsen nicht nahe genug an die Brandstelle gebracht werden oder müssen die Düsen derart nahe positioniert werden, daß sich der Strahl nicht ausbilden kann, ist diese Löschanlagentechnik ungeeignet. Anschließend an diese Betrachtungen geht Böke auf die Richtlinienarbeit ein. Feinsprüh-Löschanlagen können nach den VdS-Richtlinien "Sprühwasser-Löschanlagen, Planung und Einbau" (s.a. /62/) für Kabelkanäle eingesetzt werden. Für andere Anwendungsfälle besteht die Möglichkeit der Anerkennung auf der Basis des VdS-Richtlinienentwurfs "Anerkennung neuer Löschtechniken". In diesem Verfahren kann eine Anerkennung bezogen auf ein klar definiertes Schutzziel erfolgen. Die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der Löschanlage werden durch Brandversuche, Bauteil- und Systemprüfungen untersucht. Böke erwähnt, daß von der NFPA (National Fire Protection Association), von FM (Factory Mutual) und der IMO (International Maritime Organization) ebenfalls Richtlinien für diesen Löschanlagentyp herausgegeben werden.

Widetschek /57(1997)/ führt einen Vergleich der verschiedenen Löschmittel Wasser, Löschpulver, Schaum und Löschgase durch. Bei Wassernebel sieht er eine eingeschränkte bis gute Löschwirkung bei den Brandklasse A, B und C sowie elektrischen Anlagen und eine eingeschränkte Löschwirkung bei Bränden von Metallen.

Dortmann /58(1997)/ berichtet über Brand- und Löschversuche an einem horizontalen Kabelkanal bei der DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH auf der Versuchsgrube Tremonia in Dortmund. Als Löschanlage wurde eine Niederdruck-Wassernebel-löschanlage verwendet. Der Kabelkanal hatte die Abmessungen 15 m * 2,6 m * 1,9 m und wies 8 Kabelpritschen mit ca. 8 km Kabel auf. Es wurden sowohl Entstehungsbrände (Vorbrennzeit eines Propangasbrenners: 2 Minuten, Löscheinsatz nach 10 s)

und Vollbrände (Vorbrennzeit eines Propangasbrenners: 2 Minuten, Löscheintritt nach 10 min) untersucht. Je nach Düsenanordnung und Düsentyp war für das sichere Ablöschen von Entstehungs- und Vollbränden ein Wasservolumenstrom von 110 bis 225 l/min notwendig. Dies ergab eine Löschmittelintensität bezogen auf das Volumen von 1,5 bis 3 l/min m³. Im Vergleich zu Sprinkler-Löschanlagen konnte nachgewiesen werden, daß die notwendigen Wassermengen erheblich reduziert werden können.

Dyer /59(1997)/ berichtet über Brand- und Löschversuche an Strahltriebwerken und Gasturbinen mit Wassernebellöschanlagen. Es wurden sowohl Niederdruck- als auch Hochdrucklöschanlagen verwendet. Die Versuche wurden sowohl ventilations- als brandlastgesteuert durchgeführt. Als Brandstoffe wurden Treibstoff für Flugzeugtriebwerke, Schmier- und Hydrauliköl, Propan und Heptan verwendet. Die Vorbrennzeit betrug 60 s bis zum Löscheintritt. Die Wärmefreisetzung bei den einzelnen Versuchen betrug zwischen 1 und 2,5 MW. Beim Löschen wurde sowohl die Totalflutung, die gezielte Anwendung als auch beides kombiniert angewendet. Über die Ergebnisse der Versuche wird berichtet.

Kubiza /60(1997)/ geht auf die neuartigen Löschverfahren ein die im Prinzip mit Wassernebel arbeiten. Die neuen Methoden verteilen das Löschwasser möglichst fein, um eine hohe Ausbeute an Wärmebindung zu erzielen. Der praktische Löscherfolg ist aber nicht nur vom Wärmebindungsvermögen des Löschmittels abhängig. Die Reichweite muß ausreichen, um die Tröpfchen auch tatsächlich in den Hochtemperaturbereich des Brandes einbringen zu können. Der Autor geht auf das Turbinenlöschverfahren, Sprenglöschverfahren, Impulslöschverfahren und das Löschen mit Hochleistungslüfter näher ein und zeigt die Vor- und Nachteile bezüglich Löschwirkung und Anlagentechnik.

3. NORMUNGSTÄTIGKEITEN

Nachfolgend werden einige Normen und Richtlinien aufgeführt, die sich mit Wassernebellöschanlagen beschäftigen.

Im Jahre 1993 wurde das NFPA Technical Committee on Water Mist Fire Suppression Systems eingerichtet, um eine Norm zu schaffen, die die Wassernebeltechnologien standardisiert. Mitglieder sind Forschungseinrichtungen, Ingenieurgesellschaften, Hersteller von Wassernebellöschanlagen, die Versicherungswirt-

schaft, Vollzugsbehörden und industrielle Anwender. Es entstand die NFPA 750, Standard on Water Mist Fire Suppression Systems /61/. Die Norm enthält die Mindestanforderungen für die Konstruktion, Installation, Instandhaltung und den Test von ortsfesten Wassernebellöschanlagen. Die Norm enthält keine Angaben darüber, wie ein Brand kontrolliert, unterdrückt oder gelöscht werden kann. Es wird z.B. auf die verschiedenen Zerstäubungsarten (Einstoffsystem, Zweistoffsystem), Naß- und Trockenanlagen eingegangen. Per Definition soll ein Wassernebel eine volumenbezogenen Durchmesser $D_{V0,99}$, gemessen im "grobsten" Bereich des Sprühnebels in einer Ebene in 1 m Abstand von der Düse beim geringsten zulässigen Betriebsdruck, von weniger als 1000 μm aufweisen. Die Wassernebellöschanlagen werden durch folgende Druckstufen unterteilt:

- Hochdruck: $\geq 34,5$ bar
- Mitteldruck: $> 12,1$ bar und $< 34,5$ bar
- Niederdruck: $\leq 12,1$ bar

Als Löschmechanismen werden die Kühlung der Flammen und der Rauchgase, die Sauerstoffverdrängung durch Wasserdampf sowie die Abschwächung der Wärmestrahlung aufgeführt.

Wassernebellöschanlagen können dazu verwendet werden

- den Brand zu löschen
- den Brand zu unterdrücken
- den Brand zu kontrollieren
- die Temperaturen zu begrenzen
- Umgebungsbauteile zu schützen

Bezüglich der Einsatzgebiete sollen Wassernebelsysteme nicht bei Stoffen angewendet werden, die mit Wasser gefährliche Reaktionen ergeben. Sie sollen ebenfalls nicht bei Flüssiggasen bei der kritischen Temperatur (heftiger Siedevorgang bei Kontakt mit Wasser) eingesetzt werden.

In der Norm werden die Anforderungen an die Systemkomponenten Rohrleitungen, Rohrleitungskomponenten, Düsen, Ventile, Filter, Siebe, Pumpen, Stromversorgung, Regelung der Pumpen und sonstige Regeleinrichtungen, Brandmeldesysteme, Auslösesysteme näher erläutert. Weiterhin die Anforderungen an die Installation sowie an Gas- und Wasservorratsbehälter. Bezüglich der Wasserbevorratung soll die Menge für den größten anzunehmenden Brand ausreichend sein und für mindestens 30 Minuten ausreichen. Eine Reserveversorgung ist erforderlich, wenn das Lösch-

mittel nicht binnen 24 Std. aufgefüllt werden kann. Vor jeder Düse soll ein Filter oder Sieb angebracht werden mit der Ausnahme bei Düsenköpfen mit mehreren Öffnungen und Öffnungsdurchmessern $> 800 \mu\text{m}$. Düsen mit Öffnungsdurchmessern $< 51 \mu\text{m}$ sollen mit demineralisiertem Wasser betrieben werden.

Es werden Richtlinien für die Dokumentation der Anlage, Abnahme und Prüfung der Anlage, Wartung sowie die Zeitintervalle für Inspektionen und Tests aufgeführt. Es wird aufgeführt, daß Tropfen $< 400 \mu\text{m}$ effektiv zum Löschen von Bränden der Klasse B (flüssige Brennstoffe), Tropfen $> 400 \mu\text{m}$ effektiver bei Bränden der Klasse A (feste Brandstoffe, glutbildend) sind.

Die Wassernebel mit einem Tropfendurchmesser $D_{V0,99} < 1000 \mu\text{m}$ werden weiter unterteilt in

Klasse 1 Wassernebel:

$$D_{V0,1} = 100 \mu\text{m}$$

$$D_{V0,9} = 200 \mu\text{m}$$

Klasse 2 Wassernebel:

$$D_{V0,1} = 200 \mu\text{m}$$

$$D_{V0,9} = 400 \mu\text{m}$$

Klasse 3 Wassernebel:

$$D_{V0,9} > 400 \mu\text{m}$$

$$D_{V0,99} < 1000 \mu\text{m}$$

Es wird erwähnt, daß Klasse 1 und 2 erfolgreich beim Einsatz bei Flüssigkeitslachenbränden und Sprühbränden ohne direkten Kontakt mit der Flüssigkeitsoberfläche sind. Bei geeigneter Raumgeometrie ist auch Klasse 3 für Lachenbrände geeignet.

Es ist schwierig Brandklasse A mit Klasse 1 zu löschen, da dieser Nebel die Brandlast nicht benäht. Dies wäre erforderlich um die Verkohlungs-schicht zu durchdringen. Klasse A Brände können jedoch durch Nebel der Klasse 1 dann gelöscht werden, wenn die Tropfengeschwindigkeit hoch ist, nur die Oberfläche brennt oder Einhausungseffekte zu einer stärkeren Verringerung der Sauerstoffkonzentration führen. Die Tropfengrößenverteilung entscheidet nicht allein darüber, ob ein Brand gelöscht wird. Weiterhin mitentscheidend sind die Eigenschaften der Brandlast, Einhausungseffekte, Sprühnebel-dichte und dem Impuls des Sprühnebels (Masse und Geschwindigkeit der Tropfen). Als Anwendungsgebiete für Wassernebel-systeme werden

aufgeführt:

- a) Brände von Gasstrahlen
- b) brennbare Flüssigkeiten
- c) gefährliche Feststoffe einschließlich Brände bei Schaumstoffen
- d) Schutz von Flugzeugbesatzungen und Passagieren vor Lachenbränden im Außenbereich um eine Evakuierung zu gewährleisten
- e) Brände der Brandklasse A z.B. Papier, Holz, Textilien
- f) Elektrische Gefahrenquellen, wie Transformatoren, Schalter, Unterbrecher und rotierende Teile
- g) Elektronische Ausrichtungsgegenstände einschließlich Fernsprecheinrichtungen

Bezüglich der Wirkung von Wassernebelanlagen auf den Menschen ist in den meisten Anwendungsfällen der Wassernebel für Menschen ungefährlich, jedoch kann die direkte Einwirkung eine Schädigung der Augen bewirken. Während des Betriebes der Wassernebelanlage können die Geräusche das Gehör schädigen. Wassernebel kann die Sichtverhältnisse für die Flucht verschlechtern. Besonders bei Mittel- und Hochdruckanlagen können gebrochene Rohre und gerissene Schläuche gefährlich werden.

Die Bestimmung der Tropfengrößenverteilung soll bei minimalem und maximalem Betriebsdruck der Düse gemäß ASTM E 799: Standard Practice for Determining Data Criteria and Processing for Liquid Drop Size Analysis erfolgen.

Die Bestimmung der Wasserverteilung soll mittels Auffangwannen bei minimalem und maximalem Betriebsdruck der Düse erfolgen.

Die Bestimmung der Form des Sprühkegels soll bei minimalem und maximalem Betriebsdruck der Düse erfolgen, ebenfalls die Bestimmung der Strahlkraft.

Der VdS Schadenverhütung /62/ geht in seiner Richtlinie für Sprühwasser-Löschanlagen auf die Bemessungsgrundlagen, die Wasserversorgung, die Energieversorgung von Pumpenanlagen, die Auswahl und Arten der Auslöseeinrichtungen, die Anordnung und Arten der Düsen, das Rohrleitungsnetz, die Druckluftversorgung, die Alarmierung, die Überwachung von Sprühwasser-Löschanlagen sowie auf spezielle Einsatzgebiete der Anlagen (Holzbe- und verarbeitende Industrie, Förderbänder, Kabelkanäle, Transformatoren, Kraftwerke und brennbare Flüssigkeiten) ein. In einer Übergangsregelung wird zusätzlich auf Feinsprühdüsen, die sehr kleine Wassertropfen erzeugen, eingegangen.

Aufgrund der geringen kinetischen Energie der Tropfen kann eine ausreichende Löschwirkung bei geringem Löschwassereinsatz nur im Nahbereich bis zu 3 m erreicht werden. Es wird festgestellt, daß die Grundlagen dieses Löschprinzips noch nicht umfassend erforscht sind, so daß der VdS den Einsatz von Feinsprühdüsen vorerst nur für solche Anwendungsfälle befürworten kann, bei denen die Wirksamkeit durch Löschversuche hinreichend nachgewiesen wurde. U.a. werden folgende Punkte für Sprühwasser-Löschanlagen mit Feinsprühdüsen aufgeführt:

- die Verwendung von Salz- oder Brackwasser ist unzulässig
- die Benutzung von offenen Gewässern als Wasservorrat ist unzulässig
- nach jeder Sprühwasser-Ventilstation ist ein VdS-anerkannter Steinfänger mit Feinsieb anzuordnen
- Feinsprühdüsen für Kabelkanäle: Diese Düsen verteilen das Wasser in feinen Tropfen seitlich in die Kabelanordnung.
- bei Verwendung von Feinsprühdüsen darf sowohl der vertikale als auch der horizontale Abstand der Düsen untereinander 2,5 m nicht überschreiten.
- Mindestwasserbeaufschlagung 5 mm/min
- Druck an der Düse 4 bar bis 12,5 bar

Die Normung in Deutschland und Europa wird vom Normenausschuß Feuerwehrwesen (FNFV) und dem Europäischen Komitee für Normung (CEN) durchgeführt.

4. MARKTÜBERSICHT WASSERNEBELLÖSCHSYSTEME

In Tabelle 1 werden eine Reihe von auf dem Markt angebotenen Systemen von Wassernebellöschanlagen und -geräten (ortsfest und mobil) aufgeführt. Diese Zusammenstellung soll u.a. einen Überblick über die derzeitigen Ausführungsformen und Einsatzgebiete dieser Löschtechnik geben. Die Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die für die Erstellung der Tabelle verwendeten Unterlagen und Firmenschriften wurden nicht daraufhin überprüft, ob die Systeme zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch existieren bzw. geändert wurden. Die Richtigkeit der Angaben in den Unterlagen und Firmenschriften wurde vom Verfasser nicht überprüft.

Wie die Auswertung der in- und ausländischen Literatur und von zahlreichen Firmenschriften gezeigt hat, besteht bezüglich der

Terminologie bei Wasserlöschanlagen eine Vielfalt an Begriffen. In Tabelle 2 werden beispielhaft einige deutsche und englische Begriffe und Schreibweisen für den gleichen Anlagentyp aufgeführt.

Bezüglich der Tropfengrößen finden die in Tabelle 3 aufgeführten Tropfendurchmesser und Bezeichnungen für Tropfendurchmesser Verwendung.

Für die Erarbeitung von Normen und Richtlinien für Wassernebellöschanlagen ist es unbedingt erforderlich, daß eine einheitliche Begriffsbildung erarbeitet wird und Kenngrößen festgelegt werden, die das System eindeutig beschreiben. Hierzu zählen insbesondere Angaben zu mittleren Tropfengrößen und Tropfengrößenverteilungen. Zur Beschreibung des Tropfenspektrums ist es sowohl erforderlich den Fein- als auch den Grobtopfenanteil zu erfassen, da ersterer hauptsächlich für den Wärme- und Stoffübergang in der Flammenzone und die Inertisierung und letzterer hauptsächlich für die Löschwirkung auf dem Brandgut insbesondere bei glutbildenden Brandstoffen verantwortlich ist. Bei Untersuchungen sollte genau definiert werden, welcher Tropfendurchmesser gemeint ist, z. B. reicht es nicht nur anzugeben "Mittlerer Tropfendurchmesser", da dieser aufgrund verschiedener Definitionen sehr unterschiedlich bestimmt werden kann. Erst durch diese Vereinheitlichungen und exakten Definitionen wird es möglich sein, Löschanlagen und -geräte bezüglich der Einsatzgebiete und der zu erwartenden Löscherfolge miteinander zu vergleichen. Es wurde erkannt, daß neben dem Tropfendurchmesser, die Oberfläche der Tropfen, das auf den Brandherd aufgebrachte Wasservolumen pro Zeiteinheit sowie der Tropfen- und Wasserdampfgehalt im Sprühnebel bei unterschiedlichen Abständen von der Düse in Wechselwirkung mit den Flammen und Rauchgasen von entscheidender Bedeutung für den Löscherfolg sind. Hierfür müssen noch geeignete Meßmethoden entwickelt werden, da zum Beispiel Tropfengrößenmessungen bisher nur im kalten Fall gemessen werden können. Auch stellt die Bestimmung des Tropfen- und Wasserdampfgehaltes im Brandfall ein großes Problem dar.

5. BRANDVERSUCHE AN DOPPELFASSADE

5.1 VERSUCHSPROGRAMM

Zur Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden im Zwischenfassadenbereich sowie in benachbarte und darüberliegende Räume beim Einsatz von Niederdruck-Wassernebellöschanlagen wurden Brandversuche in einer dafür errichteten Versuchseinrichtung durchgeführt. Von Interesse war hierbei die Bestimmung der Wärmefreisetzung beim Brand, die Rauchgaszusammensetzung im Brandraum, die Temperaturen im Brandraum und in angrenzenden Räumen, im Zwischenfassadenbereich, an den Fenstern und Verglasungen, die Wärmestrahlung an Fenstern in über dem Brandraum liegenden Stockwerken, die Rauchgaszusammensetzung im Abgas des Zwischenfassadenbereiches, die Luft- bzw. Rauchgasvolumenströme der Zu- und Abluft des Zwischenfassadenbereiches sowie die Löschwirksamkeit und der Löschwasserbedarf der Löschanlage. Besondere Aufmerksamkeit wurde auch dem Versagen der Wärmeschutzverglasung der Innenfassade und dem Versagen der Einscheibensicherheitsverglasung (kurz: ESG) der Außenfassade geschenkt. Die Auswahl der Versuchsparameter und Meßgrößen hatte das Ziel, Kriterien für die Konstruktion und den Brandschutz bereitzustellen, die den Personen- und Objektschutz bei derartigen Gebäuden gewährleisten. Neben den Versuchen mit Wassernebellöschanlage wurden auch Versuche mit realer Brandlast (ca. 750 kg Möbel Δ 30 kg/m²) ohne Wassernebelanlage bei einem großen Abstand von 1,2 m zwischen innerer und äußerer Fassade durchgeführt. Diese Versuche sind eine Ergänzung zu den von Kunkelmann in /1/ und /2/ beschriebenen Versuchen mit einer Ganzflächendoppelfassade mit niedrigerer Brandlast.

5.2 VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNIK

Bild 1 zeigt die Prinzipskizze des Versuchsaufbaus bestehend aus Brandraum, Flur, Nebenraum und dem Teilbereich einer Ganzflächendoppelfassade sowie den Meßstellenplan (siehe auch Meßstellenliste in Tabelle 4) mit den entsprechenden Abmessungen. Bild 2 zeigt im Detail den Zwischenfassadenbereich. Tabelle 5 und 6 (6.1 - 6.5) enthält nähere Einzelheiten zu den Versuchsaufbauten, Konstruktionselementen, Brandlasten und Versuchsparametern ohne und mit Wassernebellöschanlage. In Bild 1 ist das durch eine Wand über dem Brandraum angedeutete weitere Stockwerk zu erkennen. Im Brandraum befindet sich eine Fensteröffnung, die bei den Versuchen mit Wassernebellöschanlage mit einer Wärmeschutzverglasung versehen war. Für die Versuche mit Wassernebel wurde ein Niederdruck-Sprühkopf an der Deckenmitte installiert (Foto 7, S.159). Die Fensteröffnung des oberen Stockwerkes ist bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen ebenfalls mit Silikat-Brandschutzbauplatten verschlossen, wobei in der Mitte des Fensters eine Wärmestrahlungsaufnehmer angebracht ist. An den Brandraum grenzen ein Flur sowie ein Nebenraum an. Die Räume sind jeweils durch eine Tür miteinander verbunden. Der Boden des Brandraumes ist als Waageplattform ausgebildet. Vor der Wand des Brandraumes und des "oberen Stockwerkes" befindet sich eine verfahrbare Außenfassade. Diese Außenfassade besteht aus einem verfahrbaren Stahlgerüst mit daran befestigten Silikat-Brandschutzbauplatten. Ein Teilbereich der Außenfassade wurde, wie in Bild 1, 2 dargestellt und in den Tabellen 5 und 6 aufgeführt, mit einer Einscheibensicherheitsverglasung in einem handelsüblichen Aluminiumprofilssystem mit Glashalteleisten ausgeführt. Auf eine Vollverglasung der Außenfassade mußte aus Kostengründen verzichtet werden.

Als Brandlast wurde bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen Möbel, Holzkrippen und Heptan als Zündquelle verwendet. Weiterhin wurde eine Holzständerwand mit Zellulosedämmung verwendet um einen ersten Einblick über das Brand- und Löschverhalten biologischer Baustoffe zu erhalten. Genauere Angaben über die Brandlast finden sich in Tabelle 5 und 6 (6.1 bis 6.5).

Bei den Versuchen wurden zeitliche Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelementen, der zeitliche Verlauf der Abbrandmasse, die Strömungsgeschwindigkeit der Luft bzw. der Rauchgase an

Zu- bzw. Abluftöffnung der Außenfassade, die Wärmestrahlung an der Innenfassade im oberen Stockwerk, die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration mit Infrarot-Gasanalysatoren im Brandraum und in der Abluft des Zwischenfassadenbereiches gemessen. Weiterhin wurde der Volumenstrom und der Druck am Wassernebelsprühkopf meßtechnisch erfaßt. Die Art und Position der Meßstellen sind Bild 1 und 2 sowie der Meßstellenliste nach Tabelle 4 zu entnehmen. Zusätzlich wurde der Versuchsablauf mit mehreren Farb-Videokameras aufgezeichnet. Die Meßwertregistrierung erfolgte mit personalcomputergesteuerten Datenerfassungsanlagen.

6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Tabelle 5 gibt nähere Einzelheiten über die Versuchsaufbauten und Versuchsparameter (z.B. Zu- und Abluftöffnungen, Fenster, Türen, Fassadenabstand, Brandlast) zu Versuch 8 ohne Wassernebel, die Tabellen 6.1 bis 6.5 zu den Versuchen A bis E mit Wassernebel enthalten zusätzlich Angaben zum Betrieb der Löschanlage (Druck, Volumenstrom, Dauer- oder Intervalllöschen).

6.1 VERSUCH 8: Ohne Wassernebellöschanlage

Brandlast: Möbel, Vorhang am geöffneten Fenster

Zur Vervollständigung der Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen von Kunkelmann /1, 2/ wurden noch weitere Versuche mit einer realen Brandlast für einen Wohnzimmerbrand (ca. 750 kg Möbel Δ 30 kg/m²) bei einem großen Abstand zwischen innerer und äußerer Fassade (1,2 m) in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächendoppelfassade durchgeführt. Versuch 8 (Tabelle 5) wurde hierzu repräsentativ herausgegriffen. Bild 3 und Foto 1 und 2 (S.157) zeigt die Aufstellung der Wohnzimmer-einrichtung mit der Position der Zündwanne im Brandraum. Bei diesem Versuch wurde keine Wassernebellöschanlage eingesetzt. Um den angrenzenden Flur und Nebenraum vor der großen Wärme-freisetzung zu schützen, wurde die Tür zum Brandraum geschlossen. Zur Erzielung einer ausreichenden Ventilation war die Fensteröffnung des Brandraumes offen. Das Ablöschen des Brandes erfolgte durch die Feuerwehr.

6.2 VERSUCH A: Mit Wassernebellöschanlage

Brandlast: Möbel, Vorhang am geschlossenen Fenster

Tabelle 6.1 enthält nähere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung mit 162 kg Möbel und einem Vorhang am Brandraumfenster. Das Auslösen der Wassernebellöschanlage erfolgte wie bei den folgenden Versuchen manuell nach dem Zerplatzen des Glasfasses eines Indikatorsprinklers direkt neben dem Wassernebel-sprühkopf (Foto 7, S.159). Die Brandlasten (Foto 8, S.159) wurden aufgrund von zahlreichen Vorversuchen relativ klein im Gegensatz zu Versuch 8 gewählt, da durch ein frühzeitiges Auslösen der Löschanlage ein geringer Brandschaden zu erwarten war und aus Kostengründen verhindert werden sollte, daß durch Benässen einer großen Brandlastmenge diese für nachfolgende Versuche zunächst unbrauchbar werden würde. Zur Erzielung einer ausreichenden Ventilation im Brandraum war die Brandraumtür geöffnet. Der Löschvorgang wurde nach einem größeren Löschintervall zu Beginn des Versuches mehrmals unterbrochen um den Löscherfolg bezüglich der Brandentwicklung beurteilen zu können. Dies geschah auch im Hinblick auf die Ausführung der Brandversuche (Versuch D und E), die bezüglich des Löscheinsatzes bewußt im Intervallbetrieb gefahren wurden.

6.3 VERSUCH B: Mit Wassernebellöschanlage

Brandlast: Holzständerwand und Holzkrippen, Vorhang am geschlossenen Fenster

Tabelle 6.2 enthält nähere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung mit einer Holzständerwand mit Zellulosedämmung. Die Wand wurde in vereinfachter Form aus Vollholzständer, OSB-Holzwerkstoffplatten und Zellulosedämmung (s. Foto 10, S.160) errichtet. In der linken unteren Ecke der Wand befand sich eine kreisrunde Öffnung in der vorderen OSB-Platte. Öffnungen dieser Art werden dazu verwendet, um den Zellulosedämmstoff in die Holzständerwand einzublasen. Diese Wand wurde rechts neben dem Brandraumfenster, an dem sich ein Vorhang befand, aufgestellt. Um ein größeres Stützfeuer zu erzielen, wurden vor der Wand Holzkrippen aufgestellt. Die Zündwanne befand sich vor der Öffnung in der Holzständerwand zum Teil unter einer Holzkrippe. Zur Erzielung einer ausreichenden Ventilation im Brandraum war die Brandraumtür geöffnet. Die Löschanlage wurde im Dauerbetrieb aufgrund der starken Brandentwicklung der

Holzkippen betrieben.

6.4 VERSUCH C: Mit Wassernebellöschanlage

Brandlast: Holzständerwand und Sofa, Vorhang am geschlossenen Fenster

Tabelle 6.3 enthält nähere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung mit der gleichen Holzständerwand wie in Versuch B, jedoch statt der Holzkippen mit einem Sofa vor dieser Wand (Foto 14, S.161). Dieser Versuch wurde mit relativ großen Löschintervallen entsprechend Tabelle 6.3 gefahren.

6.5 VERSUCH D: Mit Wassernebellöschanlage

Intervalllöschen

Brandlast: Möbel, Vorhang am geöffneten Fenster

Bei diesem Versuch wurden Möbel als Brandlast (Foto 17 u. 18, S.162) verwendet. Die Löschanlage wurde im Intervallbetrieb betrieben. Tabelle 6.4 enthält nähere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung. Zur Simulation extrem schlechter Bedingungen für die Löschwirkung von Wassernebel war das Fenster und die Brandraumtür geöffnet. Ein Vorhang befand sich an der Fensteröffnung des Brandraumes.

6.6 VERSUCH E: Mit Wassernebellöschanlage

Intervalllöschen

Brandlast: Möbel, Vorhang am geöffneten Fenster

Dieser Versuch entspricht im wesentlichen Versuch D jedoch wurden bei diesem Versuch die Pausen zwischen den Löschintervallen vergrößert, um einen Einfluß auf den Löscherfolg und die erforderliche Löschwassermenge zu erkennen (siehe Tabelle 6.5).

7. VERSUCHSBEOBSACHTUNGEN, MESS- UND VERSUCHSERGEBNISSE

7.1 VERSUCH 8

Der zeitliche Ablauf des Versuches wird in Tabelle 7 wiedergegeben. Der Versuch war gekennzeichnet durch eine starke Ver-

rauchung im Zwischenfassadenbereich, wobei sich unverbrannte Brandgase entzündeten. Oberhalb der Fassade waren Flammen erkennbar.

Bild 4 und 5 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Brandraum. Aufgrund der großen Brandlast wurden Temperaturen von ca. 1100°C im Brandraum erreicht. Foto 5 (S.158) zeigt die Feuerwehr kurz vor dem Öffnen der Brandraumtür, Foto 6 (S.158) beim Löscheinsatz. Durch die Verrauchung des Flures nach dem Öffnen der Brandraumtür ergibt sich nur eine ca. 0,5 m hohe nahezu rauchfreie Zone über dem Boden.

Die Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade werden in Bild 6 dargestellt. Im Bereich der Oberkante der offenen Fensteröffnung des Brandraumes traten Temperaturen von über 1000°C auf. Die Temperatur TOR1 im Bereich des "oberen Fensters" weist bereits nach ca. 6 min einen Wert von über 700°C auf.

Die Bilder 7 und 8 geben die zeitlichen Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich wieder. Selbst an der oberen Meßstelle TZ9 trat noch eine Temperatur von 900°C nach 5 bis 6 min auf. Die seitlich davon, im Bereich der vertikalen Abschottung, angeordneten Meßstellen erreichten niedrigere Temperaturen (TZ8, TZ10), jedoch ergaben sich auch hier noch Werte von 600°C - 700°C. Oberhalb der Doppelfassade waren im Bereich der Abluftöffnung über der gesamten Breite Flammen erkennbar.

Bild 9 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe an der Innenseite der ESG-Verglasung. Es traten Temperaturen von bis zu 600°C an der unteren Meßstelle TZ3.1 und von bis zu 960°C an der oberen Meßstelle TZ3.3 auf. Die obere Scheibe zerplatzte nach 5 min 53 s. (siehe Tabelle 8) im Bruchteil einer Sekunde schlagartig ohne vorherige Ribbildungsgeräusche. Bis zum Zeitpunkt der Zerstörung waren wegen der starken Verrauchung im Zwischenfassadenbereich und Rußablagerungen auf der Scheibe fast keine Flammen hinter der Scheibe mehr erkennbar. Nach 7 min 50 s zersprang die untere ESG-Scheibe. Nach Tabelle 8 sind diese Zeiten bis zum Zerplatzen der ESG-Verglasung wesentlich kürzer als bei kleinerer Brandlast (siehe Kunkelmann /2/, Versuche 4, 5, 6, 7: 167 kg bis 332 kg). Foto 3 (S.157) und 4 (S.158) zeigen die Außenfassade nach Zerplatzen der oberen und unteren ESG-Scheibe.

Bild 10 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Flur. Die Temperatur TF2 stieg nach Öffnen der Brandraumtür beim Löscheinsatz durch die Feuerwehr nach 13 min 18 s sehr schnell von ca. 60°C auf 550°C an.

Bild 11 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe im Nebenraum. Auch hier stieg die Temperatur zu Beginn des Löscheinsatzes auf ca. 200 °C aufgrund der geöffneten Tür des Nebenraumes an.

Bild 12 zeigt eine Zusammenstellung von ausgewählten Temperaturen im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich und an der ESG-Verglasung der Außenfassade.

Die zeitlichen Verläufe der dynamischen Drücke p_{dyn} , die an der Zu- und Abgasöffnung des Zwischenfassadenbereiches gemessen wurden, sind in Bild 13 dargestellt.

Bild 14 zeigt den Verlauf den hieraus errechneten Strömungsgeschwindigkeiten. Durch das offene Brandraumfenster und die große Brandlast entstehen schon frühzeitig hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Zwischenfassadenbereich. Es trat eine maximale über der Fassadenbreite gemittelte Strömungsgeschwindigkeit von ca. 11 m/s in der Abluftöffnung auf.

Unter Berücksichtigung der Öffnungsfläche der Zu- und Abluftöffnung von jeweils 1,5 m² (siehe Tabelle 5) und unter Berücksichtigung einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergab sich der zeitliche Verlauf des mittleren Volumenstromes für die Zu- und Abgasöffnung in Abhängigkeit der Luft- bzw. Rauchgastemperatur nach Bild 15. Der Maximalwert betrug bei diesem Versuch ca. 57900 m³/h in der Abluftöffnung bei einer Abgastemperatur von 750°C bzw. ca. 15500 m³/h unter Normbedingungen. Die Bilder 16 und 17 zeigen den Vergleich dieses Volumenstromes mit den in /2/ durchgeführten Versuchen zum einen bei der realen Temperatur zum anderen im Normzustand. Betrachtet man Bild 16, so ergibt sich durch die Vergrößerung der Brandlast von 167 kg (Versuch 4) auf 754 kg (Versuch 8) bei einem Abstand von 1,2 m ungefähr die doppelte Abluft- bzw. Rauchgasmenge bei der realen Abgastemperatur.

Nach Bild 18 beträgt die maximale Abbrandrate ca. 36 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 10,2 MW. Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist geringer als der

maximale theoretische Wärmestrom. Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch eine unvollständige Verbrennung der untere Heizwert nicht erreicht wird und Wärme durch Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z.B. durch den Einfluß flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, durch Sauerstoffmangel, Abkühlung an den Wänden, sowie durch nicht ausreichende Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe und führt u.a. zu einer Rußbildung.

Im Abgasstrom wurde mit Hilfe der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode ein maximaler Wärmestrom von 6,3 MW ermittelt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß nicht über das Industriekalorimeter direkt über der Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches abgesaugt werden konnte, da die Rauchgasmenge hierfür zu groß war. Statt dessen wurde über das gesamte Hallendach abgesaugt. Durch das relativ große Volumen, in dem sich der Brandrauch unterhalb des Hallendaches ansammelt, ergibt sich bei Änderungen eine zeitliche Verzögerung bei der Messung der Wärmeströme nach den verschiedenen Meßmethoden (Bild 18). Die Meßwerte sind nur dann exakt, wenn sich eine konstante Rauchschiebtdicke unter der Hallendecke ausbildet und genau soviel Rauch abgesaugt wird wie neuer hinzukommt. Der zeitliche Verlauf des Absinkens bzw. der Veränderung der Höhenlage der Rauchschiebt unter dem Hallendach wurde bei diesem Versuch nicht ermittelt und konnte daher nicht bei der Berechnung des Wärmestromes berücksichtigt werden.

Vergleicht man die Maximalwerte des theoretischen Wärmestromes, in diesem Brandstadium hat sich die Rauchschiebt nicht verändert, mit dem Wert aus der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode, so ist der theoretische Wert 38 % größer. Nähere Angaben zu den Berechnungsmethoden für die Wärmefreisetzung finden sich bei Kunkelmann /1, 2, 38/.

Bild 19 gibt den zeitlichen Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade wieder. Der bei diesem Versuch gemessene Maximalwert von $6,67 \text{ W/cm}^2$ wird sowohl für die Fremdentzündung (Entzündung mit Energiezufuhr von außen) als auch für die Selbstentzündung (Entzündung ohne Energiezufuhr von außen) von Holz und Textilien im oberen Stockwerk ausreichen. Dieser Wert für die Wärmestrahlung ist beträchtlich höher als bei den bisher durchgeführten Versuchen

(s. Bild 49)

Bild 20 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.

Bild 21 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom. Diese Meßwerte fanden Eingang bei der Berechnung der Wärmefreisetzung nach der Sauerstoffverbrauchsmeßmethode.

7.2 VERSUCH A

In Tabelle 6.1 sind Details zum Versuchsablauf und zu den Versuchsergebnissen aufgeführt. Z.B. werden die Löschzeit, der Gesamtlöschwasserverbrauch, die maximalen Deckentemperaturen im Brandraum und Zwischenfassadenbereich, minimale Sauerstoff-, -maximale Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentrationen im Brandraum sowie im Abgas des Zwischenfassadenbereiches sowie Angaben zu Brandschäden und Verrauchung angegeben.

Bild 22 und 23 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe und den Volumenstrom des Wassernebelprühkopfes im Brandraum. Foto 9 (S.159) zeigt den Brandraum nach 2 min 40 s. Die maximale Deckentemperatur beträgt ca. 331 °C.

Nach Bild 24 beträgt die maximale Abbrandrate bis zum Lösch-einsatz ca. 2 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 0,6 MW. In der Anfangsphase des Brandes ergibt sich eine schwankende Abbrandrate, wie aus dem Bild zu entnehmen ist. Dementsprechend ergeben sich auch Schwankungen in der Wärmefreisetzung.

Die Sauerstoffverbrauchsmeßmethode zur Berechnung des Wärmestromes im Abgas des Zwischenfassadenbereiches wurde nicht angewendet, da die Verrauchung, die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit durch Temperaturerhöhung im Zwischenfassadenbereiches und Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentrationen so gering waren, daß diese im Bereich der Meßgenauigkeit der Meßmethode lagen.

Die Strömungsgeschwindigkeiten lagen bei allen Versuchen in der Zuluft- und Abluftöffnung bei ca. 0,5 m/s bei einem

Normvolumenstrom von ca. 615 m³/h. Die Unterschiede zwischen Zu- und Abluftöffnung waren teilweise sehr gering.

Bild 25 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum. Das Absinken der Sauerstoffkonzentration auf ca. 13,5 Vol.% nach 10 min ist gegenwärtig nicht erklärbar. Es kann sich hierbei um eine Meßstörung handeln oder aber es ist wirklich etwas passiert.

Bild 26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

Aus den Meßwerten sowie den Angaben in Tabelle 6.1 ist zu entnehmen, daß während des Löscheinsatzes zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr der Brandausbreitung in benachbarte Räume und Flure sowie über den Zwischenfassadenbereich in darüberliegende Stockwerke bestand. Durch die geringe Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches konnte der Brandraum jeder Zeit auch durch die Außenfassade lokalisiert werden, was von großer Bedeutung für den Feuerwehreinsatz ist. Aufgrund des frühzeitigen Löscheinsatzes ergaben sich nur geringe Brandschäden, wobei sich der Vorhang an der Fensteröffnung nicht entzündete. Durch den Einsatz der Wassernebellöschanlage ergab sich nur eine relativ Befeuchtung der Brandlast im Vergleich zu den an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brand- und Löschversuchen mit Sprinklern.

7.3 VERSUCH B

In Tabelle 6.2 sind Details zum Versuchsablauf und zu den Versuchsergebnissen aufgeführt.

Bild 27 und 28 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe und den Volumenstrom des Wassernebelsprühkopfes im Brandraum.

Die maximale Deckentemperatur im Brandraum beträgt 247 °C.

Bild 29 zeigt den zeitlichen Verlauf von Temperaturen in der Holzständerwand. Die Meßstellen befanden sich hierbei in der Zellulosedämmung (siehe Meßstellenliste Tabelle 4). Es trat eine maximale Temperatur von 57,4 °C auf. Der Dämmstoff verkohlte im wesentlichen nur an der direkt beflamnten Oberfläche

im Bereich der Öffnung bis in eine Tiefe von ca. 3,5 cm. Es führte zu keiner Brandweiterleitung in der Holzständerwand (Foto 12 u. 13, S. 160, 161)

Nach Bild 30 beträgt die maximale Abbrandrate bis zum Löscheinsatz ca. 1,8 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 0,5 MW.

Bild 31 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.

Bild 32 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

Aus den Meßwerten sowie den Angaben in Tabelle 6.2 ist zu entnehmen, daß auch bei diesem Versuch während des Löscheinsatzes zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr der Brandausbreitung in benachbarte Räume und Flure sowie über den Zwischenfassadenbereich in darüberliegende Stockwerke bestand. Durch die geringe Verrauchung des Zwischenfasadenbereiches konnte der Brandraum jeder Zeit auch durch die Außenfassade lokalisiert werden, was von großer Bedeutung für den Feuerwehreinsatz ist. Aufgrund des frühzeitigen Löscheinsatzes ergaben sich nur geringe Brandschäden, wobei sich der Vorhang an der Fensteröffnung nicht entzündete.

7.4 VERSUCH C

In Tabelle 6.3 sind Details zum Versuchsablauf und zu den Versuchsergebnissen aufgeführt.

Bild 33 und 34 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe und den Volumenstrom des Wassernebelsprühkopfes im Brandraum. Foto 15 (S. 161) zeigt den Brandraum kurz nach der Zündung. Die maximale Deckentemperatur im Brandraum beträgt 171 °C.

In der Holzständerwand ergab sich keine nennenswerte Temperaturerhöhung. Die Temperaturen lagen wesentlich unter denen von Versuch B. Es führte zu keiner Brandweiterleitung in der Holzständerwand (Foto 16, S.162).

Nach Bild 35 beträgt die maximale Abbrandrate bis zum Lösche-

einsatz ca. 3,1 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 0,9 MW.

Bild 36 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.

Bild 37 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

Aus den Meßwerten sowie den Angaben in Tabelle 6.3 ist zu entnehmen, daß auch bei diesem Versuch während des Löscheinsatzes zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr der Brandausbreitung in benachbarte Räume und Flure sowie über den Zwischenfassadenbereich in darüberliegende Stockwerke bestand. Durch die geringe Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches konnte der Brandraum jeder Zeit auch durch die Außenfassade lokalisiert werden, was von großer Bedeutung für den Feuerwehreinsatz ist. Aufgrund des frühzeitigen Löscheinsatzes ergaben sich nur geringe Brandschäden, wobei sich der Vorhang an der Fensteröffnung nicht entzündete.

