



Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John



Integrierter Umweltschutz im Bereich der Holzwirtschaft

**Entwicklung und Erprobung neuartiger
Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau
zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung**

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

**Forschungsvorhaben im Auftrag des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)**

Förderkennzeichen Nr. 0339852/9

Projektträger:

Forschungszentrum Jülich GmbH

BEO - Projektträger Biologie, Energie, Umwelt

Karlsruhe

Juli 2001

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen Nr. 0339852/9 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

ISBN 3-00-008449-5

© 2001 Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Berichtsblatt

1. ISBN	3-00-008449-5	2. Berichtsart	Schlußbericht
3a. Titel des Berichts Integrierter Umweltschutz im Bereich der Holzwirtschaft: Entwicklung und Erprobung neuartiger Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung			
3b. Titel der Publikation			
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n))		5. Abschlußdatum des Vorhabens	
Dipl.-Ing. Reiner John (Leiter der Forschungsstelle)		Januar 2001	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum	
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann (Sachbearbeiter)		Juli 2001	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)		7. Form der Publikation	
Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 D - 76187 Karlsruhe Tel.: (+49) 721 608-4473 oder -4452 Fax: (+49) 721 755467 www.ciw.uni-karlsruhe.de/ffb/		9. Ber.Nr. Durchführende Insitution	

		10. Förderkennzeichen *)	
		0339852/9	
		11a. Seitenzahl Bericht	
11b. Seitenzahl Publikation		127	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)		12. Literaturangaben	
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		41	
		14. Tabellen	
		4	
15. Abbildungen		60	
16. Zusätzliche Angaben			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
18. Kurzfassung			
<p>Der moderne mehrgeschossige Holzbau gewinnt immer mehr an Bedeutung. Hochbauten in Deutschland und in Mitteleuropa werden gegenwärtig jedoch meistens in Massivbauweise aus Mauerwerk und Stahlbeton errichtet. Das entscheidende Hemmnis gegen die Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen war und ist der Brandschutz.</p> <p>Beim Brandschutz hat hierbei der Personenschutz Vorrang vor dem Sachschutz. Als brandschutztechnische Maßnahmen kommen sowohl bauliche als auch anlagentechnische Maßnahmen in Betracht. In den hier vorliegenden Untersuchungen wird sowohl auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden allgemein als auch auf die besonderen Problemstellungen bzgl. Gebäuden in Holzbauweise eingegangen. Zur Untersuchung der Brand- und Rauchausbreitung unter gleichzeitigem Einsatz einer Niederdruck-Wasserebellöschanlage werden in der Arbeit Brand- und Löschanlagen in einem Versuchsholzgebäude in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik beschrieben. Gleichzeitig wird die Problematik der numerischen Simulation von Bränden und des Löscheinsatzes erläutert.</p> <p>Resümee der Untersuchungen: Personen in Räumen, in denen ein Brand entsteht, können nur dann in diesen Räumen überleben, wenn durch eine schnelle Alarmierung eine ebenso rasche Brandbekämpfung eingeleitet wird. Dies ist besonders im Hinblick auf schlafende Personen zu berücksichtigen. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, kann sowohl der Personen- als auch der Sachschutz für den Fall, daß kein schneller Feuerwehreinsatz möglich ist, nur durch den Einsatz ortsfester Löschanlagen gewährleistet werden. Der Einsatz von ortsfesten Niederdruck-Wasserebellöschanlagen hat hierbei besonders positive Ergebnisse gezeigt.</p>			
19. Schlagwörter			
Brand- und Rauchausbreitung, baulicher Brandschutz, Flashover, Backdraft, Brandgase, Verglasungen, Holz, Holzbau (mehrgeschossig), biologische Dämmstoffe, Brandmeldeanlage, Sprinkleranlage, Wasserebellöschanlage (Niederdruck), Rauch- und Wärmeabzug (RWA), numerische Simulation von Bränden, Brand- u. Löschanlagen			
20. Verlag		21. Preis	
Forschungsstelle für Brandschutztechnik		64,-- EUR	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN 3-00-008449-5	2. Type of Report final report
3a. Report Title Integrated Environmental Protection with Reference to Wood and Forestry: Developing and Testing New Types of Fire Extinguishing Systems for Fire Fighting and the Protection of Escape Ways in Multi-Storey Wooden Buildings	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dipl.-Ing. Reiner John (Director of the Institute)	5. End of Project January 2001
	6. Publication Date July 2001
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann (expert)	7. Form of Publication brochure
	9. Originator's Report No. ---
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 D - 76187 Karlsruhe phone: (+49) 721 608-4473 oder -4452 fax: (+49) 721 755467 www.ciw.uni-karlsruhe.de/ffb/	10. Reference No. 0339852/9
	11a. No. of Pages Report 127
	11b. No. of Pages Publication
	12. No. of References 41
	14. No. of Tables 4
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	15. No. of Figures 60
	16. Supplementary Notes
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract Modern multi-storey wooden buildings are becoming more and more important. Both in Germany and Central Europe, however, multi-storey buildings are mostly built as solid constructions, i.e., from walls and ferro-concrete. The decisive argument against the use of sustainable natural products (esp. wood) has been fire protection. Concerning fire protection, personal protection is prior to the protection of goods. As technical measures in the field of fire protection engineering, both structural measures and fire extinguishing resp. detecting installations have to be considered. This report takes into account fire and smoke spread in buildings generally and also the special problems with wooden buildings. In order to describe smoke and heat spread under the simultaneous use of low-pressure water-fog extinguishing systems, fire tests and fire extinguishing tests in a wooden test building within the Institute's fire hall are reported on. At the same time, the publication explains the difficulties of the numerical simulation of fire and fire extinguishing. Summary: People in a room in which a fire breaks out can only survive in this room if a prompt fire alarm is followed by swift fire fighting. This applies to sleeping persons in particular. In case there isn't a speedy operation of the fire brigade, the protection of persons and goods can only be ensured by the installation of fixed extinguishing systems. The use of fixed low-pressure water-fog extinguishing systems has proved to be rather effective.	
19. Keywords fire and smoke spread, structural fire protection, flashover, backdraft, fire gases, glazing, wood, wooden multi-storey buildings, natural insulation materials, fire detection system, sprinkler system, water-fog extinguishing system (low pressure), smoke and heat vent, numerical simulation of fires, fire tests and fire extinguishing tests	
20. Publisher Forschungsstelle für Brandschutztechnik	21. Price 64,-- EUR

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	1
2.	BRAND- UND RAUCHAUSBREITUNG IN GEBÄUDEN	2
2.1	Allgemeine Problematik.....	2
2.2	Spezielle Problematik beim Holzbau, insbesondere mehrgeschossig.....	7
3.	ANLAGENTECHNISCHE BRANDSCHUTZMAßNAHMEN	14
3.1	Brandmeldeanlagen	14
3.2	Ortsfeste automatische Wasserlöschanlagen.....	15
3.2.1	Sprinkleranlagen.....	15
3.2.2	Wassernebellöschanlagen.....	16
3.3	Rauch- und Wärmeabzug.....	17
4.	EINSATZ VON WASSERNEBELLÖSCHANLAGEN IN GEBÄUDEN	
	- BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN.....	21
5.	THEORETISCHE UNTERSUCHUNG DER WIRKPRINZIPIEN UND EINFLUßGRÖßEN BEI	
	WASSERNEBELLÖSCHANLAGEN IN GEBÄUDEN	21
6.	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	28
6.1	Versuchsaufbau und Meßtechnik	28
6.2	Kaltversuche	29
6.2.1	Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsmessungen.....	29
6.2.2	Messung der Wasserbeaufschlagung.....	31
6.2.3	Strömungsmessungen im Treppenraum.....	32
6.3	Brand- und Löschversuche.....	32
6.3.1	Feste Brandstoffe	35
6.3.2	Flüssige Brandstoffe	39
6.3.3	Feste und flüssige Brandstoffe	39
7.	AUSLEGUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DEN EINSATZ VON NIEDERDRUCK-WASSER-	
	NEBELLÖSCHANLAGEN IM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU	41
8.	ZUSAMMENFASSUNG	42
9.	LITERATURVERZEICHNIS	46
10.	TABELLEN	54
11.	BILDER	68

1. EINLEITUNG

Jährlich vernichten Feuer, Rauch, Ruß und Löschwasser Millionenwerte an Altbauten, denkmalgeschützten Gebäuden und Neubauten.

Auf die spezielle Problematik bei Altbauten und denkmalgeschützten Gebäuden wird bei **Kunkelmann [1]** näher eingegangen.

In den folgenden Untersuchungen werden die modernen Gebäude in Holzbauweise behandelt.

Der moderne mehrgeschossige Holzbau erlangt immer mehr an Bedeutung. Hochbauten in Deutschland und in Mitteleuropa werden gegenwärtig jedoch meistens in Massivbauweise aus Mauerwerk und Stahlbeton errichtet. Das entscheidende Hemmnis gegen die Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen war und ist der Brandschutz. Dies rührt aus verheerenden Stadtbränden in der Vergangenheit, z.B. dem Brand im August 1988 in der Altstadt von Lissabon, her. Der betroffene Stadtteil wurde, wie viele andere Stadtviertel Lissabons, 1755 von einem schweren Erdbeben zerstört. Beim Wiederaufbau verwendeten die Architekten besonders viel Holz, um die Gebäude erdbebensicher zu machen. Beim Brand standen mehr als 1000 Feuerwehrleute im Einsatz.

Neben diesen spezifischen Eigenschaften bei Gebäuden in und mit Holzbauweise werden in den letzten Jahren zunehmend Bauwerke mit großen Glasflächen unter Verwendung von Trag- und Rahmenkonstruktionen aus Stahl, Leichtmetallen, Holz und Kunststoff errichtet. Aus architektonischen Gründen sollen diese Materialien ihr ursprüngliches Erscheinungsbild beibehalten. Hierdurch ist eine brandschutztechnisch wirksame Verkleidung mit nicht-brennbaren Materialien nicht möglich.

Die vorliegenden Untersuchungen beleuchten, wie die Brandsicherheit von Gebäuden, unter besonderer Berücksichtigung des modernen mehrgeschossigen Holzbaus, erhöht werden kann und welche brandschutztechnischen Vorkehrungen zu treffen sind.

Neben der Brandausbreitung und der Brandbekämpfung am Brandort selbst werden hierbei

die Brand- und Rauchausbreitung in einen angrenzenden Treppenraum, die Auswirkungen der Brandbelastung auf Glasfassaden (hier: Holz-Glas-Fassden) sowie die Auswirkung der Brandgase und Sauerstoffkonzentrationen auf den menschlichen Organismus behandelt.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Risiken sind spezielle Maßnahmen erforderlich, um auch dafür die Aufgaben und Schutzziele des Brandschutzes zu erfüllen.

Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden außer durch den Projektträger des BMBF, dem Forschungszentrum Jülich, von der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH, München) und von den Mitgliedern des Arbeitsausschusses "Brandverhalten von Holz und Holzwerkstoffen" (AA-8) begleitet. Die Durchführung der Versuche wurde weiterhin von der Berufsfeuerwehr Karlsruhe, der Freiwilligen Feuerwehr Karlsruhe-Neureut sowie der Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg (Bruchsal) unterstützt.

Für Literaturrecherchen zur Problematik wurde die Fachdokumentation Brandschutzwesen der Forschungsstelle für Brandschutztechnik herangezogen.

Die Versuchsaufbauten und experimentellen Untersuchungen wurden von den Mitarbeitern der Forschungsstelle für Brandschutztechnik in der dort vorhandenen Brandversuchshalle durchgeführt.

2. BRAND- UND RAUCHAUSBREITUNG IN GEBÄUDEN

2.1 Allgemeine Problematik

Die Aufgaben und Schutzziele des Brandschutzes sind:

- Personenschutz (vorrangig): Schutz der Bewohner, Besucher, Beschäftigten und Rettungskräfte
- Sachschutz: Schutz der Sachgüter
- Nachbarschutz: Schutz der Nachbarn und deren Besitz
- Umweltschutz: Schutz natürlicher Lebensgrundlagen
- Kulturgutschutz: Schutz der wertvollen Kulturgüter

Die Brandsicherheit ist gegeben, wenn durch anlagentechnische und bauliche Maßnahmen

- die Ausbreitung von Feuer und Brandrauch weitgehend verhindert und
- die wirksame Rettung und Brandbekämpfung ermöglicht wird.

Bild 1 zeigt die vielfältigen Brand- und Rauchausbreitungsmöglichkeiten innerhalb und zwischen Gebäuden. Diese müssen im Brandschutzkonzept für ein Gebäude berücksichtigt werden.

Bei einem Brand in einem Raum ist ohne schnelle Alarmierung, ohne frühzeitige Löschmaßnahmen bzw. den schnellen Feuerwehreinsatz mit erheblichen Personen- und Sachschäden durch die schnelle Brand- aber vor allem Rauchausbreitung zu rechnen. Besonders schlafende Personen sind durch die entstehenden toxischen Brandgase sowie Sauerstoffmangel beträchtlich gefährdet.

Bild 2 zeigt einen Vollbrand in einem Wohnzimmer mit anschließendem Löscheinsatz durch die Feuerwehr in der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. **Bild 3** zeigt die Inneneinrichtung eines weiteren Wohnzimmerbrandes vor und nach dem Löscheinsatz der Feuerwehr (**Kunkelmann [2]**).

Ohne schnelle Brandbekämpfungsmaßnahmen besteht bei einem Raumbrand die Gefahr eines "Flashover" oder "Backdraft".

Ein Flashover tritt auf, wenn sich in einem Raum die Oberfläche des brennbaren Materials durch Wärmestrahlung aus den Flammen und aus der heißen Rauchgasschicht unterhalb der Decke soweit aufgeheizt hat, daß brennbare Dämpfe entstehen. Mit der im Raum vorhandenen Luft bilden diese ein zündfähiges Gemisch, das sich durch die vorhandenen Flammen oder durch andere Zündquellen entzündet. Nach dem Flashover brennt in der Regel das gesamte im Raum befindliche brennbare Material.

Im Gegensatz dazu tritt ein Backdraft auf, wenn brennbare Dämpfe, die im Brandbereich entstanden sind, aufgrund von Sauerstoffmangel und/oder starker Abkühlung (z.B. an kalten Wänden) nicht vollständig verbrennen konnten. Durch Einmischen von Frischluft (z.B. Öffnen einer Tür oder Zerstörung eines Fensters) und/oder einer zusätzlichen Zünd-

quelle können diese brennbaren Dämpfe wieder entzündet werden und verbrennen dann schlagartig. Als Zündquelle kommen die im Brandraum herrschende Temperatur, Bereiche mit Flammenbildung oder glimmende Bereiche in Betracht.