7.5 VERSUCH D

In Tabelle 6.4 sind Details zum Versuchsablauf und zu den Versuchsergebnissen aufgeführt.

Bild 38 und 39 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe und den Volumenstrom des Wassernebelprühkopfes im Brandraum. Die maximale Deckentemperatur im Brandraum beträgt 284 °C.

Nach Bild 40 beträgt die maximale Abbrandrate bis zum Löscheinsatz ca. 2,5 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 0,75 MW.

Bild 41 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.

Bild 42 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

Aus den Meßwerten sowie den Angaben in Tabelle 6.4 ist zu ent-

nehmen, daß auch bei diesem Versuch während des Löscheinsatzes zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr der Brandausbreitung in benachbarte Räume und Flure sowie über den Zwischenfassadenbereich in darüberliegende Stockwerke bestand. Durch die geringe Verrauchung des Zwischenfasadenbereiches konnte der Brandraum jeder Zeit auch durch die Außenfassade lokalisiert werden, was von großer Bedeutung für den Feuerwehreinsatz ist. Aufgrund des frühzeitigen Löscheinsatzes ergaben sich nur geringe Brandschäden, wobei sich der Vorhang an der Fensteröffnung nicht entzündete (Foto 19, S.163). Bei diesem Versuch mit kleinen Löschintervallen ergab sich die geringste Löschwassermenge aller durchgeführten Versuche.

7.6 VERSUCH E

In Tabelle 6.5 sind Details zum Versuchsablauf und zu den Versuchsergebnissen aufgeführt.

Gegenüber Versuch D wurden die Löschpausen bereits in der Anfangsphase von 30 s auf 60 s bei sonst gleichem Versuchsaufbau und gleicher Versuchsdurchführung erhöht.

Bild 43 und 44 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe und den Volumenstrom des Wassernebelprühkopfes im Brandraum. Die maximale Deckentemperatur im Brandraum beträgt 199 °C.

Nach Bild 45 beträgt die maximale Abbrandrate bis zum Löscheinsatz ca. 2,9 kg/min und die maximale theoretische Wärmefreisetzung ca. 0,84 MW.

Bild 46 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.

Bild 47 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im aus der Halle abgesaugten Abgasvolumenstrom.

Aus den Meßwerten sowie den Angaben in Tabelle 6.5 ist zu entnehmen, daß auch bei diesem Versuch während des Löscheinsatzes zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr der Brandausbreitung in benachbarte Räume und Flure sowie über den Zwischenfassadenbereich in darüberliegende Stockwerke bestand. Durch die geringe Verrauchung des Zwischenfasadenbereiches konnte der Brandraum

jeder Zeit auch durch die Außenfassade lokalisiert werden, was von großer Bedeutung für den Feuerwehreinsatz ist. Aufgrund des frühzeitigen Löscheinsatzes ergaben sich nur geringe Brandschäden, wobei sich der Vorhang an der Fensteröffnung nicht entzündete. Bei diesem Versuch mit gegenüber Versuch D größeren Pausen zwischen den Löschintervallen ergab sich eine größere Löschwassermenge und ein größerer Brandschaden (Foto 21, S. 163). Die anschließenden Nachlöscharbeiten mit dem D-Strahlrohr waren ebenfalls größer.

8. VERGLEICH DER BEI DEN VERSUCHEN ERMITTELTEN MESSWERTE UND BEWERTUNG

In den Bild 48 werden die maximalen, an der ESG-Verglasung auftretenden Temperaturen sämtlicher bisher durchgeführter Versuche mit und ohne Wassernebellöschanlage verglichen. Mit Löschanlage ergaben sich nur sehr geringe Temperaturerhöhungen an der Verglasung, die nicht zu einem Versagen führen können.

Bild 49 zeigt die am "oberen Fenster" maximal auftretenden Meßwerte für die Wärmestrahlung. Unter dem Diagramm sind einige Werte für die Bestrahlungsstärke aufgeführt, die zur Fremd- bzw. Selbstentzündung von Stoffen führen. Diese Meßwerte können als Kriterium dienen, um zu beurteilen ob zum Beispiel Gardinen hinter einem Fenster in einem darüberliegenden Stockwerk hinter dem Fenster der Innenfassade durch Wärmestrahlung entzündet werden. Man erkennt, daß bei Verwendung einer Wassernebellöschanlage im Brandraum keine Gefahr eines Feuerüberschlages durch Wärmestrahlung in darüberliegende Geschosse besteht.

Durch die Auftriebsströmung im Zwischenfassadenbereich ergab sich bei den Versuchen ohne Wassernebellöschanlage durch die fehlenden horizontalen Abschottungen bei dem betrachteten Doppelfassadentyp eine schnelle Rauch- und Flammenausbreitung im Zwischenfassadenbereich, wobei die Flammenlängen noch das darüberliegende Stockwerk überschreiten können. An einem durch eine Wand angedeuteten Stockwerk über dem Brandraum traten an der Innenfassade Temperaturen und Wärmestrahlungen auf, welche z.B. zum Entzünden von Gardinen hinter einem Fenster ausreicht. Durch das hohe Temperaturniveau im Zwischenfassadenbereich ist insbesondere bei großen Brandlasten und Feuerüber-

schlag in darüberliegende Stockwerke mit einem großflächigen Versagen der Außenfassade zu rechnen, wobei nicht nur das Einscheibensicherheitsglas versagen kann sondern auch Teile des Aluminiumprofilsystems schmelzen können und dadurch Glasscheiben nicht mehr gehalten werden können.

Weiterhin wurde festgestellt, daß es beim Öffnen der Brandraumtür beim Löscheinsatz durch die Feuerwehr zu einer starken Verrauchung der angrenzenden Räume und Flure kommt.

Die Versuchsergebnisse mit Wassernebellöschanlage zeigen, daß durch Einsatz dieser Anlagen der Brandschaden bedeutend reduziert, der Feuerüberschlag verhindert, die Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches erheblich verringert und der Löschwasserschaden minimiert wird. In keinem Versuch wurde der Vorhang an der Fensteröffnung entzündet. Der Brandschaden war bei allen Versuchen relativ gering. Die Löschanlage wurde sowohl im Dauer- als auch im Intervallbetrieb eingesetzt. Bei optimal ausgelegtem Intervallbetrieb der Wassernebellöschanlage, das heißt Ein- und Ausschalten der Löschanlage nach bestimmten Zeitintervallen, kann der Löschwasserbedarf noch weiter reduziert werden.

Nach dem jetzigen Kenntnisstand ist bei einer Ganzflächen-doppelfassade unbedingt eine automatische Sprinkler- oder Wassernebellöschanlage in den Räumen einzubauen, um eine schnelle und große Rauch- und Wärmefreisetzung zu verhindern.

Die Wassernebellöschanlage weist aufgrund des geringeren Löschwasserschadens und der Löschwirkung bei flüssigen Brandstoffen und Kunststoffen Vorteile auf. Durch frühzeitiges Auslösen der Löschanlage kann verhindert werden, daß die Verglasung der Innenfassade versagt. Dadurch kann verhindert werden, daß Flammen in den Zwischenfassadenbereich schlagen bzw. daß große Mengen an Rauchgasen in andere Stockwerke gelangen und ein Feuerüberschlag hervorgerufen wird.

Von einer Löschanlage im Zwischenfassadenbereich ist abzuraten, da diese zum einen nichts zur Verringerung der Brandausbreitung im Brandraum beiträgt und zum anderen nur dazu beitragen würden, daß aufgrund des Impulses des Sprühnebels Rauch in darunterliegende Stockwerke gedrückt wird. Weiterhin würde durch die Abkühlung der Rauchgase im Zwischenfassadenbereich die Entrauchung des Zwischenfassadenbereiches erschwert.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Zur experimentellen Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden im Zwischenfassadenbereich, sowie in benachbarte und darüberliegende Räume wurden Brandversuche in einer dafür errichteten Versuchseinrichtung mit Brandraum, Flur, Nebenraum und verfahrbarer Außenfassade durchgeführt. In den Untersuchungen wurde der Ausschnitt einer Ganzflächendoppelfassade untersucht, da sich dieser Typ nach den bisherigen Erkenntnissen bezüglich der Brand- und Rauchausbreitung am kritischsten erweist. Bei der Ganzflächendoppelfassade erfolgt die Luftführung im Fassadenzwischenraum über das gesamte Gebäude. Der Zwischenfassadenbereich weist abgesehen von den Randbereichen des Gebäudes keine vertikalen und horizontalen Abschottungen auf. Die Außenfassade wurde in einem Teilbereich mit einer Einscheibensicherheitsverglasung in einem Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten ausgeführt. Als Innenfassadenfenster (Brandraumfenster) wurde ein Wärmeschutzglasfenster mit PVC-Rahmen verwendet.

Zur Vervollständigung der Ergebnisse der bisher durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Auswirkung von Schallschutzverglasungen und doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung wurden noch weitere Versuche mit einer realen Brandlast für einen Wohnzimmerbrand (ca. 750 kg Möbel Δ 30 kg/m²) bei einem großen Abstand zwischen innerer und äußerer Fassade (1,2 m) in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächendoppelfassade durchgeführt. Die gemessenen Temperaturen sowie die Wärmestrahlung über dem Brandraum zeigen auch bei diesem großen Abstand, daß es zu einem Feuerüberschlag in darüberliegende Stockwerke und zu einer Zerstörung der Außenfassade kommen kann. Weiterhin führt der Brand zu einer starken Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches, wobei sich unverbrannte Rauchgase entzünden.

Aufgrund dieser Problematiken sowie der Gefahr der Brand- und Rauchausbreitung wurde im Hinblick auf eine optimale Löschwirkung, geringen Löschwasserverbrauch und Löschwasserschaden sowie geringen Löschanlagenkosten Untersuchungen über Wassernebellöschanlagen durchgeführt. Hierzu wurde nächst eine Literaturstudie erarbeitet, die die Entwicklung dieser Löschtechnik ab dem Jahre 1942 bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt, die Löschprinzipien, die Einsatzgebiete, die Anwendungsgrenzen, den Stand der

Normungsarbeit und die gegenwärtig auf dem Markt befindlichen Löschsyste me aufzeigt. Hierbei hat sich gezeigt, daß schon in den frühesten Untersuchungen Erkenntnisse vorlagen, die in der in Vergessenheit geraten sind und nun wieder an Bedeutung erlangen. Z.B. wurde auch herausgefunden, daß z.B. brennbare Flüssigkeiten mit Wassernebel gelöscht werden können. Es wurden ebenfalls Aussagen über optimale Tropfengrößen zu verschiedenen Einsatzgebieten gemacht. Anschließend wird über Brand- und Löschanlagen in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächen-doppelfassade mit einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage berichtet. Die Löschanlage wurde sowohl im Dauer- als auch im Intervallbetrieb eingesetzt. Bei den Versuchen mit Wassernebellöschanlage wurde sowohl Möbel und Holzkrippen als Brandlast verwendet als auch der Ausschnitt einer Holzständerwand mit Zellulosedämmung.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß bei einer Ganzflächendoppelfassade ohne Abschottungen im Zwischenfassadenbereich mit einer schnellen Brand- und Rauchausbreitung über den Zwischenfassadenbereich zu rechnen ist. Weiterhin ist die Außenfassade beträchtlich gefährdet. Die Versuchsergebnisse mit Wassernebellöschanlage zeigen, daß durch Einsatz dieser Anlagen der Brandschaden bedeutend reduziert, der Feuerüberschlag verhindert, die Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches erheblich verringert und der Löschwasserschaden minimiert wird. Der Brandschaden war bei diesen Versuchen relativ gering. Nach dem jetzigen Kenntnisstand ist bei einer Ganzflächen-doppelfassade unbedingt eine automatische Sprinkler- oder Wassernebellöschanlage in den Räumen einzubauen, um eine schnelle und große Rauch- und Wärmefreisetzung zu verhindern. Die Wassernebellöschanlage weist aufgrund des geringeren Löschwasserschadens und der Löschwirkung bei flüssigen Brandstoffen und Kunststoffen Vorteile auf. Durch frühzeitiges Auslösen der Löschanlage kann verhindert werden, daß die Verglasung der Innenfassade versagt. Dadurch kann verhindert werden, daß Flammen in den Zwischenfassadenbereich schlagen bzw. daß große Mengen an Rauchgasen in andere Stockwerke gelangen und ein Feuerüberschlag hervorgerufen wird. Von einer Löschanlage im Zwischenfassadenbereich ist abzuraten, da diese zum einen nichts zur Verringerung der Brandausbreitung im Brandraum beiträgt und zum anderen nur dazu beitragen würden, daß aufgrund des Impulses des Sprühnebels Rauch in darunterliegende Stockwerke gedrückt wird. Weiterhin würde durch die Abkühlung der Rauchgase im Zwischenfassadenbereich die Entrauchung des Zwischenfassadenbereiches erschwert.

10. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Kunkelmann J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.
Teil 1: - Literaturlauswertung
- Einflußgrößen auf die Brand- und Rauchausbreitung
- Brandversuche
Forschungsbericht Nr. 100 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996)
- /2/ Kunkelmann J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.
Teil 2: Untersuchungen an einer Ganzflächen-doppelfassade
- Brandversuche bei unterschiedlichen Abständen zwischen Innen- und Außenfassade
- Verhalten von Wärmeschutzglas und Einscheibensicherheitsglas im Brandfall
Forschungsbericht Nr. 105 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1997)
- /3/ Hirst H.S.: Water Spray Protection.
National Fire Protection Association
Boston, Mass., 1942
- /4/ Rasbash D.J.: The Efficiency of Water Spray in Allaying Smoke.
Tests in Experimental Smoke Chamber
Department of Scientific and Industrial Research and Fire Offices' Committee
Joint Fire Research Organization
F.C. Note No. 21/1949

- /5/ Rasbash D.J., The Effect o Water Spray on Burning Kerosine.
Skeet G.: Department of Scientific and Industrial
 Research and Fire Offices' Committee
 Joint Fire Research Organization
 F.C. Note No. 41/1951
- /6/ Radusch R.: Betrachtungen über die günstigste Tröpfchengröße
 zur Bandlöschung durch zerstäubtes Wasser und über
 die Reichweite strahls.
 Arbeitsbericht der Forschungsstelle für Feuer-
 löschtechnik an der Technischen Hochschule
 Karlsruhe, 1953
- /7/ Fry J.F., The Production of Water Sprays for Fire Extinction.
Smart P.M.T.: Chantry Publications Limited, London 1953
- /8/ Rasbash D.J., The Extinction of Liquid Fires with Water Sprays.
Rogowski Z.W.: Reprinted from Chemistry and Industry, 1954,
 S.693 - 695
- /9/ Radusch R.: Der strahl und seine Löschkraft.
 Brandschutz, Mai 1954, S.103 - 104
- /10/ Nash P., The Use of Water in Fire-Fighting.
Rasbash D.J.: Joint Fire Research Organization,
 Reprinted from the Annual Report and Conference
 Proceedings of the Institution of Fire Engineers
 Chantry Publications, London, 1955
- /11/ Underwriters' The Mechanism of Extinguishment of Fire by
Laboratories Finely Divided Water.
Inc. Committee on Fire Prevention and Engineering
 Standards Research Division
 N.B.F.U. Research Report No. 10, New York 1955
- /12/ Radusch R.: Über die Verdampfungsgeschwindigkeit von
 Wassertropfen.
 Arbeitsbericht der Forschungsstelle für Feuer-
 löschtechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe,
 Chemie-Ingenieur-Technik, 28. Jahrgang, 1956,
 S. 275 - 277
- /13/ Herterich O.: Ein Beitrag zur Terminologie der Wasserzerstäubung.
 VFDB Zeitschrift, 5. Jahrgang, Heft 2, Mai 1956,
 S.43 - 48

- /14/ Farrenkopf H.: Wasserzerstäubung im Strahlrohr.
gwf 98.Jahrg. Heft 34, 30. August 1957
- /15/ anonym The Case for High Pressure Fog.
Fire Engineering, August 1958, S. 721 - 723, 778
- /16/ Bean J.: The Original High-Pressure Fog.
Firmenprospekt von John Bean Division,
Lansing 4, Mich., Nov. 1958
- /17.1/ Anonym Extinguishing Room Fires with High and Low Pressure
Water Sprays: JFRO Tests.
Joint Fire Research Organization,
Boreham Wood, Fire Protection Review, May 1960
- /17.2/ Herterich O.: Wasser als Löschmittel.
Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg, 1960
- /19/ Schulze G.: Wasservernebelungsanlagen.
Brandschutz Explosionsschutz, 12, Staatsverlag
der DDR, Berlin 1985, S. 15 - 18
- /19/ Schulze G., Untersuchungen von Wasservernebelungsanlagen auf
Walther J.: Eignung in Hochregallagern.
Brandschutz Explosionsschutz, 12, Staatsverlag
der DDR, Berlin 1985, S.69 - 82
- /20/ Götz R., Erprobung des 230 bar - Löschverfahrens.
Szimeth G., Florian Hessen, 6, 1990
Händler A.: S. 25 - 27
- /21/ Kohl K.-J., Das Wasseraerosol-Löschverfahren:
Kretzschmar A., Große Leistung - hohe Effizienz.
Pleiß G.: Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 12/1990,
S. 702 - 704
- /22/ Ryderman A.: Development of Standards and Test Methods for Water
Mist Systems.
Proceedings of the International Conference on Water
Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993

- /23/ Mawhinney J. R.: Design of Water Mist Fire Suppression Systems for Shipboard Enclosures.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /24/ Arvidson M.: The Efficiency of Different Water Mist Systems in a Ship Cabin.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /25/ Cousin C. S.: The Potential of Fine Water Sprays as Halon. Replacements for Fires in Enclosures.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /26/ Bill R.G.Jr., Croce P. A.: Perspectives on Fine Spray (Water Mist). Technology at Factory Mutual Research Corporation.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /27/ Holmstedt G.: Extinction Mechanismus of Water Mist.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /28/ Wighus R., Aune P., Drangsholt G., Stensaas J.P.: Full Scale Water Mist Experiments.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /29/ Simpson T., Smith D. P.: A Fully Integrated Water Mist Fire Suppression System for Telecommunications and other Electronic Cabinets.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems

SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993

- /30/ Tuomissaari M.: Suppression of Compartment Fires with a Small Amount of Water.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /31/ Jacobsen S.E.: Approval of Water Mist Systems on Ships. Consideration of Equivalency to Sprinkler and Water Spray Systems.
Proceedings of the International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems
SP Swedish National Testing and Research Institute,
SP Report 1994:03, Borås 1993
- /32/ Bill R.G., Jr.: Fire Performance Requirements for Fine Spray (Mist) Systems in Passenger Ship - Public, Accommodation and Service Areas.
Factory Mutual Research Preliminary Technical Report, Boston Norwood, 1993
- /33/ Klein W.: Wasservernebelungs-Löschanlagen. Anwendung aus Sicht des VdS.
VdS-Fachtagung Feuerlöschanlagen, Köln, 1993
- /34/ Covelli B.: Löschwirkung von Halonersatz. Eignung als Halonersatz
VdS-Fachtagung Feuerlöschanlagen, Köln, 1993
- /35/ Eggenberger P.: Dreidimensionales Löschen mit Wassersprühnebel.
BVD/SPI Bulletin, 3/1994, S.44 - 46
- /36/ Mawhinney J.R.: Water-Mist Fire Suppression Systems for the Telecommunication and Utility Industries.
NRC's Institute for Research in Construction,
Fire Research News, No. 74, 1994
- /37/ Portz H.: Inertisieren und Löschen mit Wassernebel.
Theorie und praktische Anwendung.
Unser Brandschutz 11/94

- /38/ Kunkelmann J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 12: - Zusammenstellung von Erkenntnissen aus theoretischen, numerischen und experimentellen Untersuchungen als Planungshilfe zur Ausführung von Lagern und Sprinkleranlagen sowie zur Überprüfung von numerischen Simulationen.
- Darstellung der Problematik bei der meßtechnischen Erfassung von physikalisch/chemischen Größen bei Brand- und Löschversuchen insbesondere im Hinblick auf die Verwendung bei numerischen Simulationen.
Forschungsbericht Nr. 95 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1995)
- /39/ John R.,
Kunkelmann J.: Brandschutztechnisches Gutachten zur Bewertung der Löschwirksamkeit einer Wassernebellöschanlage System Herzog in einem Hochregallager.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1995)(unveröffentlicht)
- /40/ Smith D. P.: Water Mist Fire Suppression Systems.
Fire Safety Engineering, 2/95, S. 10 - 15
- /41/ Downie B.,
Polymeropoulos C.,
Gogos G.: Interaction of a Water Mist with a Buoyant Methane Diffusion Flame.
Fire Safety Journal 24, 1995,
S.359 - 381
- /42/ Log T.,
Ekrene J.H.B.: Suppression Properties of Fine Water Sprays in A-Fires.
First European Symposium on Fire Safety Science, Zürich, 1995, S. 35 - 36
- /43/ Schatz H.: Brand- und Löschversuche mit Wassernebel an Pappkartons und Kästen aus Polypropylen im Hochregal.
vfdb-Zeitschrift, 1/96

- /44/ Großöhmig W. Niederdruck-Wasservernebelungs-Löschanlagen.
Fuchs E.: Brandschutz/Deutsche Feuerwehrzeitung,
8/1996, S.571 - 576
- /45/ Großöhmig W.: Erfahrungen mit der Niederdruck-Wasserver-
nebelungstechnik.
Sonderdruck aus VGB Kraftwerkstechnik,
76. Jahrg., 9, 1996, S. 754 - 761
- /46/ anonym: Vanntake - erstatning for halon?
Brann & Sikkerhet, 71/1996, S.16 - 17
- /47/ Schremmer U.: Stationäre automatische Wasservernebelungs-
anlagen - Grundsätze, Wirkungsweise, Gestaltung
und Einsatzgrenzen.
Dissertation, Universität Magdeburg, 1996
- /48/ Starke H., Fein verteiltes Wasser als Volumen- und
Wienecke F.-W., Oberflächenlöschmittel.
Grabski R.: Forschungsbericht Nr. 98 der Arbeitsgemeinschaft
der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehr-
angelegenheiten.
Heyrothsberge, Institut der Feuerwehr
Sachsen-Anhalt (1996)
- /49/ Kim M.B., Burning Rate of a Pool Fire with Downward
Jang Y.J., directed Sprays.
Kim J.K.: Fire Safety Journal 27, 1996, S. 37 -48
- /50/ Beisheim K., Hochdruckwassernebel (HDWN) und CO₂-Lösch-
Hochgreve H.-B., technik im Vergleich.
Keul J., Landesanstalt für Arbeitsschutz NRW
Schütz M.: Landesumweltamt NRW, Düsseldorf, Essen 1996
- /51/ Mawhinney J.R., State-of-the Art Review of Water Mist Fire
Richardson J.K.: Suppression Research and Development.
National Research Council Canada,
Internal Report No. 718, 1996
- /52/ Pleß G., Wassernebel und glutbildende Stoffe.
Meissner K.: Jahresbericht 1995 des Instituts der Feuerwehr
Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1996, S. 63 - 70

- /53/ Schremmer U.: Möglichkeiten und Grenzen der Feinsprühanlagen-
technik.
VdS-Fachtagung Feuerlöschanlagen, Köln, 1996
- /54/ Bürgel: Wirkprinzip, Einsatzmöglichkeiten und Grenzen
von Mikrowasser-Löschanlagen für Kraftwerke.
VGB Technische Vereinigung der Groß-Kraftwerk-
betreiber e.V., Fachtagung "Brandschutz",
Essen 1996
- /55/ Rempe A.: Feuerlöschmittel.
Kohlhammer - Verlag, 6. Auflage, Stuttgart, 1997
- /56/ Böke J.: Möglichkeiten und Grenzen der Wasserfeinsprühtechnik.
VdS-Fachtagung Feuerlöschanlagen, Köln, 1997
- /57/ Widetschek O.: Wie löschen wir morgen?
Über die Entwicklung der Feuerlöschmittel.
Blaulicht 3-97, S. 4 - 6, S. 8 - 10
- /58/ Dortmann
H.-D.: Kabelkanal-Schutz mit Wassernebellöschanlage.
Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 10/1997
- /59/ Dyer J.H.: Water Mist Fire Suppression Systems.
Application Assessment Tests on Full Scale Enclosures.
Fire Engineering Journal, S. 35 - 42
- /60/ Kubiza G.: Löschtechnik im Aufbruch?
Blaulicht 3-97, S. 12 - 14
- /61/ National Fire Protection
Association
Inc.: Standard on Water Mist Fire Suppression Systems.
NFPA 750, July 26, 1996 Edition, Quincy, MA
- /62/ VdS Schaden-
verhütung Richtlinien für Sprühwasserlöschanlagen
Planung und Einbau.
VdS 2109 8/90(02) sowie Übergangsregelung SP1/96,
Köln 1990 und 1996

Tabelle 1: Wassernebellöschsysteme und -geräte

System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
A		ja	3000 - 7000 l/min Wasser, 30 kg/s Luft, 180.000 m ³ /h Abgas der Triebwerke	In den Abgasstrahl von 2 Flugzeugstrahltriebwerken wird Wasser eingedüst (Aerosol- löschverfahren), Schaummittel- zusatz ist möglich Reichweite des Wassernebels: 120 m, Abgastemperatur: 620°C, keine Angaben zu Tropfengrößen	chemische und petrochemi- sche Industrie, Bekämpfung von Bränden, Auswaschen, Verwirbeln und Verdünnen von Schadgasen, Kühlung von Oberflächen und Anlagen
B	ja	ja	80 - 120 bar 100 (120)bar, 25 l/min	stationäre Systeme mit Pumpen und/oder Druckflaschen Aktivierung über Glasfaß (je Bündeldüse) oder Brandmelde- anlage Tropfendurchmesser: 0,01 mm mobiles System mit Pumpen (fahrbar, Strahlrohr mit 4 Einzeldüsen, auch einsetzbar an Wandhydranten)	Produktionsbereiche/ Objektschutz, Friteusen, Generatoren, Turbinen, Kabel(kanäle), brennbare Flüssigkeiten, Lager bis zu einer Höhe von 5 m, EDV- Räume, Schalträume, Archi- ve, Museen, Hotels, Büros, Restaurants, Löschen von brennenden Flüssigkeiten, Feststoffen, Brände in elektrischen Anlagen, Un- terdrückung von Rauchgasen

zu Tabelle 1						
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete	
C	ja		3 - 5 bar 5 - 10 l/min pro Zweistoffdüse (Wasser/Luft bzw. Stickstoff)	Zweistoffdüsen (Wasser/Luft) Tropfendurchmesser: 80 µm - 200 µm	Verfahrenstechnische Anlagen (brennbare Gase und Flüssigkeiten), Gasturbinenanlagen, Maschinenräume Dieselmotoren, Gasturbinenbrand, Produktionseinheiten, Prozesspumpen und -Mischer, Schalträume, Holzkruppenbrände, Flugzeugkabinenbrände	
D	ja		keine Angabe zum Betriebsdruck	Tropfendurchmesser: 100 µm	Hochspannungstransformatoren mit Öl gefüllt, Brandherd: Benzin	
E	ja		8 - 10 bar 2 - 15 l/min pro Düse	Auslösung durch thermische Auslöseelemente an jeder Düse, Brandmelder oder manuell	Schiffskabinen u. Aufenthaltsräume, Schiffsmotorenräume, Bohrinnseln, industrielle Anwendungen	

zu Tabelle 1					
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
F	ja		mind. 4 bar	<p>Tropfendurchmesser $\leq 100 \mu\text{m}$, Sprühkopf mit bis zu 5 Einzeldüsen, Auslösung u.a. durch hydrothermischen Linien- melder (Auslöseschlauch) und/oder Brandmeldeanlage, Dauer- oder Intervallbetrieb</p>	<p>Hochregallager mit KLT-, PP-Behältern, Kabel, Plastik- und Elektronik- teile, Euro-Holzpaletten, Kartonagen z.T. dichtge- packt, Kabelkanäle, Kabel- schächte, Kraftwerks- bereich, Fertigungshallen, Bergbau unter Tage, Kabinen u. Stauräume in Schiffen, unterirdische Verkehrsana- len und Tunnel, Wohn- und andere Gebäude in Holzbau- weise, Boxen-Parksysteme, Schutz von Fördereinrich- tungen, Personenschutz in Krankenhäusern, Hotels, Versammlungsstätten, Büro- und Verwaltungsgebäude, Schutz von kulturellen und ideellen Werten in Kirchen, Museen, Archiven etc., Niederschlagung von Rauch- und Brandgasen etc.</p>

zu Tabelle 1					
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
G	ja		2 - 40 bar	Tropfendurchmesser ≤ 100 µm, Sprühkopf mit bis zu 5 Einzeldüsen, Auslösung mit- tels hydraulischer, pneumati- scher oder elektrischer Linien- oder Punktmelder, Dauer- oder Intervallbetrieb	Hochregallager, Kabelkanäle, Transformatorhäuser, Hochregallager, Regallager, Lagerräume, Fertigungshal- len, Industriebetriebe, Chemische Fabriken, Förder- einrichtungen, Holzverar- beitende Betriebe, Papier- fabriken, Kraftwerke, Flug- zeughangars, Schiffe aller Art, Medizinische Einrich- tungen, Bergbau, Versamm- lungsstätten, Theater, Theaterbühnen, Büro- und Verwaltungsräume, Hotels, Schulen Museen, Messehal- len, Einkaufszentren Park- häuser, Öffnungen in Brand- schutzwänden
H	ja		ca. 100 bar	Sprühköpfe mit 4 - 6 Einzel- düsen, Pumpenvolumenstrom: 20 - 300 l/min Tropfendurchmesser: 20 - 50 µm	Schiffskabinen, Hotelzim- mer, Schaltzentralen, Com- puteräume, kleine Maschi- nenräume

zu Tabelle 1						
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete	
I	ja	ja	25 bar	Impuls-Feuerlöschverfahren, eine oder mehrere Löschpistolen, tragbare, fahrbare oder fest installierte Systeme Tropfendurchmesser: 5 - 120 µm (mittlerer Tropfendurchmesser 50 µm), Je Schuß: 1 l Wasser in 20 Millisekunden Zusatz von Netz- oder Schaum- mittel möglich	Fahrzeugbrände, Waldbrände, glutbildende Brandstoffe (Brandklasse A, Löschstufe IV), Ablöschen brennender Personen gefahrlos möglich	
J	ja		min. 2 bar	Tropfendurchmesser um 0,1 mm (weitere Angabe: 5 µm - 400 µm) Auslösung mittels Brandmelde- anlage und/oder hydraulische Steuersysteme	Regallager, Kabelkanäle, Automatische Parksysteme, Gefahrstofflager, Lachen- brände von brennbaren Flüssig- keiten und schmelzenden brennbaren Stoffen, Trans- formatoren, Turbinen, Archive, Anlagen mit brenn- baren Stäuben/Gasen	
K	ja		keine Angaben	keine Angaben	Schiffe	

zu Tabelle 1					
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
L	ja	ja	30 bar- 300 bar	4,5 l/min pro Sprühkopf (Sprühköpfe mit mehreren Einzeldüsen) Tropfendurchmesser: 60 µm (10 µm - 100 µm), Auflösung u.a. über Glasfaß im Sprühkopf, Zerstäubung über Hochdruck- flaschen mit Gas- und Wasser bzw. Hochdruckpumpen	Maschinenbrände, Schiffskabinen, Aufenthaltsräume, Kombüsen, glutbildende Brandstoffe (Holzkrippen), EDV-Räume, elektr. Schaltanlagen, Kabelkanäle, Gasturbinen, Parkdecks, Telekommunikation, Flüssigkeitslager, Transformator- u. Generatorräume, Abfallräume, Lagerbereich
M	ja		80 bar	Einstoff-Sprühköpfe mit mehreren Einzeldüsen 20 µm - 100 µm Zerstäubung mit Druckgas oder durch Hochdruckpumpen	Schiffe, Gasturbinen, Kompressoren, Maschinenräume, EDV-Anlagen, Telekommunikation

zu Tabelle 1					
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
N	ja	ja	* mobiles Löschaggregat mit bis zu 250 bar * stationäre Anlagen mit 5 bar bis 25 bar, 5 bis 10 bar und 100 bar	Auflösung: automatisch (hy- draulische, pneumatische oder elektrische Auslöseelemente) oder manuell, mittlerer Trop- fendurchmesser ca. 100 µm - 400 µm bei stationären An- lagen, Tropfendurchmesser < 50 µm beim mobilen Gerät	Feststoffbrände (mobiles Löschaggregat), Wohnberei- che und Maschinenräume auf Schiffen, Fahrgastabteile von Schienenfahrzeugen, Turbinen, Maschinenprüf- stände, Spanplatten - u. MDF (Mitteldichte Faser- platten) - Pressen, Walzwer- ke, Druckmaschinen, Ölrohr- kanäle, Transformatoren, Kabelkanäle, automatische Parksysteme, Groß- und Ge- werbeküchen
O	ja		Wasser- und Schaumlöcher	feinvernebelter Sprühstrahl	Brandklasse A: Wasser Brandklasse B: Zu- mischung von AFFF elektrische Anlagen
P	ja		Hochdruck- wassernebel (keine weite- ren Angaben)	keine weiteren Angaben	Schiffe

zu Tabelle 1					
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
Q	ja		4 - 8 bar 3 - 16 bar 100 - 200 bar 10 - 32 l/min Wasser pro Düse	Einfachdüsen, Zwillingsdüsen, Bündeldüsen Sprühköpfe) mit mehreren Einzeldüsen, mitt- lerer Tropfendurchmesser: Nie- derdruck: 100 - 400 µm, Hoch- druck: 10 - 100 µm Auslösung: pneumatische, hy- draulisch und elektrisch ar- beitende Punkt- oder Linien- melder, Dauer-, Intervall- oder intermittierender Betrieb	Fahrzeuflöschanlagen (Brandklassen A, B, C, auch mit Zusatz von filmbilden- den Schaummittel), Park- systeme, Lackierkabinen, Spanplattenpressen, Schutz von öl- und fetthaltigen Einrichtungen, Versamm- lungsstätten, historischen Holz-Dachkonstruktionen, Kabelkanäle, Gurtförder- anlagen, Schutz, Schutz von schaumstoffherstellenden Maschinen
R	ja		100 bar	Sprühköpfe mit mehreren Ein- zeldüsen Tropfendurchmesser: 20 µm - 300 µm 20 µm - 150 µm Auslösung durch Glasfaß im Sprühkopf	Kabinen und Aufenthalts- räume auf Schiffen, Maschinenräume, Transforma- toren, Restaurants, Theater

zu Tabelle 1					
System	ortsfest	mobil	Betriebsdruck Durchsatz	Sonstige Eigenschaften	Einsatzgebiete
S	ja			<p>Sprenglöschverfahren: kunststoffbeschichteter Gewe- beschlauch mit Sprengschnur bestückt u. mit Wasser befüllt Länge: wenige Meter bis mehre- re hundert Meter Durchmesser Einzelschläuche 14 cm (15 H₂O/m), 18 cm (25 l H₂O/m), 25 cm (50 l H₂O/m), Doppelschläuche (14 cm + 18 cm (40 l/m) bzw. 18 cm + 25 cm (75 l/m)), Parallel- schläuche (3 Typen: 2 gleich- artige Einzelschläuche neben- einander) Zusatz von Schaumbildnern und anderen Löschmittelzusätzen möglich mittlerer Tropfendurchmesser: ca. 250 µm)</p>	<p>Wald-, Busch- und Grasland- brände, Flüssigkeitsbrände</p>
T	ja		6 bar	<p>11,5 l/min pro Düse Auslösung mit 3 mm (68°C)- Glasfaß</p>	<p>Schiffskabinen, -korridore und - aufenthaltsräume</p>
U		ja	<p>100 bar ca. 23 l/min</p>	<p>Tropfendurchmesser: 20 - 100 µm Wurfweite: Vollstrahl: 7 - 8 m Sprühstrahl: 4 - 5 m Mannschutz: 0,5 m</p>	<p>keine Angaben</p>

Tabelle 2: Begriffsbildung und Schreibweisen für Wassernebellöschanlagen.

Deutsch
Wasservernebelungsanlage
Wassernebellöschanlage
Wassersprühnebel-Feuerlöschanlage
Feinsprühlöschanlage
Wasseraerosol-Feuerlöschanlage
Wasserfeinsprüh-Löschanlage
Microwasserlöschanlagen
Wasservernebelungs-Löschanlage
Wasserstaub-Löschverfahren
Wasser-Hochdruck-Sprinklersystem
Englisch
Fine Water Spray System
Water Mist System
Water Mist Fire Extinguishing System
Mist Fire Fighting Sprinkling System
Waterfog System
Fine Water Spray Suppression System
Mist Sprinkling System

Tabelle 3: Tropfengrößendefinitionen

<p>volumenbezogener Halbwertstropfendurchmesser (zentraler Tropfendurchmesser) D_{V50}</p>	<p>Die Hälfte der Tropfenvolumina ist größer und die andere Hälfte ist kleiner als der Halbwertstropfendurchmesser D_{V50}. In einer Summenkurve der Volumenverteilung liegt dieser bei 50 %.</p>
<p>anzahlbezogener Halbwertstropfendurchmesser (zentraler Tropfendurchmesser) D_{A50}</p>	<p>Die Hälfte der Tropfenanzahl ist größer und die andere Hälfte ist kleiner als der Halbwertstropfendurchmesser D_{A50}. In einer Summenkurve der Anzahlverteilung liegt dieser bei 50 %.</p>
<p>arithmetischer Mittelwert D_{10}</p>	<p>Diesen Tropfendurchmesser erhält man aus dem arithmetischen Mittel der Werte in der Anzahlhäufigkeitsverteilung (Rechnerischer Durchschnittswert aller Tröpfchendurchmesser in der Sprühprobe).</p>
<p>mittlerer Oberflächendurchmesser D_{20}</p>	<p>Durchmesser eines Tropfens, dessen Oberfläche - multipliziert mit der Gesamtanzahl der gemessenen Tropfen - der Gesamtfläche der Sprühprobe gleich ist.</p>
<p>mittlerer Volumendurchmesser D_{30}</p>	<p>kennzeichnet den Durchmesser eines Tropfens, dessen Volumen - multipliziert mit der Gesamtanzahl der gemessenen Tropfen - dem Gesamtvolumen gleich ist.</p>
<p>D_{V90}</p>	<p>Tropfendurchmesser, der bei 90 % der akkumulierten Volumenwerte angesiedelt ist, d.h. 90% des zerstäubten Volumens liegt in Tropfen vor, die gleich oder kleiner diesem Wert sind. 10 % des Volumens hat einen größeren Tropfendurchmesser.</p>
<p>$D_{V0.99}$</p>	<p>99 % des gesamten Tropfenvolumens sind kleiner als dieser Durchmesser.</p>
<p>$D_{V0.1}$</p>	<p>10 % sind kleiner als dieser Durchmesser. Damit wird der Kleintropfenanteil erfaßt.</p>
<p>$D_{V0.9}$</p>	<p>90 % sind kleiner als dieser Durchmesser. Damit wird der Großtropfenanteil erfaßt.</p>
<p>Sauter-Durchmesser D_{32}</p>	<p>Wie Untersuchungen gezeigt haben, sollen in allen physikalischen und chemischen Vorgängen zur Bildung des mittleren Durchmessers die Teilchenabmessungen verwendet werden, die Einfluß auf den ablaufenden Prozeß haben. Für den Wärme- und Stoffaustausch, gekoppelt mit einer Bewegung der Tropfen, ist dies der SAUTER-Durchmesser oder gleichwertiger Kugeldurchmesser D_{32}, der die Summe aller Tropfenvolumina zu der Summe aller Tropfenoberflächen ins Verhältnis setzt.</p> $D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i D_{Ti}^3}{\sum_{i=1}^k n_i D_{Ti}^2}$ <p>k : Anzahl der Durchmesserfraktionen n_i : Anzahl der Tropfen in der Fraktion i D_{Ti} : Mittlerer Tropfendurchmesser der Fraktion i in mm</p> <p>Der Sauter-Durchmesser spielt für ein umströmtes Teilchen eine ähnliche Rolle wie der hydraulische Durchmesser für durchströmte Körper.</p>

Tabelle 4: Meßstellenliste

Meßstellenbezeichnung	Versuchsnr.	Position der Meßstellen
ΔM	8, A, B, C, D, E	Abbrandwaage - Brandraumboden
\dot{V}_w	A, B, C, D, E	Löschwasservolumenstrom
P_w	A, B, C, D, E	Überdruck vor dem Wassernebelsprühkopf
		Prandtl-Rohre (dynamischer Druck, Strömungsgeschwindigkeit)
p1	8, A, B, C, D, E	Zuluftöffnung für Zwischenfassadenbereich Blick auf die Fassade - links, Mitte der Öffnung
p2	8, A, B, C, D, E	Zuluftöffnung für Zwischenfassadenbereich Blick auf die Fassade - Mitte, Mitte der Öffnung
p3	8, A, B, C, D, E	Zuluftöffnung für Zwischenfassadenbereich Blick auf die Fassade - rechts, Mitte der Öffnung
p4	8, A, B, C, D, E	Abluftöffnung für Zwischenfassadenbereich Blick auf die Fassade - links, Mitte der Öffnung
p5	8, A, B, C, D, E	Abluftöffnung für Zwischenfassadenbereich Blick auf die Fassade - Mitte, Mitte der Öffnung
p6	8, A, B, C, D, E	Abluftöffnung für Zwischenfassadenbereich Blick auf die Fassade - rechts, Mitte der Öffnung
WSA	8, A, B, C, D, E	Wärmestrahlungsaufnehmer (Typ: Gardon, Sichtwinkel: 180°) Sensor bündig mit Oberfläche der Innenfassade, Mitte der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung, im Bereich von Temperaturmeßstelle TOR1
		Temperaturmeßstellen
TB1	8, A, B, C, D, E	Brandraum, zentral im Raum in 1,5m Höhe
TB2	8, A, B, C, D, E	Brandraum, zentral im Raum 5 cm unter der Decke

zu Tabelle 4		
Meßstellenbezeichnung	Versuchs-Nr.	Position der Meßstellen
		Temperaturmeßstellen
TB3	8, A, B, C, D, E	Brandraum, Oberkante Tür, Mitte
TB4	8, A, B, C, D, E	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: vorne links
TB5	8, A, B, C, D, E	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: hinten links
TB6	8, A, B, C, D, E	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: hinten rechts
TB7	8, A, B, C, D, E	Brandraum, 10cm unter der Decke, Abstand 1 m von der Wand, Blick: Eingang Brandraum: vorne rechts
TBF2	8, A, B, C, D, E	Brandraum, Fenster, innen, 5 cm unter Oberkante des Rahmens, 5 cm entfernt vom rechten (Blick auf die Fassade) Rahmen
TBFi	8, A, B, C, D, E	Brandraum, Fenster, innen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas
TBFa	8, A, B, C, D, E	Zwischenfassadenbereich, Fenster, außen, Oberkante und Mitte des Rahmens, Thermoelementspitze in kleiner Bohrung im Rahmen direkt neben dem Glas
THS1	B, C	Brandraum, Holzständerwand, 50 mm über Oberkante Öffnung in der Zellulosedämmung
THS2	B, C	Brandraum, Holzständerwand, 550 mm über Oberkante Öffnung in der Zellulosedämmung
TSofa	D, E	Brandraum, Sofalehne neben der Zündkrippe im Unterteil des Schrankes
TZKr	D, E	Brandraum, Zündkrippe im Unterteil des Schrankes
TOR1	8, A, B, C, D, E	Zwischenfassadenbereich, Mitte der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung, Oberfläche der Innenfassade
TZ1	8, A, B, C, D, E	Temperatur an Zuluftöffnung (Umgebungstemperatur), Mitte der Außenfassade im Bereich von Prandtl-Rohr p2
TZ2	8, A, B, C, D, E	Zwischenfassadenbereich, Unterkante des Brandraumfensters, Mitte, 20 cm vor Innenfassade

zu Tabelle 4		
Meßstellenbezeichnung	Versuchs-Nr.	Position der Meßstellen
		Temperaturmeßstellen
TZ3	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberfläche des Brandraumfensters, zentral
TZ3.1	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberfläche der Außenfassade, zentral gegenüber Brandraumfenster
TZ3.2	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberfläche der Außenfassade, gegenüber Brandraumfenster Oberkante Mitte
TZ3.3	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberfläche der Außenfassade, zentral, gegenüber der oberen, durch Silikat-Brandschutzbauplatte verschlossenen Fensteröffnung (gegenüber Meßstelle WSA)
TZ4	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensterrahmens, Mitte, 20 cm vor Innenfassade
TZ5	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensters, links, 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade
TZ6	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberkante des Brandraumfensters, rechts ² , 10 cm vor vertikaler Abschottung, 20 cm vor Innenfassade
TZ7	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Unterkante des "oberen Fensters" (s.Bem. TOR1), Mitte, 20 cm vor Innenfassade
TZ8	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, links, im Bereich von Prandtl-Rohr p4
TZ9	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, Mitte, im Bereich von Prandtl-Rohr p5
TZ10	8,A,B,C,D,E	Zwischenfassadenbereich, Oberkante der Außenfassade, rechts, im Bereich von Prandtl-Rohr p6
TF1	8,A,B,C,D,E	Flur, Brandraumtür, Mitte, Höhe 1,5 m
TF2	8,A,B,C,D,E	Flur, zentral im Raum, 5 cm unter der Decke
TF3	8,A,B,C,D,E	Flur, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
TF4	8,A,B,C,D,E	Flur, Tür zur Halle, Oberkante, Mitte
TF5	8,A,B,C,D,E	Flur, Tür zum Nebenraum, Oberkante, Mitte
TN1	8,A,B,C,D,E	Nebenraum, Tür, Mitte, Höhe 1,5 m

zu Tabelle 4		
Meßstellenbezeichnung	Versuchsnr.	Position der Meßstellen
TN2	8,A,B,C,D,E	Nebenraum, zentral im Raum, 5 cm unter der Decke
TN3	8,A,B,C,D,E	Nebenraum, zentral im Raum, Höhe 1,5 m
		Gaskonzentrationen
O ₂ B	8,A,B,C,D,E	Brandraum - Sauerstoffkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
CO ₂ B	8,A,B,C,D,E	Brandraum - Kohlendioxidkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
COB	8,A,B,C,D,E	Brandraum - Kohlenmonoxidkonzentration, zentral im Raum in 1,5 m Höhe
O ₂ A	8,A,B,C,D,E	Sauerstoffkonzentration in der Abluft des Zwischenfassadenbereiches
CO ₂ A	8,A,B,C,D,E	Kohlendioxidkonzentration in der Abluft des Zwischenfassadenbereiches
COA	8,A,B,C,D,E	Kohlenmonoxidkonzentration in der Abluft des Zwischenfassadenbereiches

Tabelle 5: Versuchsaufbau: Versuch 8 - Ganzflächen-doppelfassade ohne Löschanlage

Versuch	Brandraum	Innenfassade	Zwischenfassadenbereich	Außenfassade
8	<p>Brandlast: Wohnzimmereinrichtung, 754 kg Möbel u. Papier 1 Zündwanne (250 mm * 175 mm * 30 mm) mit 0,5 l Heptan Mittlerer Heizwert der Brandlast $H_u = 16,9 \text{ MJ/kg}$ Ansaugung von Verbrennungsluft über Ventilationsöffnung (Fenster) sowie über den Spalt zwischen Plattform der Abbrandwaage und Brandraumwänden, Brandraum- und Flurtür (geschlossen): 1985mm * 985mm (1,96m²)</p>	<p>Brandraumfenster offen, Öffnung: Höhe 1,38 m * 1,08 m, 1,49 m² 2. Geschoß durch Wand angedeutet</p>	<p>vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandenschutzbauplatten</p>	<p>Abstand: 1,2m Material: Silikat-Brandenschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe: 3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe: 1468 mm (2*1,39m² = 2,78m²), 8mm stark Verglasungsgummi: EPDM (Ethylen/Propylen-Dein-Terpolymer) Zuluftöffnung: 1,5m² Abluftöffnung: 1,5m²</p>

Tabelle 6: Brand- und Löschversuche mit Wassernebel
Tabelle 6.1

Versuch	Versuchsaufbau / Brandlast	Löschanlage	Versuchsablauf u. Versuchsergebnisse
<p>A</p>	<p>* Brandraum: Gesamtbrandlast: ca. 162 kg - Möbel (1 Sofa, 1 Sessel, 2 Tische, 2 Stühle, Zündkrippe im unteren Teil des Schrankes, Zeitungspapier im Schrank, Zündwanne (250mm * 175mm * 30mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan zwischen Sofa und Schrank im Bereich der Zündkrippe), Brandlast vor und links neben dem Fenster angeordnet, - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutzrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangsbene 1,75 kg - Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m²) * Innenfassade: PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum (Öffnungsfläche: 0,15m²), (4-16-4, k=1,5 W/m²K, Rahmen: Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m²), Glas:Höhe: 1160mm, Breite:860mm (1m²) 2. Geschoß durch Wand angedeutet, * Zwischenfassadenbereich: vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandschutzbauplatten * Außenfassade: Abstand: 0,3m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilsystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe:3100mm, Material: AIMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe: 1468 mm (2*1,39m²=2,78m²), 8mm stark, Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: je 0,375m²</p>	<p>* Niederdruck-Wassernebel-löschanlage (System Herzog), 1 Sprühkopf mit 5 Einzeldüsen, Düsenöffnung: $\phi = 4$ mm, Tropfendurchmesser < 100µm Gesamt.volumenstrom: 61 l/min 7,3 bar Überdruck Auslösen über Indikator-sprinkler mit 5 mm Glasfaß (Nemauslösetemp.: 68 °C, mittl. RTI: ca. 100) * Intervalllöschen nach Auslösung der Löschanlage: 3,6 min (3 min 36 s) löschen 2,1 min (2 min 6 s) Pause 1,5 min (1 min 30 s) löschen 2,3 min (2 min 18 s) Pause 6,45 min (6 min 27 s) löschen * Gesamtwasserverbrauch: ca. 705 l * nach Ausschalten der Löschanlage: Nachlöscharbeiten mit D-Strahlrohr</p>	<p>* Wärmeschutzglasfenster geschlossen * Brandraumtür auf (16 mm 29 s bis 20 min 33 s: zu) * Löschanfang (Wassernebel): 3 min 18 s nach Zündung (Temperatur am Sprinklerglasfaß: ca. 127 °C) * Löschende (Wassernebel): 19 min 15 s nach Zündung nach Ausschalten der Löschanlage: Abföschten mit D-Rohr * Deckentemperatur während des Löschens: < 254 °C * Maximale Deckentemperatur im Brandraum: TB6 = 331 °C nach 22 min 33 s (nach Abschalten der Löschanlage) * Temperaturen im Zwischenfassadenbereich: < 26 °C * Gaskonzentrationen im Brandraum: <i>minimaler O₂-Wert: 16,9 Vol% nach 20 min 48 s (13,6 Vol% nach 9 min 45 s)</i> maximaler CO₂-W.: 3,5 Vol% nach 24 min 9 s max. CO-W.: 0,26 Vol% nach 24 min 9 s * Gaskonzentrationen im Abgas des Zwischenfassadenbereiches: <i>minimaler O₂-Wert: 20,6 Vol% nach 24 min 51 s</i> maximaler CO₂-W.: 0,25 Vol% nach 24 min 24 s maximaler CO-W.: 0,03 Vol% nach 24 min 42 s * Brandschäden: Vorhang am Fenster nicht entzündet (keine Brandspuren), Wärmeschutzglasfenster nicht zerstört, geringer Brandschaden am Möbel (1 Sofalehne verbrannt, kleiner Schrank größtenteils noch erhalten (ca. 30 % verbrannt), Zeitungspapier im Schrank zu ca. 85 % verbrannt, keine Brandspuren an Sessel, Tisch und Stühlen) * Zwischenfassadenbereich: keine Flammen, geringe Rauchentwicklung, vernachlässigbare Temperaturerhöhung</p>

Tabelle 6.2

Versuch	Versuchsaufbau / Brandlast	Löschanlage	Versuchsablauf u. Versuchsergebnisse
<p>B</p>	<p>* Brandraum: Gesamtbrandlast: ca. 90 kg - Holzständerwand mit Füllung: 56,1 kg Außenabmessungen: Höhe: 1570 mm, Breite: 885 mm, Wandstärke außen 143 mm, oben offen (Rastermaß: 815 mm), beidseitig OSB-Holzwerkstoffplatte (15 mm dick), Füllung: ca. 10,14 kg Zellulosedämmung aus Altpapier, Flammenschutzmittel Borax, Dämmdicke: 140 mm, trocken eingefüllt, kreisförmige Öffnung im Bodenbereich (d=100mm, Mittelpunkt: 130 mm von linker u. unterer Kante) - 2 Holzkrippen vor Holzständerwand: 32,66 kg - Zündwanne (250mm * 175mm * 30mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan vor kreisförmiger Öffnung im Boden- bereich teilweise unterhalb der Zündkrippe - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutzrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg - Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m²) * Innenfassade: PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, gekippt (Öffnungsfläche: 0,15m²), (4-16-4, k=1,5 W/m²K, Rahmen: Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m²); Glas:Höhe: 1160mm, Breite:860mm (1m²) 2. Geschoß durch Wand angedeutet, * Zwischenfassadenbereich: vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat- Brandschutzbauplatten * Außenfassade: Abstand: 0,3m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Eisenbrennsicherheitsverglasung in Aluminium- profilsystem mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe:3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG- Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe:1468 mm (2*1,39m² = 2,78m²), 8mm stark Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: je 0,375m²</p>	<p>* Niederdruck-Wassernebel- Löschanlage (System Herzog), 1 Sprühkopf mit 5 Einzeldüsen, Düsen- öffnung: φ = 4 mm, Tropfendurchmesser < 100µm Gesamtvolumenstrom: 61 l/min 7,3 bar Überdruck Auslösen über Indikatorsprinkler mit 5 mm Glasfaß (Nennaus- lösetemp.: 68 °C, mittl. RTI: ca. 100)</p> <p>* Dauerlöschen nach Auslösung der Löschanlage: 19,3 min löschen</p> <p>* Gesamtwasserverbrauch: ca. 1158 l</p> <p>* nach Ausschalten der Löschanlage: Ablöschen der Holzkrippen mit D- Strahlrohr</p>	<p>* Wärmeschutzglasfenster geschlossen * Brandraumtür auf (18 min 10 s bis 21 min 30 s: zu) * Löscheintritt (Wassernebel): 4 min 9 s nach Zündung (Temperatur am Sprinklerglasfaß: ca. 137 °C) * Löschende (Wassernebel): 23 min 27 s nach Zündung nach Ausschalten der Löschanlage: Ablöschen der Holzkrippen mit D-Strahlrohr * Maximale Deckentemperatur im Brandraum: TB7 = 247 °C nach 9 min 33 s * Maximale Temperatur im Inneren des Zellulose-Dämmmaterials: 57,4 °C * Temperaturen im Zwischenfassadenbereich: < 29 °C * Gaskonzentrationen im Brandraum: minimaler O₂-Wert: 16,8 Vol% nach 15 min 18 s maximaler CO₂-W.: 3,5 Vol% nach 13 min 54 s maximaler CO-W.: 0,15 Vol% nach 15 min 15 s * Gaskonzentrationen im Abgas des Zwischen- fassadenbereiches: minimaler O₂-Wert: 20,53Vol% nach 27 min 54 s maximaler CO₂-W.: 0,25 Vol% nach 27 min 3 s maximaler CO-W.: 0,03 Vol% nach 27 min 12 s * Brandschäden: Vohang am Fenster nicht entzündet (keine Brand- spuren), Wärmeschutzglasfenster nicht zerstört, geringer Brandschaden an der Holzständerwand, Zellulosedämmung nur im Bereich der Öffnung angebrannt (ca. 3,5 cm tief) * Zwischenfassadenbereich: keine Flammen, geringe Rauchentwicklung, vernachlässigbare Temperatur- erhöhung</p>

Tabelle 6.3

Versuch	Versuchsaufbau / Brandlast	Löschanlage	Versuchsablauf u. Versuchsergebnisse
C	<p>* Brandraum: Gesamtbrandlast: ca. 111 kg - Holzständerwand mit Füllung: 56,1 kg Außenabmessungen: Höhe: 1570 mm, Breite: 885 mm, Wandstärke außen 143 mm, oben offen (Rastermaß: 815 mm), beidseitig OSB-Holzwerkstoffplatte (15 mm dick), Füllung: ca. 10,14 kg Zellulosedämmung aus Altpapier, Flammenschutzmittel Borax, Dämmdicke: 140 mm, trocken eingefüllt, kreisförmige Öffnung im Bodenbereich (d=100mm, Mittelpunk: 130 mm von linker u. unterer Kante) - Sofa vor Holzständerwand: 51,9 kg - Zündwanne (250mm * 175mm * 30mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan unter der Mitte des Sofas - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutzrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg - Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m²)</p> <p>* Innenfassade: PVC-Wärmeschutzglasfenster im Brandraum, gekippt (Öffnungsfläche: 0,15m²), (4-16-4, k=1,5 W/m²K, Rahmen: Höhe:1350mm, Breite:1050mm (1,42m²); Glas:Höhe: 1160mm, Breite:860mm (1m²) 2. Geschoß durch Wand angedeutet,</p> <p>* Zwischenfassadenbereich: vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandschutzbauplatten</p> <p>* Außenfassade: Abstand: 0,3m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofilsystem mit Glasbalteileisten (Breite: 1050mm, Höhe:3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe:1468 mm (2*1,39m²=2,78m²), 8mm stark Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: je 0,375m²</p>	<p>* Niederdruck-Wassernebel-löschanlage (System Herzog), 1 Sprühkopf mit 5 Einzeldüsen, Düsenöffnung: $\phi = 4$ mm Tropfendurchmesser < 100μm Gesamt-volumenstrom: 60 l/min 7,2 bar Überdruck Auslösen über Indikatorsprinkler mit 5 mm Glasfaß (Neumauslösetemp.: 68 °C, mittl. RTI: ca. 100)</p> <p>* Intervalllöschen nach Auslösung der Löschanlage: 5,2 min löschen 9,85 min Pause 2,75 min löschen 0,85 min Pause 4,55 min löschen</p> <p>* Gesamtwasserverbrauch: ca. 763 l</p> <p>* nach Ausschalten der Löschanlage: Nachlöscharbeiten mit D-Strahlrohr</p>	<p>* Wärmeschutzglasfenster geschlossen * Brandraumtür auf * Löschbeginn (Wassernebel): 4 min 12 s nach Zündung (Temperatur am Sprinklerglasfaß: ca. 141 °C) * Löschende (Wassernebel): 27 min 24 s nach Zündung * Maximale Deckentemperatur im Brandraum: 171 °C (TBT) nach 4 min * Maximale Temperatur im Inneren des Zellulose-Dämmmaterials: 17,9 °C * Temperaturen im Zwischenfassadenbereich: <22 °C * Gaskonzentrationen im Brandraum: <i>minimaler</i> O₂-Wert: 18,04 Vol% nach 8 min 42 s maximaler CO₂-W.: 2,55 Vol% nach 8 min 33 s maximaler CO-W.: 0,30 Vol% nach 8 min 45 s * Gaskonzentrationen im Abgas des Zwischenfassadenbereiches: <i>minimaler</i> O₂-Wert: 20,63Vol% nach 14 min 51 s maximaler CO₂-W.: 0,25 Vol% nach 14 min 18 s maximaler CO-W.: 0,03 Vol% nach 14 min 21 s * Brandschäden: Vorhang am Fenster nicht entzündet (keine Brandspuren), Wärmeschutzglasfenster nicht zerstört, brennbare Teile am Sofa ca. zur Hälfte verbrannt, kein Brandschaden an der Holzständerwand * Zwischenfassadenbereich: keine Flammen, geringe Rauchentwicklung (etwas stärker als bei Versuch A u. B), vernachlässigbare Temperaturerhöhung</p>

Tabelle 6.4

Versuch	Versuchsaufbau / Brandlast	Löschanlage	Versuchsablauf u. Versuchsergebnisse
<p>D</p> <p>* Brandraum: Gesamtbrandlast: ca. 177 kg - Möbel (1 Sofa, 1 Sessel, 2 Tische, 2 Stühle, Zündkrippe im unteren Teil des Schrankes, Zeitungspapier im Schrank, Zündwanne (250mm * 175mm * 30mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan zwischen Sofa und Schrank im Bereich der Zündkrippe), Brandlast vor und links neben dem Fenster angeordnet, - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutzrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg - Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m²) * Innenfassade: ohne Wärmeschutzglasfenster im Brandraum Öffnung: Höhe:1380mm, Breite:1080mm (1,49m²), 2. Geschoß durch Wand angedeutet, * Zwischenfassadenbereich: vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandschutzbauplatten * Außenfassade: Abstand: 0,3m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofil system mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe:3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe: 1468 mm (2*1,39m²=2,78m²), 8mm stark, Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: je 0,375m²</p>	<p>* Niederdruck-Wassernebel-Löschanlage (System Herzog), 1 Sprühkopf mit 5 Einzeldüsen, Düsenöffnung: $\phi = 4$ mm Tropfendurchmesser < 100μm Gesamt.volumenstrom: 61 l/min 7,3 bar Überdruck Auslösen über Indikator-Sprinkler mit 5 mm Glasfaß (Nennauslösetemp.: 68 °C, mittl. RTI: ca. 100)</p> <p>* Intervalllöschen nach Auslösung der Löschanlage: 60 s löschen 30 s Pause 30 s löschen 30 s Pause usw. bis 12,8 min bis 15,8 min: 60 s Pause 30 s löschen</p> <p>* Gesamtwasserverbrauch: ca. 420 l</p> <p>* nach Ausschalten der Löschanlage: Nachlöscharbeiten mit D-Strahlrohr</p>	<p>* ohne Wärmeschutzglasfenster * Brandraumtür auf * Löschbeginn (Wassernebel): 2 min 36 s nach Zündung (Temperatur am Sprinklerglasfaß: ca. 131 °C) * Löschende (Wassernebel): 15 min 48 s nach Zündung * Maximale Deckentemperatur im Brandraum: TB6=284 °C nach 2 min 45 s * Maximale Deckentemperatur nach Abschalten der Löschanlage: 22 °C * Maximale Temperatur im Zwischenfassadenbereich: TZ4= ca. 68 °C nach 2 min 39 s * Gaskonzentrationen im Brandraum: minimaler O₂-Wert: 18,5 Vol% nach 8 min 6 s maximaler CO₂-W.: 2,1 Vol% nach 7 min 48 s max. CO-W.: 0,16 Vol% nach 7 min 48 s * Gaskonzentrationen im Abgas des Zwischenfassadenbereiches: minimaler O₂-Wert: 20,8 Vol% nach 8 min 27 s maximaler CO₂-W.: 0,14 Vol% nach 9 min 30 s maximaler CO-W.: 0,035 Vol% nach 15 min 33 s * Brandschäden: Vorhang an Fensteröffnung nicht entzündet (keine Brandspuren), geringer Brandschaden am Möbel (1 Sofalehne angebrannt, kleiner Schrank größtenteils noch erhalten (Inhalt des Unterteiles (Zündkrippe, Zeitungspapier) verbrannt), keine Brandspuren an Sessel, Tisch und Stühlen) * Zwischenfassadenbereich: keine Flammen, etwas stärkere Rauchentwicklung als bei den Versuchen A, B und C durch offenes Fenster, geringe Temperaturerhöhung im Zwischenfassadenbereich</p>	

Tabelle 6.5

Versuch	Versuchsaufbau / Brandlast	Löschanlage	Versuchsablauf u. Versuchsergebnisse
<p>E ähnlich Vers. D, jedoch anderes Lösch- intervall</p>	<p>* Brandraum: Gesamtbrandlast: ca. 185 kg - Möbel (1 Sofa, 1 Sessel, 2 Tische, 2 Stühle, Zündkrippe im unteren Teil des Schrankes, Zeitungspapier im Schrank, - Zündwanne (250mm * 175mm * 30mm) mit 0,5 l (0,35 kg) Heptan zwischen Sofa und Schrank im Bereich der Zündkrippe), Brandlast vor und links neben dem Fenster angeordnet, - Vorhang am Fenster (Baumwolle/Polyester-Mischgewebe ohne Brandschutzrüstung), 1,1 kg + Dachlatte als Vorhangschiene 1,75 kg - Brandraum- und Flurtür: 1985mm * 985mm (1,96m²) * Innenfassade: ohne Wärmeschutzglasfenster im Brandraum Öffnung: Höhe: 1380mm, Breite: 1080mm (1,49m²), 2. Geschoß durch Wand angedeutet, * Zwischenfassadenbereich: vertikale Abschottung am Fassadenrand durch Silikat-Brandschutzbauplatten * Außenfassade: Abstand: 0,3m Material: Silikat-Brandschutzbauplatten, Teilbereich mit Einscheibensicherheitsverglasung in Aluminiumprofil system mit Glashalteleisten (Breite: 1050mm, Höhe: 3100mm, Material: AlMgSi0,5F22), ESG-Scheibe 2-teilig, jeweils Breite: 946mm, Höhe: 1468 mm (2*1,39m² = 2,78m²), 8mm stark, Verglasungsgummi: EPDM Zu- u. Abluftöffnung: je 0,375m²</p>	<p>* Niederdruck-Wassernebel-löschanlage (System Herzog), 1 Sprühkopf mit 5 Einzeldüsen, Düsenöffnung: $\phi = 4$ mm Tropfendurchmesser < 100µm Gesamt-volumenstrom: 62 l/min 7,5 bar Überdruck Auslösen über Indikator-sprinkler mit 5 mm Glasfaß (Nennauslösetemp.: 68 °C, mittl. RTI: ca. 100) * Intervalllöschen nach Auslösung der Löschanlage: 60 s löschen 60 s Pause 30 s löschen 60 s Pause 30 s löschen usw. bis 25,35 min bis 30,55 min: 5 min 12s löschen Gesamtwasserverbrauch: ca. 787 l * nach Ausschalten der Löschanlage: Nachlöscharbeiten mit D- Strahlrohr</p>	<p>* ohne Wärmeschutzglasfenster * Brandraumtür auf * Löscheintritt (Wassernebel): 2 min 36 s nach Zündung (Temperatur am Sprinklerglasfaß: ca. 120 °C) * Löschende (Wassernebel): 30 min 33 s nach Zündung * Maximale Deckentemperatur im Brandraum: TB6 = 199 °C nach 2 min 36 s * Maximale Deckentemperatur nach Abschalten der Löschanlage: < 95 °C * Maximale Temperatur im Zwischenfassadenbereich: TZ4 = ca. 89 °C nach 25 min 18 s * Gaskonzentrationen im Brandraum: <i>minimaler O₂-Wert:</i> 17,3 Vol% nach 27 min 3 s <i>maximaler CO₂-W.:</i> 3,2 Vol% nach 26 min 42 s <i>max. CO-W.:</i> 0,41 Vol% nach 22 min 21 s * Gaskonzentrationen im Abgas des Zwischenfassadenbereiches: <i>minimaler O₂-Wert:</i> 20,6 Vol% nach 23 min 36 s <i>maximaler CO₂-W.:</i> 0,26 Vol% nach 25 min 21 s <i>maximaler CO-W.:</i> 0,05 Vol% nach 18 min 42 s * Brandschäden: Vorhang an Fensteröffnung nicht entzündet (keine Brandspuren), geringer Brandschaden am Möbel (1 Sofalehne angebrannt, kleiner Schrank zum großen Teil verbrannt, dem Brand zugewandte Sessellehne teilweise verbrannt, keine Brandspuren an Tischen und Stühlen) * Zwischenfassadenbereich: keine Flammen, etwas stärkere Rauchentwicklung als bei den Versuchen A, B, C und D durch offenes Fenster, relativ geringe Temperaturerhöhung im Zwischenfassadenbereich</p>

Tabelle 7: Versuch 8 - Versuchsablauf

Versuchszeit min : s	Bemerkungen
0 : 00	Zündung unter dem Schrank gegenüber dem Brandraumfenster mit 1 Zündwanne, Brandraumtür geschlossen, Brandraumfenster geöffnet, Tür zum Nebenraum und Flurtür zur Versuchshalle geschlossen, Brandraumfenster geöffnet
0 : 41	Leichte Rauchentwicklung im Zwischenfassadenbereich
1 : 06	Brandraum beginnt zu verrauchen
2 : 00	Stärkere Rauchentwicklung im Zwischenfassadenbereich
2 : 18	Brandraumfensteröffnung nicht mehr zu erkennen, nur noch Leuchterscheinung der Flammen erkennbar
2 : 38	Erste Flammen aus dem oberen Bereich der Brandraumfensteröffnung
2 : 54	Dunkler dichter Rauch im Brandraum, Brandraumbeobachtungsfenster verrußt
3 : 07	Stärkere Flammenentwicklung im Zwischenfassadenbereich, durch den dunklen Rauch sind die Flammen zum Teil nur noch schwach erkennbar
3 : 11	Aufgrund der starken Verrauchung des Zwischenfassadenbereiches sind von außen fast keine Flammen durch ESG-Verglasung mehr erkennbar
3 : 49	Unverbrannte Rauchgase entzünden sich kurzzeitig im Zwischenfassadenbereich, hierbei ist durch die ESG-Verglasung über der gesamten Höhe eine aufsteigende Flammenerscheinung erkennbar
4 : 03	"
4 : 27	"
4 : 32	"
4 : 36	Oberhalb der Fassade sind erste Flammen kurzzeitig erkennbar
4 : 54	Unverbrannte Rauchgase entzünden sich kurzzeitig im Zwischenfassadenbereich, hierbei ist durch die ESG-Verglasung über der gesamten Höhe eine aufsteigende Flammenerscheinung erkennbar
5 : 03	Unverbrannte Rauchgase entzünden sich im Zwischenfassadenbereich, hierbei ist durch die ESG-Verglasung über der gesamten Höhe eine länger andauernde Flammenerscheinung erkennbar
5 : 09	Anhaltende Flammenerscheinung oberhalb der Fassade zeitweise fast über der gesamten Breite

zu Tabelle 7	
5 : 53	<p>Obere ESG-Scheibe geht nach dumpfem Knall schlagartig im Bruchteil einer Sekunde ohne vorherige Geräusche z.B. durch Ribbildung kaputt - vor der Zerstörung ist durch die starke Verqualmung und der durch Ruß geschwärzten Scheibe fast keine Flammerscheinung durch die ESG-Scheibe erkennbar</p> <p>Bemerkung: Die Flammerscheinung durch die ESG-Verglasung ist jedoch deutlicher erkennbar als bei den vorherigen Versuchen, wo statt Möbel Brandlastpaletten mit einem Anteil an schwerentflammbarem und im Brandfall stark rußendem Styropor verwendet wurde.</p> <p>- auch nach der Zerstörung sind Flammen oberhalb der Fassade im Bereich der Abluftöffnung erkennbar</p>
6 : 08	<p>Dunkle Rauchgase verschwinden relativ schnell im Zwischenfassadenbereich, Flammenkonturen und Abluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches wieder gut erkennbar</p>
7 : 50	<p>Untere ESG-Scheibe geht nach dumpfem Knall schlagartig im Bruchteil einer Sekunde ohne vorherige Geräusche z.B. durch Ribbildung kaputt - vor der Zerstörung ist durch die starke Verqualmung und der durch Ruß geschwärzten Scheibe fast keine Flammerscheinung durch die ESG-Scheibe erkennbar</p>
11 : 20	<p>Zwischenfassadenbereich verraucht wieder aufgrund der Absenkung der Rauchsicht in der Versuchshalle</p>
13 : 18	<p>Abnehmende Flammerscheinung im Zwischenfassadenbereich aufgrund des Ablöschens durch die Feuerwehr</p>
14 : 15	<p>Keine Flammen mehr aus Brandraumfenster</p>

Tabelle 8: Versagen der Verglasungen von Innen- und Außenfassade

		Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7	Versuch 8
Wärmeschutzglasfenster (Innenfassade)	Temperatur					
1. Ribbildung im Glas	TBFi	9 min 59 s 321,4°C	12 min 47 s 593,9°C	13 min 14 s 251,4°C	3 min 26 s 104,8°C ¹	- ²
	TBFa	9 min 59 s 52,7°C	12 min 47 s 83,5°C	13 min 14 s 99,2°C	3 min 26 s 35,1°C ²	"
1. Flammen im Zwischenfassadenbereich	TBFi	20 min 40 s 748,3°C	13 min 53 s 700,1°C	14 min 35 s 713,3°C	4 min 57 s 340,6°C	2 min 38 s 548,6°C
	TBFa	20 min 40 s 167,3°C	13 min 53 s 103,3°C	14 min 35 s 135,5°C	4 min 57 s 339,6°C	-
ESG-Verglasung (Außenfassade)						
Zerspringen der unteren ESG-Scheibe	TZ3.1	kein Zerspringen	kein Zerspringen	16 min 38 s 770,0°C	16 min 34 s 667,1°C ³	7 min 50 s 611,5°C
	TZ3.2	"	"	16 min 38 s 702,7°C	16 min 34 s 745,0°C ³	7 min 50 s 702,1°C
	TZ3.3	"	"	16 min 38 s 499,9°C	16 min 34 s 578,8°C ³	7 min 50 s 952,3°C
Zerspringen der oberen ESG-Scheibe	TZ3.1	"	19 min 22 s 308,2°C	18 min 32 s 618,6°C	13 min 28 s 573,5°C	5 min 53 s 281,3°C
	TZ3.2	"	19 min 22 s 510,9°C	18 min 32 s 849,1°C	13 min 28 s 724,8°C	5 min 53 s 508,9°C
	TZ3.3	"	19 min 22 s 466,4°C	18 min 32 s 376,3°C	13 min 28 s 828,8°C	5 min 53 s 682,0°C

¹ Gekippter Fensterflügel fällt durch Versagen des Kippmechanismus (Wärmeeinwirkung) in den Brandraum

² Ohne Wärmeschutzglasfenster

³ Kein Zerspringen, Beginn der plastischen Deformation der Scheibe im oberen Rahmenbereich

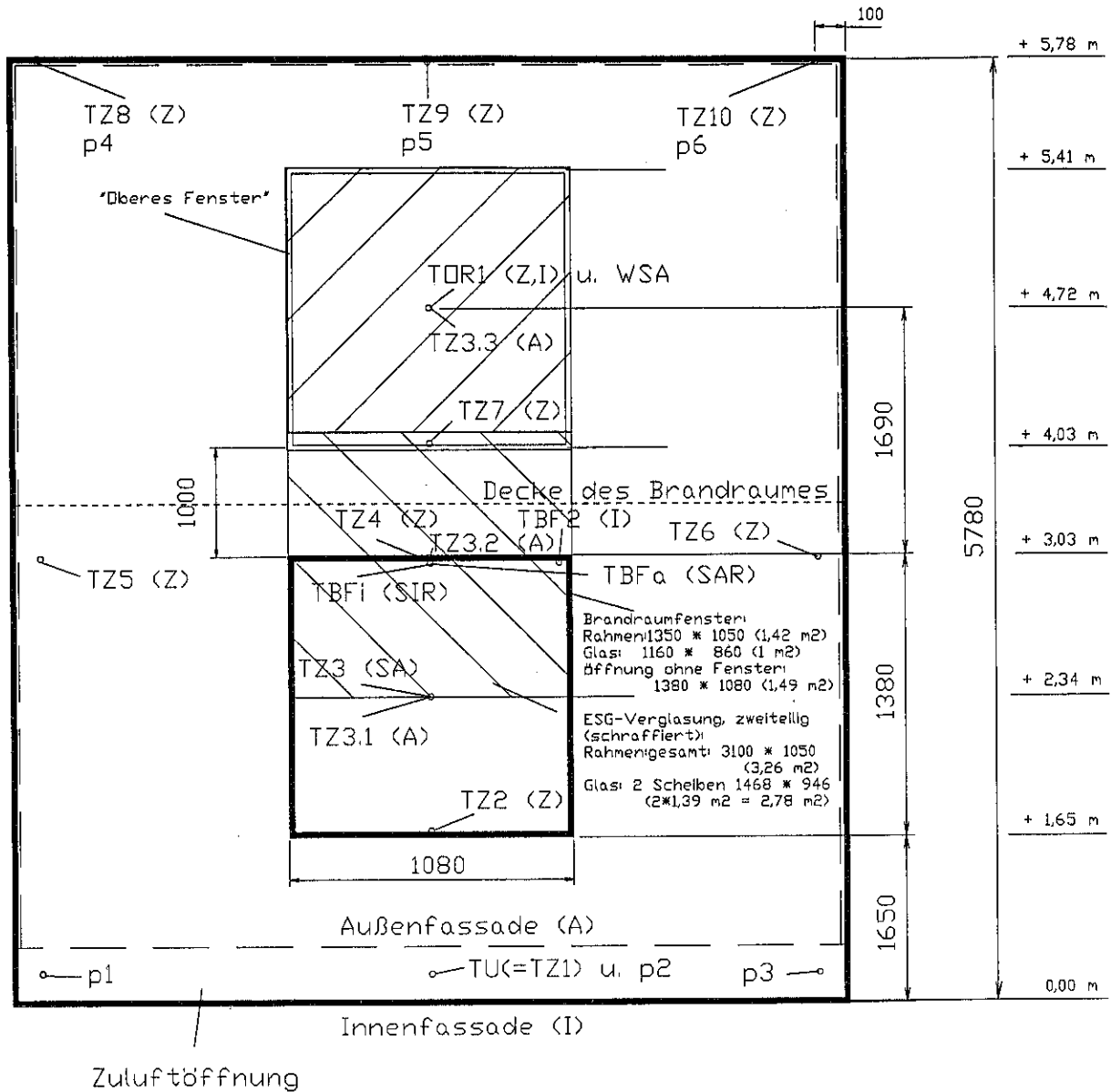


Bild 2 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus und Meßstellenplan - Zwischenfassadenbereich.

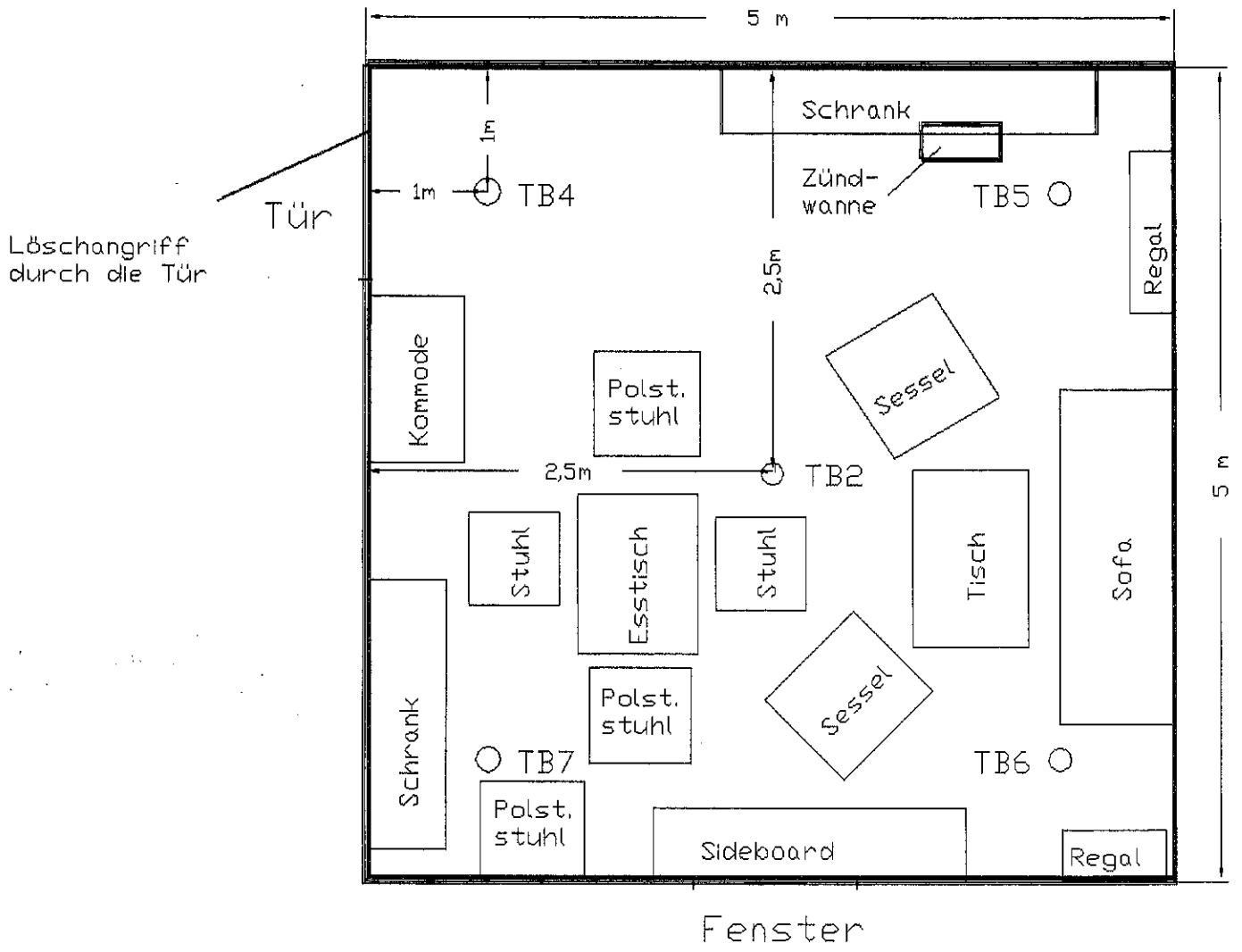


Bild 3 Aufstellung der Brandlast bei Versuch 8.