Wie reale Brände und die zahlreichen Brandversuche an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gezeigt haben, werden Personen im Brandraum in erster Linie durch die aus der Inneneinrichtung der Räume resultierende Brandlast und erst in zweiter Linie durch die Brandlast, die die Gebäudekonstruktion beinhaltet, gefährdet.

Gebäude weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Nutzung und Einrichtung zum Teil sehr große Brandlasten auf, die bis nahe an die Decken bzw. Außenwände reichen. Im Brandfall werden dadurch insbesondere unzureichend geschützte Bauteile, wie Glasfassaden, thermisch hoch belastet und bilden eine zusätzliche Gefahr für Personen in und außerhalb von Gebäuden.

Bisherige Untersuchungen über die Brand- und Rauchausbreitung bei Gebäuden mit Doppelfassaden als auch bei einschaligen Glasfassaden (Stahl-, Leichtmetall-, Holz- und Kunststoff-Tragkonstruktionen mit den entsprechenden Verglasungen) von **Kunkelmann [2, 3, 4]** haben gezeigt, daß ohne ortsfeste Löschanlage oder frühzeitigen Feuerwehreinsatz z.B. bei Ganzflächendoppelfassaden (siehe **Bild 4, 5** und **6**) mit einer sehr schnellen Brand- und Rauchausbreitung und einer Zerstörung der Verglasungen von Innen- und Außenfassade zu rechnen ist. Von entscheidender Bedeutung sind hierbei die sehr schnell erreichten und für den Menschen tödlich wirkenden Grenzkonzentrationen von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Sauerstoff (Versuch in **Bild 5**: unter 3 Minuten).

Weiterhin wird ohne frühzeitigen Löscheinsatz die Inneneinrichtung des Raumes vollständig zerstört. Bei einer Brandlast in Form einer gewöhnlichen Wohnzimmereinrichtung ergab sich in einem Versuch ein Flashover bereits nach 3 min. Die maximale Brandraumtemperatur betrug ca. 1.100°C nach 13 min. An der Außenfassade in 1,2 m Abstand von der Innenfassade traten Temperaturen von ca. 960°C nach 8 min auf. Bei der zur Bemessung von Bauteilen verwendeten Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK, siehe **Kordina, Meyer-Ottens [12]**) werden vergleichbare Temperaturen erst nach ca. 110 min (1.000°C) erreicht. Nicht-verbrannte Zersetzungsgase entzündeten sich bei dem durchgeführten Versuch mit Doppelfassade im Zwischenfassadenbereich. Bei Kastendoppelfassaden mit vertikalen und

horizontalen Aluminiumabschottungen schmolzen die Abschottungen selbst bei einer kleinen Brandlast von nur 166 kg nach ca. 17,5 min durch. Bei Kastendoppelfassaden mit vertikalen und horizontalen Stahlabschottungen (**Bild 6**) wurde festgestellt, daß zwar die Abschottungen der Brandbelastung standhielten, jedoch das Einscheiben-Sicherheitsglas seine Vorspannung verlor und vollflächig nach unten fiel. Passanten, Feuerwehreinsatz- und Rettungskräfte sind hierbei sowohl durch herabfallende große Verglasungsteile als auch durch Glaskrümel, evtl. aus großer Höhe, gefährdet.

Aufgrund des unterschiedlichen Bruchverhaltens von Verglasungen infolge verschiedener Glasarten, Glasdicken, Haltekonstruktionen der Scheiben und unterschiedlicher Aufheizbedingungen bei unterschiedlichen Brandbedingungen kann die Zerstörung einer Verglasung im allgemeinen nicht vorhergesagt bzw. numerisch simuliert werden.

Die Meßergebnisse bei diesen Untersuchungen haben gezeigt, daß die entstehenden Temperaturen weit über den zulässigen Temperaturen für normale Verglasungen wie Einfachglas (Floatglas), Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG) liegen.

Für Verglasungen gelten nach **VEGLA [5]** die folgenden maximalen Betriebstemperaturen:

- Einfachglas (Floatglas): maximal ± 40 K Temperaturunterschied in der Scheibenfläche (z.B. zwischen Scheibenmitte und Scheibenrand) bei üblichen Umgebungstemperaturen
- Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG): ca. 250°C, (kurzzeitig: 300°C), maximal 150 K Temperaturunterschied in der Scheibenfläche
- Verbund-Sicherheitsglas (VSG): maximale Dauertemperatur: ca. 60°C, (kurzzeitig: 80°C), maximal ± 40 K Temperaturunterschied in der Scheibenfläche

Brandschutzverglasungen sind hierbei gesondert zu betrachten.

Die Problemstellung der Zerstörung von Verglasungen bei Stahl- bzw. Leichtmetall-Glasfassaden im Brandfall kann direkt auch auf Gebäude mit Holz-Glas-Fassaden **[6]** angewendet

werden.

Aufgrund der an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bisher gewonnenen Erfahrungen mit dem sehr unterschiedlichen Verhalten von Gläsern im Brandfall in Verbindung mit den unzähligen Einflußgrößen bei der Brand- und Rauchausbreitung als auch dem zeitlichen Ablauf des Löscheinsatzes müssen für die brandschutztechnische Beurteilung dieser Gebäude geeignete Brandversuche durchgeführt werden. Dies steht im Einklang mit den Untersuchungen von **Kunkelmann [7]**.

Bei den Untersuchungen mit Doppelfassaden **[3]** wurde weiterhin festgestellt, daß die bei einem Vollbrand eines Wohnzimmers entstehende

Kohlendioxid-Konzentration von ca. 200.000 ppm und

Kohlenmonoxid-Konzentration von ca. 50.000 ppm (Meßbereich überschritten)

durch die frühzeitige Auslösung einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage auf eine

Kohlendioxid-Konzentration von ca. 21.000 - 35.000 ppm bzw.

Kohlenmonoxid-Konzentration von 1.500 - 4.100 ppm

reduziert wird.

Nach dem Handbuch der gefährlichen Güter von **Hommel [8]** ergeben sich folgende für den Menschen kritische Konzentrationen:

Kohlendioxid: Kurzzeiteinwirkung von 30.000 ppm: 300%ige Erhöhung der Atmung
120.000 -150.000 ppm: nach wenigen Minuten bewußtlos

Kohlenmonoxid: 800 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 45 Minuten
1.600 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 20 Minuten
3.200 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 5 -10 Minuten
Bewußtlosigkeit und Tod nach 20 Minuten
6.400 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 2 - 3 Minuten, Tod nach
10 -15 Minuten

Außerdem entstehen bei jedem Brand Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe und sonstige toxische Brandpyrolyseprodukte. Wie diese Brandgasbestandteile in ihrer Zusammenwirkung bei gleichzeitiger Einwirkung den menschlichen bzw. tierischen Organismus

schädigen ist hierbei noch nicht geklärt.

Durch den Einsatz einer Niederdruck-Wassernebellöschanlage (**Kunkelmann [3]**) ergab sich keine Gefährdung von Personen durch Sauerstoffmangel aufgrund des Brandes und der Löschanlage **[9, 10]**. Die Sauerstoffkonzentration lag nach Löschbeginn im Brandraum mit ca. 16 - 18,5 % O₂ über dem für den Stickeffekt erforderlichen Wert bei Löschgasen (z.B. bei CO₂ < 15 % O₂) sowie im Bereich bzw. über der O₂-Konzentration der Ausatemungsluft eines Menschen (16 - 17,5 % O₂) als auch wesentlich über dem Wert, bei dem die Sauerstoffmangelkrankheit auftritt (< 12 % O₂).

An den bisher an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Untersuchungen erkennt man, daß im Brandfall zur Erzielung eines ausreichenden Personen- und Sachschutzes bei den brandschutztechnischen Maßnahmen die Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe im Brandschutzkonzept berücksichtigt werden müssen. Im Brandfall kommt es ohne schnelle Brandbekämpfung nicht nur zum Aufheizen der Bauteile durch heiße Brandgase, sondern, wie die Untersuchungen von **Kunkelmann [1, 2, 3, 4, 7]** gezeigt haben, auch zum direkten Flammenkontakt. Die Flammenlängen betragen hier zum Teil mehrere Meter.

Gesetzlich wird der Brandschutz in Deutschland durch die Landesbauordnungen der Länder und die entsprechenden Normen und Richtlinien sowie durch die Musterbauordnung geregelt. Beispielsweise werden Gebäude in Gebäudeklassen (siehe **Bild 7**) entsprechend ihrer Höhen und Bauweisen eingeordnet. Die DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen" (siehe **Mayr [11]**) gibt zum Beispiel Auskunft über die verschiedenen Baustoffklassen (**Bild 8**) und Feuerwiderstandsklassen (**Bild 9**).

2.2 Spezielle Problematik beim Holzbau, insbesondere mehrgeschossig

Die Ausbreitung eines Feuers über Brandabschnitte hinaus wird durch entsprechend dimensionierte Holzbauteile genauso behindert wie durch Bauteile aus anderen Baustoffen gleicher Feuerwiderstandsdauer.

Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen können eine erstaunlich hohe Feuerwiderstandsfähigkeit besitzen, obwohl sie im Gegensatz zu Mauerwerk, Stahl oder Stahlbeton aus einem brennbaren Baustoff bestehen (siehe **Kordina, Meyer-Ottens [12, 13]**). Holz kann eine Feuerwiderstandsdauer von F-0 bis F-180 aufweisen. Sie ist abhängig von den Abmessungen und der Brandbeanspruchung des Bauteils. Je mehr Oberfläche dem Feuer ausgesetzt ist, desto größer ist der Abbrand. Somit wird die Feuerwiderstandsdauer verringert. Es wird in ein-, zwei-, drei- oder allseitige Brandbeanspruchung unterschieden.

Die Entzündungstemperatur und die Abbrandgeschwindigkeit von Holz hängen von der Erwärmungsdauer, dem Feuchtigkeitsgehalt, der Rohdichte, der Porenstruktur und dem Harzgehalt ab. Weiterhin entscheidend ist die spezifische Oberfläche sowie die eigentliche Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils, verbunden mit den evtl. auftretenden Schwindrisen. Die spontane Entzündung kleiner Holzproben tritt bei Temperaturen von ca. 350°C ein. Bei langanhaltender Erwärmung (> 20 Std.) kann eine Temperatur von 120°C schon zu einer Entzündung (Selbstentzündung) führen.

Weiterhin hat die Feuchte einen großen Einfluß auf die Entzündbarkeit des Holzes. Holz mit einem Feuchtegehalt < 20 % ergibt keine baupraktisch wertbare Schutzwirkung.

Die Abbrandgeschwindigkeiten bei Holzfeuchten < 20 % betragen z.B. für Buche: ca. 0,8 mm/min, Fichte: ca. 0,7 mm/min, Eiche: ca. 0,4 mm/min - 0,6 mm/min. Obwohl Buche eine höhere Rohdichte als Fichte hat, zeigt Buche eine höhere Abbrandgeschwindigkeit als Fichte. Dies ist auf die zerstreutporige Struktur und zahlreiche röhrenförmige Gefäße bei Buche zurückzuführen. Durch diese Röhren, ähnlich einem Kamin, werden die brennbaren Gase im Holz nach außen geleitet und können daher schnell abbrennen. Bei ringporigen Laubhölzern, z.B. Eiche, wird im Gegensatz dazu die thermische Zersetzung durch die Porenstruktur erschwert. Die Abnahme der Festigkeit bei den auftretenden Brandtemperaturen ist im Verhältnis zu anderen Werkstoffen geringer. Die verbleibenden Restquerschnitte der brandbeanspruchten Hölzer verfügen weiterhin über eine hohe Tragfähigkeit.

Holz verkohlt bei Brandeinwirkung an der Oberfläche. Die Wärmeleitfähigkeit von Holzkohle ist geringer als bei Holz. Die Holzkohleschicht bildet eine Schutzschicht, die den weiteren Abbrand des Holzes stark verzögert.

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Holzes bleibt die Festigkeit und Tragfähigkeit der Bauteile verhältnismäßig lange erhalten. Durch die geringe thermische Längenänderung des Holzes werden im Brandfall Zwangskräfte auf benachbarte Bauteile vermieden. Ein weiterer Vorteil ist der Erhalt der vollen Tragfähigkeit im unverbrannten Kern, z. B. von Stützen und Trägern aus Holz. Weiterhin kündigt Holz im Gegensatz zu Stahl im Brandfall durch ein charakteristisches Knistern den Zusammenbruch des Bauwerks an, was bei Lösch- und Rettungsarbeiten von lebenswichtiger Bedeutung sein kann.

Nach **Nutsch, W. et al. [14]** können vorbeugende Holzschutzmaßnahmen gegen Feuereinwirkungen werkstofftechnischer, konstruktiver und chemischer Art sein. Durch diese Schutzmaßnahmen soll die Gefahr der Entzündung und die Schnelligkeit der Verbrennung verringert werden. Hierbei ergeben sich folgende werkstofftechnischen und konstruktiven Maßnahmen:

- Mit zunehmender Rohdichte des Holzes nehmen die Zündung und die Abbrandgeschwindigkeit ab.
- Risse erleichtern den Austritt der Gase und begünstigen den Zutritt der Flammen und des Luftsauerstoffs in das Holzinnere. Außerdem vergrößern sie das Verhältnis von Holzoberfläche zu Holzvolumen. Es sollte deshalb rißfreies und wenig zur Rißbildung neigendes Holz verwendet werden.
- Glatte Holzoberflächen mit abgerundeten Ecken und Kanten verkleinern das Verhältnis von Holzoberfläche zu Holzvolumen und erschweren somit das Entflammen.
- Holzkonstruktionen sind um so widerstandsfähiger, je größer die Querschnitte der Holzteile sind.
- Großformatige Flächen und waagrecht angebrachte Verkleidungen bieten dem Feuer einen größeren Widerstand als kleine Flächen und senkrecht angebrachte Verkleidungen.
- Holzbauteile können durch nichtbrennbare Verkleidungen oder Ummantelungen wie durch Putze, Holzwolleleichtbauplatten und Gipskartonplatten wirksam geschützt werden. Dadurch wird das Holz allerdings verdeckt.