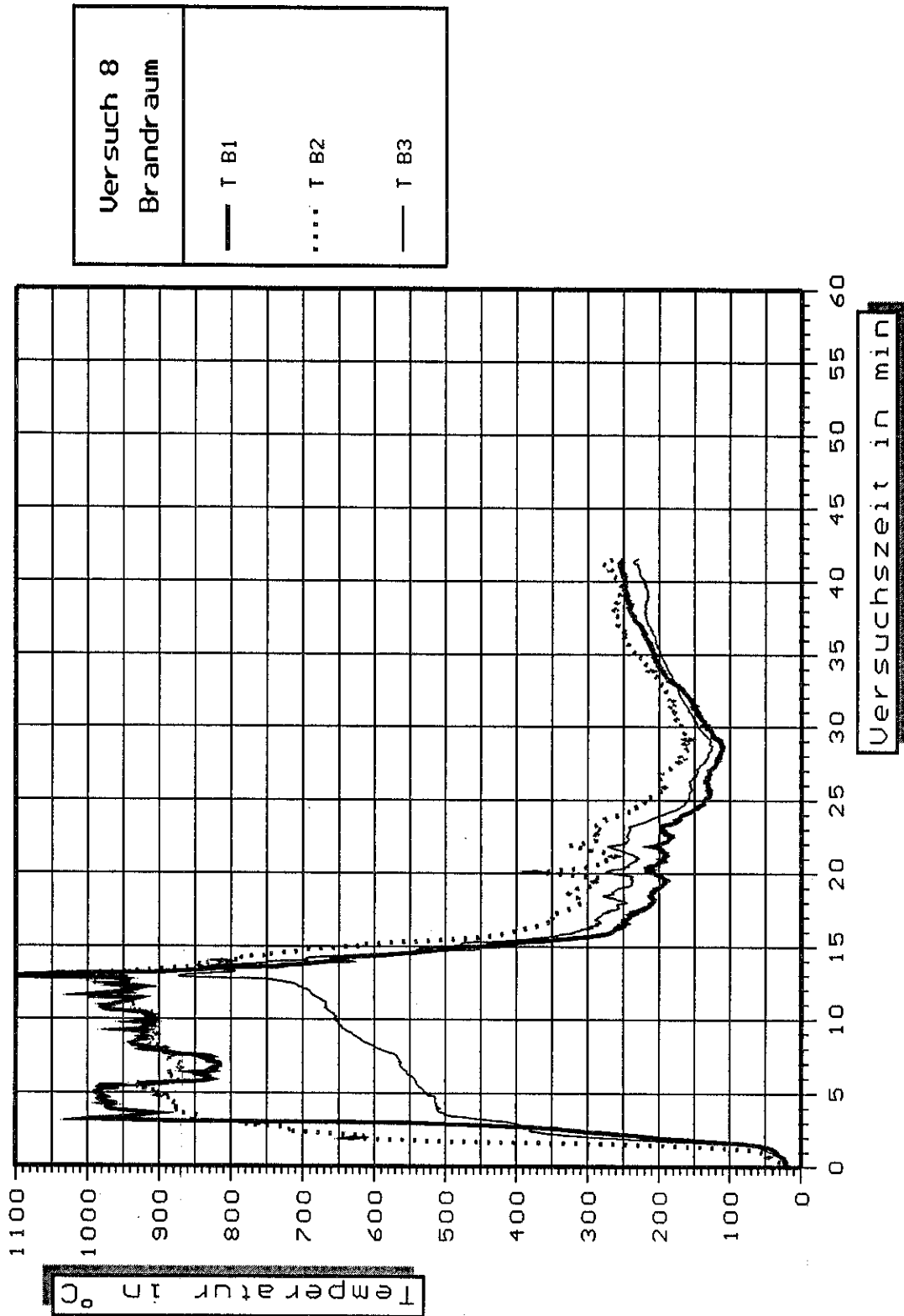


Bild 4 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.
- Versuch 8 -

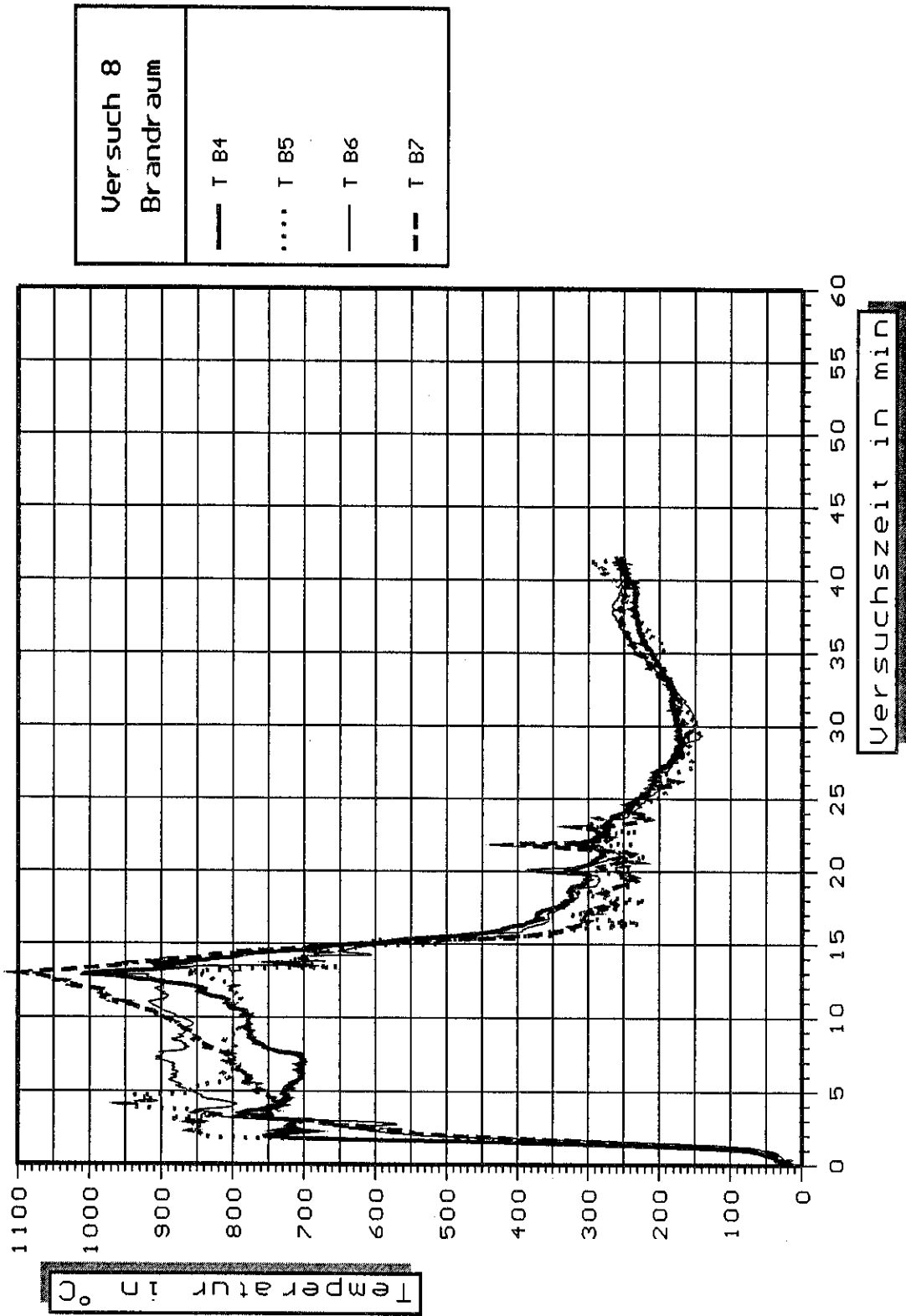


Bild 5 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes.
- Versuch 8 -

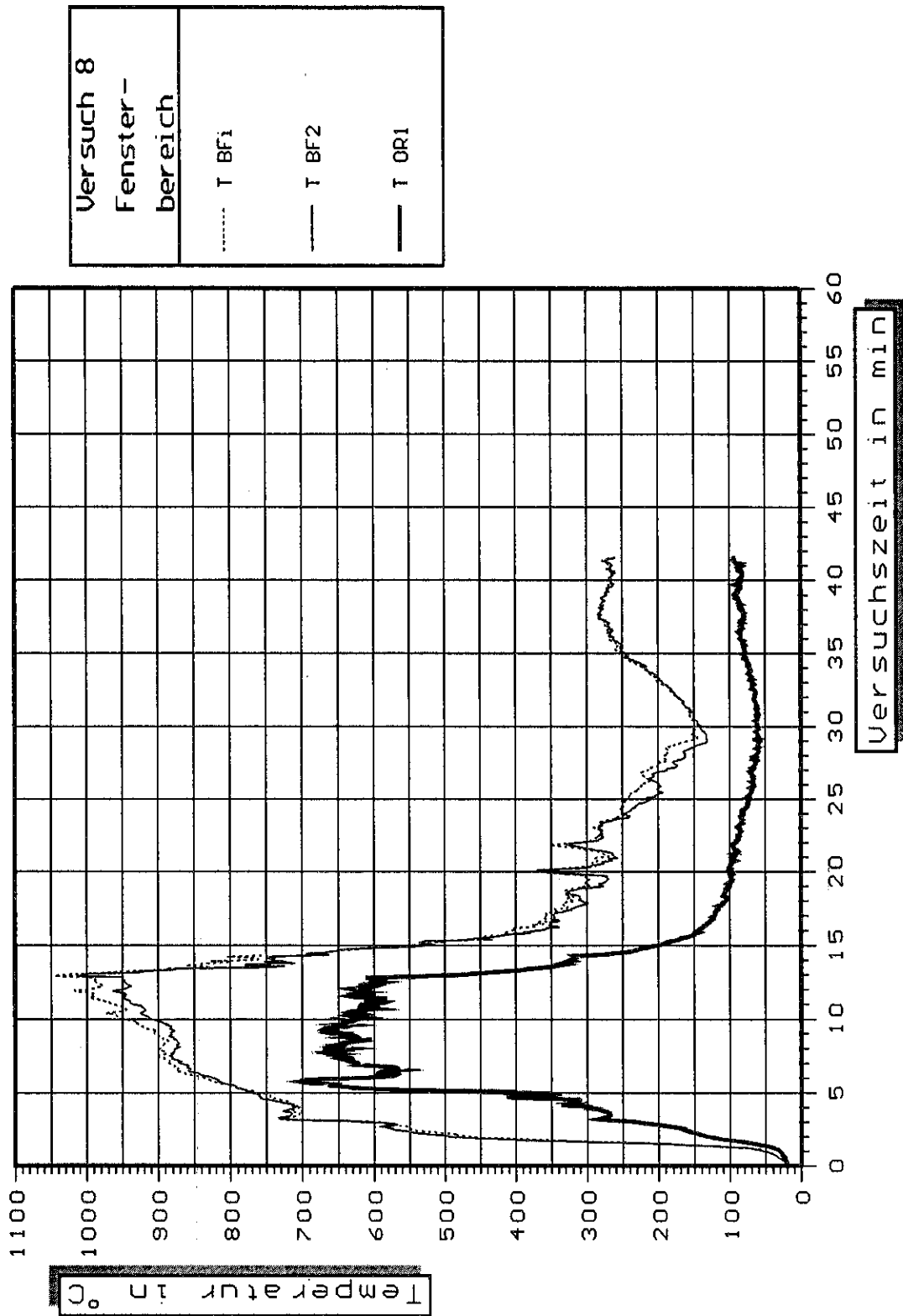


Bild 6 Zeitliche Temperaturverläufe im Fensterbereich der Innenfassade.
- Versuch 8 -

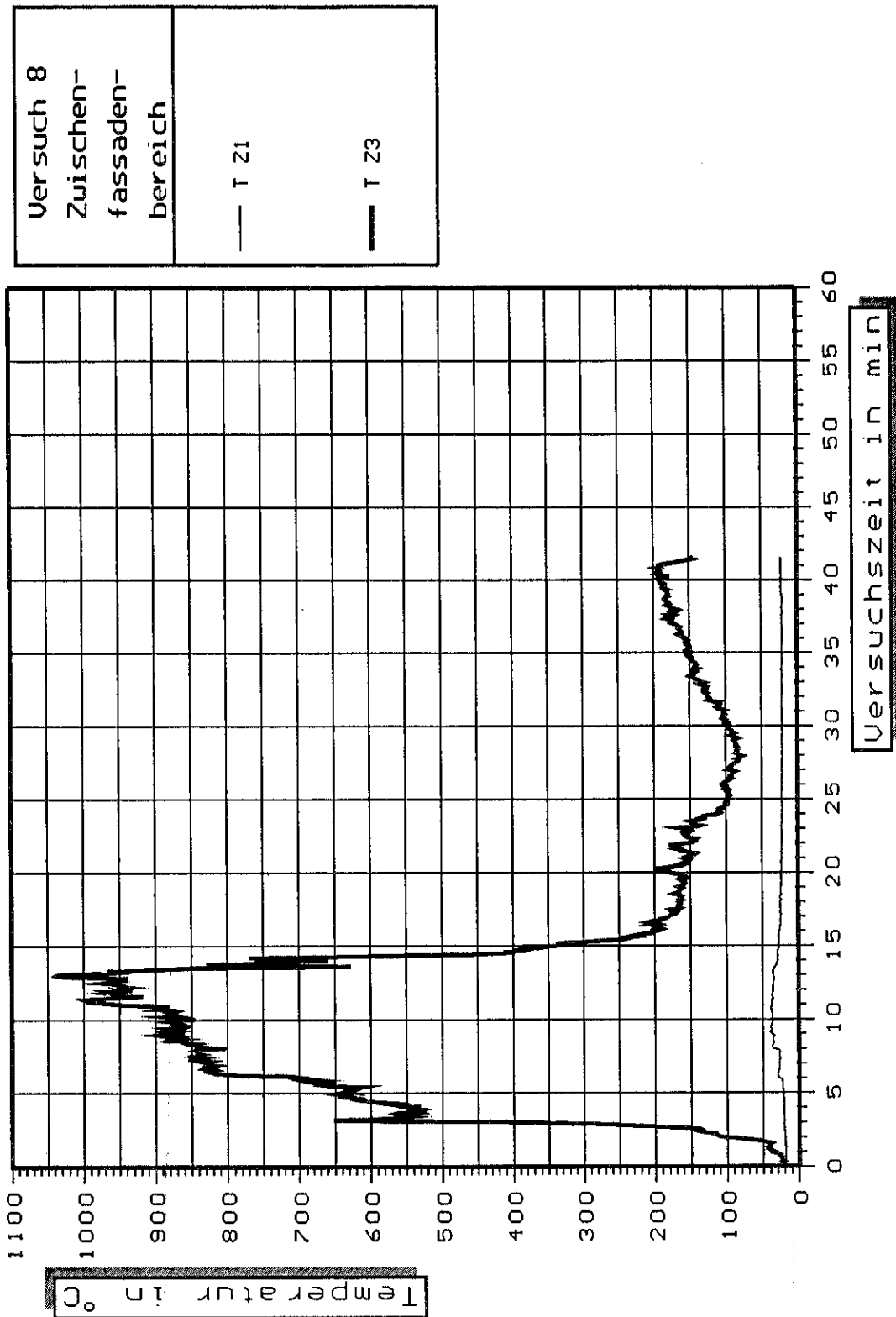


Bild 7 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.
- Versuch 8 -

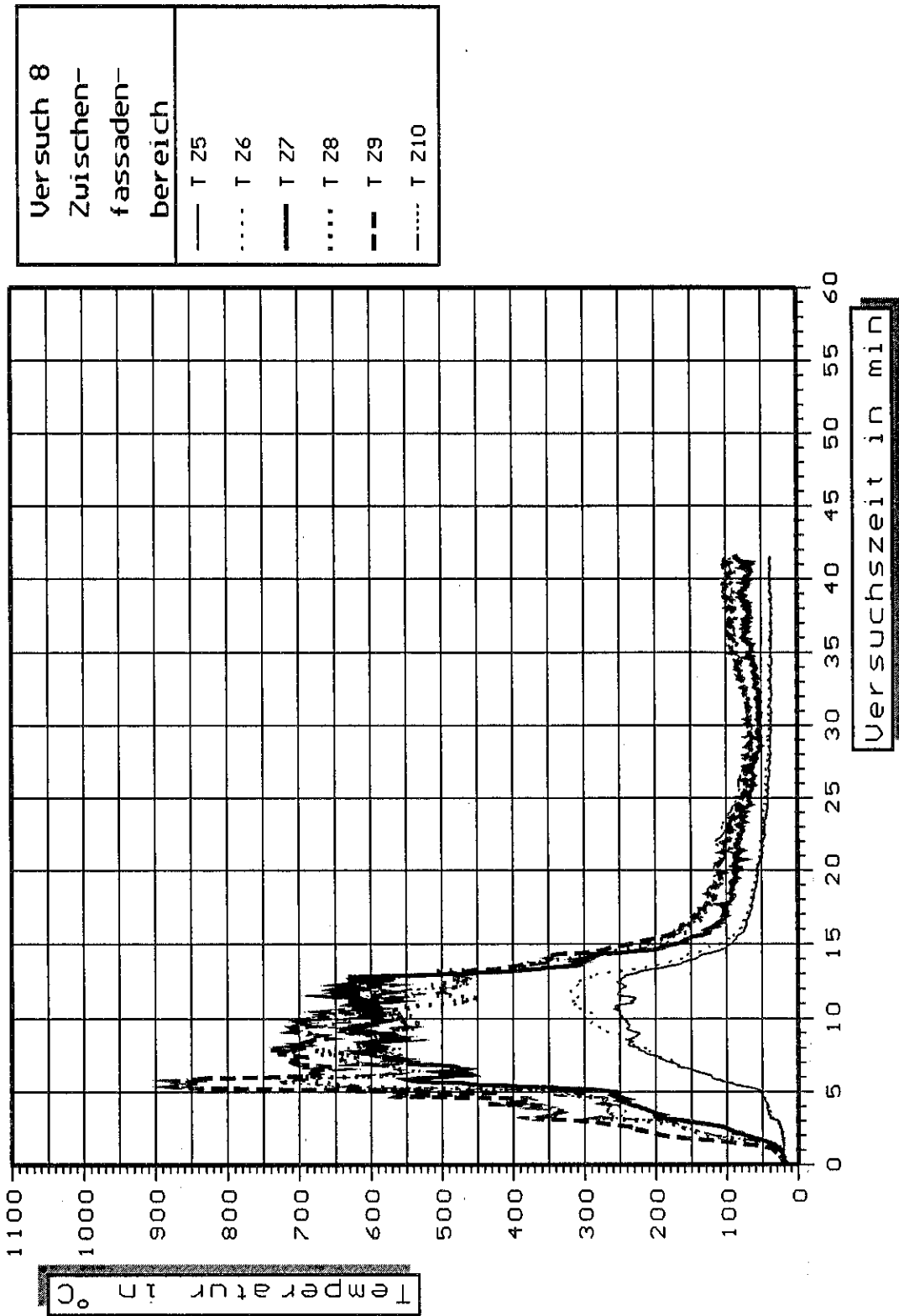


Bild 8 Zeitliche Temperaturverläufe im Zwischenfassadenbereich.
- Versuch 8 -

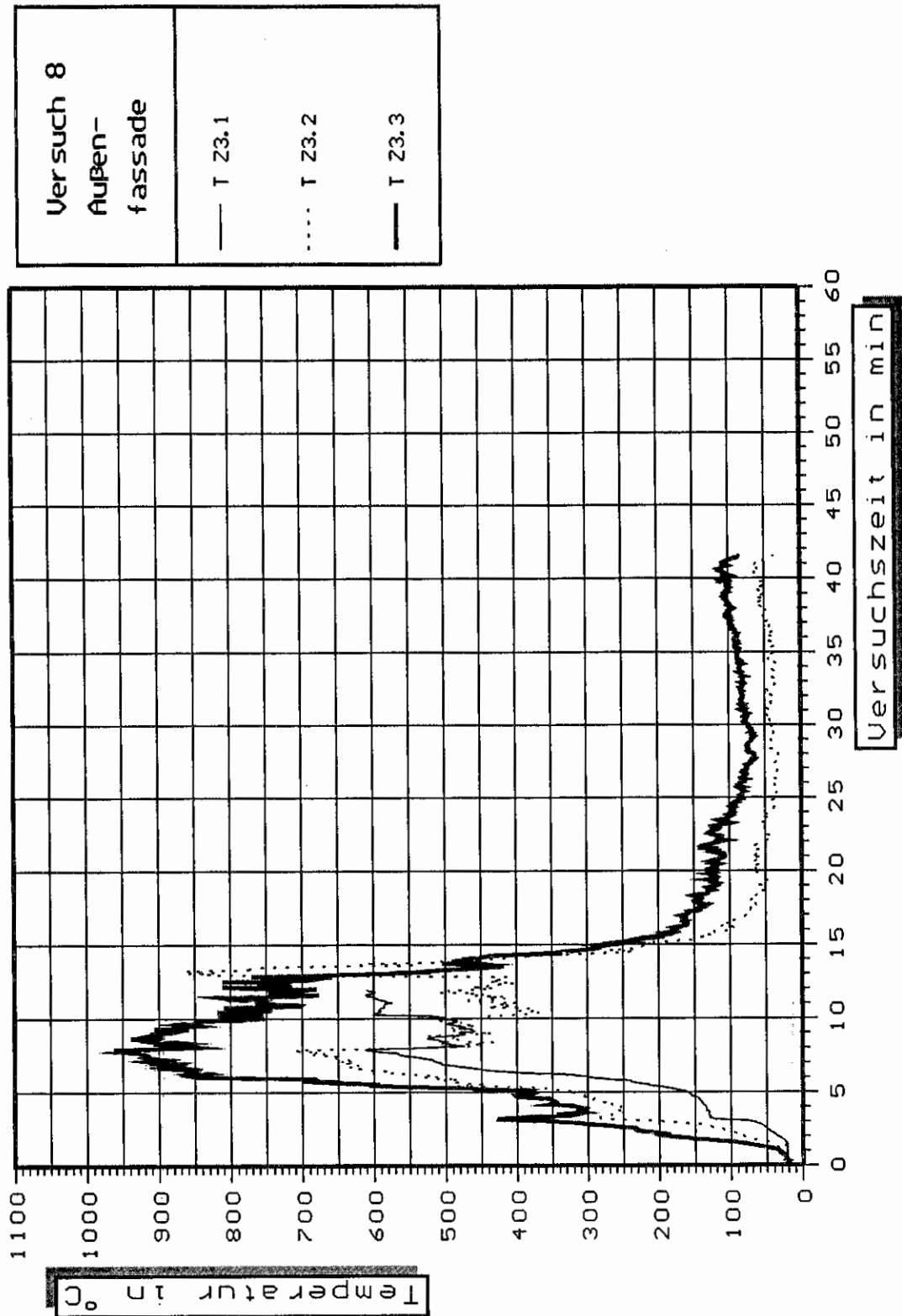


Bild 9 Zeitliche Temperaturverläufe an der ESG-
Verglasung der Außenfassade.
- Versuch 8 -

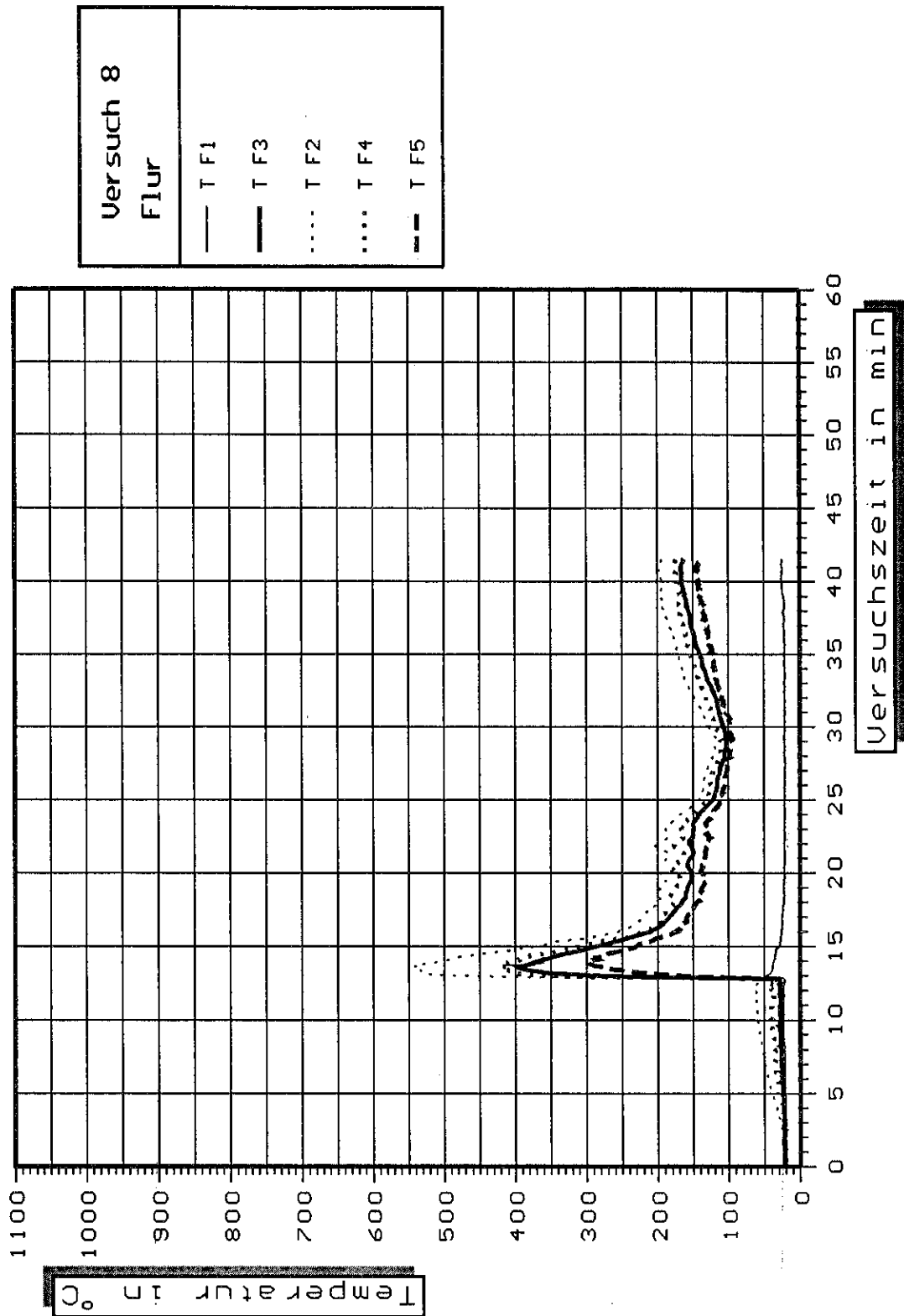


Bild 10 Zeitliche Temperaturverläufe im Flur.
- Versuch 8 -

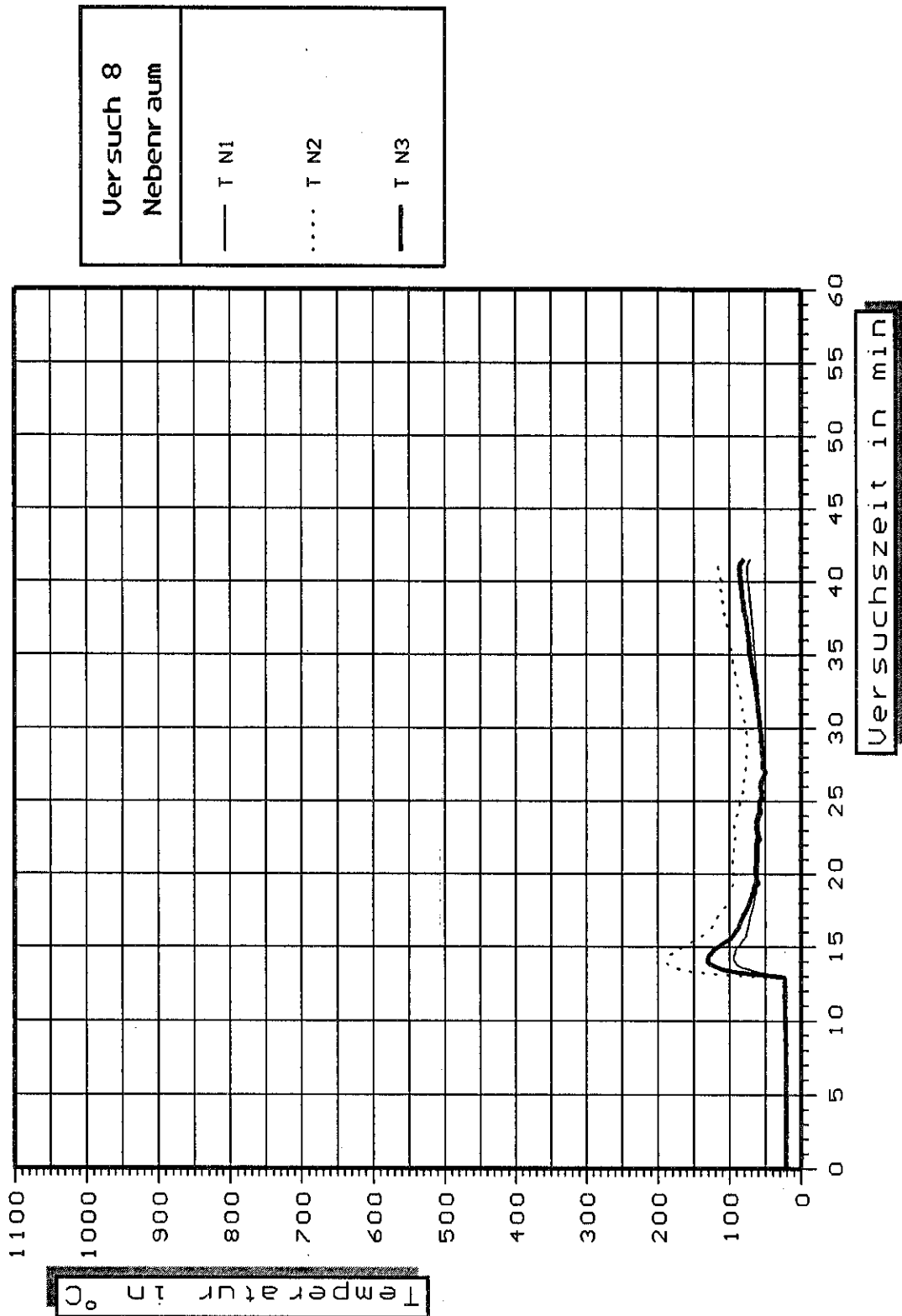


Bild 11 Zeitliche Temperaturverläufe im Nebenraum.
- Versuch 8 -

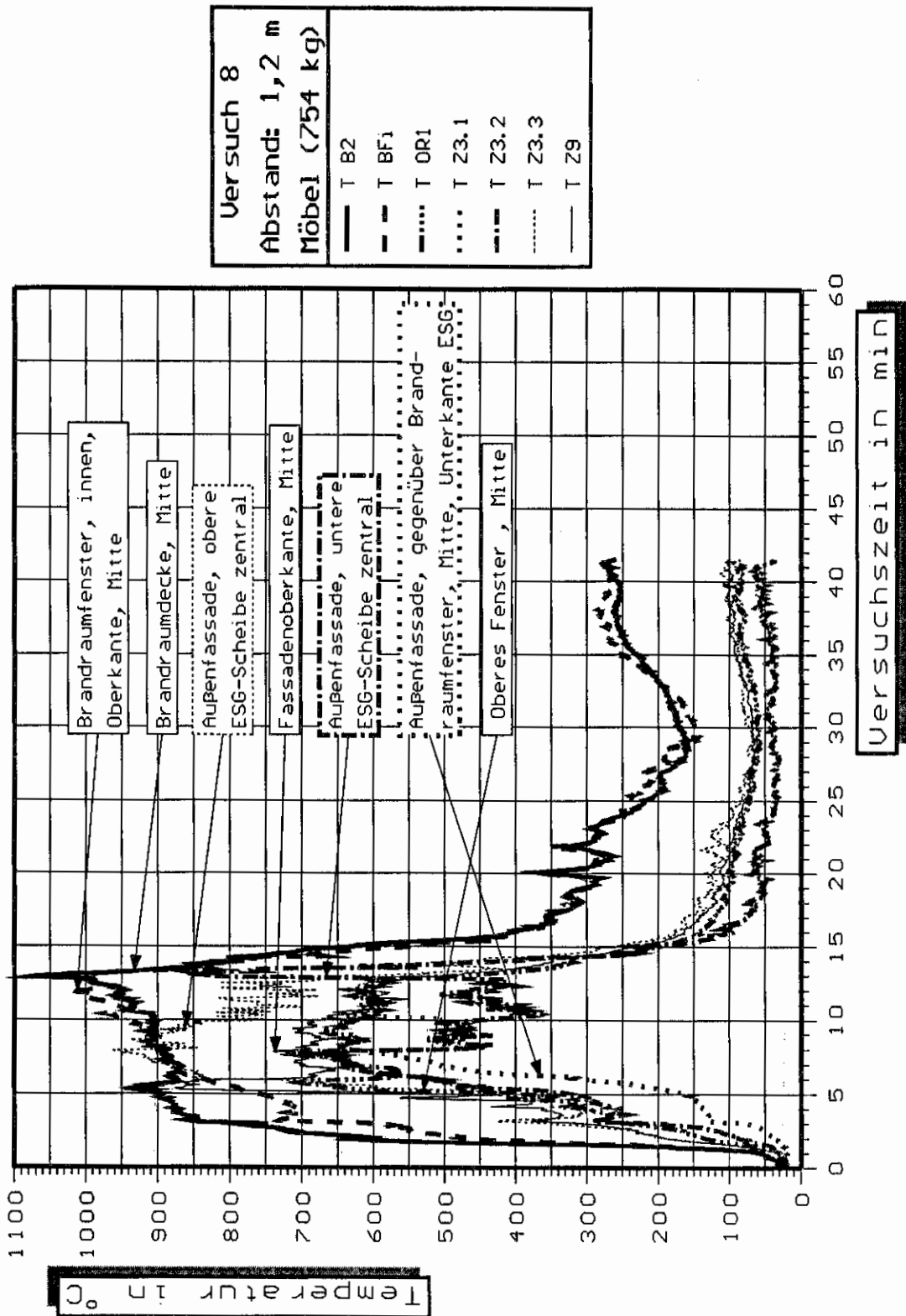


Bild 12 Vergleich ausgewählter zeitlicher Temperaturverläufe im Brandraum, Fensterbereich der Innenfassade, Zwischenfassadenbereich, sowie an der Außenfassade.
- Versuch 8 -

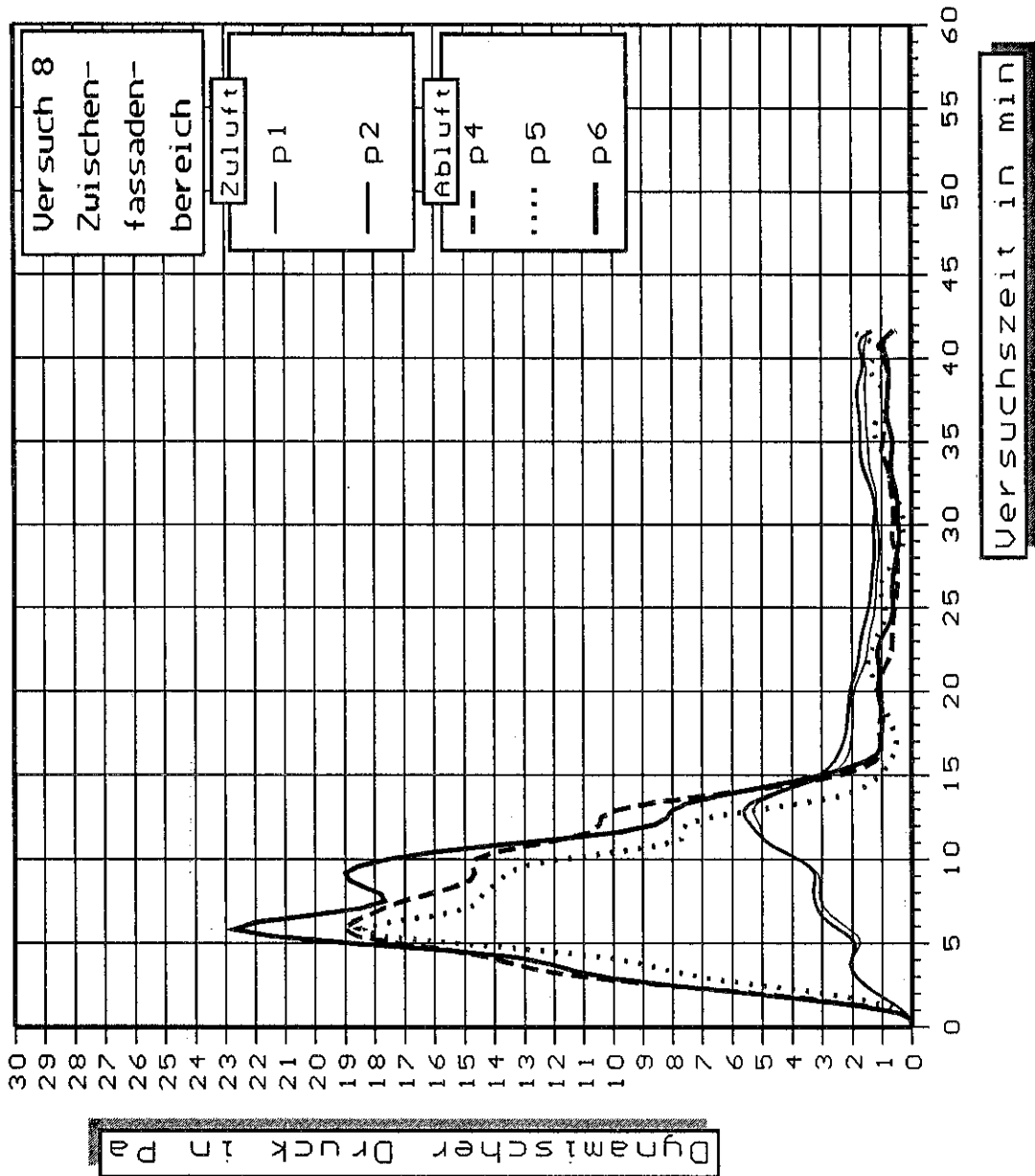


Bild 13 Zeitliche Verläufe des dynamischen Druckes an der Zu- und Abluftöffnung.
- Versuch 8 -

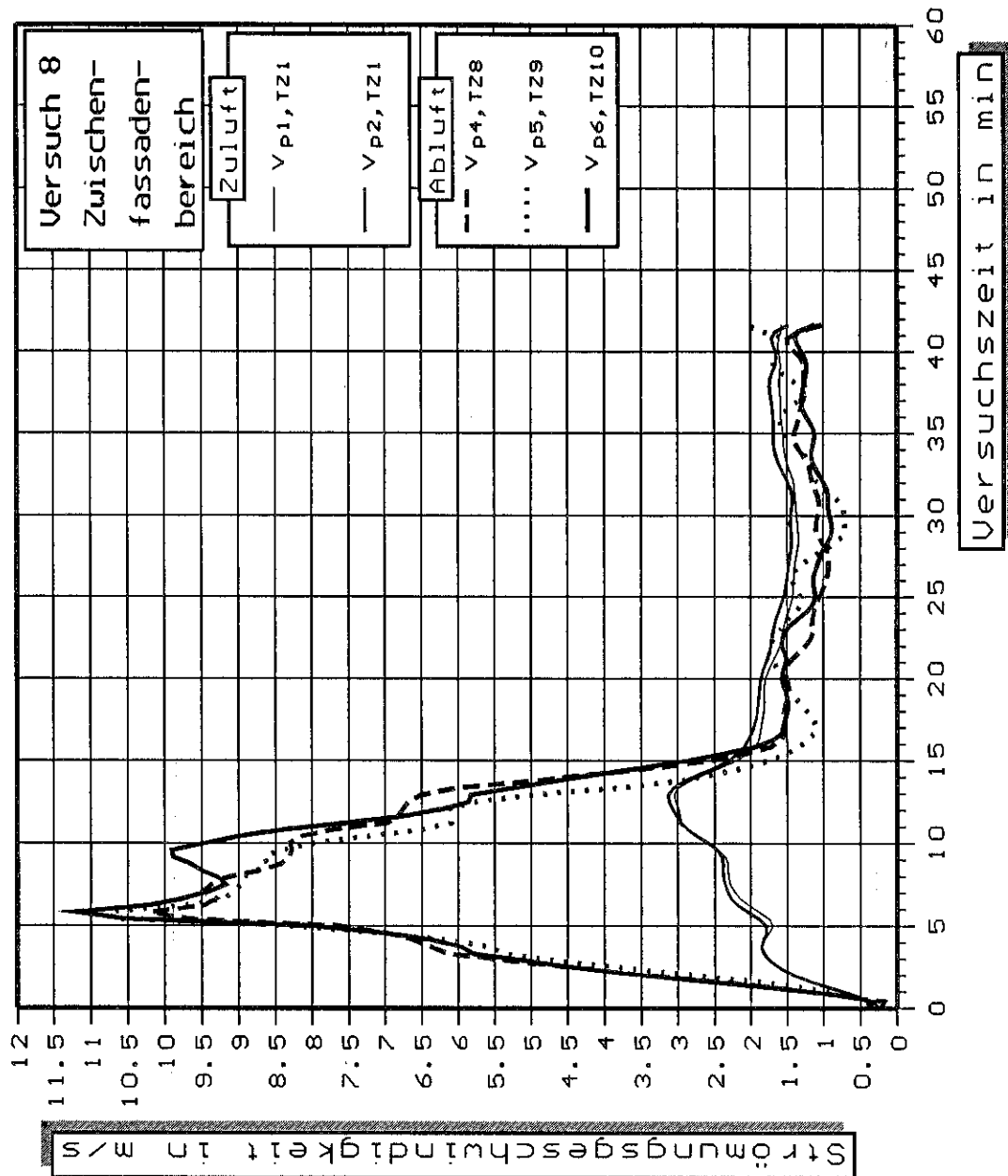


Bild 14 Zeitliche Verläufe der Strömungsgeschwindigkeit an der Zu- und Abluftöffnung.
- Versuch 8 -

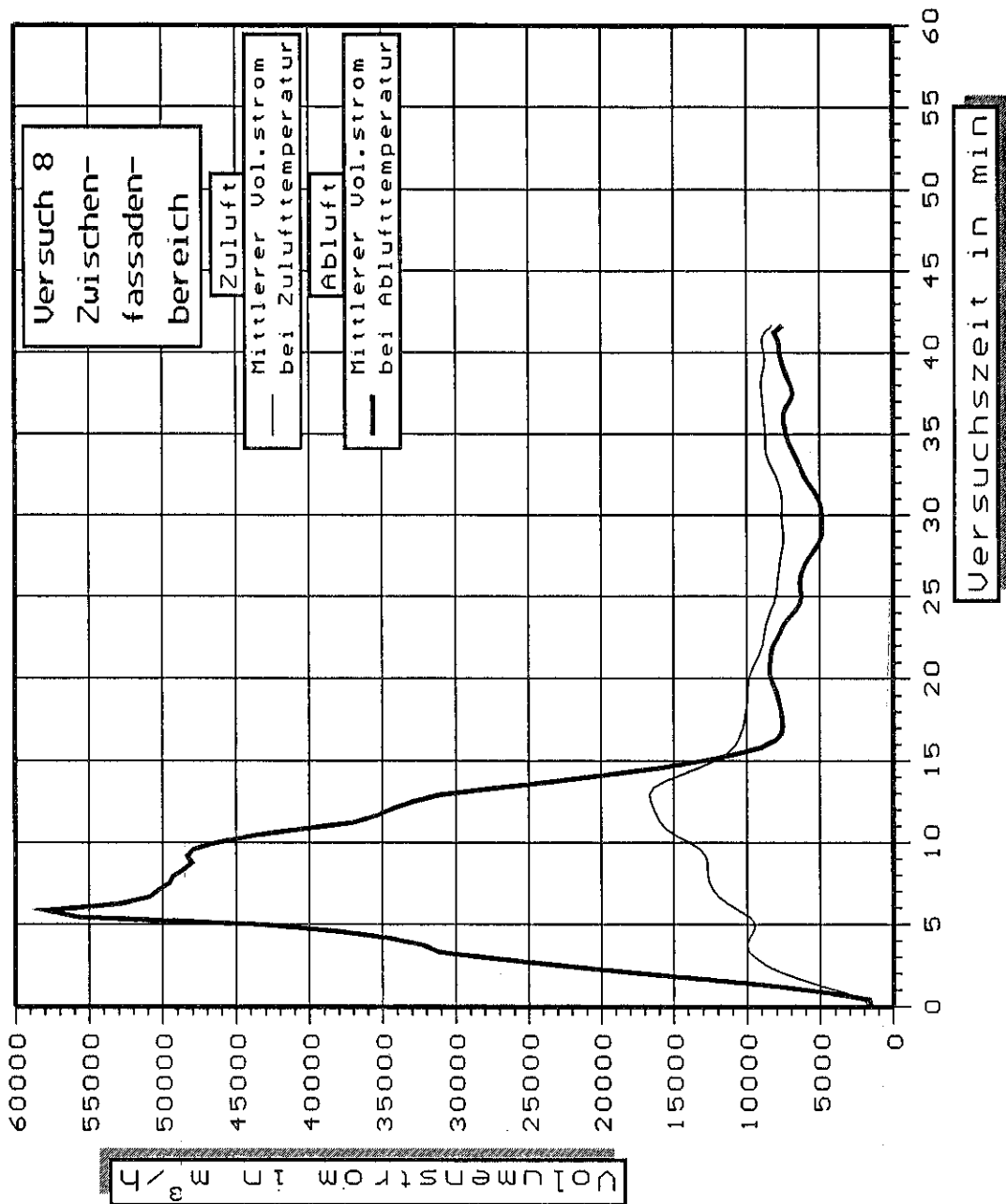


Bild 15 Zeitliche Verläufe der mittleren Volumenströme an der Zu- und Abluftöffnung bei Zu- bzw. Ablufttemperatur.
- Versuch 8 -

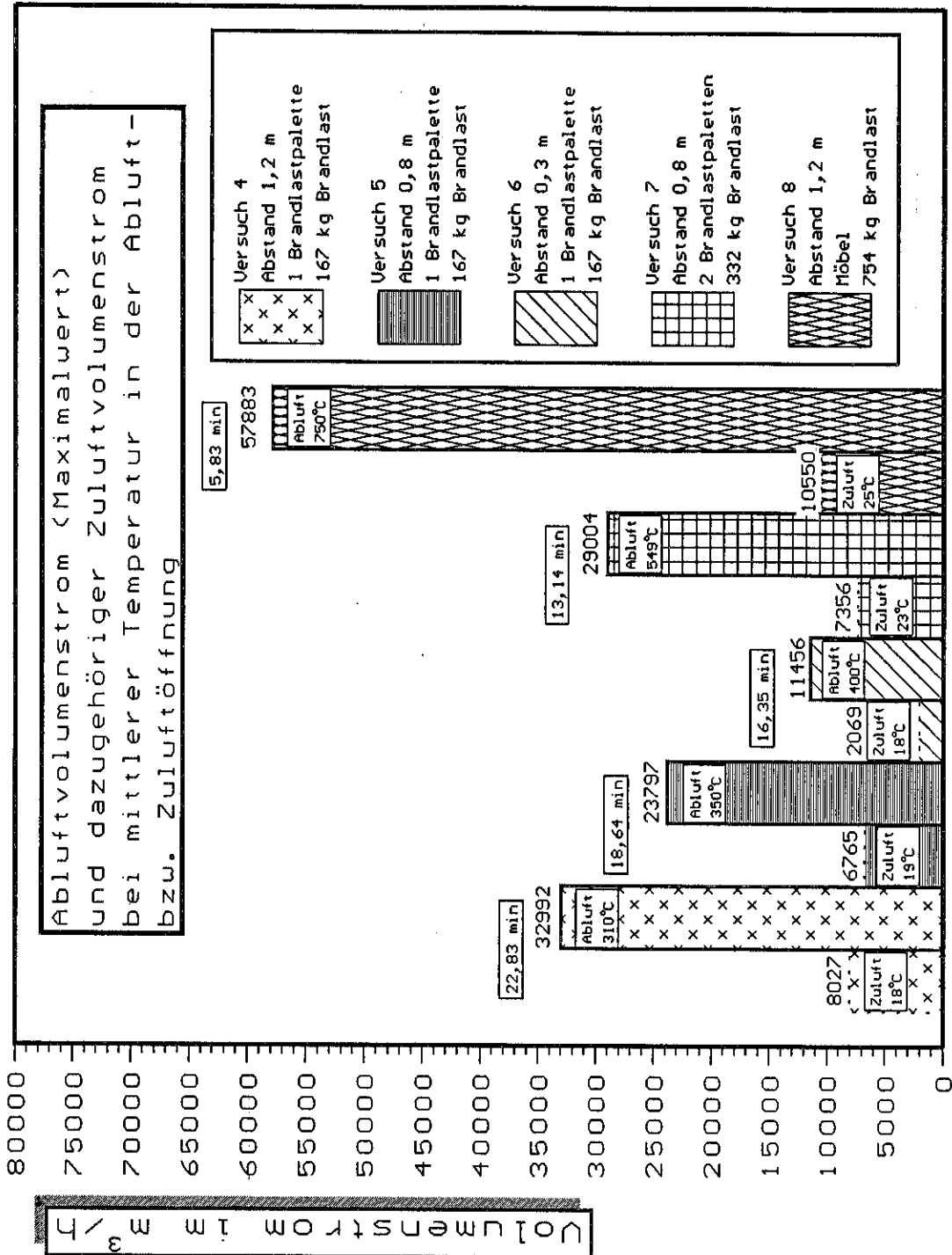


Bild 16

Vergleich der Maximalwerte der Volumenströme aus der Abluftöffnung mit den dazugehörigen Volumenströmen durch die Zuluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches bei einer mittleren Abluft- bzw. Zulufttemperatur bei den Versuchen 4, 5, 6, 7 und 8.

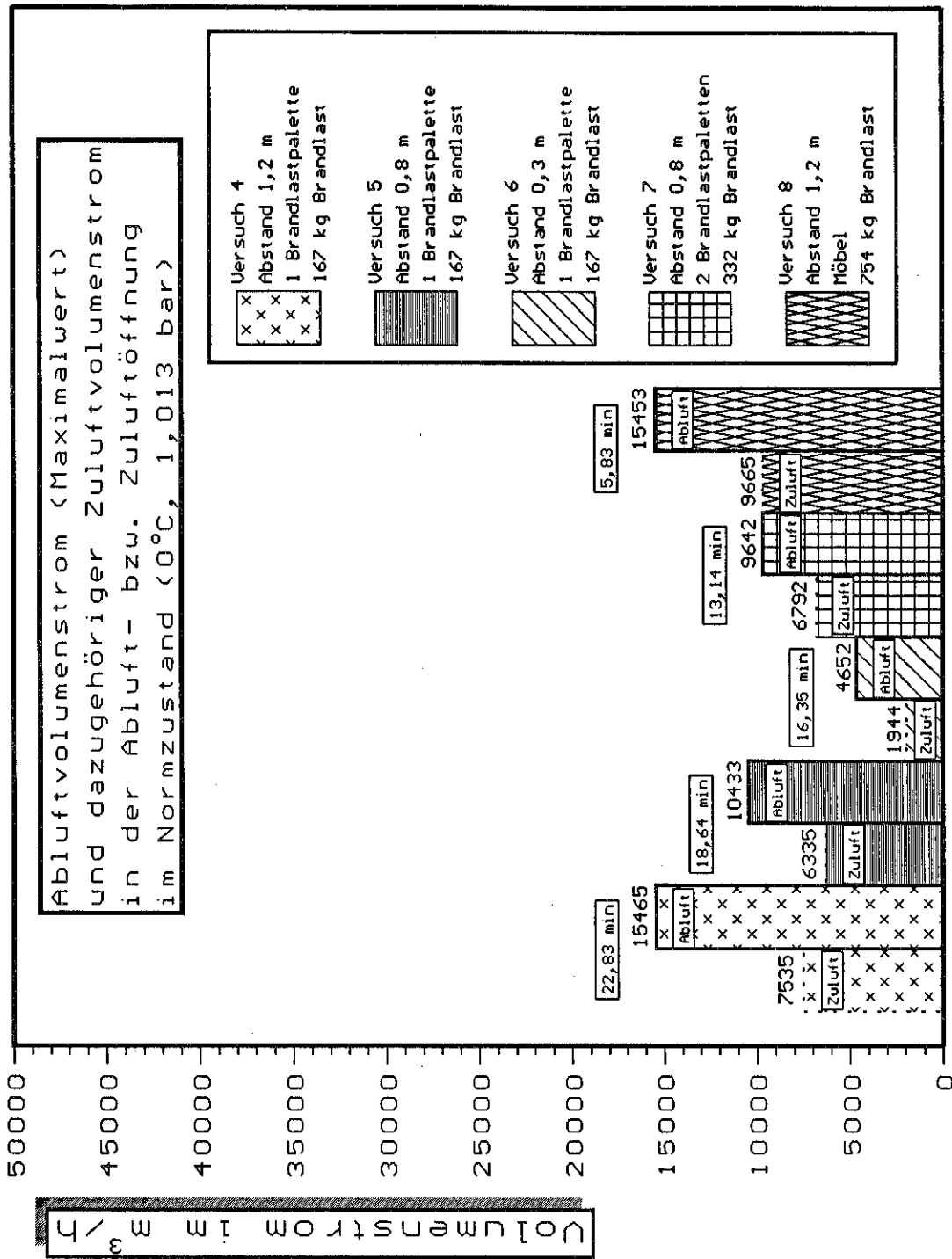


Bild 17 Vergleich der Maximalwerte der Volumenströme aus der Abluftöffnung mit den dazugehörigen Volumenströmen durch die Zuluftöffnung des Zwischenfassadenbereiches im Normzustand (0°C, 1,013 bar) bei den Versuchen 4, 5, 6, 7 und 8.

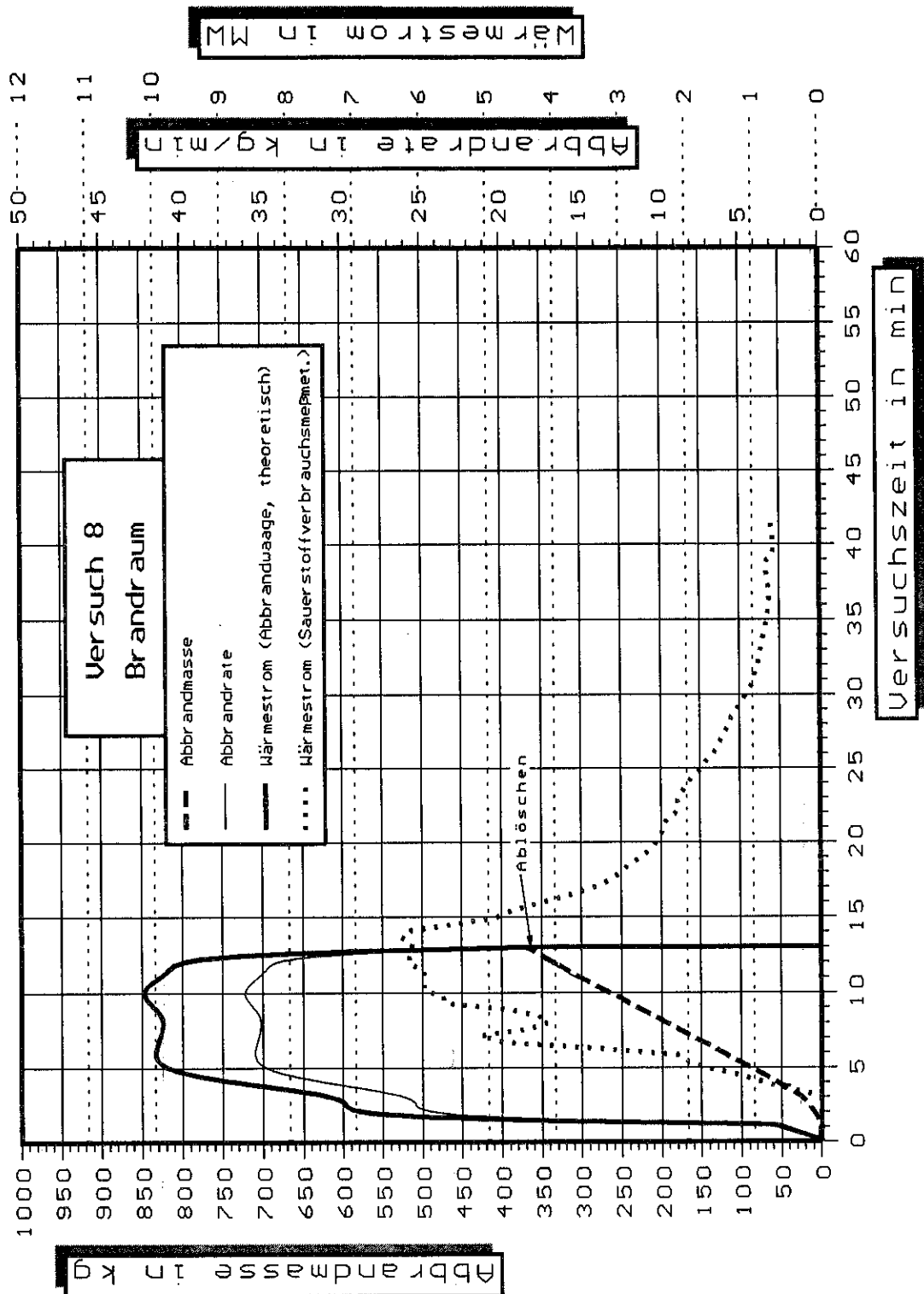


Bild 18 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate und der Wärmefreisetzung.
- Versuch 8 -

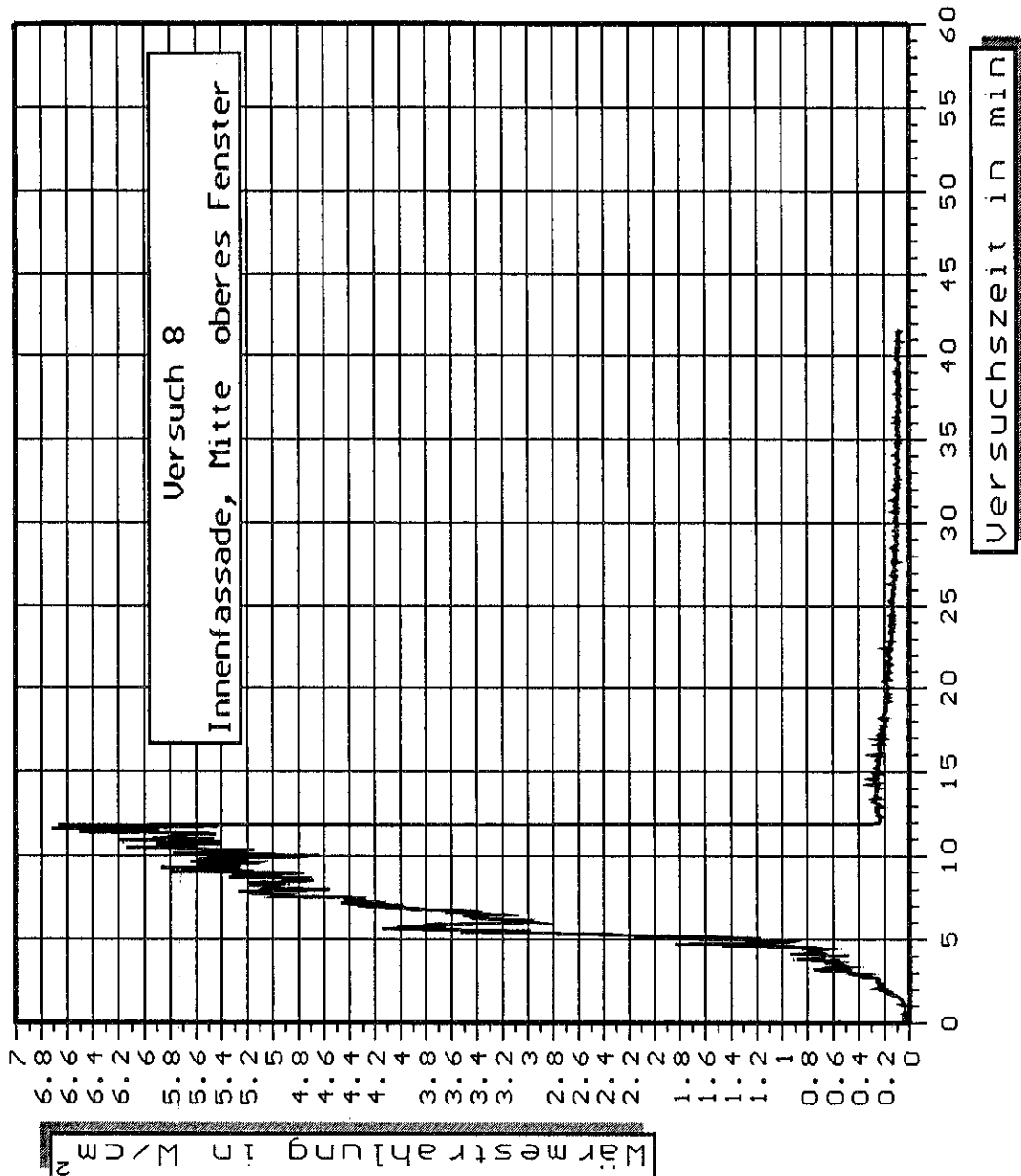


Bild 19 Zeitlicher Verlauf der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade.
- Versuch 8 -

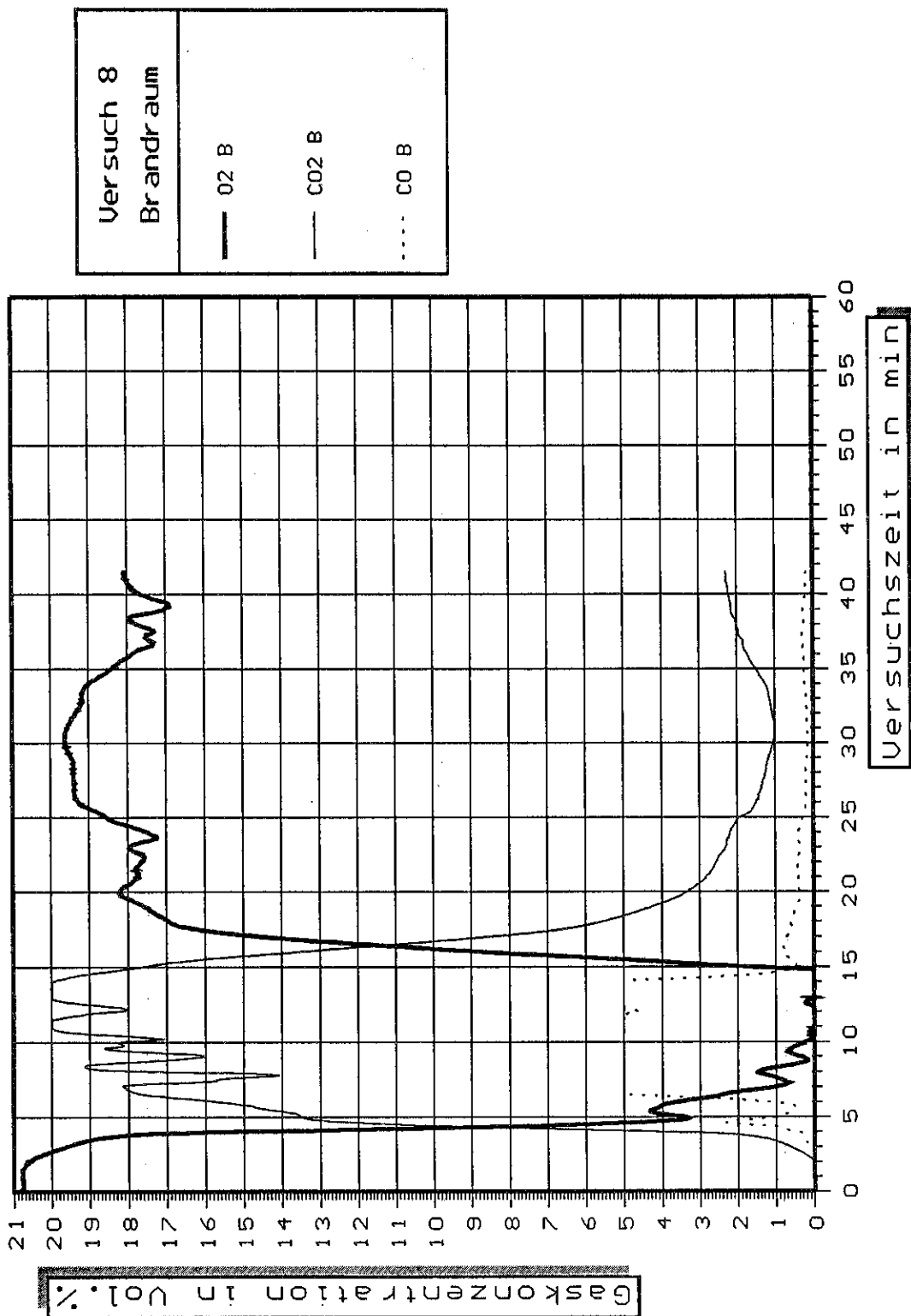


Bild 20 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch 8 -

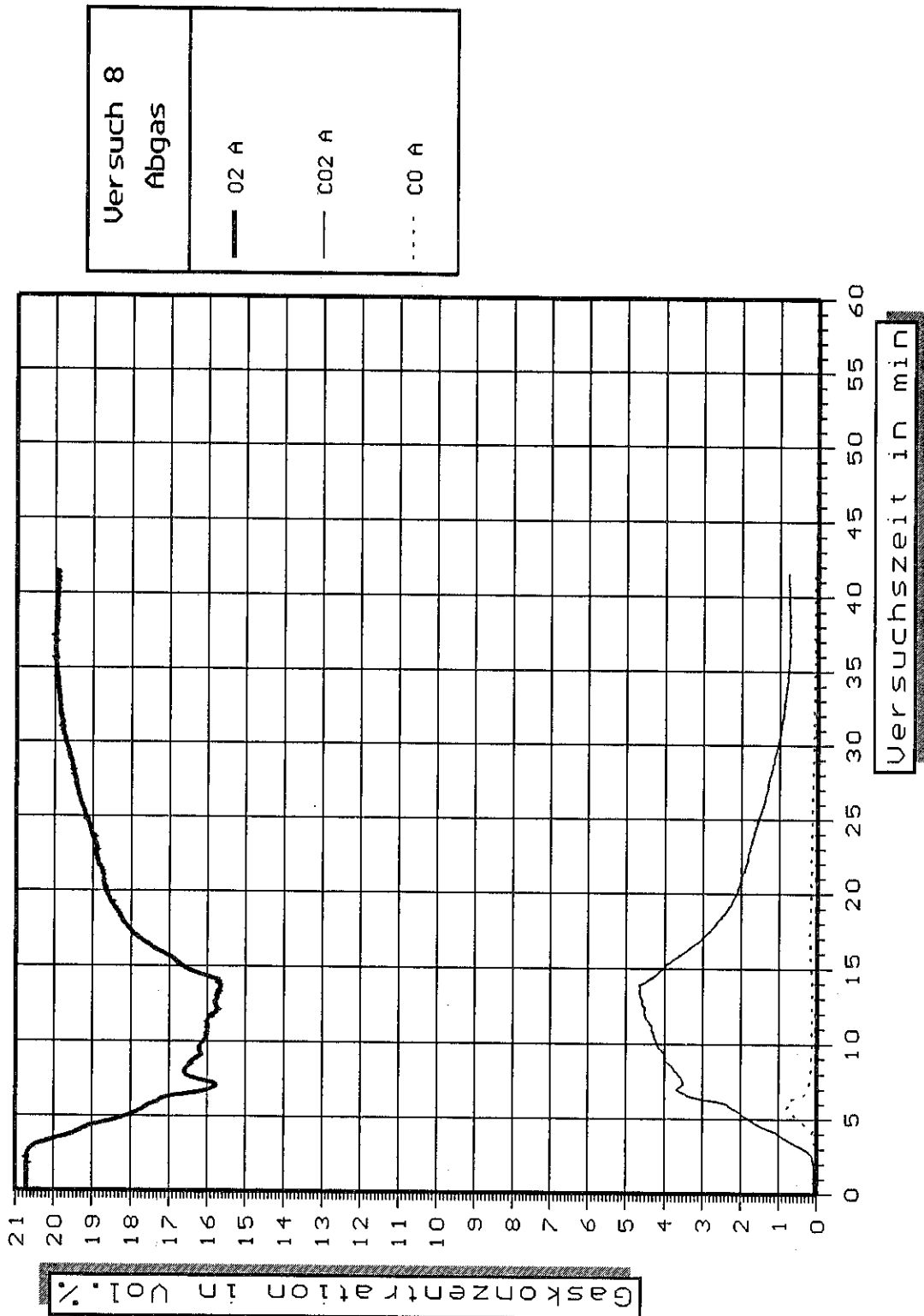


Bild 21 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas des Zwischenfassadenbereiches.
- Versuch 8 -

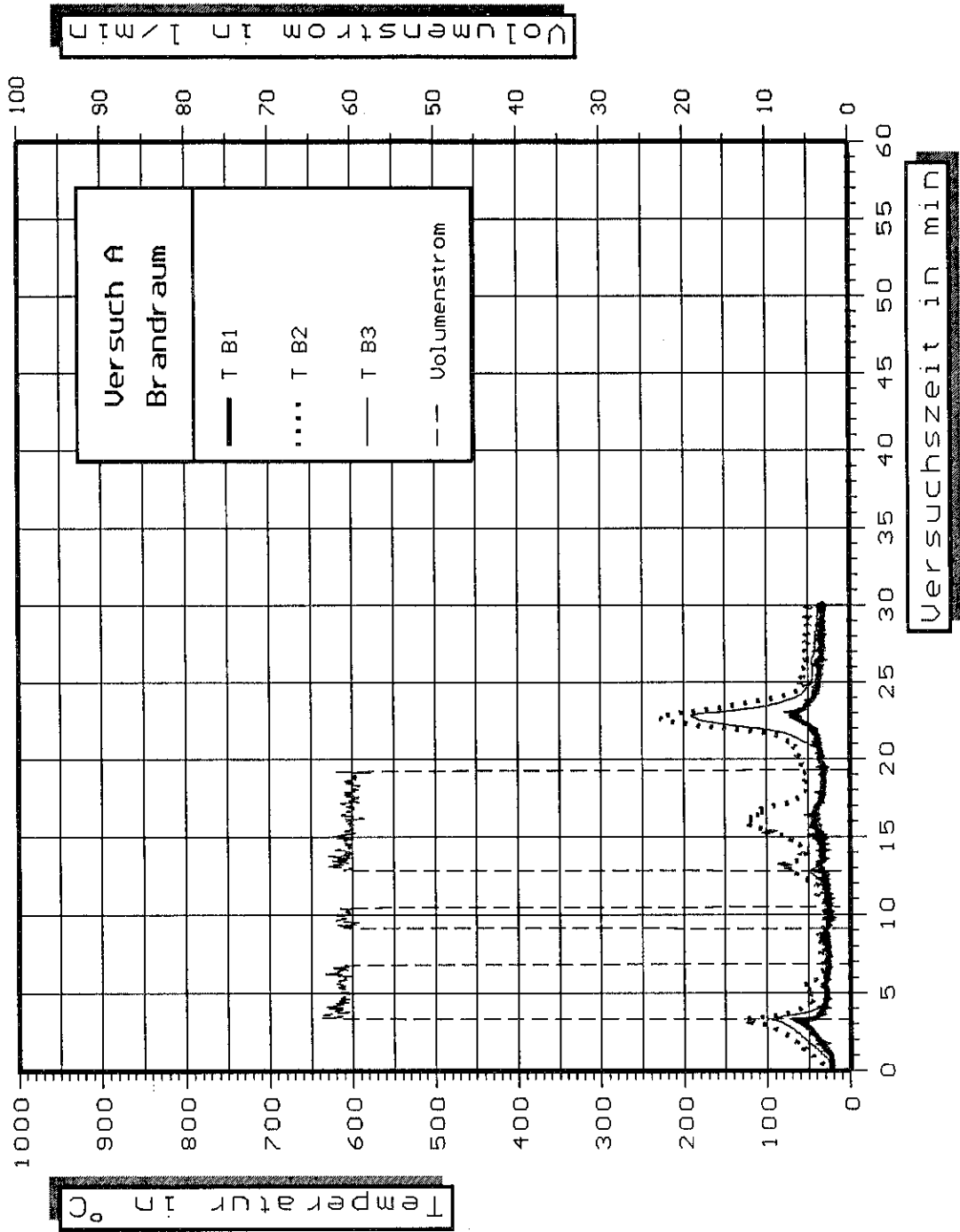


Bild 22 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch A -

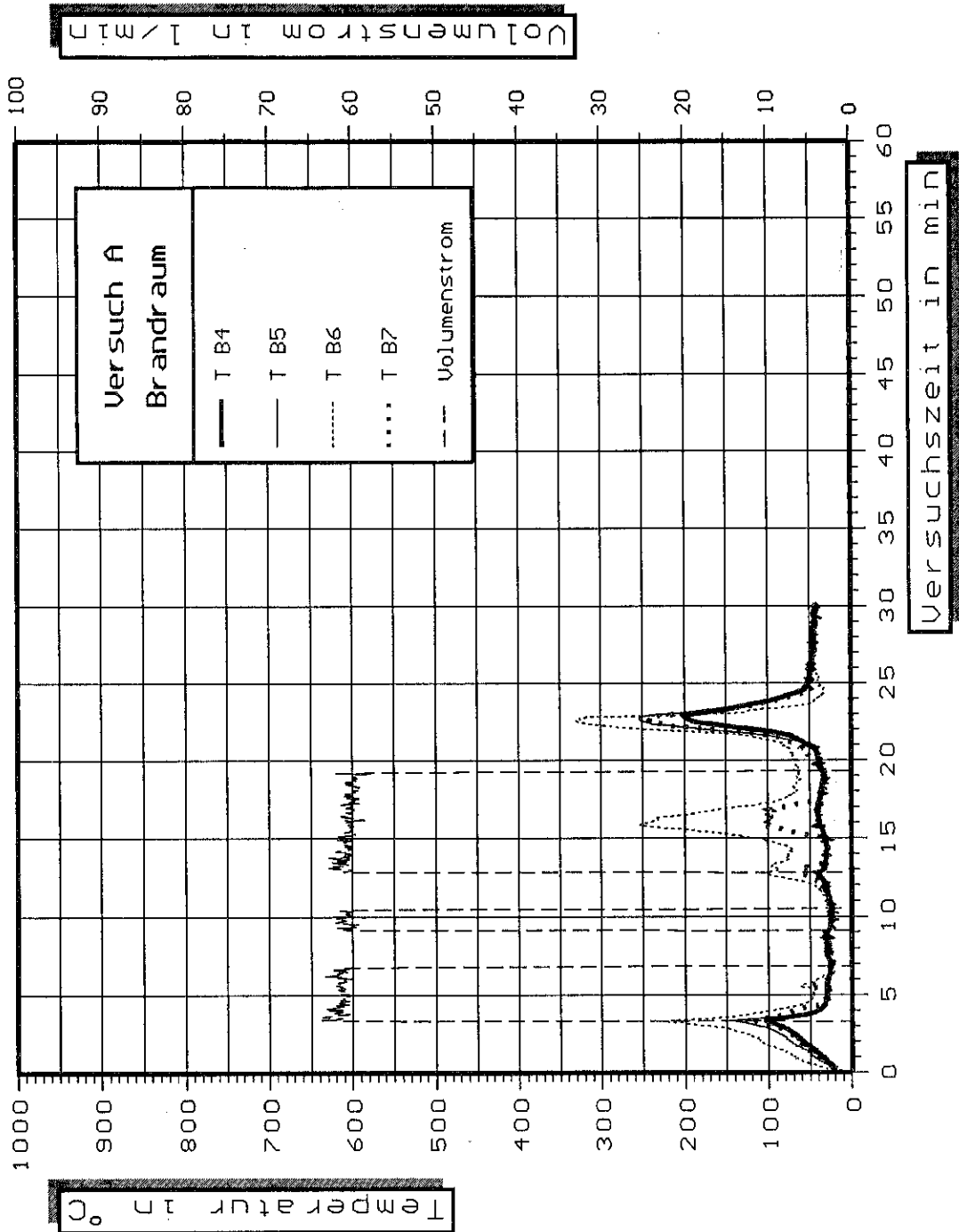


Bild 23 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch A -

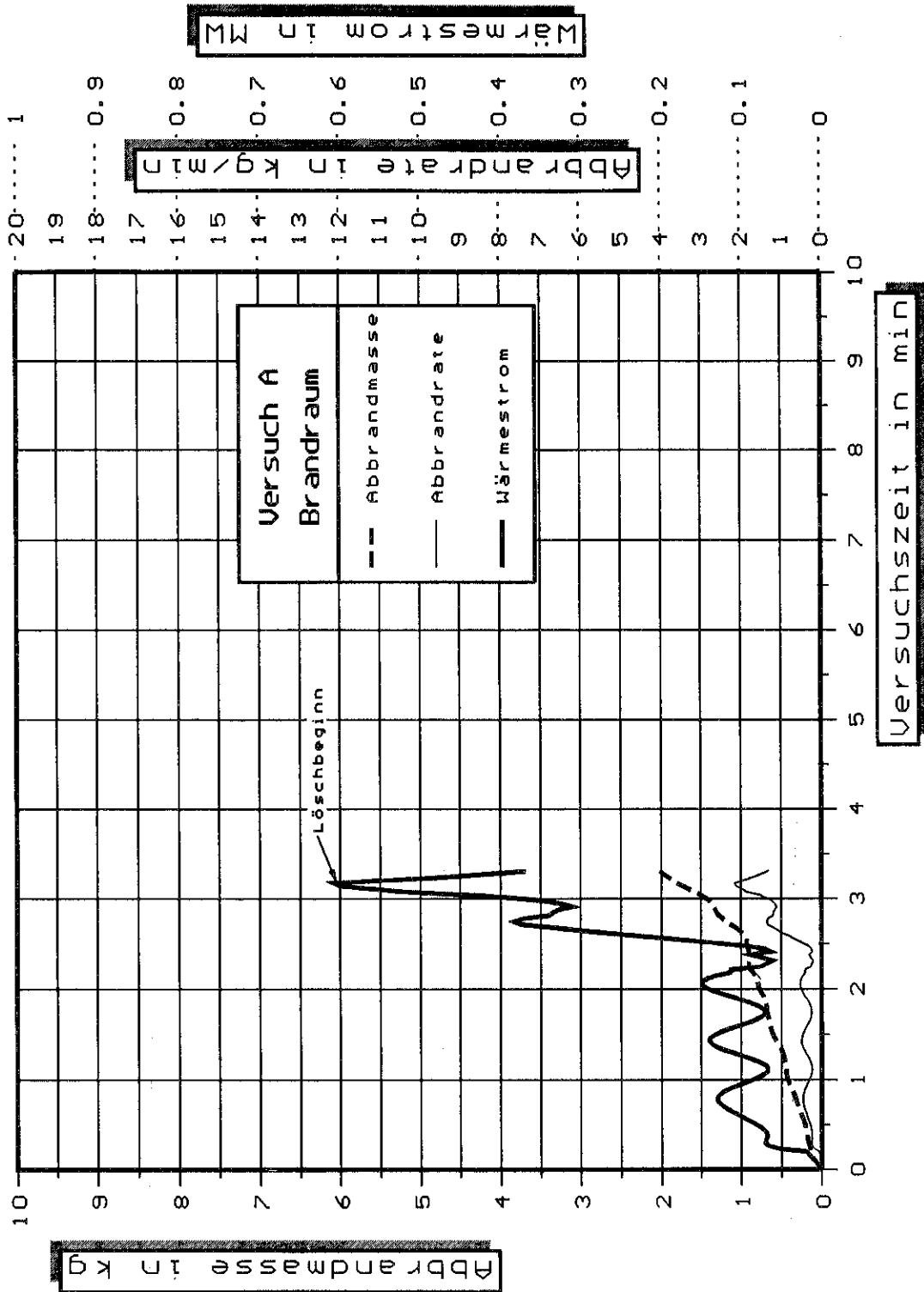


Bild 24 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate der Wärmefreisetzung und des Wasservolumenstromes aus dem Wasserebelsprühkopf.
- Versuch A -