Bei chemischen Holzschutzmaßnahmen werden schaumschichtbildende Feuerschutzmittel, Feuerschutzsalze und Brandschutzplatten angewendet. Durch diese chemischen Schutzmittel wird das Holz lediglich schwerentflammbar, nicht unbrennbar. Die schaumschicht-

bildenden Feuerschutzmittel bestehen aus anorganischen und organischen Bestandteilen. Hierbei kommen u.a. duroplastische Kunststoffe und Ammoniumverbindungen zum Einsatz. Bei direkter Beflammung oder bei Wärmeeinwirkungen von etwa 200 °C wird bei der Zersetzung dieser Schicht eine 10 mm bis 30 mm dicke wärmedämmende, schwer brennbare, das Holz schützende Schaumschicht gebildet. Sie schützt das Holz vor Sauerstoffzutritt und durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit vor eindringender Wärme. Auf diese Weise wird die Zersetzungstemperatur des Holzes zu einem späteren Zeitpunkt erreicht und das Auftreten brennbarer Gase verzögert. Außerdem werden bei der Schaumbildung unbrennbare Gase frei, die sich mit den gasförmigen, brennbaren Zersetzungsprodukten des Holzes sowie mit der Luft vermischen. Diese Feuerschutzmittel dienen auch zum Schutz von Stahlbauteilen. Die Anwendung der Schaumschichtbildner beschränkt sich auf trockene Innenräume. Eine von Zeit zu Zeit auf die Schutzschicht einwirkende erhöhte Luftfeuchtigkeit ist unbedenklich, wenn die Schutzschicht durch eine besondere Lackschicht geschützt ist. Die Feuerschutzsalze bestehen vor allem aus Phosphaten, denen als Streckmittel Ammoniumsulfat und zur Erzielung einer fungiziden und insektiziden Wirkung bestimmte Salze zugesetzt werden. Feuerschutzsalze wirken im wesentlichen durch den Entzug von Wärme beim Schmelzvorgang, durch Bildung einer Schmelzschicht an der Holzoberfläche, durch Abspaltung von unbrennbaren Gasen sowie durch die Förderung der Holzkohlebildung. Während die schaumschichtbildenden Feuerschutzmittel an der Holzoberfläche wirksam sind, schützen die Feuerschutzsalze das Holz von innen. Sie müssen daher möglichst tief in das Holz eingebracht werden. Für das Einbringen von Feuerschutzsalzen in Vollholz ist aus diesem Grunde nur das Kesseldruckverfahren zugelassen. Dabei müssen die Holzbauteile fertig bearbeitet sein. Den Spänen schwerentflammbarer Spanplatten werden vor der Verleimung zum Teil Feuerschutzsalze untergemischt. Die Anwendung der Feuerschutzsalze ist auf trockene Innenräume beschränkt. Brandschutzplatten werden aus wasserhaltigem Natriumsilikat gebildet, das mittels Glasfasern oder eines Drahtnetzes zusammengehalten wird. Trotz dieses Aufbaus sind die Brandschutzplatten nichttragend. Sie müssen daher auf einer tragenden, vollflächigen Unterkonstruktion befestigt werden. Eine außen aufgebrachte Epoxidharzschicht dient zum Schutz der etwa 2 mm dicken weißgrauen oder schwarzen Natriumsilikatschicht. Ein Teil der Platten ist in die Klasse der nichtbrennbaren Baustoffe nach DIN 4102 eingeordnet. Sobald auf die Brandschutzplatte eine Wärme von 150 °C bis 250 °C einwirkt, schäumt die etwa 2 mm dicke Platte zu einer wärmedämmenden Schaumschicht von 12 mm bis 15 mm Dicke auf.

Sie bindet Wärme durch Wasserverdampfung, fördert die Holzkohlebildung und hält als Wärmedämmschicht die Wärme von der Holzoberfläche ab. Dadurch entstehen im Holz weniger brennbare Gase. In Fugen eingebaute Natriumsilikatschichten schäumen bei Wärmeeinwirkung auf und unterbinden auf diese Weise für einige Zeit den Flammen-, Rauch- und Wärmedurchtritt. Hierbei wird das Aufschäumen des Brandschutzplattenstreifens und damit die Schnelligkeit des Fugenverschlusses durch eingebaute Streifen aus Aluminium beschleunigt, wobei durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums das Fugenmaterial schnell aufgeheizt wird.

Zahlreiche Beispiele für Gebäude in Holzbauweise mit entsprechenden Konstruktionsrichtlinien finden sich in [15, 16, 17, 18, 19]. Über ökologische Baustoffe, einschließlich der verschiedenen Dämmstoffe, Anstriche, Farben und Oberflächenbehandlungen, gibt das Buch von **Bruckner** und **Schneider** [20] Auskunft. Die **Bilder 10 bis 13** zeigen einige Beispiele für Gebäude in Holzbauweise sowie ein Gebäude mit Holz-Glas-Fassade.

Die Brand- und Rauchausbreitung in andere Geschosse bzw. Wohneinheiten ist bei der Elementbauweise in Holz (z.B. Holzständerbauweise, Holzrahmenbauweise) nach **Wesche** [21] und **Kunkelmann** [22] kritischer zu bewerten, da über Hohlräume, brennbare Dämmungen und Fugen Ausbreitungswege vorgegeben werden. In höheren Gebäuden als Gebäude mit geringer Höhe (Gebäudehöhe > 7 m) muß dieses aufgrund des größeren Zeitaufwandes für die Personenrettung und die Brandbekämpfung besonders berücksichtigt werden. Bei der Ermittlung des Brandschadens ist außer den Schäden infolge der direkten Brandeinwirkung insbesondere auf tragende Teile der Gebäudekonstruktion auch die schädigende Wirkung des Löschwassers auf die gegen Feuchtigkeit empfindlichen Teile wie z.B. Dämmstoffe oder Gipskartonplatten zu berücksichtigen sowie die Möglichkeit, daß durch das Löschwasser brennbare Wärmedämmungen verdichtet werden können und damit Glutnester nicht mehr gelöscht werden können.

Becker und **Tichelmann** sowie **Hosser et al.** [23, 24] zeigen Maßnahmen zur Verbesserung des Brandverhaltens von Holzbauteilen auf. Mit verschiedenen Maßnahmen kann das Risiko der Brandweiterleitung über Holzbaustoffe reduziert werden. Neben den konstruktiven Maßnahmen zum Schutz des Holzes gegen Feuereinwirkung, beispielsweise durch Ummantelung mit Feuerschutzplatten, kommen auch chemische Verfahren zum Einsatz, um

die Entzündlichkeit herabzusetzen bzw. nach erfolgter Zündung die Feuerweiterleitung an der Oberfläche zu begrenzen. Die Wirkung solcher Feuerschutzmittel wird häufig überschätzt. Durch solche Beschichtungen ist keine Reduzierung der Brennbarkeit, sondern nur der Entflammbarkeit (Veränderung des Brandverhaltens des Baustoffs von B2 „normalentflammbar“ zu B1 - „schwerentflammbar“ nach DIN 4102) möglich. Der Feuerwiderstand tragender und auch raumabschließender Bauteile wird durch eine Oberflächenbehandlung mit chemischen Feuerschutzmitteln nicht erhöht. Schutzschichtbildende Mittel bedürfen eines Prüfzeichens. In dem zugehörigen Prüfbescheid ist festgelegt, wie und in welcher Menge diese Mittel aufgebracht werden müssen. Bei Wand- und Deckenkonstruktionen werden in der Regel die Bekleidungen, Beplankungen und Abdeckungen aus Holz, Holzwerkstoff oder Gipsbauplatten so angeordnet, daß sie zu einer Verbesserung der Feuerwiderstandsdauer beitragen.

Die baurechtliche Situation sieht bei der Errichtung von Gebäuden in Holzbauweise gegenwärtig so aus, daß der Einsatz von brennbaren feuerhemmenden Teilen F 30-B bei Tragkonstruktionen (Wände, Pfeiler, Stützen), Decken und Treppen, sowie in einigen Bundesländern auch bei Wänden notwendiger Treppenträume, im allgemeinen auf Gebäude geringer Höhe begrenzt ist. In allen anderen Fällen wird „feuerbeständig“, d.h. mindestens F 90-AB (in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen) verlangt. Seit einiger Zeit wird an einer neuen Musterbauordnung gearbeitet (Entwurfsstadium). Mit dem neuen Konzept verfolgt die Arbeitsgemeinschaft der für das Bau-, Wohnungs- und Siedlungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU) Gesichtspunkte wie Sicherung der Einheitlichkeit, Fortschreibung von Erleichterungen, Kostenreduzierung zur Wettbewerbsfähigkeit im europäischen Raum, Anpassung an europäische Klassensysteme und die weitere Förderung des Holzbaus. In der neuen Musterbauordnung wird der Holzbau voraussichtlich für Gebäude bis 13 m und 5 Geschosse (Fußbodenoberkante des letzten Geschosses über Gelände) möglich sein, wenn die Nutzungseinheiten pro Geschos nicht größer als 400 m² sind. Neben den bekannten B-, A- und AB-Bauteilen werden auch sogenannte BA-Bauteile zulässig sein (brennbare Bauteile mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen, z.B. F 60-BA oder F 90-BA). Weiterhin wird die Feuerwiderstandsklasse „feuerhemmend“ F 30-B durch die Feuerwiderstandsklasse „hochfeuerhemmend“ F 60-B ergänzt.

Eine ausführliche Bestandsaufnahme und Analyse von Bränden in Gebäuden in und mit Holzbauweise (Alt- und Neubauten) findet sich bei **Rupp [25]**.

Nach **Gräser [26]** mußten sich die Feuerwehren in den letzten Jahren zunehmend mit der Problematik der Freisetzung toxischer Brandgase bei Bränden im Zusammenhang mit Kunststoffen auseinandersetzen. Nicht nur die Dioxin- und Furanbildung, sondern auch das Entstehen von Blau-, Salz- und Flußsäure als Verbrennungsprodukte verschiedener Kunststoffe waren Gegenstand der Untersuchungen. Naturstoffe haben in der modernen Möbelindustrie sowie der Innenraumgestaltung heute einen festen Platz eingenommen. In der Arbeit werden Werkstoffe betrachtet, die als Naturprodukte pflanzlicher und tierischer Herkunft bei der Produktion von Einrichtungsgegenständen Anwendung finden. Pflanzliche Naturstoffe (Grundsubstanz: Cellulose) setzen sich hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff zusammen. Hierzu zählen Holz, Baumwolle, Flachs, Jute, Sisal, Kokos. Tierische Naturstoffe (Grundsubstanz: Faserproteine) bestehen hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Zu diesen Naturstoffen gehören Schafwolle, Leder, Seide und Federn (Daunen). Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, daß die wenigsten Naturstoffe in ihrer ursprünglichen Form zu finden sind. Sie sind durch Färbung, Veredelung oder Beschichtung behandelt oder mit synthetischen Materialien verbunden worden. Bei der Untersuchung der Verbrennungsprodukte wurde deutlich, daß die tierischen Naturprodukte außer CO , CO_2 und H_2O erhebliche Mengen toxischer Gase (Ammoniak, Blausäure (Cyanwasserstoff), Schwefeldioxid, nitrose Gase) bei ihrer Verbrennung freisetzen und damit verschiedenen Kunststoffen in keiner Weise nachstehen. Ursache für das Entstehen der toxischen Gase bei der Verbrennung ist der relativ hohe Stickstoffanteil. Pflanzliche Naturstoffe verbrennen zwar teilweise unter starker CO - und CO_2 -Bildung, hoch toxische Substanzen werden aber nur in sehr geringem Maße frei. Weiterhin entsteht bei der Verbrennung aller Naturstoffe Ruß als fester Bestandteil des Brandrauches. Auf die Verbrennungsprodukte von Verbundwerkstoffen oder Mischfasern konnte im Verlauf dieser Arbeit nicht eingegangen werden, da die Palette derer zu weitreichend ist und die Fachliteratur hierüber keine Aussagen macht. Gräser kommt zu dem Schluß, daß bei verstärkter Verwendung rein pflanzlicher Naturprodukte bei der Innenraumgestaltung im Brandfall eine Senkung der toxischen Konzentrationen an Stickstoff und schwefelhaltigen Verbindungen auftritt.

Weitere ausführliche Angaben zu Schadstoffen bei Bränden, Toxikologie der Schadstoffe, Maßnahmen der Einsatzkräfte bei Bränden sowie Maßnahmen nach Abschluss der Brandbekämpfung finden sich in der **vfdb-Richtlinie "Schadstoffe bei Bränden" [27]** sowie bei **Buff und Greim [28]** und **Föhl et al. [29]**.

3. ANLAGENTECHNISCHE BRANDSCHUTZMAßNAHMEN

3.1 Brandmeldeanlagen

Nach **Fischer [30]** ist primäres Ziel des entwickelten Brandrettungskonzeptes die Alarmierung und Information der von Bränden betroffenen Menschen und ihrer Helfer sowie die Sicherstellung der Selbstrettung.

- Schon in der Brandentstehungsphase (Schwelphase) bilden sich große Mengen hochtoxischer Rauchgase
- Rauchgase führen innerhalb weniger Minuten zu Bewußtlosigkeit und dann zum Tode
- Menschen werden häufig im Schlaf überrascht und unmittelbar bewußtlos
- in rauchgefüllten Räumen ist die Orientierung nahezu unmöglich

Die betroffenen Menschen müssen daher frühestmöglich gewarnt werden. Es muß ihnen technische Unterstützung zur Selbstrettung gegeben werden. Ohne frühzeitige Brandentdeckung kommt die Feuerwehr für die Menschenrettung häufig zu spät.