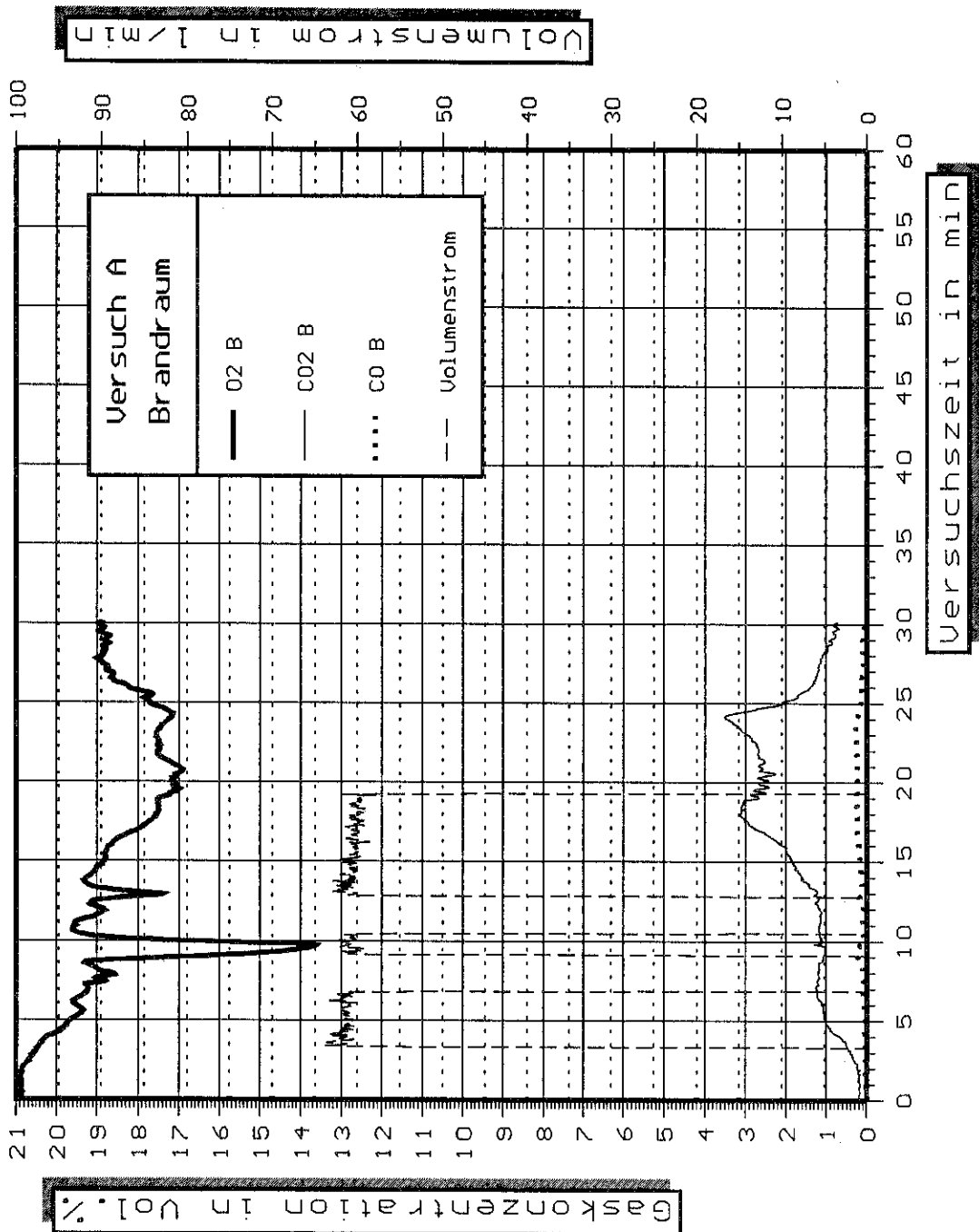


Bild 25 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch A -

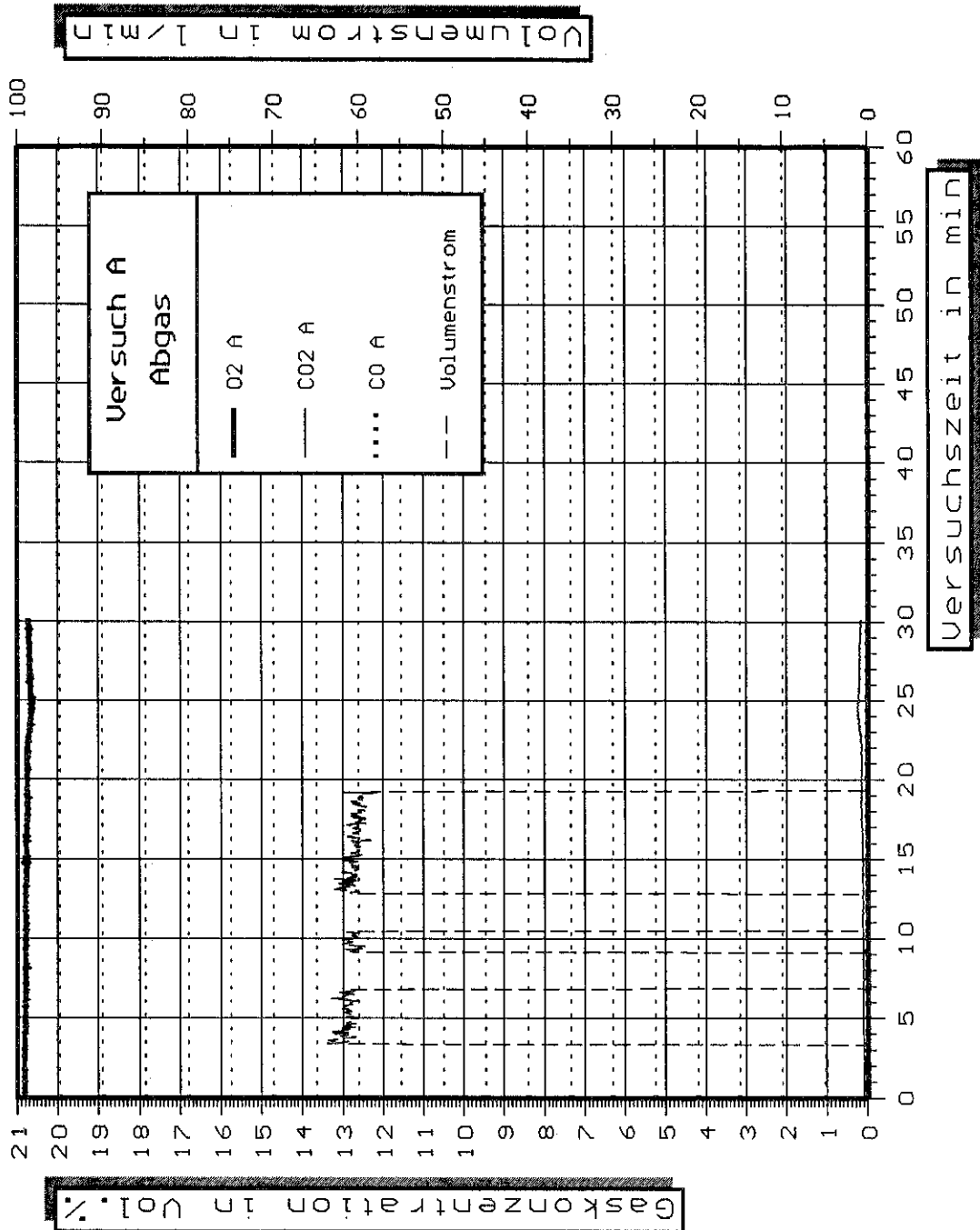


Bild 26 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas des Zwischenfassadenbereiches.
- Versuch A -

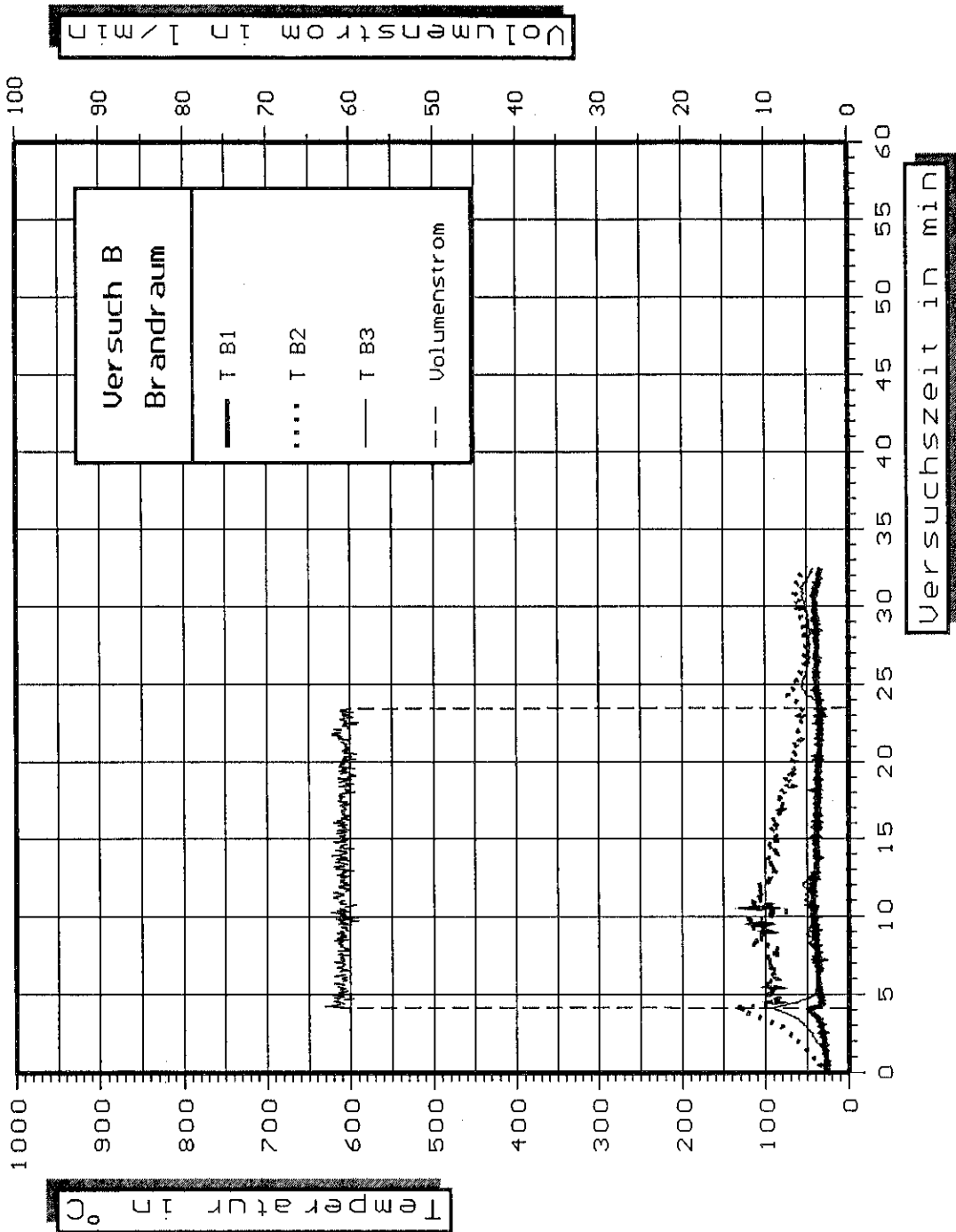


Bild 27 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brand-
raumes und Wasservolumenstrom aus dem Wasser-
nebelsprühkopf.
- Versuch B -

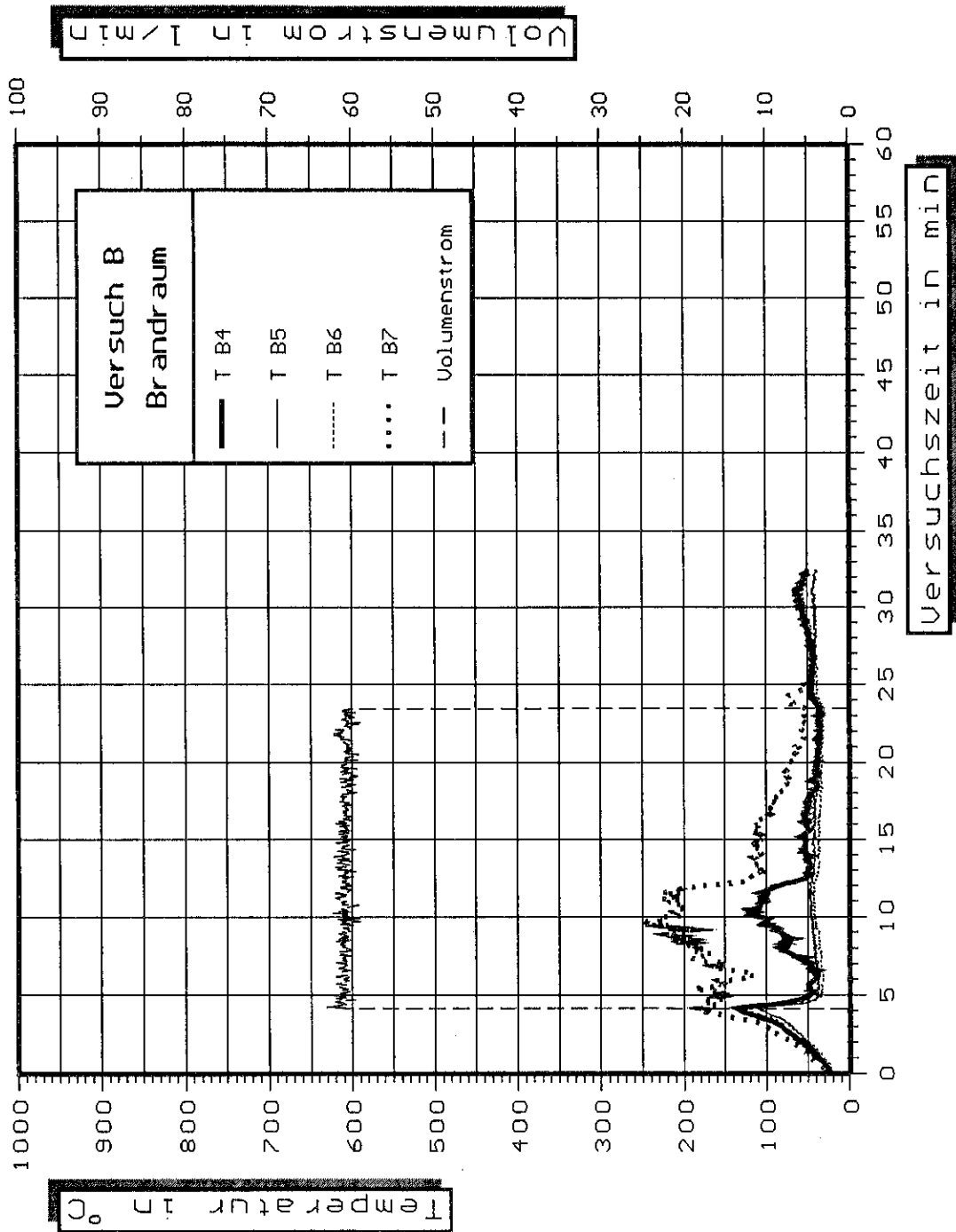


Bild 28 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch B -

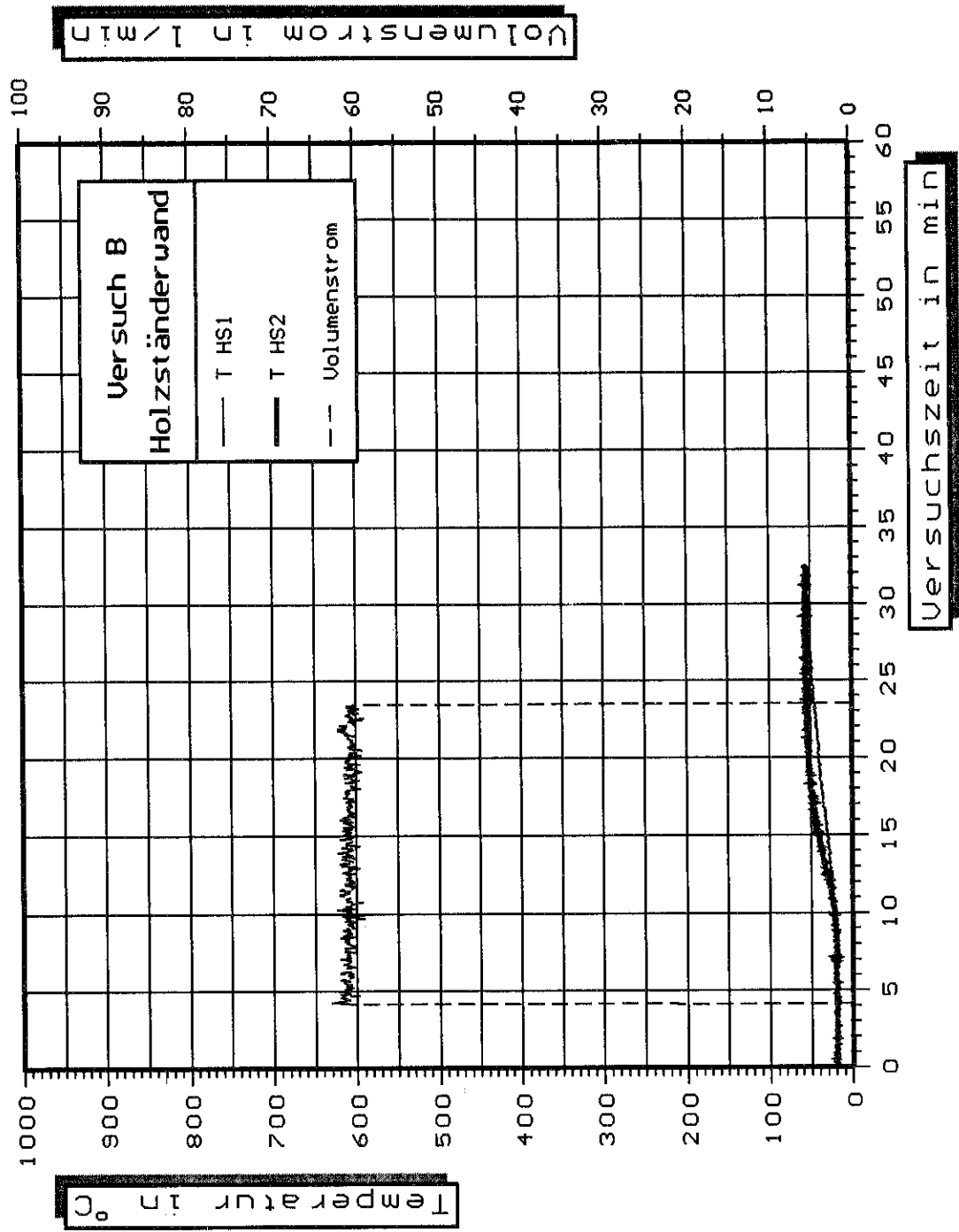


Bild 29 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb der Holzständerwand und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelprüfkopf.
- Versuch B -

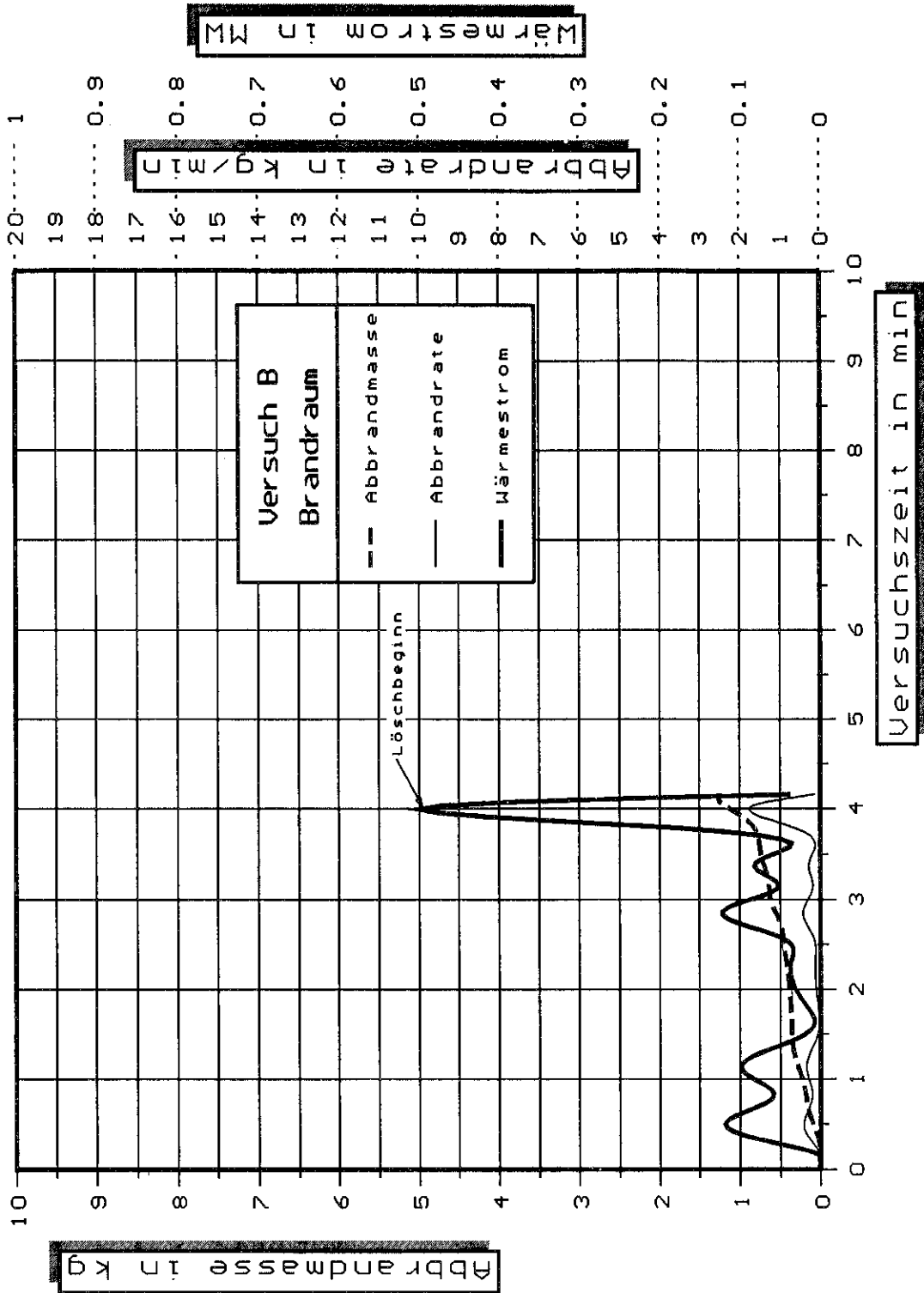


Bild 30 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate der Wärmefreisetzung und des Wasservolumenstromes aus dem Wassernebelprühkopf.
- Versuch B -

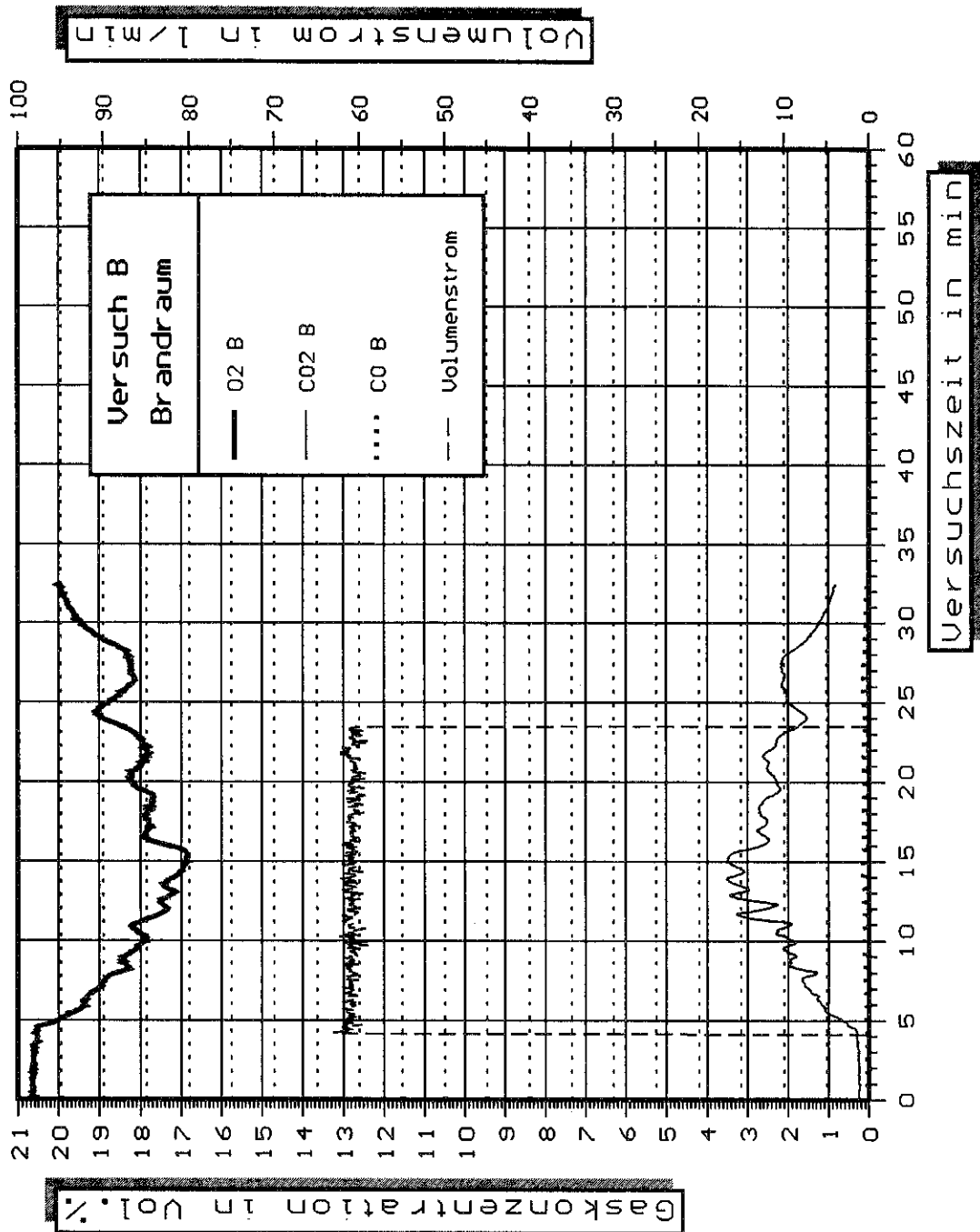


Bild 31 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch B -

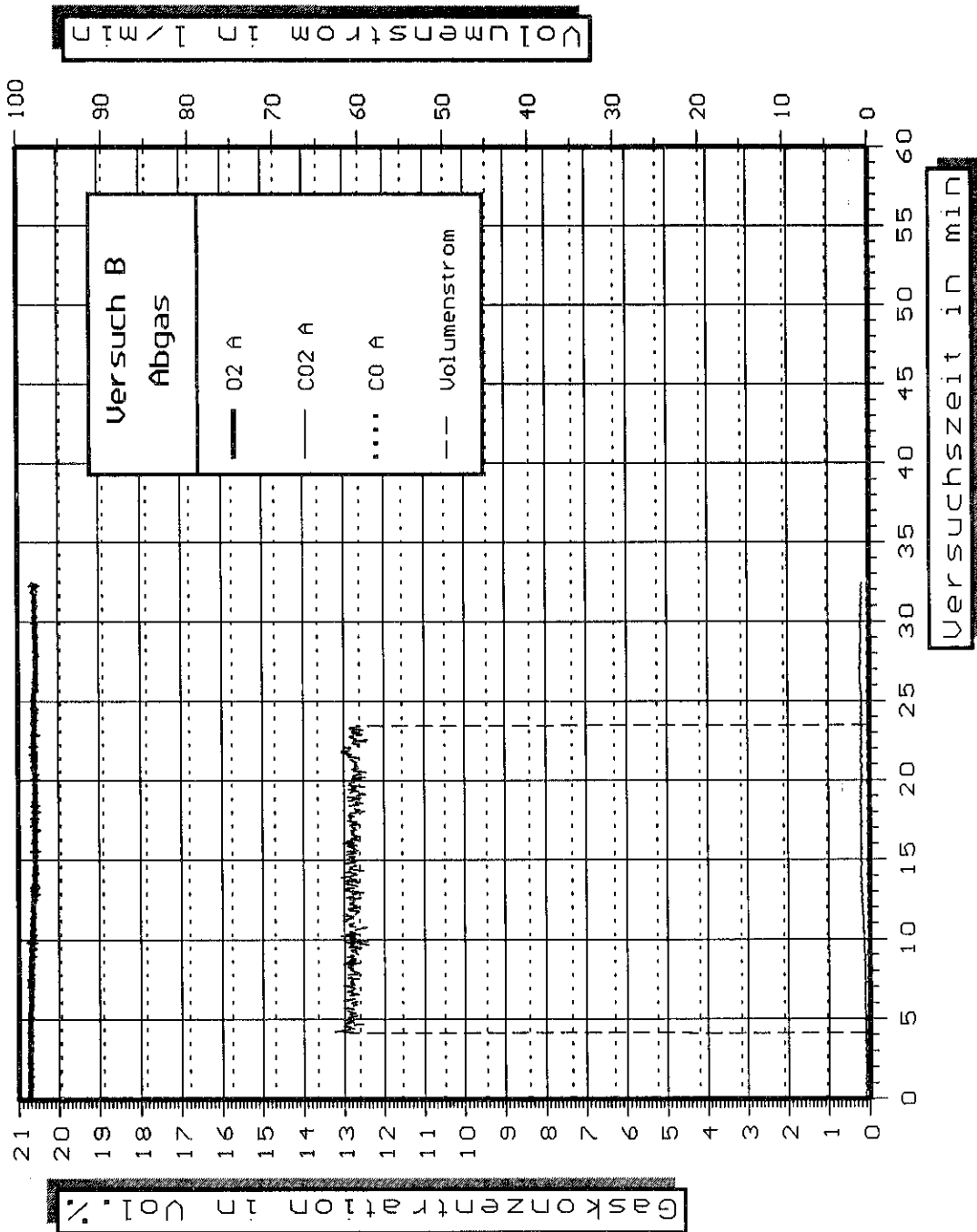


Bild 32 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas des Zwischenfassadenbereiches.
- Versuch B -

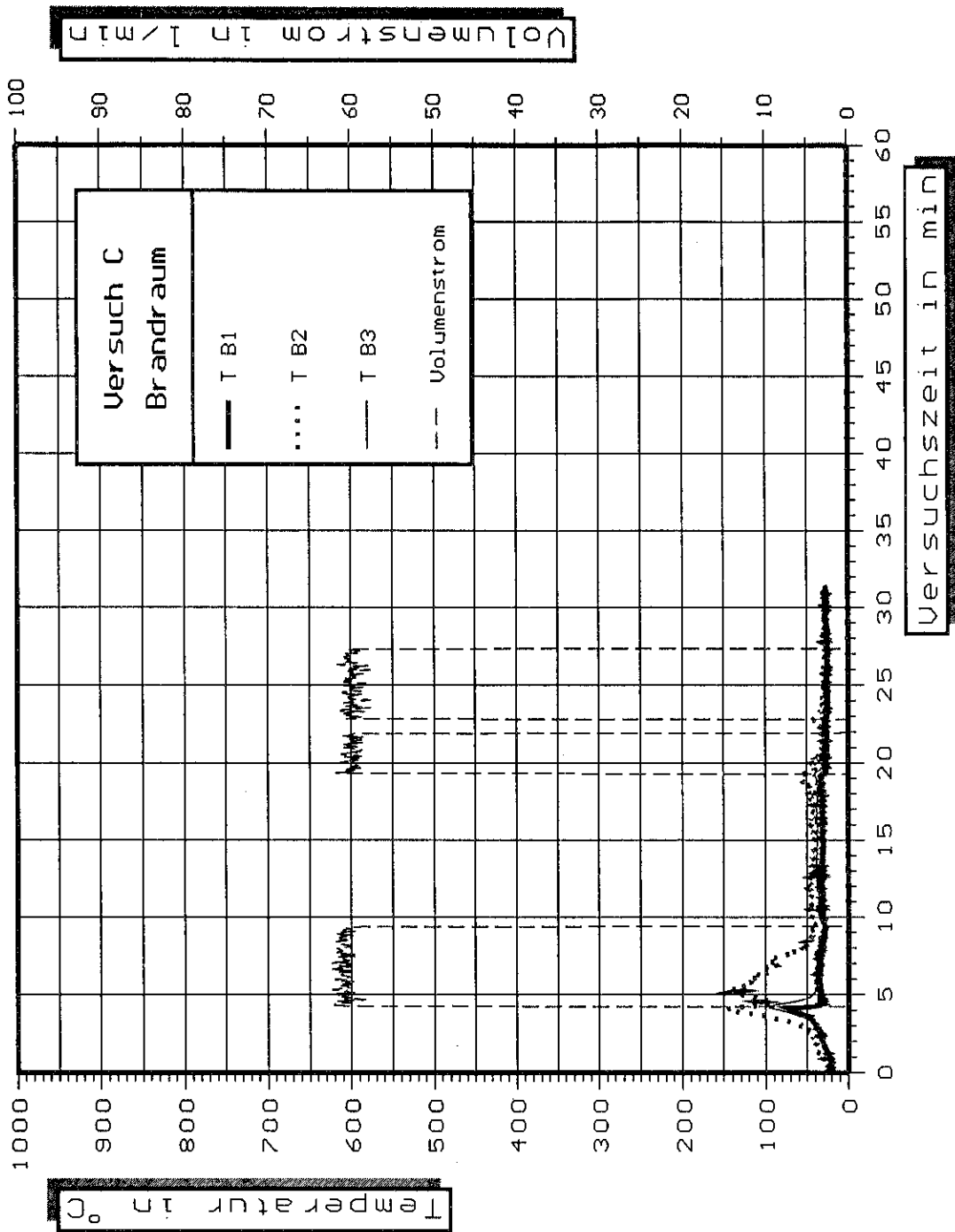


Bild 33 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch C -

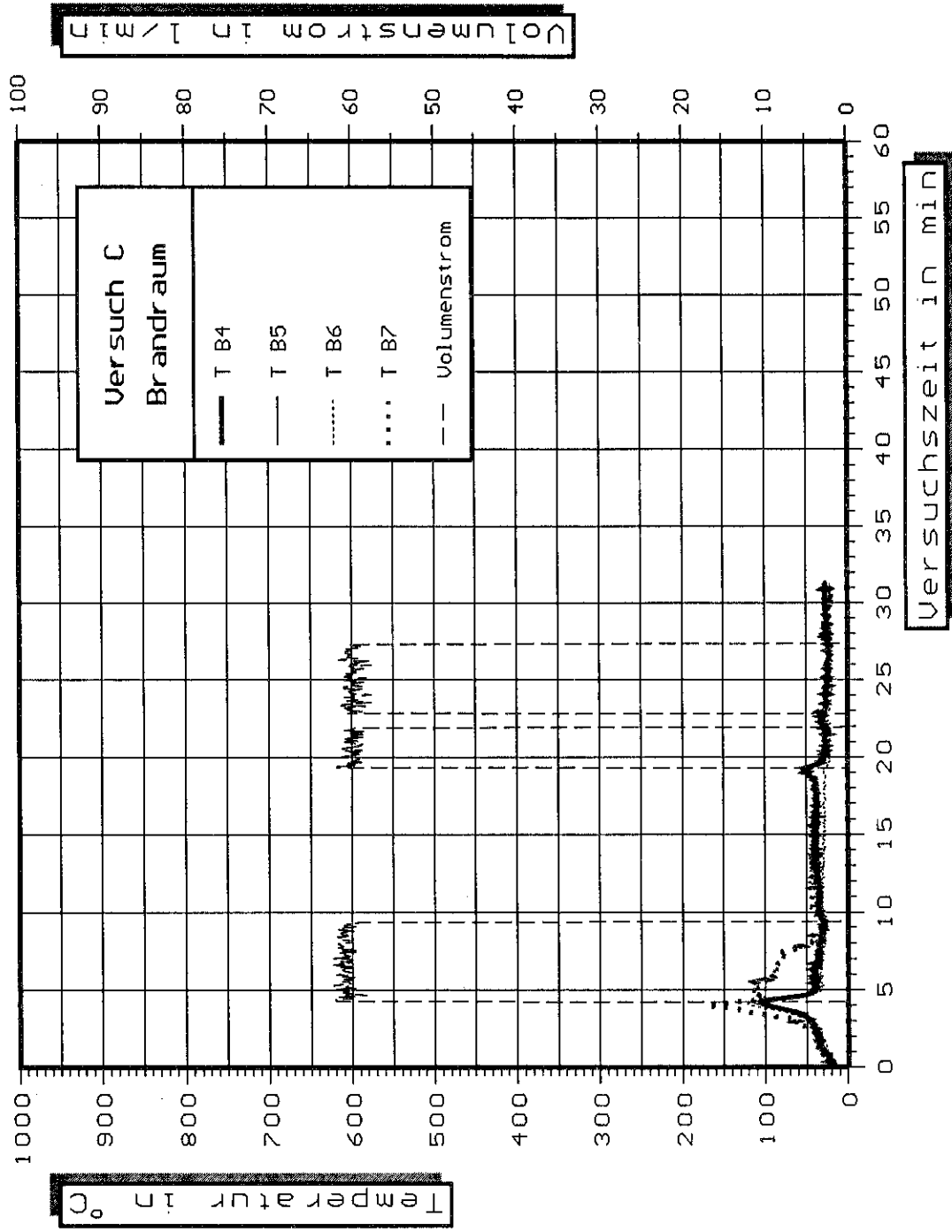


Bild 34 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brand-
raumes und Wasservolumenstrom aus dem Wasser-
nebelsprühkopf.
- Versuch C -

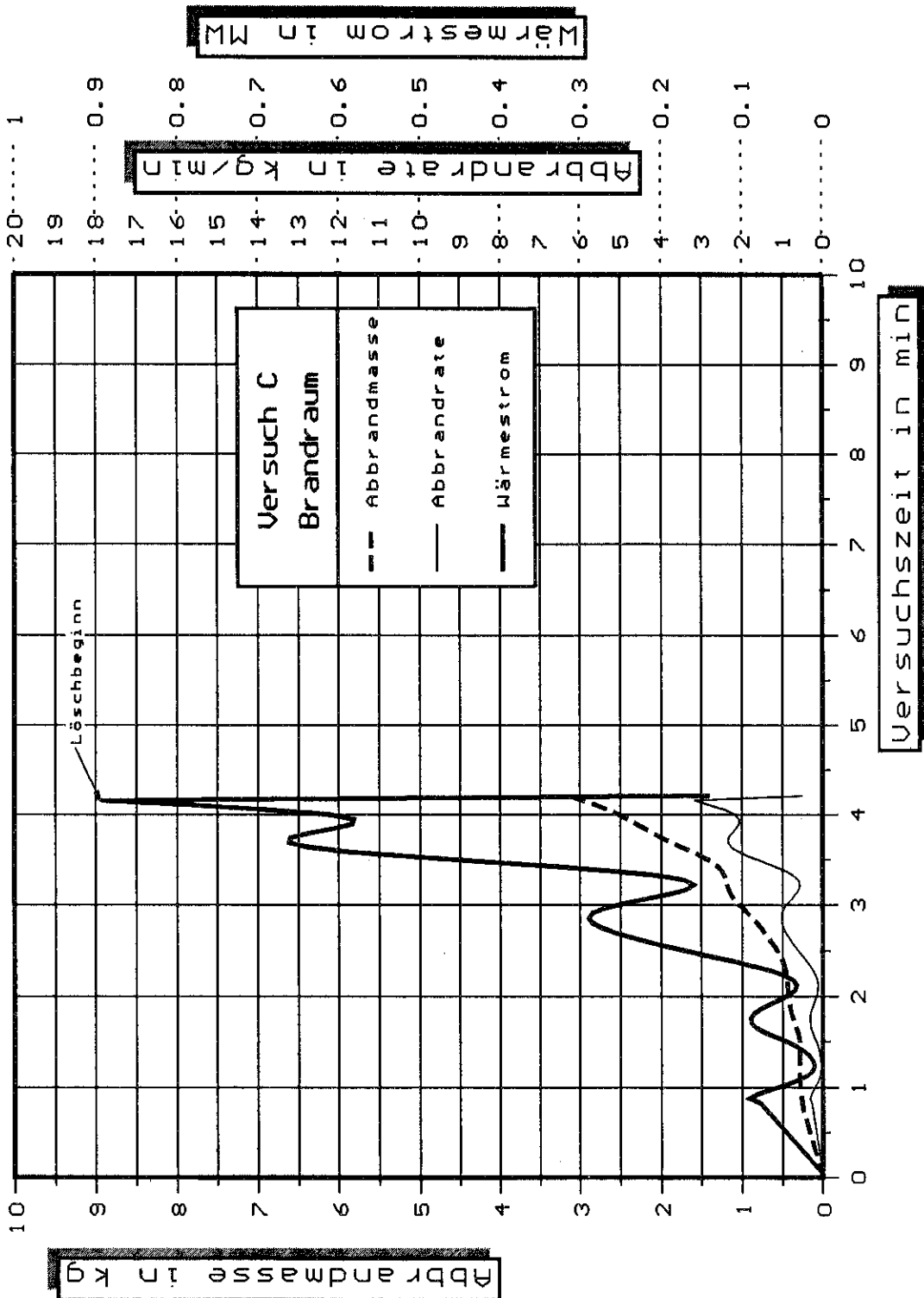


Bild 35 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate der Wärmefreisetzung und des Wasservolumenstromes aus dem Wassernebelprüfkopf.
- Versuch C -