Daraus ergeben sich folgende Schutzziele:

- Brandentdeckung und Bekämpfung von Bränden in der Entstehungsphase
- Schnelle Alarmierung und Information der betroffenen Menschen
- Schnelle Alarmierung der Feuerwehr und/oder anderer hilfeleistender Stellen
- Eindeutiges Lokalisieren des Gefahrenbereiches
- Gute Orientierungsmöglichkeiten für Flüchtende und Einsatzkräfte
- Verringerung der Gesundheitsgefahren durch rauchfreie Rettungswege
- Aktiver Umweltschutz durch Minimierung von Rauchniederschlag und kontaminiertem Löschwasser

Zentrales Element des Brandrettungskonzepts ist die Brandmeldeanlage. Sie erkennt den Brand, alarmiert, informiert und steuert die übrigen Anlagen und Funktionen des gesamten Konzepts, die selbstverständlich in ihren sonstigen Funktionen auch getrennt angesteuert werden können. Einige Anlagen müssen aus brandschutztechnischen Gründen darüber hinaus zusätzlich auch manuell angesteuert werden können. Bei der Betrachtung des Brandrettungskonzepts muß zwischen öffentlichen Gebäuden und Privatwohnungen unterschieden werden. Was sich in Großprojekten sehr gut bewährt hat, wird in privaten Bereichen oft nicht ernst genommen, wie z.B. der Einbau von Brandmeldern. In Deutschland sind weniger als 3% der Haushalte mit Brandmeldern ausgestattet. Doch gerade im privaten Bereich kommen die meisten Menschen ums Leben. In den USA und Kanada sind Brandmelder vom Gesetzgeber vorgeschrieben. 80 % der Haushalte sind mit Brandmeldern ausgerüstet; die Zahl der Todesopfer ist seit der Einführung der Brandmelder um 45 % zurückgegangen. In Großbritannien und Skandinavien haben mehr als 50 % der Haushalte einen Brandmelder. In Norwegen ist es seit 1990 Pflicht, in jedem Haushalt einen Brandmelder zu installieren. Dort schätzt man, daß durch diese Maßnahme jede Woche ein Menschenleben gerettet wird. Diese sogenannten Haushaltsbrandmelder sind aber nicht vergleichbar mit den automatischen Brandmeldeanlagen, welche in öffentlichen Gebäuden und in der Industrie eingesetzt werden (z.B. keine Alarmweiterleitung zu einer hilfeleistenden Stelle außerhalb der Wohnung oder Ansteuerung von stationären Löschanlagen).

3.2 Ortsfeste automatische Wasserlöschanlagen

Nachfolgend soll die Wirkungsweise von Sprinkler- und Wassernebellöschanlagen als Hauptvertreter von ortsfesten Wasserlöschanlagen erläutert werden, die eine Brandausbreitung verhindern und damit auch die Entstehung von Brandrauch begrenzen. Ihr Einsatz ist jedoch auf die Brände begrenzt, die mit Wasser gelöscht werden dürfen.

3.2.1 Sprinkleranlagen

Eine Sprinkleranlage ist eine ständig betriebsbereite, selbsttätige, ortsfeste Feuerlöschanlage, deren Löschwasser über Sprinkler abgegeben wird. Sprinkler sind durch thermische

Auslöseelemente verschlossene Düsen mit einem Sprühteller (Deflektor), von denen jeder unabhängig von den anderen auslösen kann. Der Löscheffekt beruht hauptsächlich auf der Kühlwirkung der größeren Wassertropfen (mittlere Tropfendurchmesser: ca. 300 μm bis 1200 μm) auf der brennenden Oberfläche des Brandstoffes. Sprinkleranlagen arbeiten hier vorwiegend im Niederdruckbereich.

Ziel einer Sprinkleranlage ist es, einen Brand selbständig zu entdecken, Alarm auszulösen und das Schadenfeuer bis zum Eintreffen der Feuerwehr unter Kontrolle zu halten oder günstigstenfalls zu löschen. Sprinkleranlagen sollen Entstehungsbrände bekämpfen und auf ihren Entstehungsherd begrenzen. Weitere Ausführungen zu Sprinkleranlagen finden sich bei **Kunkelmann [1, 31]**.

3.2.2 Wassernebellöschanlagen

Ortsfeste Wassernebellöschanlagen sind Sprühwasser-Feuerlöschanlagen, die im Dauer- oder Intervallbetrieb Wasser in fein verteilter Form versprühen. Die mittleren Tropfendurchmesser liegen bei der in dieser Untersuchung eingesetzten Niederdruck-Wassernebellöschanlage unter 21 μm (Sauter-Durchmesser D_{32} , Definition: siehe **Kunkelmann [7]**). Ausführliche Angaben zu Anlagentypen, Löschmechanismen, bisher durchgeführten Brandversuchen und Normungstätigkeit etc. finden sich bei **Kunkelmann [3]**.

Im Gegensatz zu konventionellen Sprinkleranlagen, deren Löscheffekt hauptsächlich auf der Kühlwirkung der größeren Wassertropfen auf der brennenden Oberfläche des Brandstoffes beruht, weisen Wassernebellöschanlagen folgende Löscheffekte auf :

- Kühlwirkung durch Verdampfung in der Reaktionszone und an der Grenzfläche Flammensäule/Brandgasströmung
- Ausbildung einer lokalen Inertisierung (Sauerstoffverdrängung) am Brandherd infolge Verdampfung und einer entsprechenden Teilchendichte an Wassertropfen
- Verdünnung der Reaktionszone durch Verdampfung
- Heterogene Inhibition in der Mischungszone der Flamme durch die Erzeugung eines Wandeffektes mit einem Löschmittelstrahl entsprechender Tropfendichte durch Energieentzug. Dies führt zu Kettenabbruchreaktionen und zum Verlöschen der Flamme

- Verminderung der Strahlungswärmerückkopplung durch Sedimentation der Wassertropfen in der Verbrennungszone oder durch Erreichen des Trenneffektes

Bei Wassernebellöschanlagen unterteilt man in Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen. Niederdruck-Wassernebellöschanlagen weisen speziell den Vorteil auf, daß diese in das Hauswasserleitungsnetz integriert werden können, falls die Anforderungen für die Wasserversorgung der Löschanlage im Brandfall gewährleistet sind.

Die Wassernebellöschanlage weist aufgrund ihres gegenüber Sprinkleranlagen abweichenden Löschrinzips auch ohne Löschmittelzusätze Vorteile bei der Löschwirkung auf Flammenbrände, insbesondere bei flüssigen Brandstoffen und Kunststoffen, bei gleichzeitig niedrigem Löschwasserverbrauch auf.

Die Anlagen können über alle Arten von vorzugsweise schnellen Auslöseelementen wie Glasfaß, Brandmelder etc. ausgelöst werden. Hierbei ist die Auslösung von Einzelsprühköpfen als auch die Gruppenauslösung von mehreren an Sprührohren angeordneten Sprühköpfen möglich.

3.3 Rauch- und Wärmeabzug

Nach **John [32]** breitet sich der durch einen Brand in einem Gebäude entstehende Rauch im ganzen Gebäude aus, wenn keine besonderen Schutzmaßnahmen getroffen werden. Dieser Brandrauch stellt die größte Gefahr für Personen dar. Nahezu alle Todesfälle bei Gebäudebränden sind durch die Einwirkung des Brandrauches hervorgerufen worden.

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

Brandbekämpfung in das Gebäude eindringen müssen.

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

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

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

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

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

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

In den vorliegenden Untersuchungen wird zur Beurteilung der optischen Brandrauchdichte der Extinktionskoeffizient $\sigma(\lambda)$ herangezogen. Dieser beschreibt im vorliegenden Fall die Schwächung der Intensität eines Lichtstrahles durch Brandrauch. Als Meßgerät diente bei den vorliegenden Untersuchungen ein Maurer-Lichtmeßgerät zur Messung des zeitlichen Verlaufes der Leuchtdichte $I(t)$ in cd/m^2 . Dieses besteht aus einem Meßlichtgeber und Meßlichtempfänger, die im Abstand x voneinander entfernt sind. (siehe **Bild 15.5**).

Der Extinktionskoeffizient ergibt sich aus der Beziehung:

$$\sigma(\lambda) = 1/x * \ln (I(t=0) / I(t)) \quad [\text{m}^{-1}]$$

Es hat sich gezeigt, daß der zulässige Extinktionskoeffizient σ_{zul} für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind und nicht mit den Örtlichkeiten vertraut sind (Allgemeinheit)

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

beträgt. Da in den Untersuchungen ab diesem Grenzwert bei der Verschwelung von Holz der Pulsschlag anstieg und das Konzentrationsvermögen nachließ, ist dies als Maximalwert anzusehen, auch wenn bezüglich der Sichtverhältnisse im Einzelfall höhere optische Brandrauchdichten zulässig wären.

Weitere ausführliche Angaben über die chemische Zusammensetzung des Brandrauches, Art und Größe der Rauchpartikel, maximal zulässigen Brandrauchkonzentrationen, Verdünnung des Brandrauches etc. finden sich bei **John [32]**.

Die Aufgabe von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) besteht nach **John [33]** darin, im Brandfall Rauch und Wärme abzuführen und damit dazu beizutragen,

- Rettungs- und Angriffswege rauchfrei zu halten,
- die Brandbekämpfung durch Schaffung einer rauchfreien Schicht zu erleichtern,
- den Flashover und damit den Vollbrand zu verzögern bzw. zu vermeiden,
- Einrichtungen zu schützen,
- Brandfolgeschäden durch Brandgase und thermische Zersetzungsprodukte herabzusetzen sowie
- die Brandbeanspruchung der Bauteile zu vermindern.

Die Wirksamkeit von RWA beruht darauf, daß sich der bei einem Brand in einem Raum über dem Brandherd aufsteigende Brandrauch durch Einmischen von Raumluft abkühlt. Dieses Brandrauch-Luftgemisch sammelt sich unterhalb der Decke. Da diese Schicht eine höhere Temperatur als die der Umgebungsluft besitzt, ergibt sich eine Druckdifferenz gegenüber der freien Umgebung. Ist die Decke des Brandraumes gleichzeitig das Dach des Gebäudes, so kann durch Öffnungen in der Decke, die in diesem Fall das Dach ist, ein Teil des Brandrauch-Luftgemisches abströmen, wenn gleichzeitig durch Öffnungen unterhalb der Schicht des Brandrauch-Luftgemisches Frischluft in den Raum einströmt. Eine RWA besteht daher nicht nur aus den Öffnungen für die Abfuhr der Abgase, sondern auch aus Zuluftöffnungen.

Die Verhältnisse im Brandraum bezüglich der Temperatur des Brandrauch-Luftgemisches unterhalb der Decke sowie die Höhe, in der sich die untere Begrenzung des Brandrauch-Luftgemisches befindet, sind, wenn die Abgase durch den thermischen Auftrieb abgeführt werden, von der Gesamthöhe des Raumes, den Querschnitten der Öffnungen im Dach und im unteren Teil des Raumes sowie von dem beim Brand freigesetzten Wärmestrom abhängig.

Eine rauchfreie Zone sowie die Abkühlung des aufsteigenden Brandrauches wird nur dann erreicht, wenn die entsprechenden Zuluft- und Abgasvolumenströme kontinuierlich aufrechterhalten werden. Dies ist durch mechanisch betriebene Lüftungsanlagen als auch unter Ausnutzung der entstehenden thermischen Druckdifferenz (natürlicher Rauch- und Wärmeabzug) möglich. Eine thermische Druckdifferenz zwischen Brandraum und freier Umgebung entsteht, sobald sich eine Schicht aus heißem Brandrauch-Luftgemisch unterhalb der Decke ansammelt. Reicht die thermische Druckdifferenz zur Rauchabführung nicht aus, muß ein mechanisches Lüftungssystem den fehlenden Druckverlust aufbringen. Bei der Auslegung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen sind z.B. auch der Windeinfluß auf offene Fenster und Balkontüren sowie die Temperaturverhältnisse am Tag und in der Nacht im Sommer und im Winter zu berücksichtigen. Weiterhin ist die Wechselwirkung von RWA mit gleichzeitig betriebener Sprinkler- oder Wassernebellöschanlage von Bedeutung (siehe **Föhl [34]**).

Nach § 32 der Musterbauordnung muß in Gebäuden mit mehr als fünf oberirdischen

Geschossen sowie bei innenliegenden notwendigen Treppenräumen an der obersten Stelle eines notwendigen Treppenraumes ein Rauchabzug vorhanden sein. Der Rauchabzug muß eine Rauchabzugsöffnung mit einem Querschnitt von mindestens 5 % der Grundfläche, mindestens jedoch von 1 m² haben. Dieser muß weiterhin vom Erdgeschoß und vom obersten Treppenabsatz aus bedient werden können. Ausnahmen können gestattet werden, wenn der Rauch auf andere Weise abgeführt werden kann.

Weiterhin beträgt die Spülluftmenge für einen innenliegenden Treppenraum 10.000 m³/h im Normzustand.

4. EINSATZ VON WASSERNEBELLÖSCHANLAGEN IN GEBÄUDEN

- BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN

Bei der Bewertung der internationalen Untersuchungen wurde festgestellt, daß derzeit keine allgemein zugängliche Literatur über den Einsatz von Wassernebellöschanlagen in Gebäuden außer den Untersuchungen bei der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (Einsatz in Lagergebäuden [3], Altwohngebäude und denkmalgeschützte Gebäude [1], Gebäude mit Doppelfassaden [3] und Stahl-Glasfassaden [2]) vorliegen.

5. THEORETISCHE UNTERSUCHUNG DER WIRKPRINZIPIEN UND EINFLUßGRÖßEN BEI WASSERNEBELLÖSCHANLAGEN IN GEBÄUDEN

Die Untersuchungen von **Kunkelmann** und **Schatz** [7, 31, 36, 37, 38, 39, 40] haben ergeben, daß sehr komplexe Wechselwirkungen innerhalb des Systems Wassertropfenschwamm/Brand/Umgebung ablaufen. Literatúrauswertungen haben gezeigt, daß diese Wechselwirkungen in den gegenwärtig verfügbaren Berechnungsmodellen nur zum Teil oder nur qualitativ erfaßt werden. Während des Löschvorgangs laufen dreidimensionale instationäre Wärme-, Stoff- und Impulstransportprozesse zwischen den Wassertropfen und der kontinuierlichen Phase, dem Rauchgas/Luftgemisch, ab. Durch den Zerstäubungsvorgang wird ein Tropfenspektrum erzeugt, das durch einen mittleren Tropfendurchmesser nur

bedingt beschrieben werden kann. Dieses Tropfenspektrum ändert sich während des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches mit der Rauchgasströmung. Weiterhin ist der Tropfenschwarm nicht durch eine konstante Geschwindigkeit gekennzeichnet, sondern weist eine Geschwindigkeitsverteilung auf. Innerhalb des Tropfenschwarmes ergeben sich Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Tropfen (z.B. Vereinigung und Zerteilung von Tropfen), die bisher quantitativ noch nicht untersucht worden sind. Hier sei besonders der Impulsaustausch beim Zusammenstoß erwähnt. Durch das Einsprühen kommt es zu einer mehr oder weniger starken Beeinflussung der Rauchgasströmung, welche wiederum eine Rückwirkung auf den Sprühnebel hat. Die hierdurch hervorgerufene Änderung der Relativgeschwindigkeit hat einen Einfluß auf die jeweiligen Kennzahlen des Wärme-, Stoff- und Impulstransportes. Die Verdunstung und die Verdampfung der Wassertropfen erhöhen die Feuchtigkeit der umgebenden Luft bzw. des Rauchgases. Dieses hat ebenfalls einen Einfluß auf die Wärme-, Stoff- und Impulsbilanzen, u.a. durch Änderung des Konzentrationsgradienten zwischen Tropfen und Umgebung sowie durch die Veränderung der Stoffwerte, vor allem auf der Gasseite. Je nach Rauchgastemperatur wird der entstehende Dampf mehr oder weniger stark überhitzt. Dieser überhitzte Dampf trägt neben dem Rauchgas zur Aufheizung der Tropfen und des noch nicht überhitzten Dampfes und der kälteren Luft bei. Die Ventilationsbedingungen im Raum, z.B. Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, offene Türen und Fenster, haben ebenfalls einen erheblichen Einfluß auf das System Wassertropfenschwarm/Brand/Umgebung.

Weitere Einflußgrößen sind die Ansaugung von Umgebungsluft durch den Brand und durch den Tropfenschwarm, die Einflußgrößen der Brandlast (Masse, Brennbarkeit, Heizwert, Zündverhalten, thermische Stoffgrößen, Stapelabstände, Stapelhöhen, Zündquelle etc.) sowie die Kenngrößen, Betriebsparameter, Anzahl, Anordnung und Auslöseverhalten der Löschdüsen.

In den experimentellen Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik wurde weiterhin festgestellt, daß eine erhebliche Streubreite der Versuchsergebnisse bei den Brand- und Löschversuchen auftritt. Hierfür sind zum einen die unterschiedlichen Versuchskonfigurationen verantwortlich, zum anderen können bei identischem Versuchsaufbau die Meßwerte, z.B. aufgrund unterschiedlicher Umgebungsbedingungen wie schwankende Feuchtigkeitsgehalte und Temperaturen von Luft und Brandlast sowie

unterschiedliche Ventilationsbedingungen, zu diesen Abweichungen führen. Numerische Beschreibungen des Brand- und Löschablaufs scheitern zum Teil daran, daß die dafür wesentlichen Vorgaben nicht bekannt sind, da Probleme bezüglich der meßtechnischen Erfassung von wichtigen Brandkenngößen vorliegen. Die physikalisch/chemischen Größen sind zum Teil nur mit unzureichender Meßgenauigkeit bzw. gegenwärtig überhaupt nicht meßtechnisch erfaßbar, wie z.B. Tropfengrößenmessungen oder die Bestimmung des Tropfengehaltes und der Feuchtigkeit in einer Brandgasströmung bzw. Flamme, die Bestimmung von Sauerstoffkonzentrationsgradienten innerhalb des Gebäudes, z.B. durch den Einfluß des Sprühnebels bei einem realen Brand, oder die Bestimmung der Luftansaugung durch den Brand und den Sprinklersprühnebel durch Zwischenräume (z.B. bei Treppenträumen mit Treppen mit und ohne Setzstufen, siehe **Kunkelmann [1]**). 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.

Friedman [41] hat zum Thema Rechenmodelle eine Arbeit veröffentlicht, die die Möglichkeiten und Grenzen einer numerischen Simulation des Systems Brand/Löschanlage aufzeigt. Er gibt eine Zusammenstellung von 62 Programmen aus 10 Ländern zur Simulation der Brandbekämpfung. Hierbei kann man unterscheiden zwischen Raumbrandmodellen, Brand/Sprinkler-Modellen sowie Unterprogrammen zur Berücksichtigung der Brandbelastung von Bauteilen, der Evakuierung von Gebäuden, des Auslöseverhaltens von Brandmeldern, der Brandausbreitung auf einer Wand und der Rauchausbreitung. Die Rohrnetz-berechnung bei Sprinklern wurde nicht in die Betrachtung mit eingeschlossen. Eine große Anzahl der Programme ist auf Personal Computern lauffähig. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Zonenmodelle. Weiterhin werden Feldmodelle aufgeführt. Ein Feldmodell ist 2- oder 3-dimensional und unterteilt den interessierenden Raum in eine große Anzahl von Elementen. Abgesehen von sehr vereinfachten Modellen erfordern Feldmodelle Rechner, die die Leistungsfähigkeit eines PC um ein Vielfaches überschreiten. Zum Teil sind hier erst die schnellsten verfügbaren Rechner sinnvoll. Ein Zonenmodell wird meistens eindimensional behandelt und unterteilt den interessierenden Raum in mehrere Zonen. Der Hauptvorteil eines Feldmodells gegenüber einem Zonenmodell ist, daß bei ersterem die Berechnung des Strömungsfeldes möglich ist. Der Hauptvorteil eines Zonenmodells liegt darin, daß durch dessen relative Einfachheit die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen im Rahmen

vertretbarer Rechenzeiten möglich ist. Des Weiteren lassen sich Zonenmodelle leichter in anderen Programmen integrieren als Feldmodelle. Bei allen Programmen ist eine genaue Kenntnis der Wärmefreisetzung des Brandes zur Festlegung der Anfangsbedingungen erforderlich. Gegenwärtig sind weder Feld- noch Zonenmodelle in der Lage, gewisse Merkmale von Bränden im Zusammenhang mit dem Verbrennungsprozeß und den Turbulenzerscheinungen hinreichend zu beschreiben. Es werden 3 Modelle aufgeführt, die sich mit den Wechselwirkungen von Sprinklern mit einem Brand beschäftigen. Friedman kommt zu dem Urteil, daß diese Programme die Problematik sehr vereinfacht darstellen. Keines dieser Programme behandelt in hinreichender Form die Wechselwirkungen der aufsteigenden Gase im turbulenten Rauchgas-/Flammenbereich eines Brandes mit herabfallenden Wassertropfen bei gleichzeitiger Lufteinsaugung. Das Ziel hierbei ist, die kritischen Bedingungen, unter denen die Tropfen den Rauchgas-/Flammenbereich durchdringen und den Brandherd erreichen können, zu bestimmen. Bei der Entwicklung von Raumbrandmodellen gilt es bezüglich der für die Berechnungen erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen folgendes zu beachten: Die Geometrie des Brandraumes sowie der Einfluß von und auf angrenzende Räume ist von großer Bedeutung. Falls es sich um einen unregelmäßigen Raum, z.B. mit gewölbter Decke, mit langem Gang mit und ohne Krümmung oder mit offenem Treppenhaus handelt, kann dieses durch ein Feldmodell besser beschrieben werden als durch ein Zonenmodell. Für die begrenzenden Flächen, wie Wände oder Decken müssen hierbei die thermodynamischen Eigenschaften bekannt sein. Weiterhin müssen der Ort des Brandherdes bzw. der Brandherde im Raum sowie die Ventilationsbedingungen spezifiziert werden. Dieses hat einen erheblichen Einfluß auf die Brandausbreitung. Neben dem Raum ist die Beschreibung des Brandes von entscheidender Bedeutung. Hierbei bestehen die Möglichkeiten, daß im einfachsten Fall ein Brand definierter Größe zu einer bestimmten Zeit beginnt und eine vorgegebene Zeit bei einer konstanten Wärmefreisetzung andauert. Hierbei ist die Kenntnis des stöchiometrischen Brennstoff/Luftverhältnisses und der entstehenden Brandgasmenge wichtig. Die nächste Stufe ist die Eingabe der Wärmefreisetzung als Funktion der Zeit. Realistischer ist jedoch der Fall, wenn der Abbrand gemäß der Verminderung des Sauerstoffgehaltes in der Umgebung des Brandes gesteuert wird. Hierbei spielt das Absenken der Rauchgasschicht und die Mischung der eingesaugten Luft mit den Brandgasen eine wichtige Rolle. Im Realfall wechselt der Brand bei hinreichender Sauerstoffreduzierung vom Flammen- zum Schmelbrand. Dies hat einen viel geringeren Sauerstoffbedarf zur Folge, so daß der Sauerstoffgehalt in der

Luft wieder ansteigt und wieder ein Flammenbrand entstehen kann. Dieser Vorgang kann von einem Computer nur dann hinreichend beschrieben werden, wenn die Kriterien für den Übergang vom einen zum anderen Zustand rechnerisch berücksichtigt werden. Durch die Mischung der Verbrennungsprodukte mit der Luft wird die Temperatur der Luft erhöht, was wiederum einen Einfluß auf die Abbrandgeschwindigkeit hat. Die Wärmerückstrahlung des Raumes auf die brennende Oberfläche, z.B. von der heißen Rauchsicht, der Decke, den Wänden und den Flammen selbst, haben ebenfalls einen Einfluß auf die Brandausbreitung.

Bei der numerischen Simulation bestehen folgende Ungenauigkeiten:

- Die Wärmestrahlung hängt von der 4. Potenz der Temperatur ab. Hierdurch ergeben kleine Fehler bei der Berechnung der Temperatur der heißen Rauchgase oder der Decke und Wände große Fehler bei der Berechnung der Wärmestrahlung.
- Die Temperatur der oberen heißen Rauchgasschicht ist stark von der vom Brand angesaugten Luft und den Wärmeverlusten an die Decke abhängig. Keiner dieser Parameter kann mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Dies trifft besonders auf das Zonenmodell zu.
- Der Rauch emittiert nicht nur, sondern absorbiert und streut auch die Wärmestrahlung. Der kältere Rauch unterhalb des heißen Rauches beeinflusst die von oben kommende Strahlung.
- Die Berücksichtigung der Winkelverhältnisse zwischen den Strahlungsquellen und Strahlungsempfängern erfordert einen erheblichen mathematischen Aufwand.
- Die Strahlungseigenschaften vom Rauch, den Flammen, der Decke und sonstigen Flächen müssen bekannt sein.
- Einfache Zonenmodelle berücksichtigen nicht, daß der Bereich direkt über dem Brand viel wärmer als die weiter entfernten Bereiche, besonders bei großen Räumen, ist. Feldmodelle sind hierzu prinzipiell in der Lage, jedoch besteht hierbei die Komplexität, daß jedes der Vielzahl von Elementen Strahlung mit den übrigen Elementen austauschen kann. Aus diesen Gründen ist die korrekte Beschreibung der Vergrößerung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit durch den Strahlungseinfluß sehr schwierig. Neben der Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit aus Großbrandversuchen besteht die Möglichkeit, aus Kleinbrandversuchen Kenntnisse über die Eigenschaften der Brandstoffe zu gewinnen, z.B. Zündzeitpunkt, Flammenausbreitungsgeschwindigkeit und Abbrandgeschwindigkeit bei kleinen Probekörpern als Funktion der Wärmestrahlung und des Sauer-

stoffgehaltes. Hieraus kann dann mit einem halbempirischen Modell auf einen größeren Maßstab hochgerechnet werden. Auch kann mit diesen Basisdaten ein wissenschaftliches Modell im Gegensatz zu einem empirischen für die Beschreibung eines Raumbrandes im Großmaßstab entwickelt werden.

Es müssen z.B. folgende zusätzliche Kenngrößen für die nach oben gerichtete Flammenausbreitung auf einer verkohlenden Oberfläche bekannt sein:

- Zündquelle (Intensität, Größe, Dauer)
- Wärmeleitfähigkeit, Dichte und Wärmekapazität des unverbrannten und des verkohlten Brandstoffes
- Oberflächentemperatur der pyrolysierenden Oberfläche
- Reflexion der Oberfläche
- Verdampfungswärme
- Verbrennungswärme der Pyrolysegase
- Effektivität der Verbrennung
- Strahlungswärme der Flammen
- stöchiometrisches Luft/Brandstoff-Verhältnis
- Anteil der giftigen und korrosiven Gase in den Verbrennungsprodukten

Weiterhin müssen die unterschiedlichen Verbrennungswärmen beim verkohlten Stoff und bei den Pyrolysegasen berücksichtigt werden. Große Unterschiede ergeben sich auch bezüglich des Abbrandverhaltens von aus mehreren Stoffen zusammengesetzter Brandlast. Hieraus ergibt sich, daß die Abbrandgeschwindigkeit als eine Anfangs- und Randbedingung für die numerische Simulation der am schwierigsten zu bestimmende Faktor in einem Modell ist.

Wichtig für die numerische Simulation ist auch die Kenntnis folgender Einflußfaktoren:

- Bildung von Kohlenmonoxid bei unvollständiger Verbrennung
- Luftansaugung durch den Brand
- Vermischung der heißen und kalten Luftschichten
- Wärmeverluste an die Decke mit zunehmendem Abstand von der Brandherdachse
- Zerbersten von Fenstern während des Brandes
- Rauchbewegung bei unterschiedlicher Raumform
- Strömung durch Belüftungsöffnungen
- Zündbedingungen für brennstoffreiche Verbrennungsprodukte beim Kontakt mit Frischluft

- Wirkung der Verbrennungsprodukte auf Menschen

Die Modelle liefern u.a. folgende Werte als Funktion der Zeit:

- Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Positionen
- Konzentration des Rauches, des Sauerstoffes und giftiger bzw. korrosiver Gaskomponenten an verschiedenen Positionen
- Thermische Belastung von Bauteilen
- Auslösezeiten von Sprinklern und Brandmeldern bzw. Effektivität dieser Anlagen
- Auslegung von Fluchtwegen

Friedman [41] kommt zu dem Schluß, daß ein Modell einen realen Brand aus fünf möglichen Gründen nicht vollständig beschreiben kann :

1. Die im Modell verwendeten Idealisierungen und Vereinfachungen weichen beträchtlich von der Realität ab.
2. Die Eingabeparameter sind nicht exakt.
3. Keine korrekten Näherungswerte für Koeffizienten innerhalb des Programmes.
4. Fehlerhafte Berechnung von Werten infolge zu großer Zeitschritte bzw. zu großer Maschenweite beim Finite Elemente-Verfahren oder mathematischer Instabilitäten.
5. Fehlerhafte oder nicht reproduzierbare Meßwerte aus experimentellen Untersuchungen.