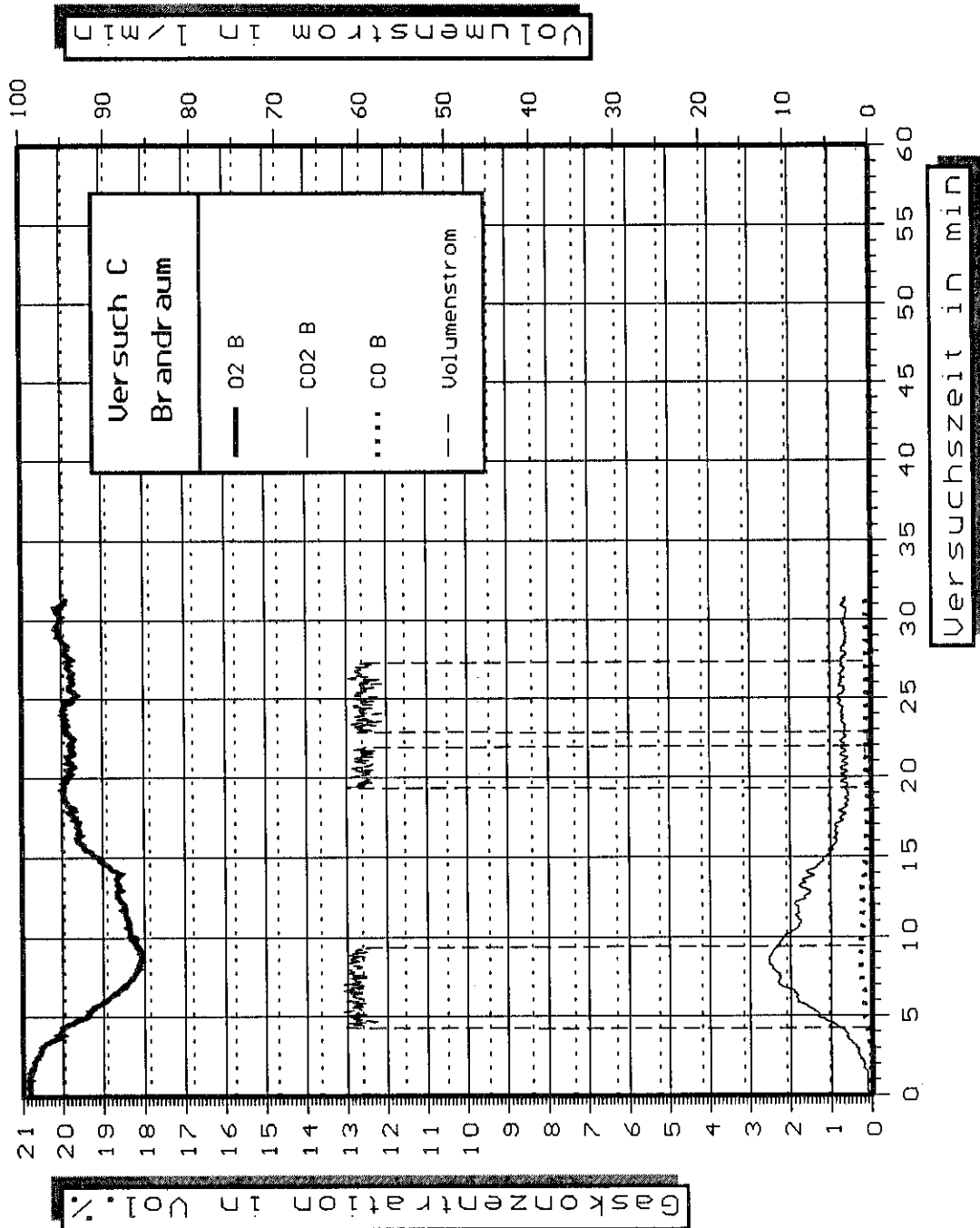


Bild 36 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum. - Versuch C -

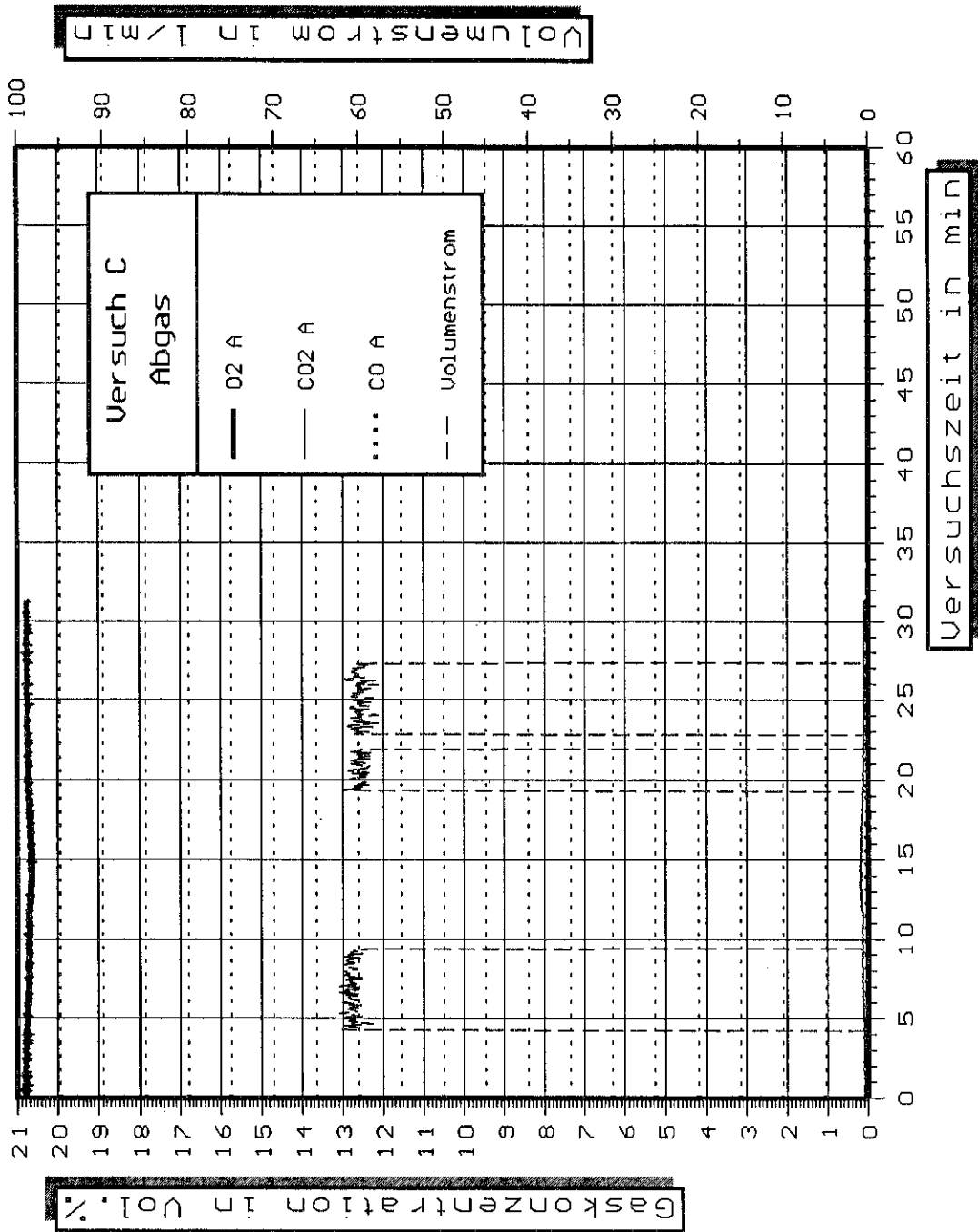


Bild 37 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas des Zwischenfassadenbereiches.
- Versuch C -

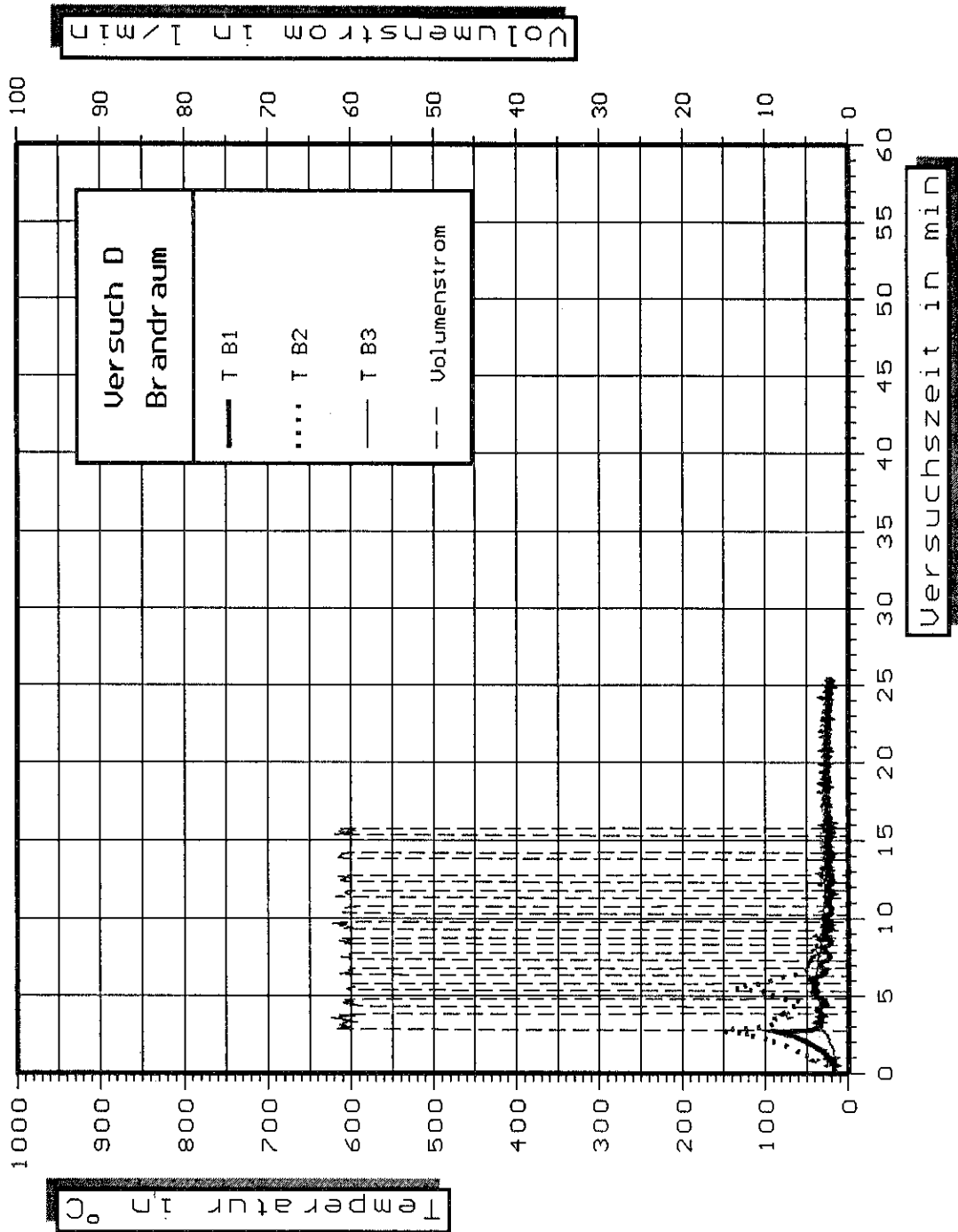


Bild 38 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch D -

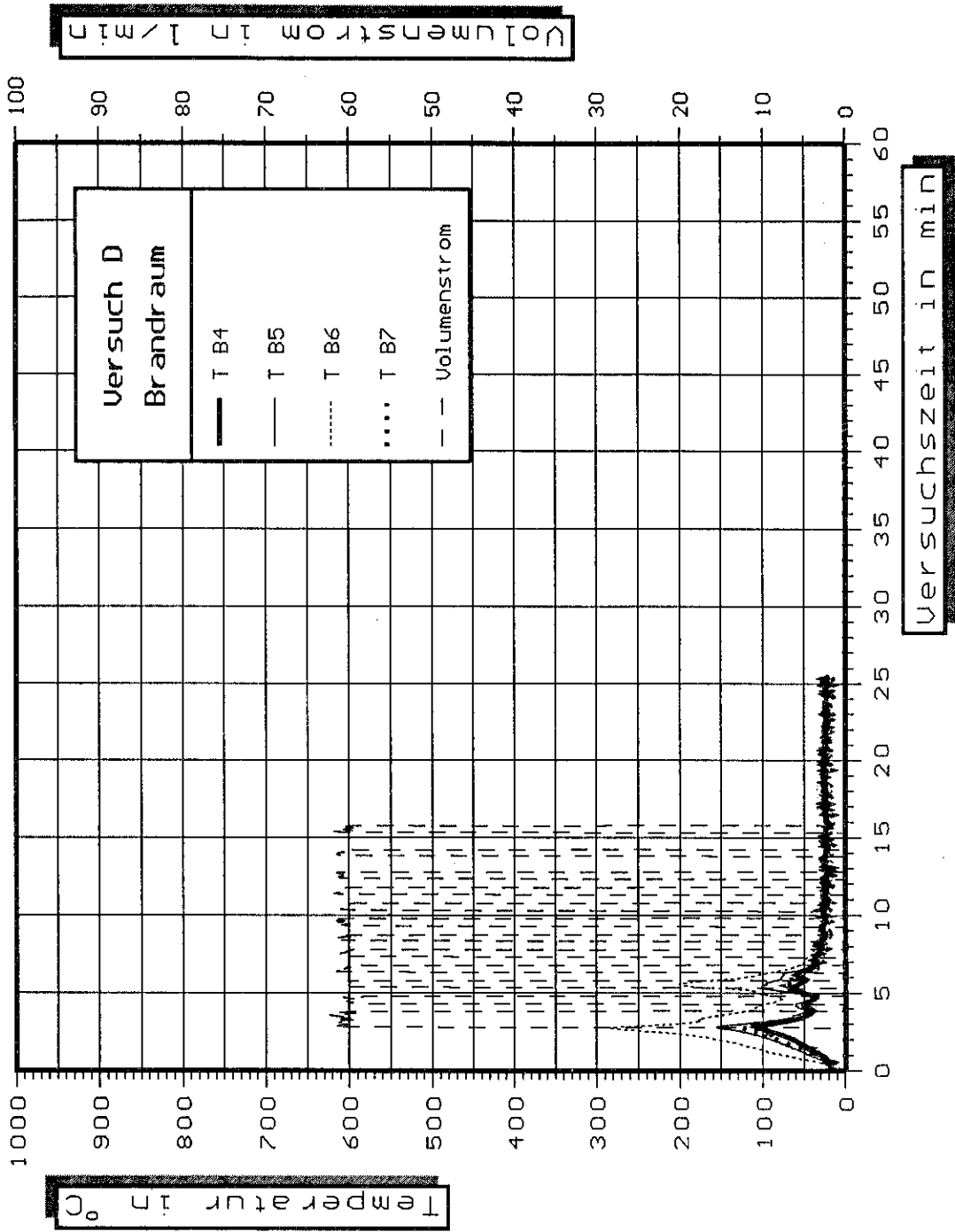


Bild 39 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brand-
raumes und Wasservolumenstrom aus dem Wasser-
nebelsprühkopf.
- Versuch D -

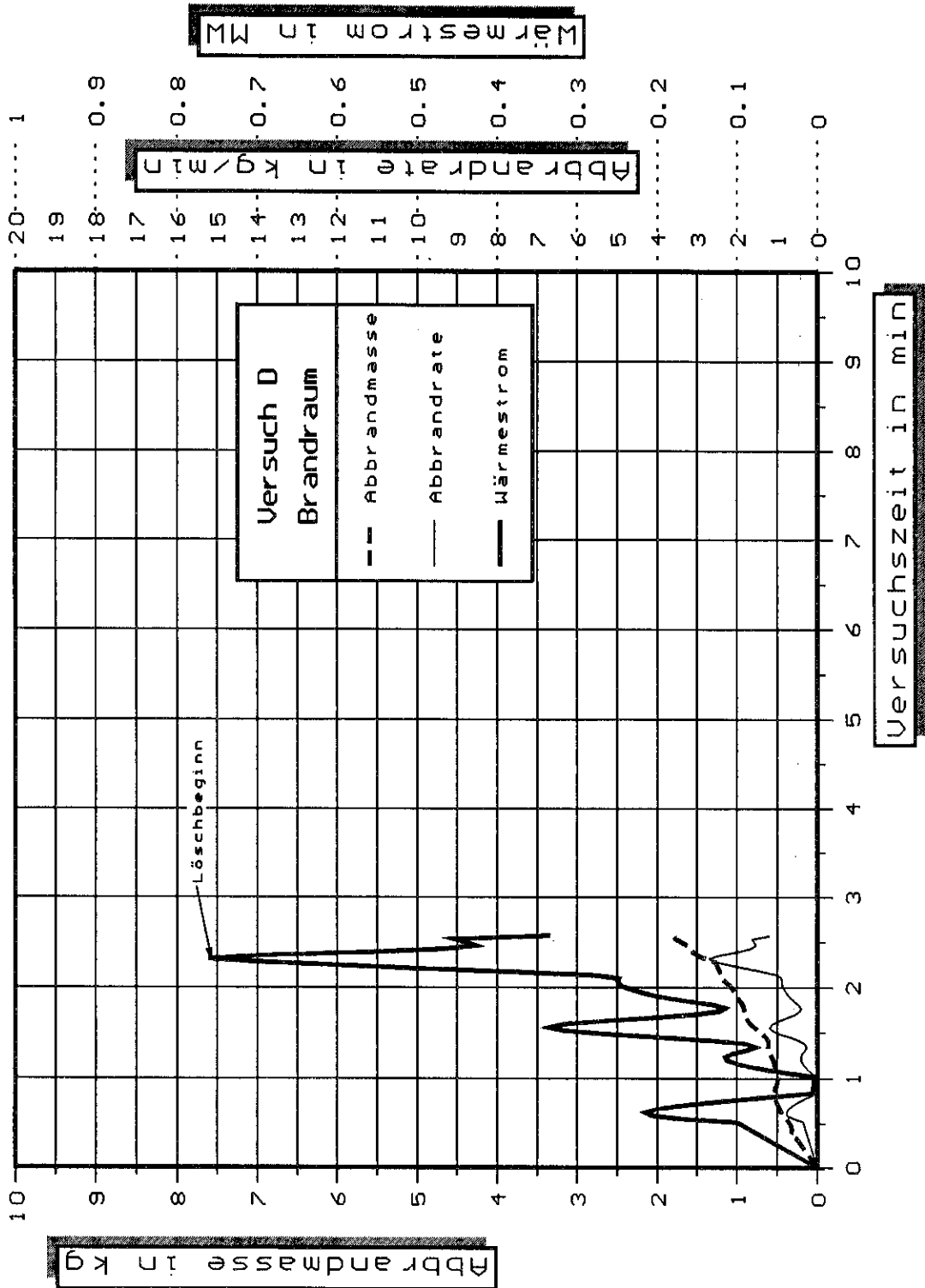


Bild 40 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate der Wärmefreisetzung und des Wasservolumenstromes aus dem Wassernebelprüfkopf.
- Versuch D -

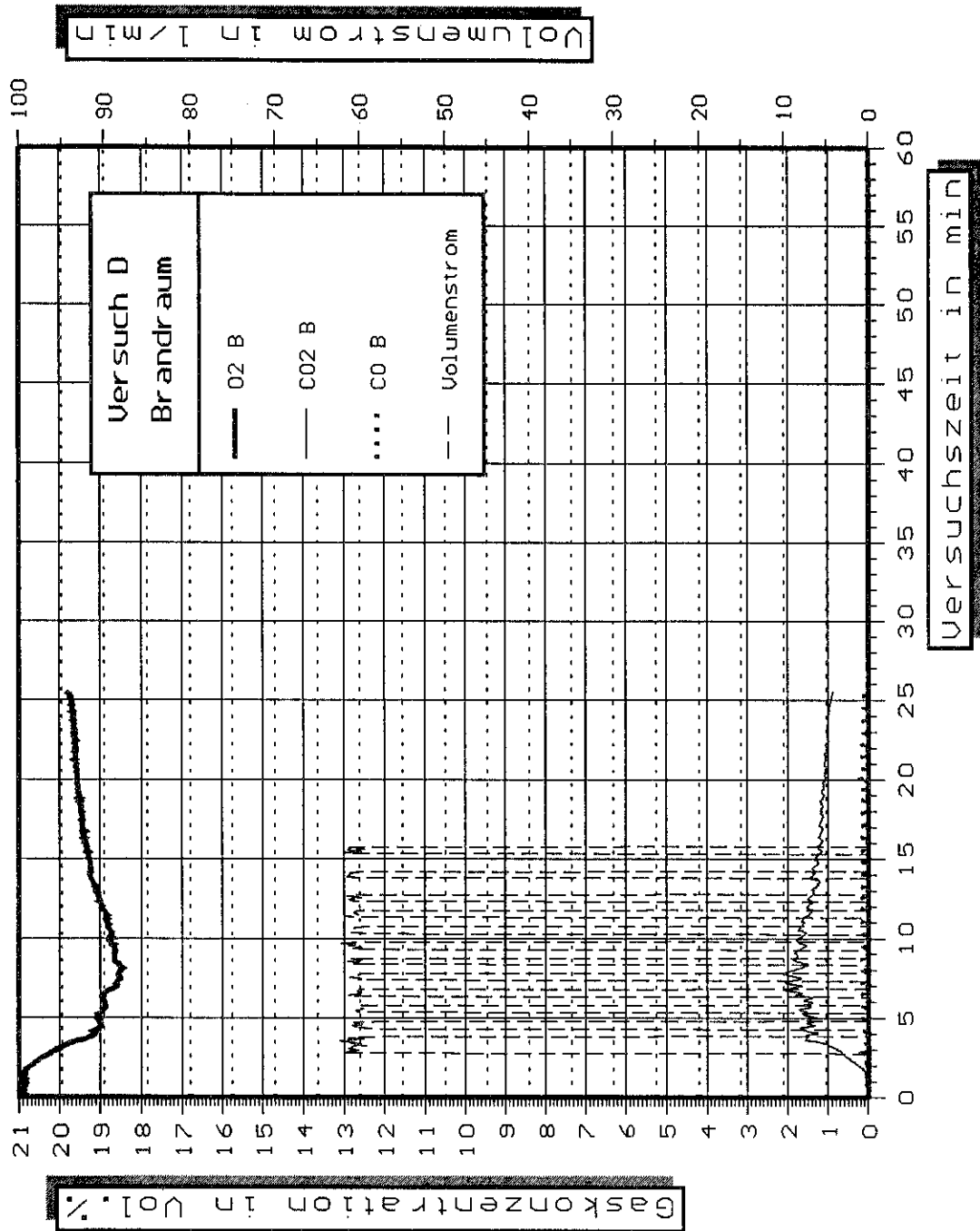


Bild 41 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch D -

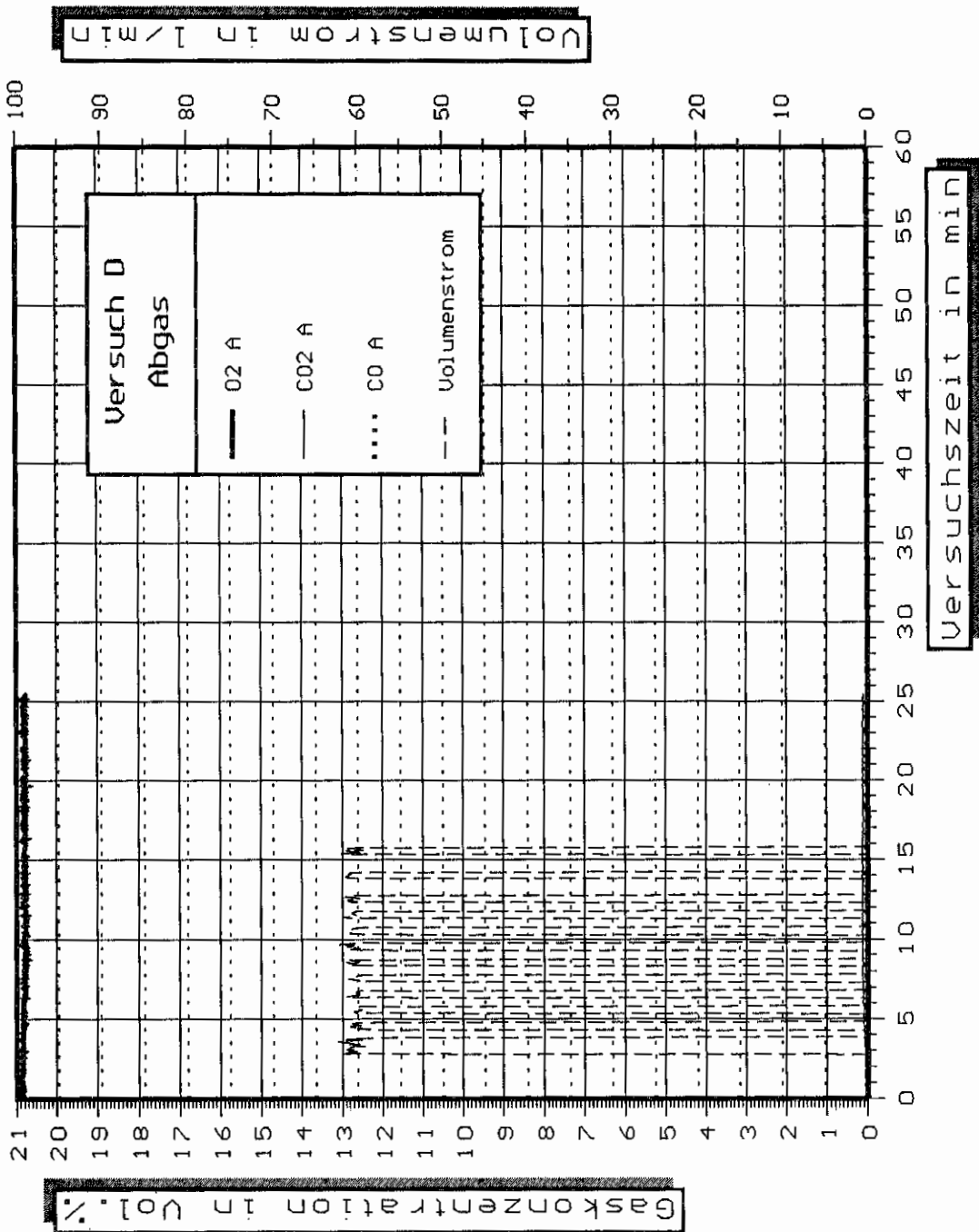


Bild 42 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas des Zwischenfassadenbereiches.
- Versuch D -

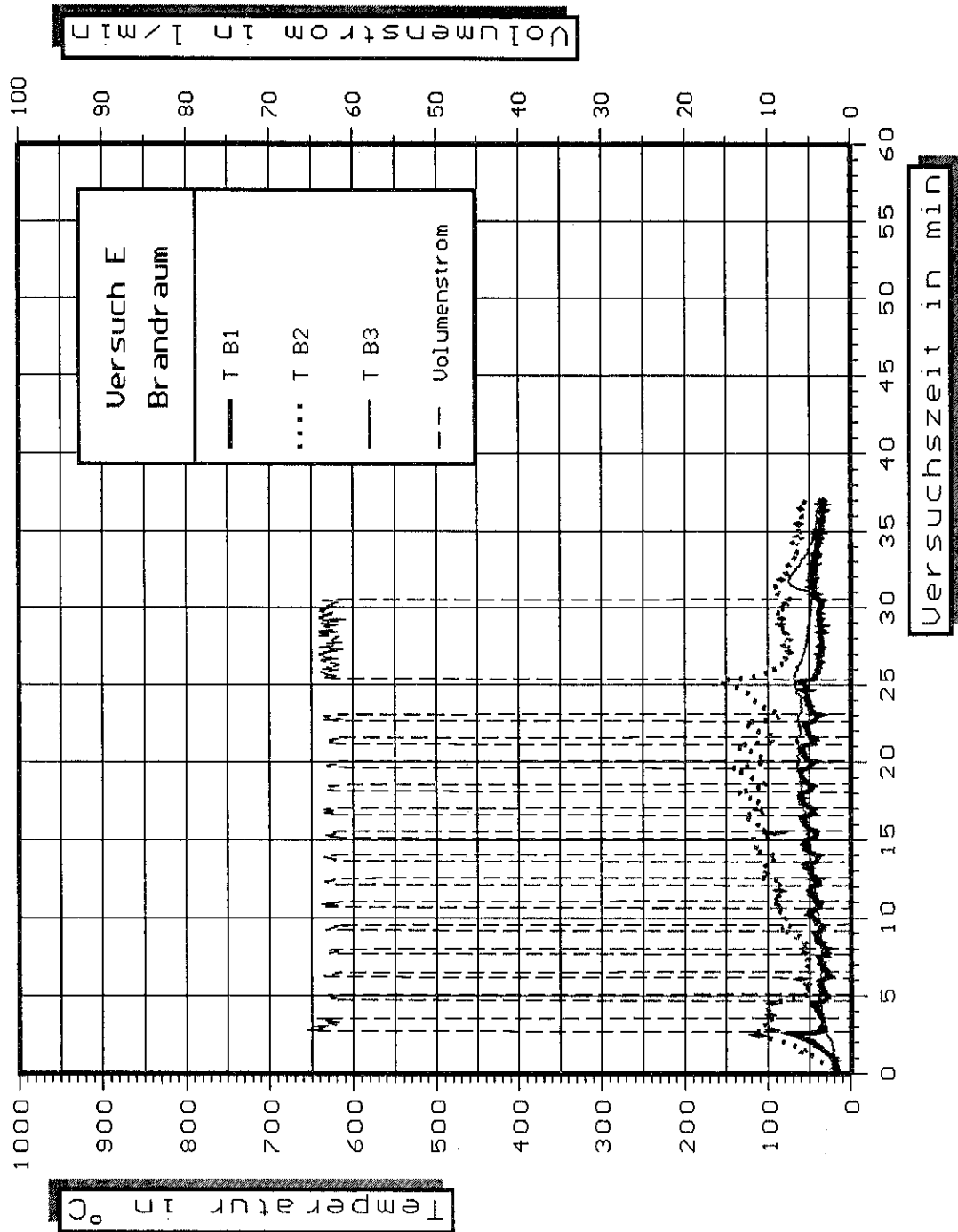


Bild 43 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch E -

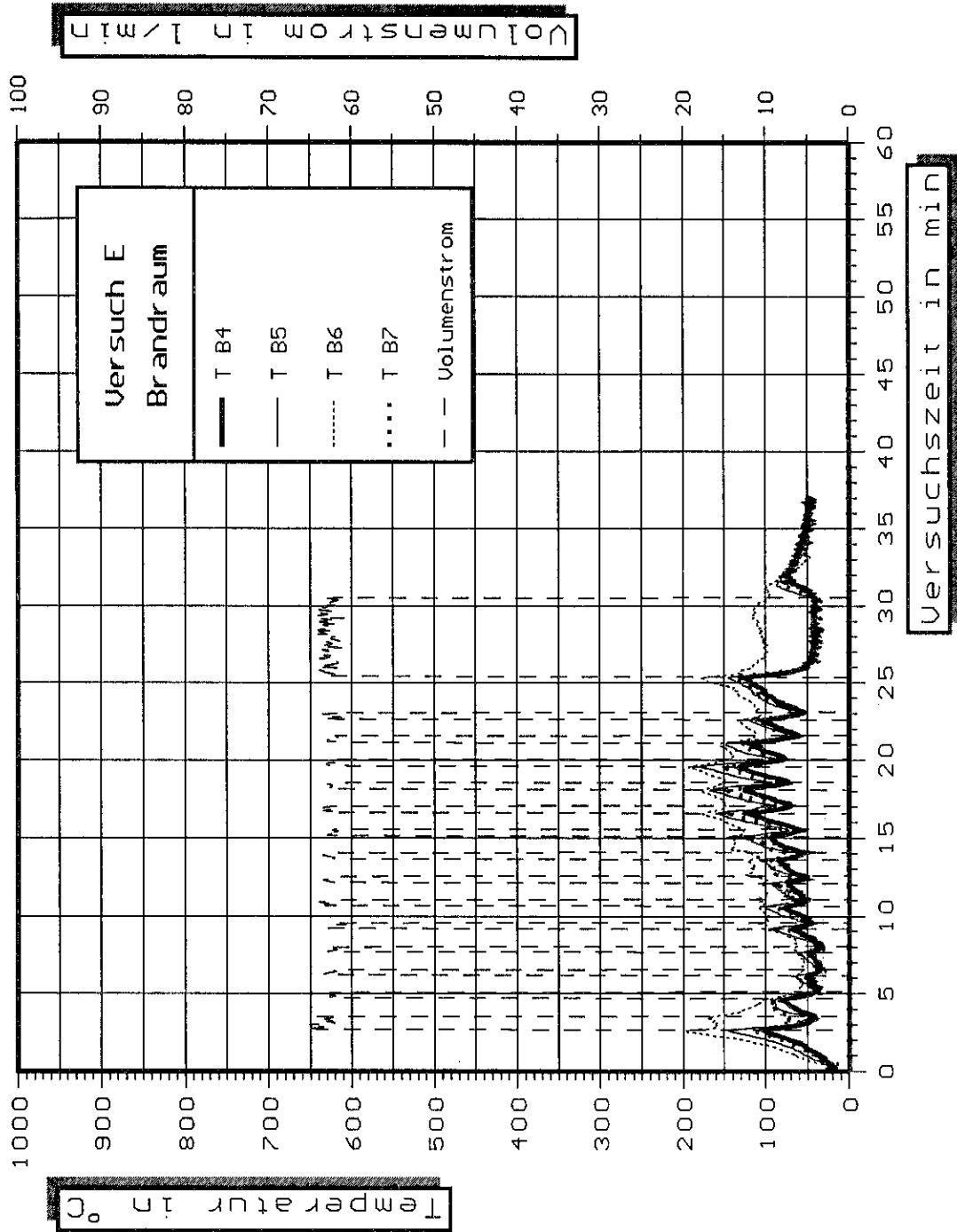


Bild 44 Zeitliche Temperaturverläufe innerhalb des Brandraumes und Wasservolumenstrom aus dem Wassernebelsprühkopf.
- Versuch E -

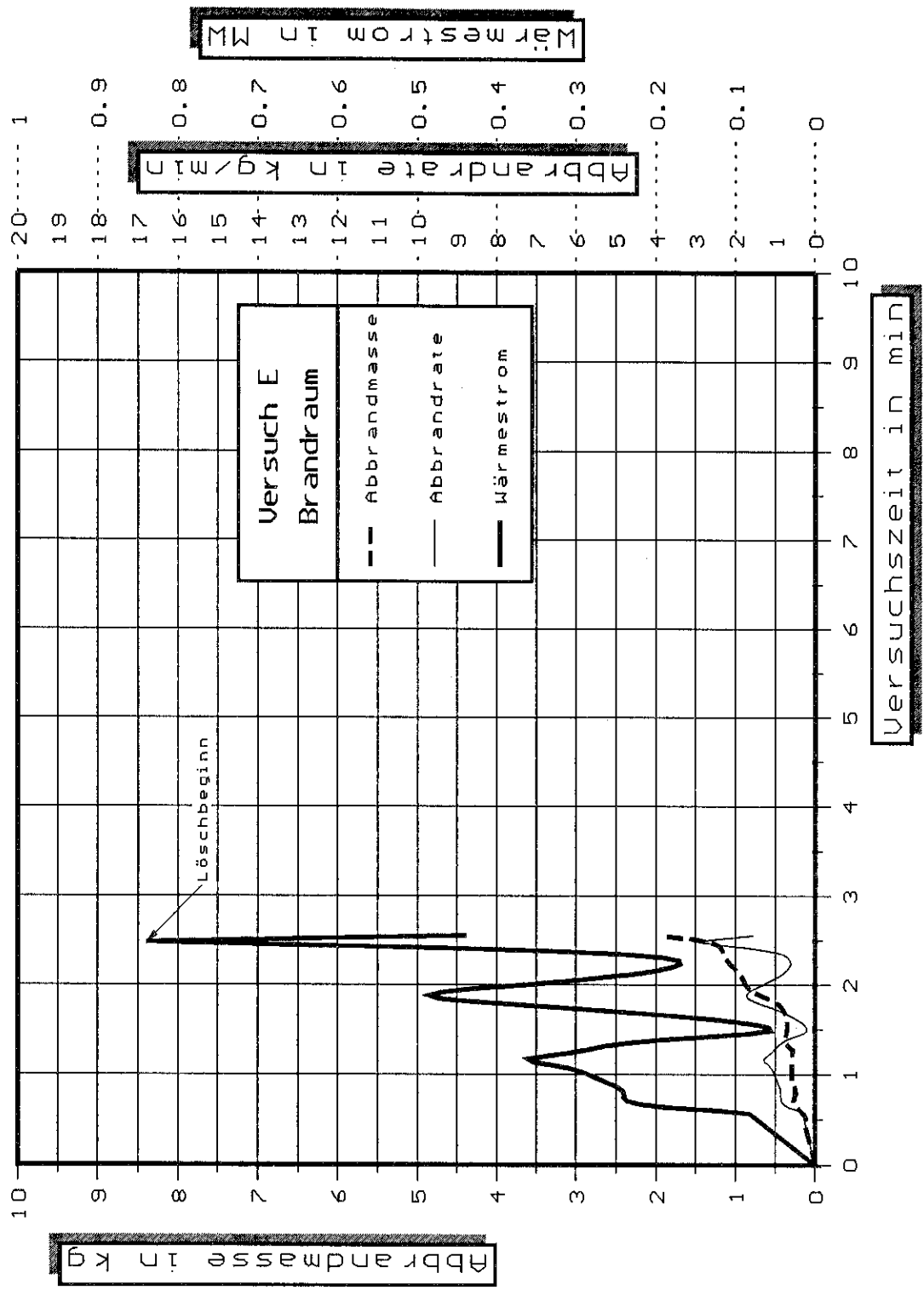


Bild 45 Zeitlicher Verlauf der Abbrandmasse, der Abbrandrate der Wärmefreisetzung und des Wasservolumenstromes aus dem Wassernebelprüfkopf.
- Versuch E -

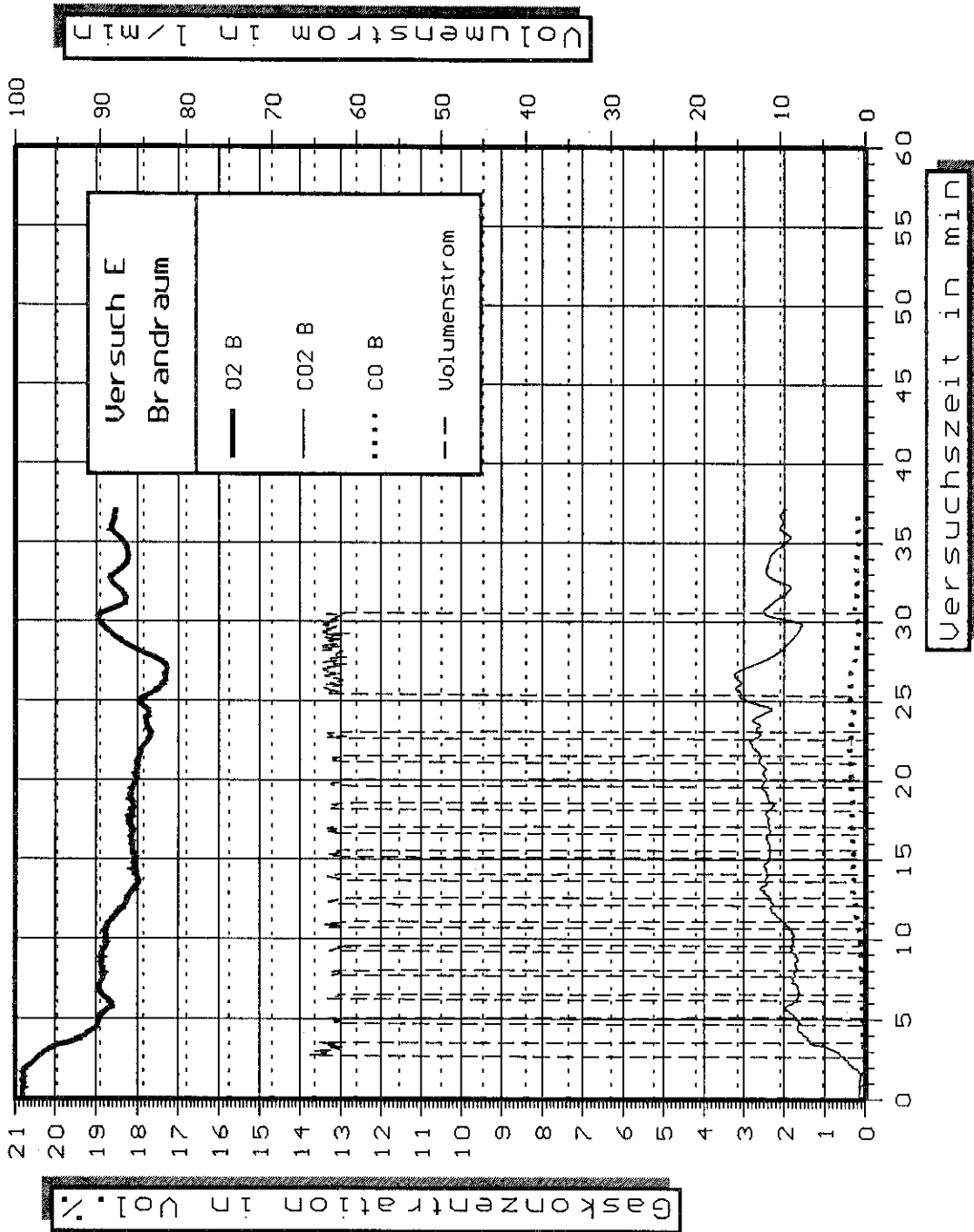


Bild 46 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Brandraum.
- Versuch E -

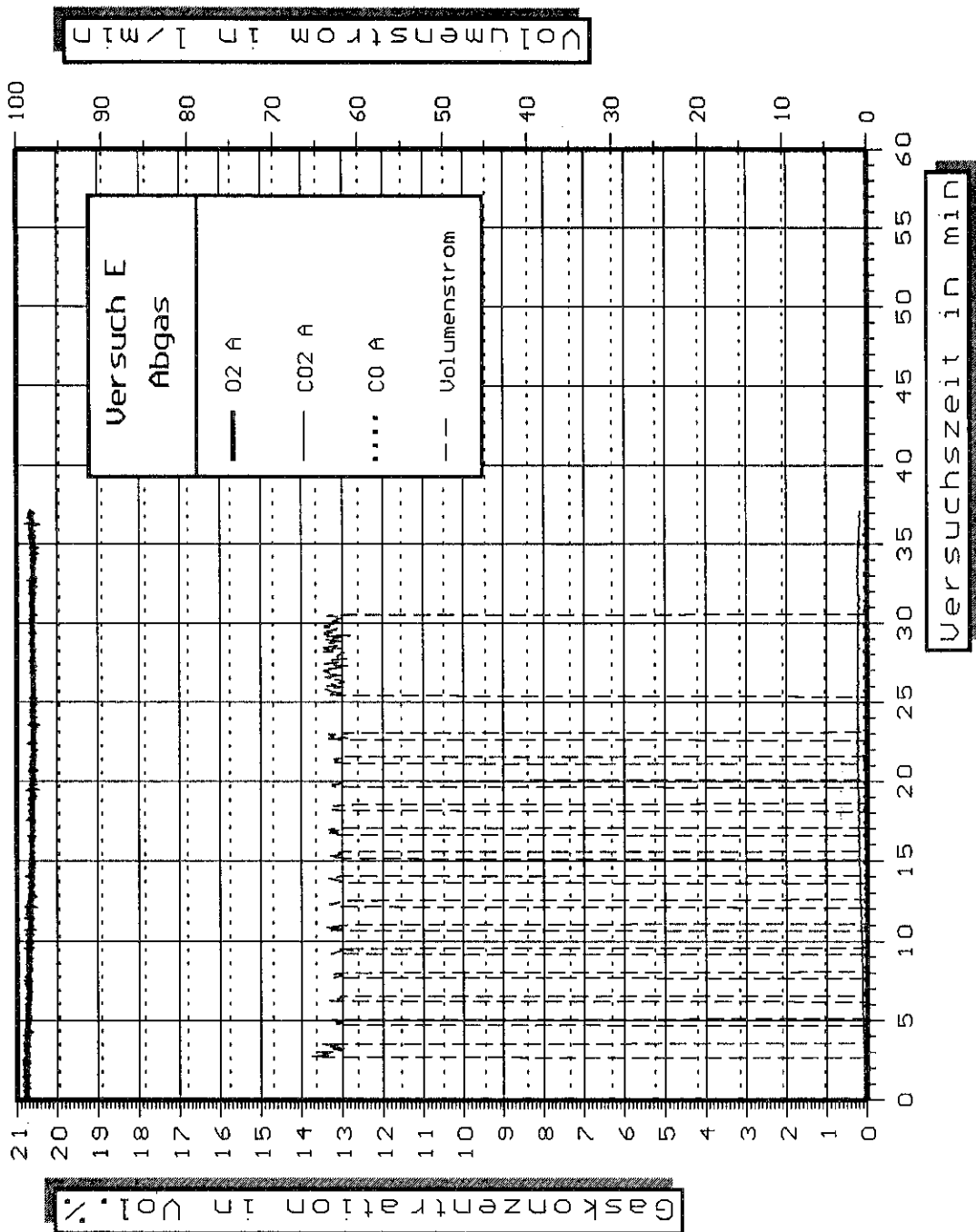


Bild 47 Zeitlicher Verlauf der Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration im Abgas des Zwischenfassadenbereiches.
- Versuch E -

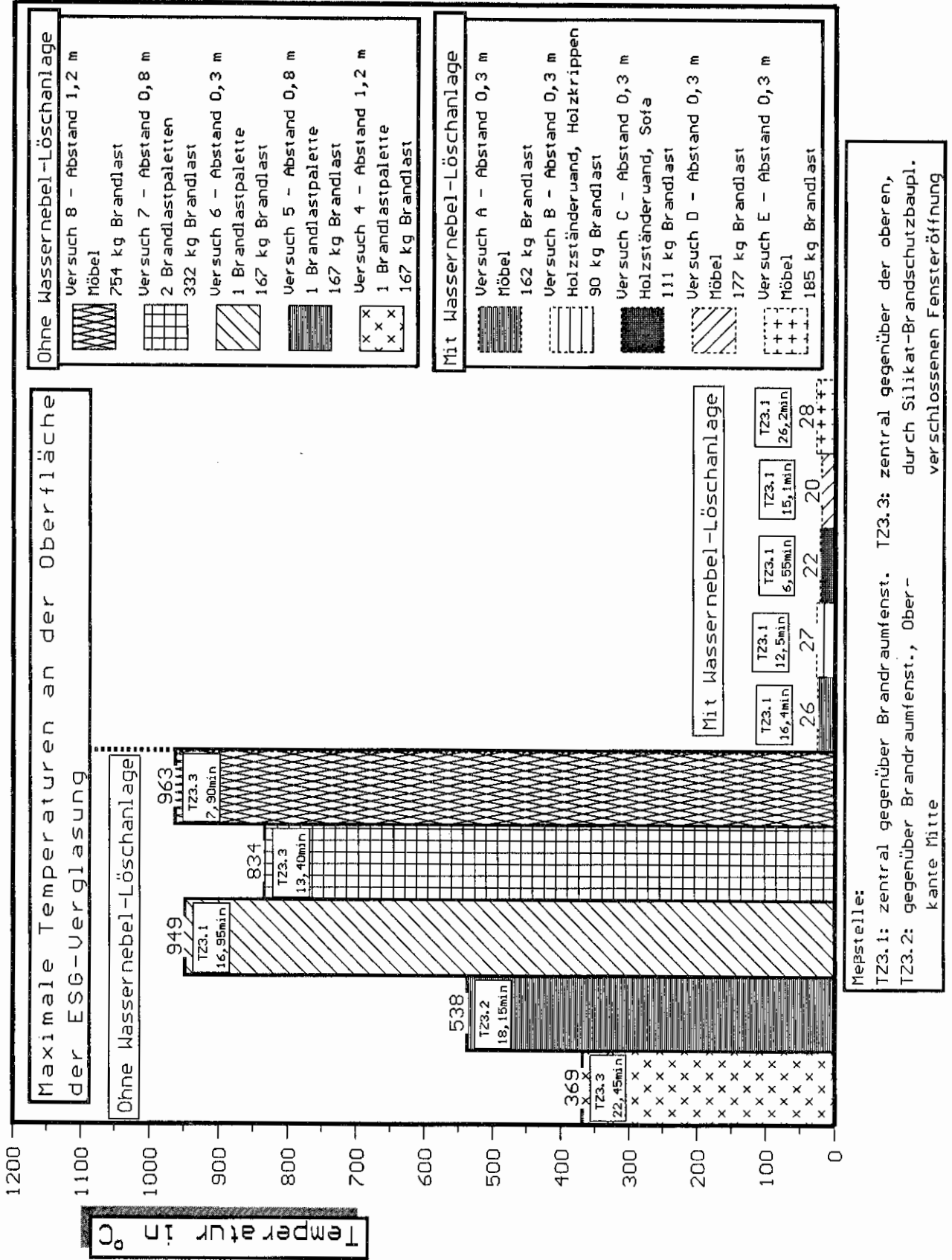


Bild 48 Vergleich der Maximalwerte der Wärmestrahlung in der Mitte des "oberen Fensters" der Innenfassade bei den Versuchen ohne (4, 5, 6, 7, 8) und mit Wassernebellöschanlage (A, B, C, D, E).