Um die Gültigkeit eines Modelles zu überprüfen, ist der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Ergebnissen aus Brandversuchen erforderlich. Hierdurch ist es möglich, ein Modell in Übereinstimmung mit den Meßwerten zu bringen. Gleichzeitig ergibt sich jedoch die Frage, ob das Modell unter anderen Bedingungen weiterhin seine Gültigkeit behält. Ein Modell ist dann überzeugend, wenn es für eine große Anzahl von Brandversuchen unter den unterschiedlichsten Randbedingungen und dem geringsten Aufwand für die Anpassung zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Jedoch ist es riskant, die überprüften Randbedingungen sehr stark zu modifizieren. Wichtig ist hierbei, durch eine Fehlerabschätzung die Abweichung der Rechenergebnisse von den Versuchsergebnissen zu kennen und zu wissen, unter welchen Randbedingungen die größten Fehler auftreten.

6. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Versuchsaufbau und Meßtechnik

Zur Durchführung der Brand- und Löschversuche wurde ein Versuchsholzgebäude mit Brand- und Treppenraum in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gemäß der Konstruktionszeichnung in **Bild 14** errichtet. Zum Nachbau eines modernen Gebäudes in Holzbauweise wurde die Holzrahmenbauweise verwendet. Der Wandaufbau wurde in vereinfachter Form ähnlich **Bild 10** (Holzständerbauweise) durchgeführt. Zum besseren Verständnis soll an dieser Stelle der Unterschied zwischen Holzrahmenbauweise und Holzständerbauweise erläutert werden. Beim Holzrahmenbau (siehe [**15, 16, 19**]) erfolgt der Aufbau stockwerksweise. Die Wandelemente bestehen aus einem Traggerippe aus vertikalen Ständern (Stiele) und horizontalen Rähmen, die ein- oder beidseitig durch Platten aus Holzwerkstoffen oder Gipswerkstoffen beplankt sind. Die Gebäudeaussteifung erfolgt durch die Boden- (Decken-) und die äußere Wandbeplankung. Die Gefache der einzelnen Wandelemente nehmen die aus schall-, wärme- und brandschutztechnischen Gründen erforderlichen Dämmstoffe auf. Im Gegensatz dazu besteht die Holzständerbauweise aus einem vom Boden bis zum Dach durchlaufenden Ständerwerk.

Das Geschoß über dem Brandraum wurde im vorderen Bereich vereinfacht nur durch Außenwände in Holzrahmenbauweise ausgeführt. Dieses reicht aus, um Aussagen zur Gefahr eines Feuerüberschlages in darüberliegende Stockwerke machen zu können.

Die **Bilder 15.1 bis 15.5** zeigen Details zum Aufbau des Brandraumes, der Holzrahmenbauwände und Deckenkonstruktionen, dem Installationsraum (mit Öffnungen für Steckdosen, Lichtschalter, Verteiler- oder Abzweigdosen), den unterschiedlichen ökologischen Dämmstoffen in den jeweiligen Gefachen, dem Treppenraum, den anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen (Löschanlage und Brandmelder), der Brandlast sowie der Video- und Meßtechnik. **Tabelle 1** führt ebenfalls konstruktive Details zum Versuchsaufbau auf. **Tabelle 2** gibt Auskunft über die eingesetzte Meß- und Videotechnik und deren Position im Holzgebäude.

Aus den bisherigen Erfahrungen, die sowohl bei Versuchen mit Sprinkleranlagen als auch

mit Niederdruck-Wassernebellöschanlagen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gewonnen wurden [1, 2, 3, 7], wird bei den in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Brand- und Löschversuchen eine Niederdruck-Wassernebellöschanlage mit Sprühköpfen (siehe **Bild 15.1** und **15.3**, **Tabelle 1**) der Firma Systemtechnik Herzog GmbH eingesetzt.

Die Auswahl der Versuchsparameter und Meßgrößen hatte das Ziel, Kriterien für die Konstruktion und den Brandschutz bereitzustellen, die den Personen- und Objektschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise gewährleisten.

6.2 Kaltversuche

Um das Sprühbild und die Verteilung des Wassernebels der eingesetzten Löschanlage im Raum bewerten zu können, wurden Kaltversuche ohne Brand durchgeführt.

Bild 16 zeigt Sprühbilder sowohl von Einzelsprühköpfen als auch von mehreren gleichzeitig betriebenen Sprühköpfen in Sprührohren über mehrere Sprühebene der Niederdruck-Wassernebellöschanlage. Man erkennt sowohl die Wirkungsweise des Einzelsprühkopfes im Brandraum als auch die von mehreren Sprühköpfen in einem Hochregal, welches für diese Untersuchungen zum Holztreppenhaus umgebaut wurde.

Zur Einstellung der Löschwasservolumenströme und Betriebsdrücke im Brand- bzw. Treppenraum wurden vor den jeweiligen Brandversuchen entsprechende Sprüh- und Kalibrierversuche durchgeführt.

6.2.1 Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsmessungen

Von besonderer Bedeutung für die Charakterisierung eines Sprühnebels und dessen Verhalten beim Brand sind die Kenntnis der Tropfengrößen- und Geschwindigkeitsverteilung sowie von speziellen charakteristischen Durchmessern. Hierfür wurden die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik verwendeten Wassernebellösdüsen von der Firma

Systemtechnik Herzog GmbH bezüglich des Tropfenspektrums und der vertikalen Tropfengeschwindigkeit analysiert. Hierzu wurde ein Phasen/Doppler-Anemometer (PDA, siehe **Kunkelmann [7]**) verwendet. Die Meßeinheit besteht aus einem Lasersender und -empfänger. Beide sind mit einem Personal Computer gekoppelt, über den die Meßergebnisse ausgewertet werden. Hierbei wird Laserlicht an den zu messenden Partikeln gestreut, das dabei seine Frequenz und Phasenlage, bezogen auf das Ausgangssignal, ändert. Der Laserstrahl wird durch eine spezielle Optik in 2 Strahlen aufgespalten, die sich in einem kleinen Winkel zueinander ausbreiten. Diese Strahlen kreuzen sich in einem bestimmten Punkt im Raum. Dieser Punkt repräsentiert gleichzeitig den Meßpunkt. Tropfen, die durch diesen Bereich fallen, streuen das Licht der beiden Laserstrahlen und verschieben gleichzeitig die Frequenz (Doppler-Effekt) und die Phase der Lichtsignale. Während die Verschiebung der Phase mit der Größe der Tropfen zusammenhängt, ist die Frequenzverschiebung proportional zur Geschwindigkeit der Partikel. Das gestreute Licht wird durch ein System von Linsen aufgefangen und auf 3 Fotomultiplier fokussiert. Diese Lichtmeß-Detektoren zeichnen die Lichtsignale auf, die anschließend in einer schnellen Speichereinheit (Transientenrekorder) aufgezeichnet und im Computer mathematisch weiterverarbeitet werden.

Die Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilungen wurden in einem Abstand von 1 m von der Wassernebeldüse (Einzeldüse) in normaler Umgebung, d.h. ohne Brandeinfluß, ermittelt. Im Brandfall verändern die aufsteigenden heißen Rauchgase die Tropfendurchmesser und die Tropfengeschwindigkeiten sowie die Bewegungsrichtung der Tropfen durch Gegenströmung, Verdunstung, Verdampfung, Lufteinsaugung durch den Sprühnebel, Verwirbelungen etc. zeitlich und örtlich. Auch in normaler Umgebung ändern sich die Tropfengeschwindigkeiten und Tropfendurchmesser durch Auftrieb und Verdunstung etwas.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß es sehr problematisch, wenn nicht gar unmöglich ist, ein Phasen-Doppler-Anemometer bei einem realen Brand bei gleichzeitigem Löscheinsatz einzusetzen, um die zeitlichen Veränderungen des Tropfengrößenspektrums und des Tropfengeschwindigkeitsspektrums meßtechnisch zu erfassen.

Aufgrund der mit dem Phasen-Doppler-Anemometer ermittelten Tropfendurchmesser und

Tropfengeschwindigkeiten für die Betriebsdrücke 4 bar und 8 bar wurden die Anzahl-, Volumen- und Geschwindigkeitsverteilung aufgezeichnet (siehe **Bild 17.1** und **17.2**). Weiterhin wurden die zur Charakterisierung des Sprühnebels wichtige Tropfendurchmesser errechnet (Arithmetischer Mittelwert D_{10} , Sauter-Durchmesser D_{32} , volumenbezogene Tropfendurchmesser: $D_{V,10\%}$, $D_{V,50\%}$, $D_{V,90\%}$, $D_{V,99\%}$, anzahlbezogener Tropfendurchmesser $D_{A,50\%}$, siehe **Tabelle 1**).

Die Meßwerte zeigen, daß bereits bei einem sehr niedrigen Druck sehr kleine Tropfen erzeugt werden.

6.2.2 Messung der Wasserbeaufschlagung

Zur Charakterisierung der Löschwirksamkeit von Sprinkleranlagen ist es eine gängige Methode, für unterschiedliche Brandgefahrenklassen eine Mindestwasserbeaufschlagung in mm/min anzugeben (siehe **Kunkemann [1, 31]**). Bei Wassernebellöschanlagen macht das wenig Sinn, da diese nach Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2 gegenüber Sprinkleranlagen unterschiedliche Löschmechanismen aufweisen und der Wassernebel den Brandbereich einhausen soll. Wie die theoretischen Untersuchungen von **Kunkelmann** und **Schatz [7, 36, 37, 38, 39, 40]** gezeigt haben, bleibt ein großer Teil der insgesamt sehr kleinen Tropfen beim Wassernebel in der Schwebelage und führt daher zu keiner vergleichbaren Wasserbeaufschlagung wie bei Sprinkleranlagen.

Zur Bestätigung dieser Sachlage wurden im Brandraum die Wasserbeaufschlagungen mit handelsüblichen elektronischen Regenmessern gemessen (siehe **Bild 15.4**). Die **Bilder 18.1 bis 18.5** zeigen die Wasserbeaufschlagungen im Brandraum bei

- minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar)
- Sprühkopf mit 1 Zentraldüse oder
 - 4 Düsen am Umfang des Sprühkopfes oder
 - 5 Düsen (vollbestückter Sprühkopf)
- Messung am Boden und in 1 m Höhe
- 5 Positionen im Brandraum (siehe Skizze in rechter oberer Ecke der Balkendiagramme)

Man erkennt, daß im wesentlichen die Positionen 3, 4 und 5 mit Wasser beaufschlagt worden sind. Einen Einfluß hatten hier die beiden geöffneten Türen in den Brandraum und in den Treppenraum und die damit verbundene Luftströmung. Im realen Brandfall ist damit zu rechnen, daß flüchtende Personen die Türen nicht schließen.

6.2.3 Strömungsmessungen im Treppenraum

Weiterhin wurden zur Beschreibung der Strömungsbedingungen im Treppenraum und für die Einstellung des Absaugvolumenstromes für den maschinellen Rauch- und Wärmeabzug Strömungsmessungen mit einem Flügelradanemometer sowie Prandtl-Staurohren (**Bild 15.5**) bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen (*Treppenraum beide Türen: auf oder Treppenraumbür: zu - Brandraumbür: auf oder Treppenraum- und Brandraumbür: zu*) im Bereich des Treppenauges in Podesthöhe sowie an den Treppenraumbüren durchgeführt. Parallel dazu wurde ein Nebel-Generator eingesetzt, um visuell die Strömung im Treppenraum zu beobachten. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird jedoch hier nicht näher eingegangen.

6.3 Brand- und Löschanversuche

Die Brand- und Löschanversuche wurden sowohl im Brandraum (**Bild 14, 15.1 und 15.2**) als auch im Treppenraum (**Bild 15.3**) durchgeführt. **Tabelle 3** gibt über die jeweiligen Versuchsparameter und Brandlasten, Ventilationsbedingungen (Türen geöffnet oder geschlossen, natürlicher oder maschineller Rauch- und Wärmeabzug im Treppenraum), Betriebsbedingungen der Wasserebellöschanlage (Sprühköpfe, Düsen, Betriebsdruck, Volumenstrom), Dämmstoffe in den Gefachen von Außenwand und Installationsraum, wichtige Temperaturen, Auslösezeiten von Indikatorsprinklern und Brandmeldern, Löschanzeiten, Löschwassermengen sowie Abbrandmasse, Abbrandrate und Wärmestrom Auskunft.

Die Auslösung der Löschanlage erfolgte bei den Versuchen manuell nach dem Auslösen von verschiedenen Indikatorsprinklern (Nennauslösetemperatur: 68°C, Glasfaß: 3mm

(mittlerer RTI-Wert: ca. $50 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{1/2}$) und 5 mm (mittlerer RTI-Wert: ca. $100 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{1/2}$) oder Brandmeldern (fotoelektronische Rauchmelder) an unterschiedlichen Positionen im Brand- und Treppenraum sowie bei 2 Versuchen (Ö1, Ö2) nach dem Erreichen einer bestimmten Flammenlänge.

Die **Bilder 14, 15.1 und 15.3** sowie die **Tabellen 1 und 2** verdeutlichen die Position dieser Auslöseelemente.

Das Auslösen der Indikatorsprinkler wurde durch den Druckabfall an einem Manometer ermittelt, das an einer unter Druck stehenden luftgefüllten Leitung angeschlossen war (**Bild 15.5**). Nähere Angaben zum Auslöseverhalten von Sprinklern und den Kenngrößen, die dieses Auslöseverhalten beschreiben (z.B. RTI (Response Time Index) - Wert), finden sich bei **Kunkelmann [1, 31]**. Diese Kenngrößen mit den damit verknüpften physikalischen Eigenschaften sind u.a dafür verantwortlich, daß im Realfall beim Auslösezeitpunkt die Umgebungstemperatur am Sprinkler die Nennauslösetemperatur des Sprinklerauslöseelementes zum Teil beträchtlich überschreitet.

Die Brandlast im Brandraum wurde auf dem als Waage ausgebildeten Boden des Brandraumes aufgebaut. Über die Messung des zeitlichen Verlaufs der Abbrandmasse wurde die Abbrandrate errechnet und hieraus mit einem entsprechend der Masseanteile der Brandlastbestandteile gemittelten Heizwert (**Tabelle 4**, siehe **Beilicke [35]**) der theoretische Wärmestrom errechnet. An dieser Stelle soll bemerkt werden, daß die Heizwerte der Brandlastkomponenten zum Teil großen Schwankungen unterworfen sind. Der Heizwert bei Holz schwankt z.B. je nach Holzart und Feuchtegehalt (**Beilicke [35]**).

Tabelle 4 zeigt die bei den Versuchen eingesetzte Brandlast und die entsprechende Ermittlung der Heizwerte der Einzelkomponenten bzw. der zusammengesetzten Brandlast.