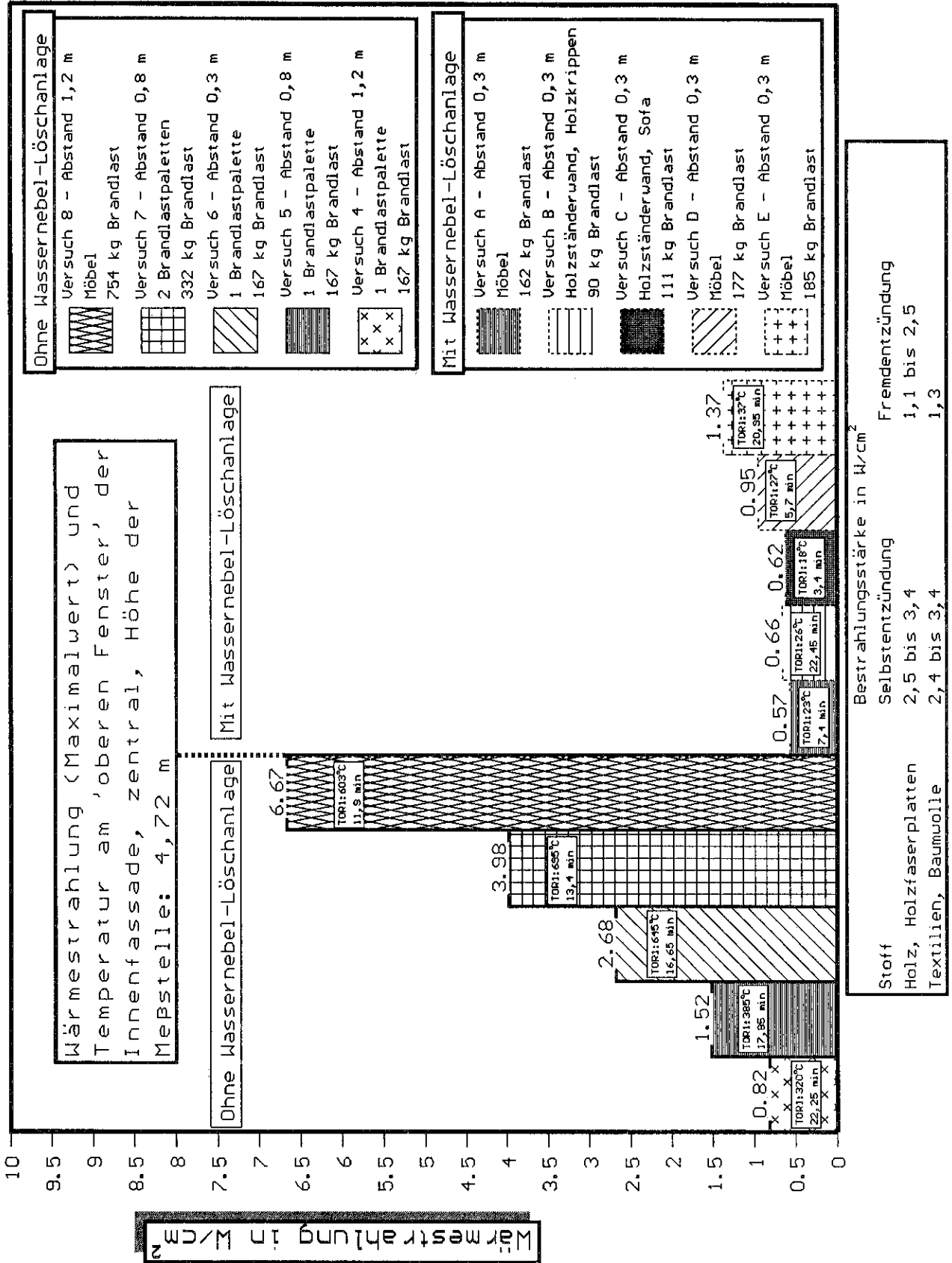


Bild 49 Vergleich der Maximalwerte der Temperaturen an der ESG-Verglasung bei den Versuchen ohne(4, 5, 6, 7, 8) und mit Wassernebellöschanlage (A, B, C, D, E).

13. Fotos

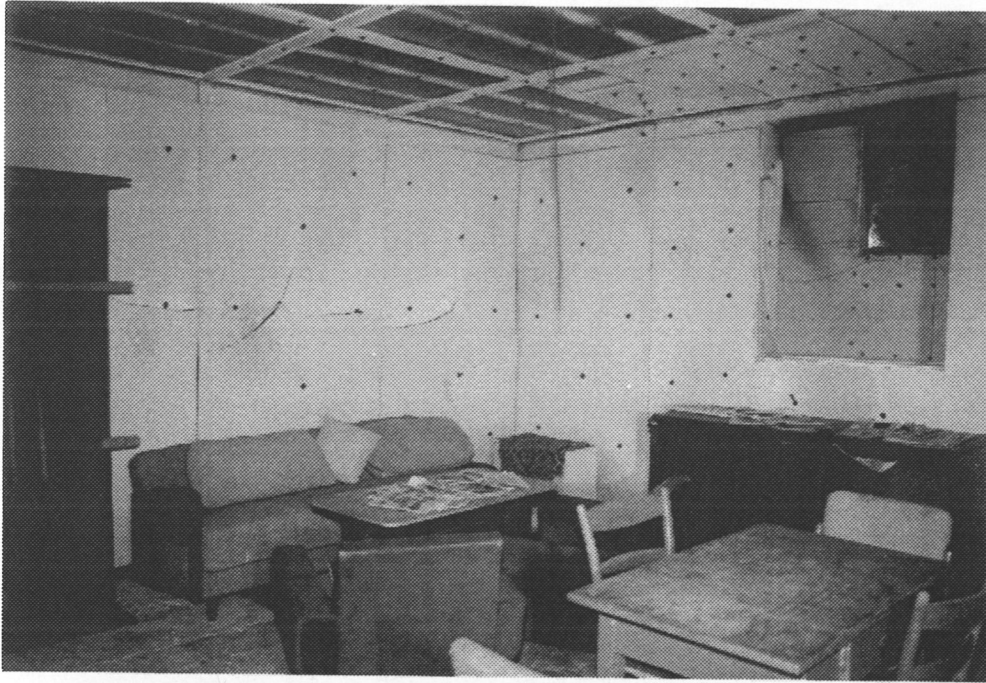


Foto 1

Brandraum bei
Versuch 8

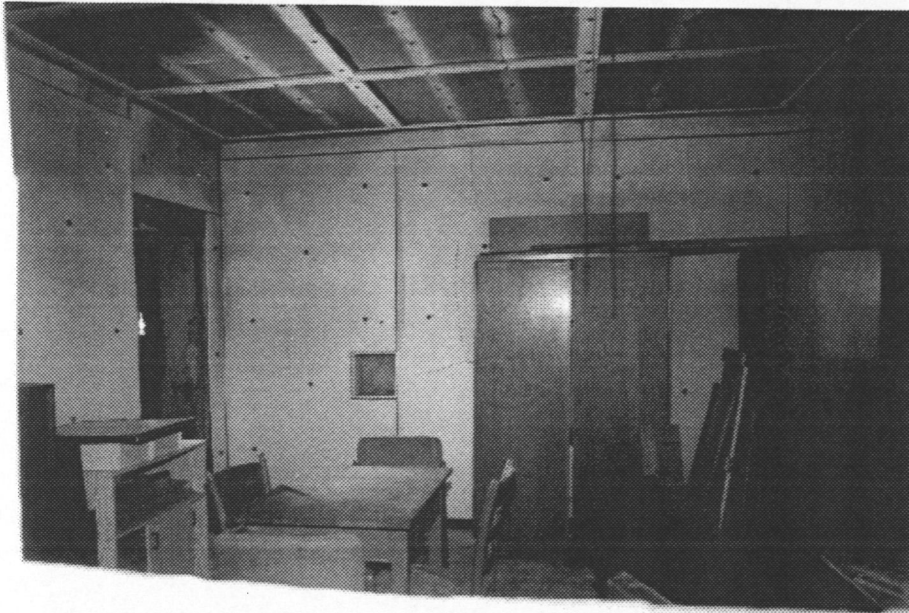


Foto 2

Brandraum bei
Versuch 8

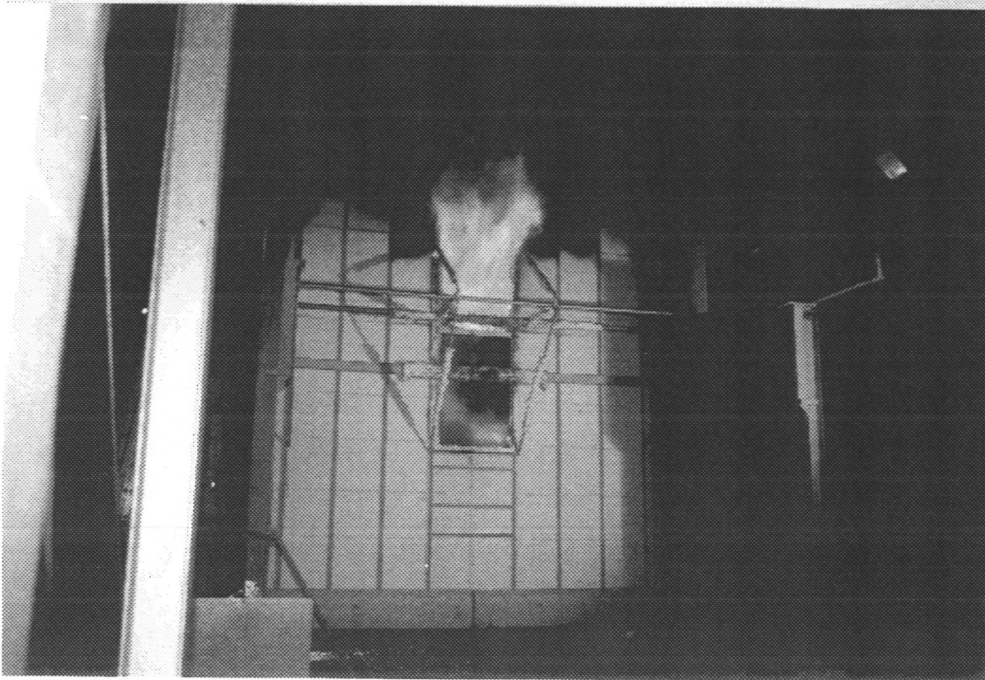


Foto 3

Versuch 8 -
6 min nach
Zündung

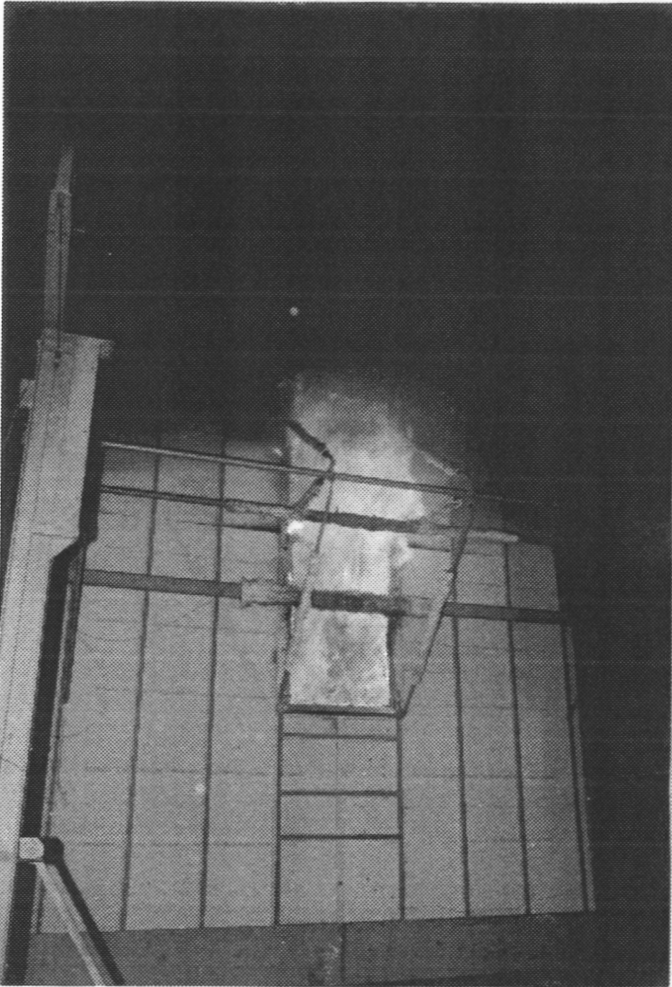


Foto 4 Versuch 8
7 min 6 s nach
Zündung

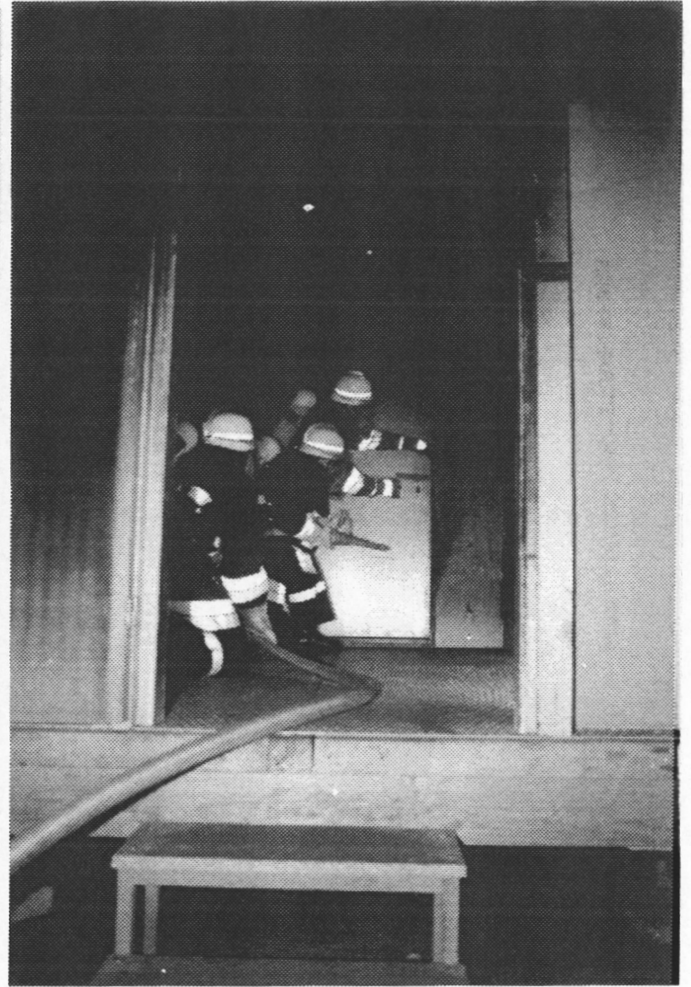


Foto 5 Versuch 8
12 min 39 s nach
Zündung



Foto 6 Versuch 8 - 13 min 32 s nach Zündung

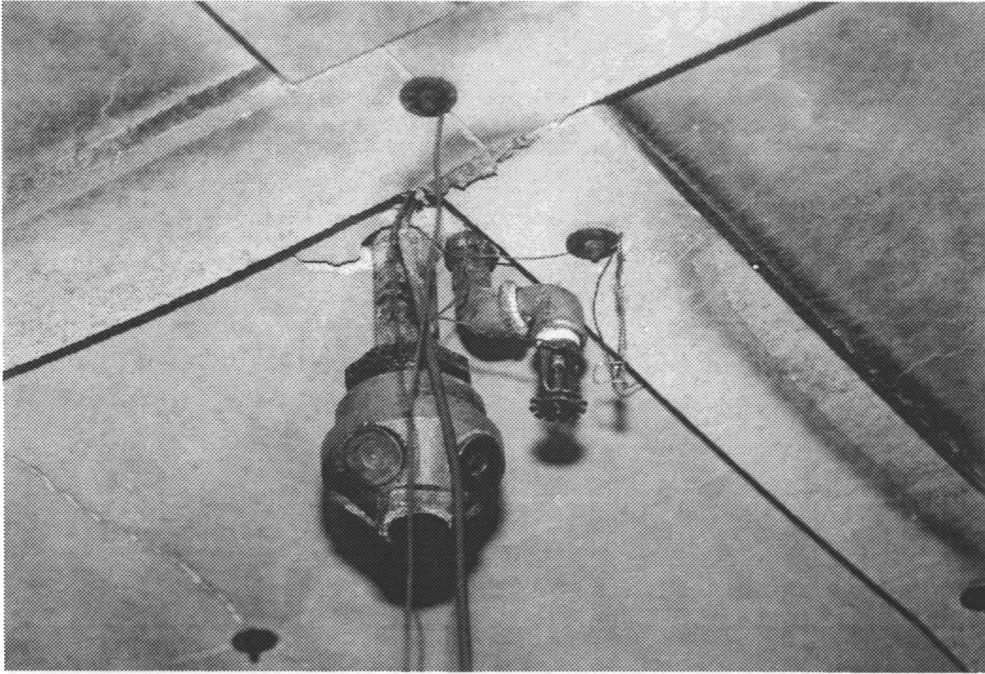


Foto 7

Wassernebel-
sprühkopf



Foto 8

Versuch A -
Brandraum vor
dem Versuch



Foto 9

Versuch A -
2 min 40 s nach
Zündung

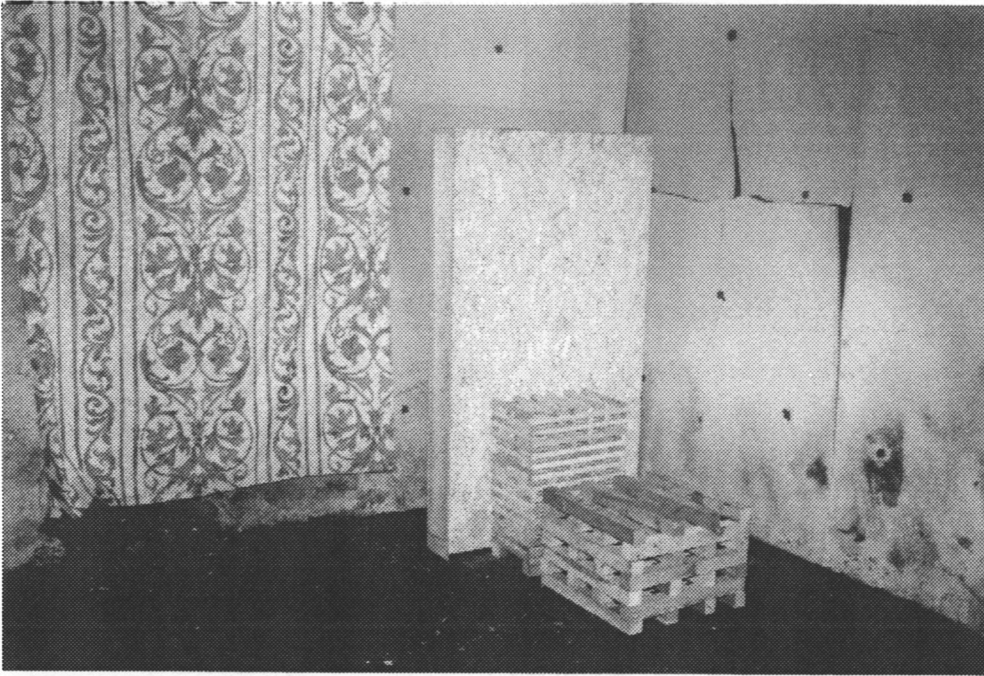


Foto 10

Versuch B
Brandraum vor
dem Versuch

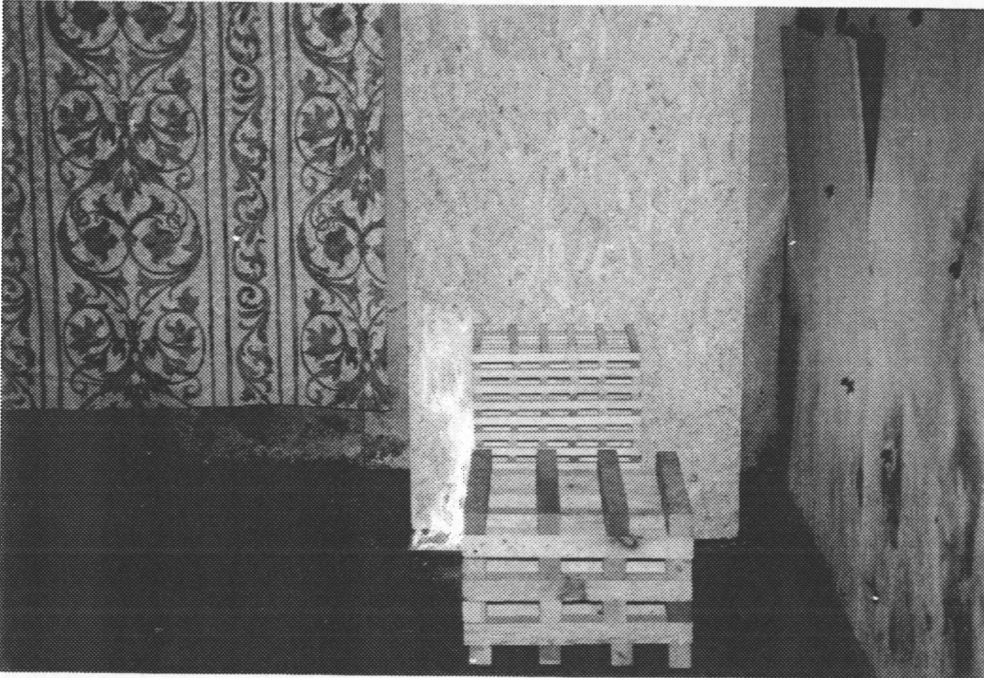


Foto 11

Versuch B -
14 s nach
Zündung



Foto 12

Versuch B -
Brandraum nach
dem Versuch

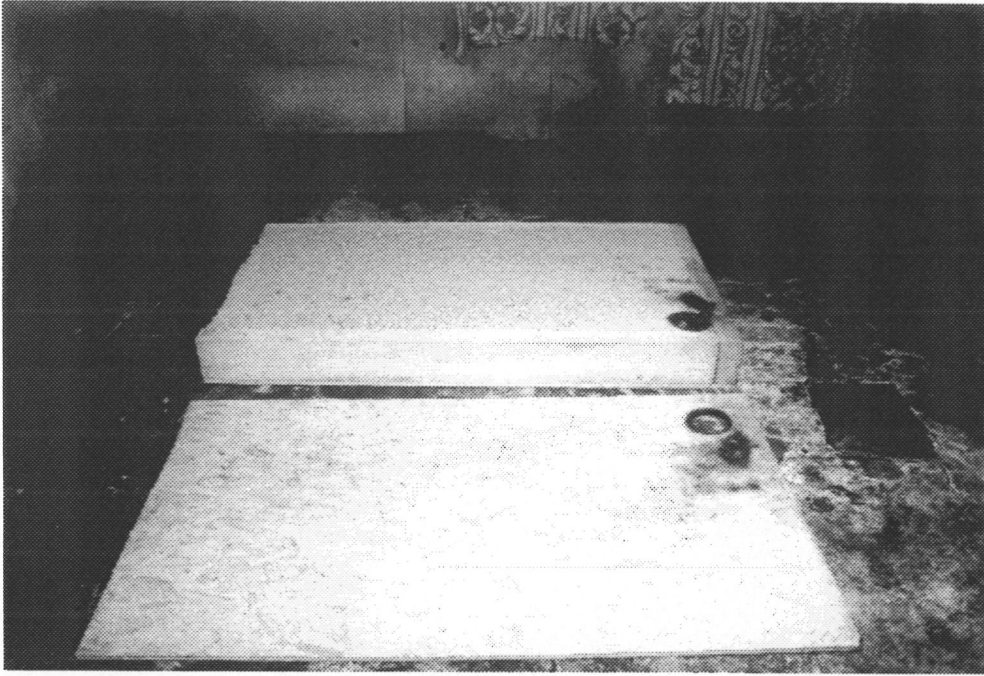


Foto 13

Versuch B -
nach dem
Versuch
geöffnete
Holzständer-
wand



Foto 14

Versuch C -
Brandraum vor
dem Versuch

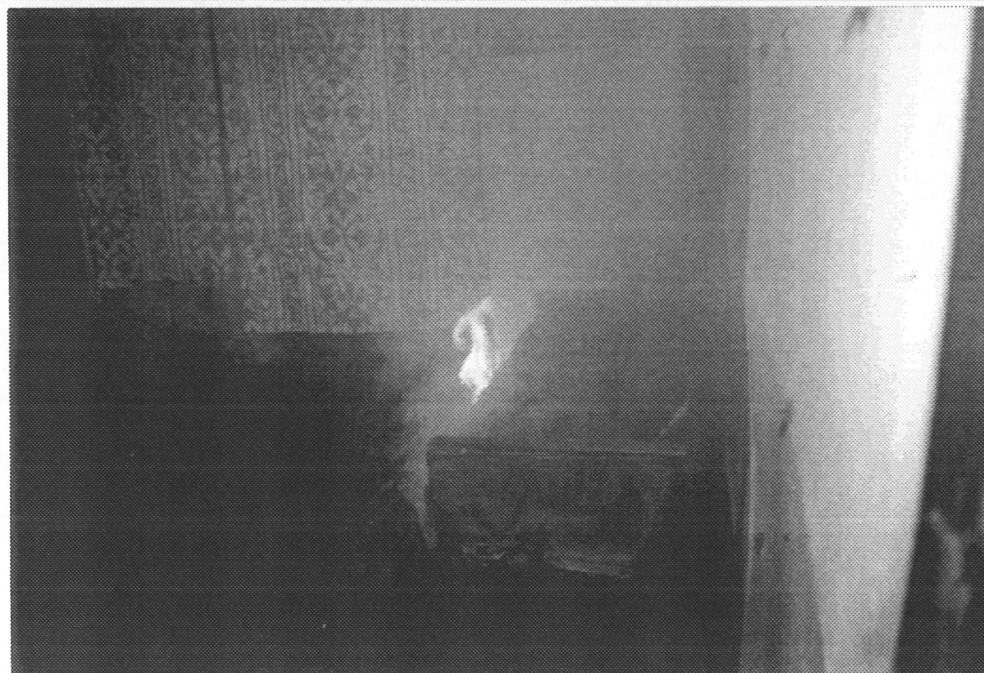


Foto 15

Versuch C -
52 s nach
Zündung

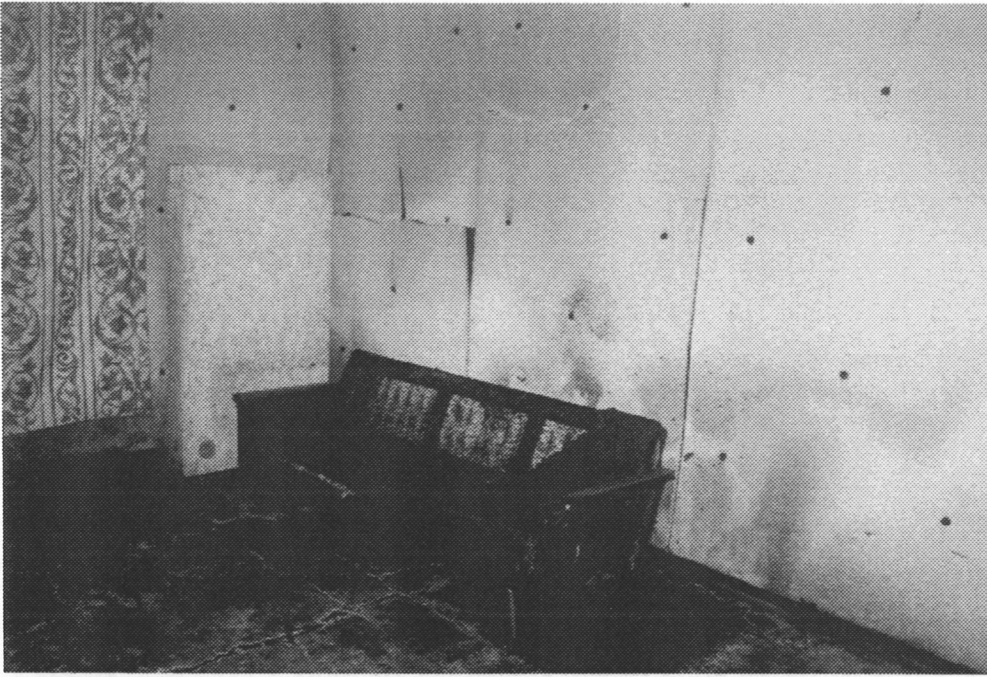


Foto 16

Versuch C -
Brandraum
nach dem
Versuch

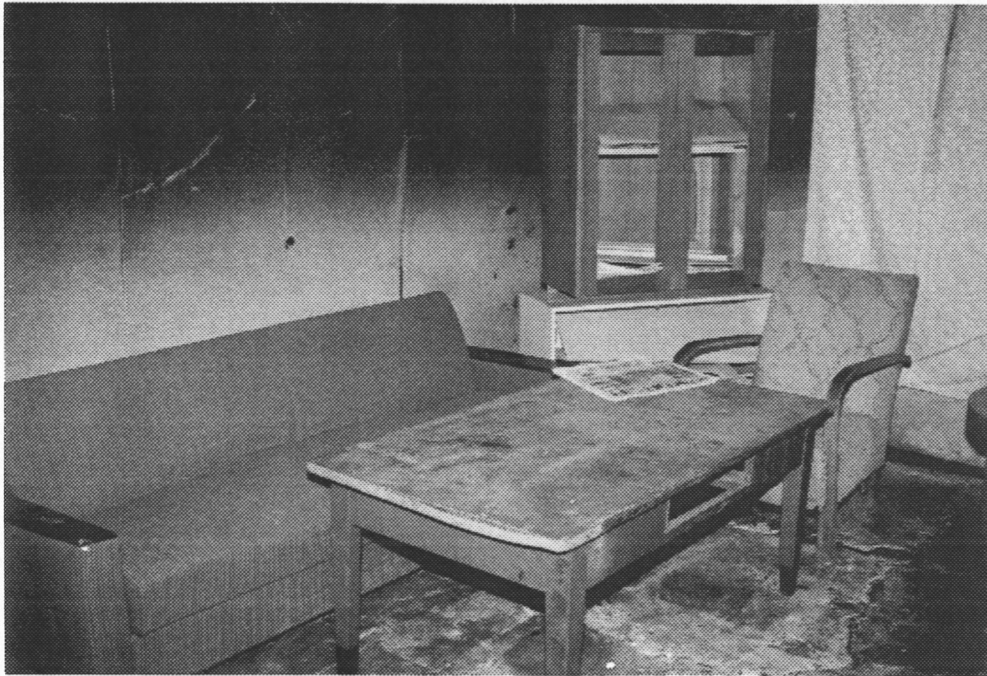


Foto 17

Versuch D -
Brandraum vor
dem Versuch



Foto 18

Versuch D -
Brandraum vor
dem Versuch

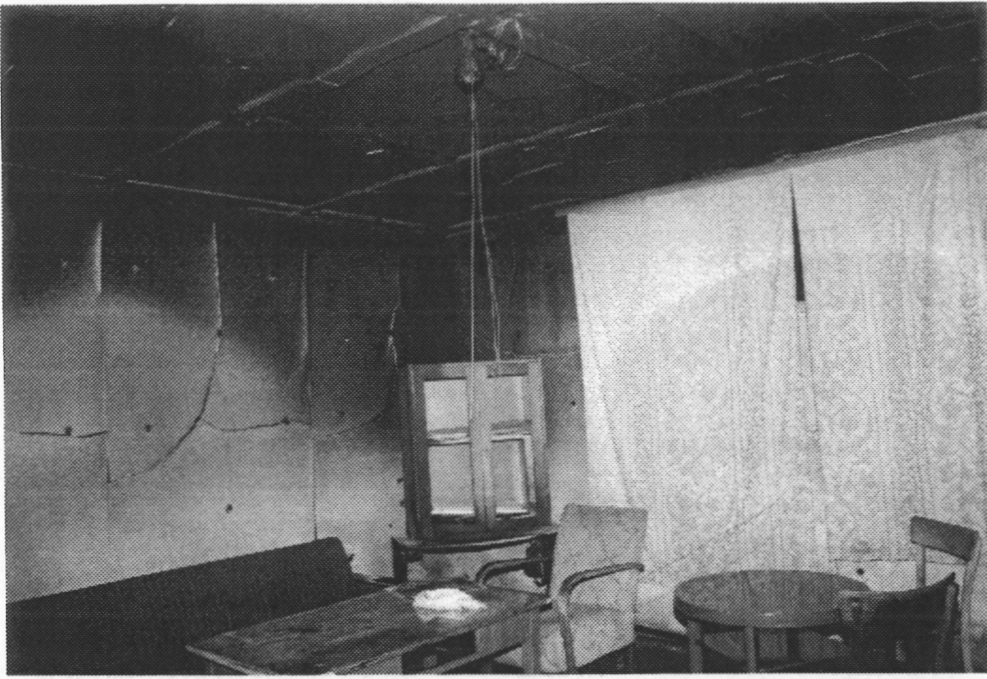


Foto 19

Versuch D -
nach dem
Versuch

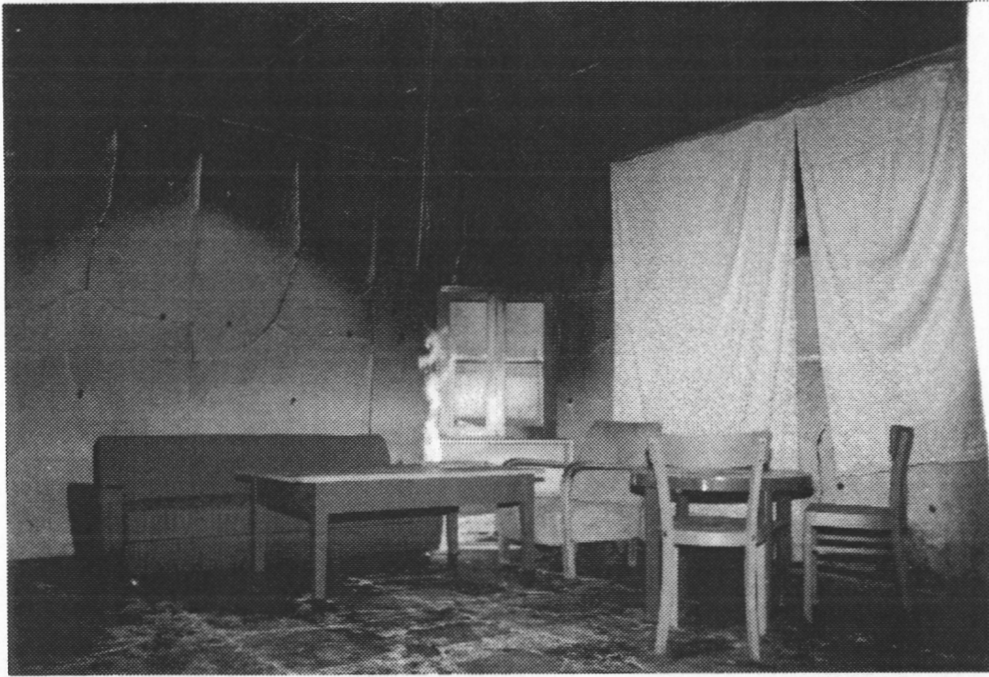


Foto 20

Versuch E -
24 s nach
Zündung



Foto 21

Versuch E -
Brandraum nach
dem Versuch