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist geringer als der maximale theoretische Wärmestrom. Dies ist darauf zurückzuführen, daß durch die unvollständige Verbrennung der untere Heizwert nicht erreicht wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z.B. durch den Einfluß flammenhemmender Zusätze, durch Sauerstoffmangel und durch Abkühlung an den Wänden und führt u.a. zu einer Rußbildung. Der theoretische Wärmestrom ist hier-

durch ca. 20% - 30% höher als der effektive Wärmestrom.

Der Wärmestrom kann mittels der Abbrandwaage nur bis zum Löscheinsatz der Feuerwehr oder der Löschanlage ermittelt werden, da das Löschwasser die Massenbestimmung verfälscht.

Bei den Brand- und Löschversuchen wurden feste Brandstoffe, flüssige Brandstoffe als auch die Kombination von beiden untersucht.

Als Brandlast wurden Brandlastpaletten (Holzkrippen - Hauptkrippen und Zündkrippen - mit Linoleum und Nadelfilzteppichboden als Unterlage, **Bild 15.1, Tabelle 3 u. 4**) analog den Untersuchungen von **Kunkelmann [2, 4]**, Holzkrippen allein (**Bild 15.3, Tabelle 3 u. 4**) als auch Brandlastpaletten mit Pflanzenöl (**Bild 15.1, Tabelle 3 u. 4**) verwendet. Die Brandlastpaletten wurden zentral im Raum angeordnet. Die Brandlast wurde mittels Zündwanne mit 0,5 l Heptan im Bereich unterhalb der Holz-Zündkrippen gezündet.

Die bei den bisher durchgeführten Untersuchungen von **Kunkelmann [1, 2, 3]** gewonnenen Erfahrungen haben ergeben, daß bei den in dieser Arbeit durchgeführten Brand- und Löschversuchen keine größeren Brandlasten als max. 170 kg im Brandraum aufgebaut werden mußten, um eine Beurteilung der Löschwirksamkeit durchführen zu können.

Weitere Angaben zu den Versuchsaufbauten und Versuchsparametern bei den jeweiligen Versuchen sind den nachfolgenden Abschnitten zu entnehmen.

Die Meßwerte wurden mit einem Meßwerterfassungssystem registriert und anschließend ausgewertet.

Die Versuche wurden zusätzlich durch Videoaufnahmen an verschiedenen Positionen des Holzgebäudes (siehe **Bild 14 u. 15.4, Tabelle 1 u. 2**) dokumentiert und mit Hilfe von Videoprints ausgewertet.

Nachfolgend werden die mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage durchgeführten Brand- und Löschversuche mit festen und flüssigen Brandstoffen erläutert.

6.3.1 Feste Brandstoffe

Versuch H1 wurde gemäß **Tabelle 3** mit einer Brandlast von 1 Brandlastpalette im Brandraum durchgeführt (siehe auch **Tabelle 4** und **Bild 15.1**).

Beim Versuch war die Öffnung von der Versuchshalle in den Brandraum durch eine Holztür verschlossen. Die übrigen Türen des Versuchsholzgebäudes (Versuchshalle/Treppenraum, Treppenraum/Brandraum) waren geöffnet. Es sollte simuliert werden, daß eine flüchtende Person die Türen offen läßt.

Die Wassernebellöschanlage wurde beim maximalen Betriebsdruck von 8 bar mit 5 Düsen im Sprühkopf betrieben. Die Auslösung der Löschanlage erfolgte zunächst manuell nach Auslösung von Indikatorsprinkler Sp1 (siehe **Bild 14** und **Bild 15.1**). Nach kurzer Löschzeit (ca. 1 min, siehe **Tabelle 3**, **Bild 19.4**) wurde die Wassernebellöschanlage noch vor dem vollständigen Ablöschen ausgeschaltet. Die Brandintensität nahm wieder zu und löste nach einer Versuchszeit von ca. 13 min den Indikatorsprinkler Sp2 im Erdgeschoß des Treppenraumes aus (**Bild 15.3**). Ab diesem Zeitpunkt wurde die Wassernebellöschanlage wieder manuell eingeschaltet. Die Rauch- und Wärmeabzugsanlage im Treppenraum wurde zu diesem Zeitpunkt ebenfalls in Betrieb genommen. Die Absaugung erfolgte mit 10.000 m³/h im Normzustand.

Bild 19.1 zeigt die Verrauchung des Podestes der 3. Etage. Verglichen wurden hierbei die Sichtverhältnisse aufgrund der Verrauchung bei Auslösung der Indikatorsprinkler Sp1 und Sp2 mit den Sichtverhältnissen zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten (siehe **Abschnitt 3.3**). Man erkennt, daß bei Auslösung von Indikatorsprinkler Sp1 die Umgebungstemperatur mit 179°C beträchtlich über der Nennauslösetemperatur von 68°C liegt (siehe **Bild 19.4**). Man erkennt weiterhin, daß es bei der verspäteten Auslösung (Indikatorsprinkler Sp2 im Treppenraumbereich) zu einer beträchtlichen Verrauchung des Treppenraumes kommt. Der zulässige Extinktionskoeffizient wird hierbei weit überschritten (siehe **Bild 19.4**). Die Sauerstoffkonzentration im Treppenraum (3. Etage) ist mit 19,6 Vol% sehr hoch, die Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentrationen sind mit 1300 ppm und 11000 ppm im Vergleich zum Vollbrand sehr gering. Man erkennt jedoch, daß der beim

Löschen entstehende Wasserdampf zu einer beträchtlichen Sichtbehinderung führt. Dies bedeutet, daß eine schnelle Auslösung der Wassernebellöschanlage gewährleistet sein muß, um ein Gebäude im Brandfall sicher zu räumen. Der Rauch- und Wärmeabzug muß hierbei gewährleistet sein.

Die **Bilder 19.2** und **19.3** zeigen die sehr geringen Brandschäden bei der Brandlast, im Installationsraum sowie an der Brettstapeldecke. Dies korrespondiert mit der gemessenen geringen Abbrandmasse von ca. 1 kg. Die Abbrandrate betrug maximal 0,52 kg/min. Dies entspricht einem theoretischen Wärmestrom von ca. 0,14 MW (siehe **Tabelle 3**).

Die Temperaturkurven in **Bild 19.4** zeigen, daß durch den Löscheinsatz eine schnelle Abkühlung der Temperaturen im Brandraum erfolgt. Im Treppenraum liegen diese im Bereich der Umgebungstemperaturen. Durch diese niedrigen Temperaturen sind auch Holz-Glas-Fassaden mit Normal- bzw. Verbundglas im Brandfall nicht gefährdet.

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

In **Versuch H2** wurde gegenüber **Versuch H1** die Wassernebellöschanlage mit dem minimalen Druck von 4 bar betrieben (siehe **Tabelle 3**). Die Auslösung der Wassernebellöschanlage erfolgte bewußt verspätet nach Auslösung von Indikatorsprinkler Sp2 im Treppenraumbereich nach 7 min 3 s. Die **Bilder 20.1** bis **20.8** zeigen den zeitlichen Verlauf des Versuches und die Auswirkungen im Bereich von Brand- und Treppenraum. Man erkennt wiederum auch hier, daß es durch die verspätete Auslösung zu einer beträchtlichen Verrauchung des Treppenraumes aufgrund der Brandgasentwicklung (**Bild 20.6** und **20.7**) kommt. Durch die Auslösung der Wassernebellöschanlage wird aufgrund der Wasserdampfbildung die Sicht weiter verschlechtert. Nach **Bild 20.9** und **20.12** wird der zulässige Extinktionskoeffizient beträchtlich überschritten. Auch bei diesem Versuch liegen die Umgebungstemperaturen beim Auslösezeitpunkt der Indikatorsprinkler Sp1 (ca. 171°C) und Sp2 (ca. 185°C) beträchtlich über der Nennauslösetemperatur von 68°C. Nach **Bild 20.10** und **20.11** sowie **Tabelle 3** ergeben sich trotz der verspäteten Auslösung und dem nied-

rigen Betriebsdruck von 4 bar nur geringe Brandschäden und Wärmefreisetzungen im Brandraum. Die tragende Konstruktion der Holzrahmenbauwand war zu keiner Zeit gefährdet. Die in Normalglas (Floatglas) ausgeführten Oberlichte über den Türen zum Brandraum zeigten allerdings nach dem Brand- und Löschversuch Rißbildung.

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

Zur weiteren Verringerung des Löschwasserbedarfs wurde in **Versuch H3** die Düsenanzahl von 5 auf 4 Düsen (ohne Zentraldüse) bei einem Betriebsdruck von 4 bar verringert. Weiterhin wurde der in den bisherigen Versuchen an der Türöffnung zwischen Brand- und Treppenraum vollständig vorhandene Vorhang durch einen 10 cm hohen Vorhangstreifen unterhalb des Oberlichtes ersetzt. Hierdurch ergab sich gegenüber den bisherigen Versuchen gleich von Beginn an eine fast vollständig geöffnete Türöffnung. Die Rauch- und Wärmeabzugsanlage im Treppenraum wurde während dieses Versuches nicht betrieben. Die Auslösung der Löschanlage erfolgte wiederum verspätet nach Auslösung von Indikatorsprinkler Sp2. Die Umgebungstemperaturen zum Auslösezeitpunkt betragen bei Indikatorsprinkler Sp1 ca. 145°C und bei Sp2 ca. 155°C (**Tabelle 3, Bild 21.3**). In **Bild 21.1** und **21.3** erkennt man die beträchtliche Verrauchung durch Wasserdampfbildung. Der zulässige Extinktionskoeffizient wurde beträchtlich überschritten. Wäre die Löschanlage frühzeitig, z.B. nach Auslösung des Brandmelders Br oder des Indikatorsprinklers Sp1 im Brandraum ausgelöst worden, hätte diese extreme Verrauchung trotz verringerter Düsenanzahl im Sprühkopf mit großer Wahrscheinlichkeit vermieden werden können. Man erkennt, daß selbst nach Auslösung des Brandmelders Tr in der 3. Etage des Treppenraumes die Verrauchung des Treppenraumes noch sehr gering war (**Bild 21.3**). Auch bei diesem Versuch ergab sich im Vergleich zum Vollbrand eine relativ hohe Sauerstoffkonzentration und niedrige Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidkonzentration sowohl im Brand- als auch im Treppenraum. Die Brandschäden an der Brandlast (Inneneinrichtung) waren auch hier nur gering. Der Installationsraum zeigte nur geringe Brandschäden im Bereich der Abzweigdosenöffnung. Beide Oberlichte wiesen eine geringe Rißbildung auf (**Bild 21.2**).

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende

Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

Bei den bisher beschriebenen Versuchen wurde der Dämmstoff im Installationsraum nur im Bereich der Öffnungen, bei denen der Federdeckel geschmolzen ist (Lichtschalter, Verteiler- bzw. Abzweigdose) unwesentlich befeuchtet (Fühlprobe mit der Hand).

Ein weiterer **Brand- und Löschversuch (H5)** mit festen Brandstoffen wurde im Treppenraum auf dem Podest der 1. Etage mit einer Zündkrippe und Zündwanne am Treppengeländer durchgeführt (siehe **Bild 15.3, Tabelle 3**). Die Löschanlage wurde nach Auslösung von Brandmelder Tr im Treppenraum aktiviert (mittleres Sprührohr, siehe **Bild 14**). Im Treppenraum hatten zu diesem Zeitpunkt die Indikatorsprinkler Sp3, Sp4 und Sp5 noch nicht ausgelöst. Nach dem Löscheinsatz erfolgte die Öffnung der 1m² großen Öffnung zur natürlichen Entrauchung. Durch mehrmaliges Öffnen und Schließen dieses Schiebers zu unterschiedlichen Zeitpunkten während des Löscheinsatzes sollte ein Eindruck vom Einfluß auf den Extinktionskoeffizienten gewonnen werden. Die **Bilder 22.1** und **22.3** zeigen, daß der zulässige Extinktionskoeffizient bei der eingesetzten Brandlast nach dem Auslösen der Löschanlage frühzeitig überschritten wurde. Die Temperaturen im Treppenraum waren im Bereich der Umgebungstemperatur (**Tabelle 3, Bild 22.3**). Nach **Bild 22.2** ergab sich auch bei diesem Versuch ein sehr geringer Brandschaden an der aufgesetzten Brandlast. Das Geländer wurde nicht beschädigt. An dieser Stelle soll nochmals bemerkt werden, daß die Indikatorsprinkler Sp3, Sp4 und Sp5 über dem Brandherd im Treppenraum nicht ausgelöst hatten. Besonders in einem Treppenraum mit seinen vielfältigen Durchströmungsmöglichkeiten, z. B. durch das Treppenauge, durch offene Treppen ohne Setzstufen als auch durch den Einfluß offener Fenster, Türen und Rauch- und Wärmeabzüge besteht die Gefahr, daß Sprinklerauslöseelemente überlaufen werden und sich der Brand beträchtlich ausbreiten kann, bevor die Löschanlage auslöst. Die bei diesem Versuch erforderliche große Löschwassermenge (1314 l, siehe **Tabelle 3**) macht deutlich, daß eine genaue örtliche Detektierung des Brandes und eine z.B. auf die 1. Etage (Brandherd) beschränkte Löschsektion den Löschwasserschaden bedeutend reduziert hätte. Hierfür sind allerdings noch weitere Versuche erforderlich.

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende

Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

6.3.2 Flüssige Brandstoffe

In **Tabelle 3** sind die Daten zu den **Brand- und Löschversuchen Ö1 bis Ö4**, die mit handelsüblichem Pflanzenöl in einer Bratpfanne durchgeführt wurden, zusammengestellt. Das Pflanzenöl wurde bei den Versuchen zunächst mit einem Gasbrenner auf eine Flammpunkttemperatur von ca. 350°C vorgeheizt. Anschließend wurde die Pfanne im Brandraum auf eine Holzkrippe mit 3 Pastenbrennern zur weiteren Beheizung und Entzündung gestellt. Die Auslösung der Löschanlage erfolgte zu den in **Tabelle 3** angegebenen Zeitpunkten.

An dieser Stelle soll nur auf **Versuch Ö4** näher eingegangen werden. Die **Bilder 23.1 und 23.2** zeigen den zeitlichen Verlauf des Löscheinsatzes nach Auslösung des Brandmelders Br im Brandraum. Im Brandraum aufgehängte Toilettenpapierstreifen (**Bild 23.3**) sollten die Brandeinwirkung nach dem Löscheinsatz zeigen. Man erkennt, daß innerhalb kurzer Zeit (23 s) der Pflanzenölbrand gelöscht wurde. Die von der Bratpfanne verdeckten Pastenbrenner wurden durch den Wasserdampf nicht gelöscht. **Bild 23.3** zeigt, daß nach schneller Auslösung der Wasserdampflöschanlage die Toilettenpapierstreifen nur in geringem Maß hauptsächlich im Deckenbereich beschädigt wurden. Die niedrigen Temperaturen im Brandraum nach **Bild 23.4** bestätigen diese geringen Brandschäden.

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

6.3.3 Feste und flüssige Brandstoffe

Zur Untersuchung sowohl fester als auch flüssiger Brandlasten, wie sie z.B. in Küchen oder Labors vorkommen, wurden die **Versuche H4 und H6** gemäß **Tabelle 3** und **Bild 15.1**

durchgeführt.

In **Versuch H4** wurde 1 Brandlastpalette mit ca. 167 kg incl. 0,2 l Pflanzenöl in einer Bratpfanne verwendet. Die Wassernebellöschanlage wurde mit einem Betriebsdruck von 4 bar bei 4 Düsen im Sprühkopf betrieben. Der Löscheinsatz erfolgte bewußt verspätet bei Auslösung von Indikatorsprinkler Sp2 im Brandraum. Die Umgebungstemperaturen beim Auslösezeitpunkt betragen bei Indikatorsprinkler Sp1 ca. 153°C und bei Sp2 ca. 91°C (**Bild 24.3, Tabelle 3**).

Bild 24.1 zeigt die Verrauchung auf dem Podest der 3. Etage. In Verbindung mit **Bild 24.3** erkennt man die beträchtliche Verrauchung des Treppenraumes bei verspäteter Auslösung der Löschanlage. Der zulässige Extinktionskoeffizient wird in kurzer Zeit beträchtlich überschritten. Die Brandschäden sind nach **Bild 24.2** jedoch wiederum vergleichsweise gering. Auch die Brandgaskonzentrationen im Treppenraum (3. Etage) liegen beträchtlich unter denen eines Vollbrandes. Die Temperaturen im Brandraum werden durch den Löscheinsatz sehr schnell gesenkt.

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

In **Versuch H6** wurde die Löschanlage nach Auslösen des Indikatorsprinklers Sp1 (5 mm Glasfaß) im Brandraum ausgelöst. Gleichzeitig wurde ein Indikatorsprinkler mit höherer Empfindlichkeit (Sp1*: 3 mm Glasfaß) eingesetzt (**Bild 15.1**). Dieser löste ca. 17 s früher aus. Die tatsächlichen Auslösetemperaturen betragen bei Indikatorsprinkler Sp1* ca. 140°C und bei Sp1 ca. 153°C. Die Löschanlage wurde hierbei im Intervallbetrieb nach **Tabelle 3** und **Bild 25.3** mit 4 bar und 5 Düsen im Sprühkopf betrieben. Der Intervallbetrieb hat das Ziel, Löschwasser zu sparen, indem der Löschvorgang in bestimmten Intervallen ein- und ausgeschaltet wird. Durch den Intervallbetrieb wird u.a. auch erreicht, daß die Strömungsverhältnisse im Raum gestört werden und damit Rauchgase und Wasserdampf bzw. Wassertropfen besser miteinander vermischt werden. Beim Wiedereinschalten der Löschanlage ergeben sich daher neue Strömungsverhältnisse im Raum, durch die der Wasser-

nebel Brandherde erreicht, die vorher nicht erreicht worden sind. **Bild 25.1** und **25.3** zeigen die gegenüber den anderen Versuchen langsamere und geringere Verrauchung des Treppenraumes aufgrund der schnellen Auslösung der Löschanlage. **Bild 25.2** zeigt die äußerst geringen Brandschäden bei diesem Versuch. Nicht einmal die Oberfläche der Gipskarton-Bauplatte zeigte eine Braunfärbung durch den Brand. Der Dämmstoff im Installationsraum von Gefach 1 wurde nur im Bereich der oberen Öffnung (für Verteiler- bzw. Abzweigdose) aufgrund des geschmolzenen Federdeckels unwesentlich befeuchtet (Fühlprobe mit der Hand).

Weitere Angaben zum Versuchsablauf und den Ergebnissen, wie maximal auftretende Temperaturen, Löschzeit, Löschwassermenge, Wärmefreisetzung, Ventilationsbedingungen, Rauch- und Wärmeabzug etc. finden sich in **Tabelle 3**.

7. AUSLEGUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR DEN EINSATZ VON NIEDERDRUCK-WASSER-NEBELLÖSCHANLAGEN IM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist bereits beim minimalen Betriebsdruck von 4 bar mit der eingesetzten Niederdruck-Wassernebellöschanlage ein sehr guter Löscherfolg zu erzielen. Voraussetzung ist hierbei, daß die Wassernebellöschanlage schnell, z.B. durch Brandmelder, schnelle thermische Auslöseelemente oder sonstige schnellen Branddetektoren (z.B. Analysatoren für Brand- und Zersetzungsgase) ausgelöst wird. Bei thermischen Auslöseelementen besteht die Gefahr, daß diese verdeckte Brände (z.B. in Regalen) nicht rechtzeitig erkennen und daß diese bei ungünstigen Ventilationsbedingungen vom Brand nicht ausreichend aufgeheizt werden und daher nicht auslösen. Bei Flüssigkeitsbränden sind Brandmeldern bzw. Brandmeldeanlagen gegenüber thermischen Auslöseelementen aufgrund der schnelleren Detektion der Vorzug zu geben. Allerdings ist hierbei auch der Einsatz schneller Gasanalysatoren denkbar. Um eine Fehlauslösung zu vermeiden ist auch eine "UND"-Verknüpfung zwischen zwei Auslöseelementen möglich. In diesem Fall müßten beide Branddetektionseinrichtungen ansprechen, bevor der Wasserdampf freigesetzt wird. Bei verspäteter Auslösung besteht insbesondere bei festen Brandstoffen, wie z.B. Holz und Möbel die Gefahr, daß der beim Löschen erzeugte Wasserdampf zu einer erheblichen

Sichtbehinderung z.B. in einem angrenzenden Treppenraum führt. Auf eine Rauch- und Wärmeabzugsanlage kann daher bei mehrgeschossigen Gebäuden nicht verzichtet werden.

Eine genaue örtliche Detektierung des Brandes mit örtlich begrenzter Löschsektion reduziert die Löschwasserbevorratung, den Löschwasserverbrauch und -schaden bedeutend.

Für den Fall, daß die Wassernebellöschanlage gewartet oder repariert werden muß, muß gewährleistet sein, daß in dieser Zeit der Personen- und Sachschutz im Brandfall sichergestellt ist. Denkbar ist z.B. der Einsatz einer Brandwache in diesem Zeitraum.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der Ergebnisse der in dieser Untersuchung durchgeführten Brand- und Löschversuche (siehe **Tabelle 3**) ergeben sich bei frühzeitiger Auslösung der eingesetzten Niederdruck-Wassernebellöschanlage in der Brandentwicklungsphase durch schnelle Auslöseelemente oder Brandmelder die folgenden Aussagen:

Die Brandentstehung innerhalb von Wänden, z.B. infolge defekter oder überlasteter elektrischer Installationen, wird hierbei jedoch nicht betrachtet.

- Die Brandausbreitung bleibt selbst bei offenen Türen bzw. Fenstern auf den Zündbereich im Brandraum beschränkt.
- Keine Gefährdung der tragenden Wände, Decken und Treppenräume des Holzgebäudes. Installationswände und Deckenverkleidungen werden ebenfalls nur unwesentlich, wenn überhaupt, durch Brandeinwirkung beschädigt.
- Keine Gefährdung von Holz-Glas-Fassadenkonstruktionen: keine Zerstörung von Verglasungen aufgrund der niedrigen Temperaturen; kritische Holz- und Glastemperaturen für verschiedene Verglasungen wie Einfachglas (Floatglas), Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) und Verbund-Sicherheitsglas (VSG) werden nicht erreicht.
- Keine Gefährdung von Passanten, Feuerwehreinsatz- und sonstigen Hilfskräften durch herabfallende Teile der Verglasungen wie Glasbruchstücke, Glaskrümel und Rahmenelemente evtl. aus großen Höhen bei Holz-Glas-Fassaden.

- Kein Feuerüberschlag in darüberliegende Geschosse, z.B. über Fenster- und Türöffnungen.
- Nur geringe Verrauchung des Treppenraumes durch Brandgase und Wasserdampfbildung bei offener Tür, wenn die Löschanlage durch schnelle Auslöseelemente, insbesondere Brandmelder, ausgelöst wird.

Bei verzögerter Auslösung der Löschanlage durch langsame Auslöseelemente oder durch Unterlaufen von Auslöseelementen (insbesondere bei thermischen Auslöseelementen wie Glasfaß- oder Schmelzlotauslöseelementen) z.B. aufgrund ungünstiger Ventilationsbedingungen oder bei verdeckten Bränden, ist mit einer Sichtbehinderung durch Wasserdampf zu rechnen. Hierdurch kann bei hohen Gebäuden, trotz der im Vergleich zu einem Vollbrand geringen Brandgaskonzentrationen auf einen Rauch- und Wärmeabzug nicht verzichtet werden.

- Der Brandschaden an den Einrichtungsgegenständen (hier: aufgebaute Brandlast) sowie die Kontamination der Innenseite von Wänden, Decken und Dämmstoffen durch Ruß, Brandgase und Branddämpfe ist sehr gering.
- Geringe Brandrauchentwicklung im Fenster- bzw. Fassadenbereich.
- Durch die Verhinderung eines Vollbrandes werden sowohl der Personen- und Sachschaden als auch der evtl. unvermeidbare Löschwasserschaden durch einen Feuerwehreinsatz auf ein Minimum reduziert.
- Normalentflammbare Bau- und Dämmstoffe werden nur bei direkter Flammeneinwirkung und durch die heißen aufsteigenden Brandgase in geringem Maße angebrannt (überwiegend im oberen Bereich von Türen und im Bereich darüber, Verteiler- und Abzweigdosenöffnungen nahe der Decke).
- Nur geringe Befeuchtung von Dämmstoffen in den Wänden im Bereich von Öffnungen (z.B. für Steckdosen, Lichtschalter, Verteilerdosen, Abzweigdosen).
- Keine Brandausbreitung in Hohlräume (z.B. Decken und Wände).
- Keine Zerstörung von Oberlichtern und Verglasungen in Türen und Fenstern.
- Brandschutzverglasungen sind nicht erforderlich, wenn die Betriebsbereitschaft der Wassernebellöschanlage gewährleistet ist.
- Flüssige Brandstoffe (hier: Bratpfanne mit brennendem Pflanzenöl in einer Küche) können im Gegensatz zu Sprinkleranlagen ohne Zusätze zum Löschwasser in kurzer Zeit (hier: unter 25 s) selbst bei offener Tür gelöscht werden. Einsatzmöglichkeit dieser Löschanlagen z.B. auch in Lagerräumen und Labors.

- Durch die Niederdruckausführung der Löschanlage (minimaler Betriebsdruck: 4 bar) ist der kostengünstige Anschluß an eine Hauswasserleitung bei ausreichender Wasserversorgung im Brandfall denkbar. Im Gegensatz zu Mittel- und Hochdruck-Wassernebellöschanlagen ergeben sich keine besonderen Anforderungen bezüglich der Wasseraufbereitung (z.B. Verschmutzungen) und Anlagentechnik (z.B. Hochdruckpumpen, Edelstahl-Verrohrung etc.).
- Geringer Löschwasserverbrauch und Löschwasserschaden, insbesondere beim Löschen im Intervallbetrieb (kurze Pausen während des Löschvorganges).
- Vorteile bei der Gebäudestatik und bei den Baukosten durch Verzicht auf aufwendige Beplankungen mit nichtbrennbaren Baustoffen, Aufbringen von mineralischen Schichten oder dämmschichtbildenden Brandschutzsystemen zur Erzielung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer.
- Aus architektonischen Gründen kann Holz sein ursprüngliches Erscheinungsbild („sichtbare Holzbauteile“) beibehalten.
- Keine Gefährdung von Feuerwehreinsatz- und sonstigen Hilfskräften durch Backdraft und Flashover.
- Schnelle Abkühlung des Brandraumes nach Löschbeginn.
- Keine Gefährdung von Personen durch Wasserdampf mit hoher Temperatur.
- Keine Gefährdung von Personen durch Sauerstoffmangel aufgrund des Brandes und der Löschanlage. Die Sauerstoffkonzentration liegt nach Löschbeginn im Brandraum mit ca. 16 - 18,5 % O₂ über dem für den Stickeffekt erforderlichen Wert bei Löschgasen (z.B. bei CO₂ < 15 % O₂) sowie im Bereich bzw. über der O₂-Konzentration der Ausatemungsluft eines Menschen (16 - 17,5 % O₂) als auch wesentlich über dem Wert, bei dem die Sauerstoffmangelkrankheit auftritt (< 12 % O₂).
- Die Gefahr durch die Brandgasbestandteile Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe und sonstige Pyrolyseprodukte für den Menschen ist jedoch gesondert zu berücksichtigen. Wie diese Brandgasbestandteile in ihrer Zusammenwirkung den menschlichen bzw. tierischen Organismus schädigen ist hierbei noch nicht geklärt.
- Die bei einem Vollbrand eines Wohnzimmers entstehende Kohlendioxid-Konzentration von ca. 200.000 ppm und Kohlenmonoxid-Konzentration von ca. 50.000 ppm wird durch die frühzeitige Auslösung der Wassernebellöschanlage auf eine

Kohlendioxid-Konzentration von ca. 21.000 - 35.000 ppm bzw.

Kohlenmonoxid-Konzentration von 1.500 - 4.100 ppm reduziert.

Nach dem Handbuch der gefährlichen Güter von **Hommel [8]** ergeben sich folgende für den Menschen kritische Konzentrationen:

Kohlendioxid: Kurzezeitwirkung von 30.000 ppm: 300%ige Erhöhung der Atmung
 120.000 -150.000 ppm: nach wenigen Minuten bewußtlos

Kohlenmonoxid: 800 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 45 Minuten
 1.600 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 20 Minuten
 3.200 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 5 -10 Minuten
 Bewußtlosigkeit und Tod nach 20 Minuten
 6.400 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 2 - 3 Minuten, Tod nach
 10 -15 Minuten

Daraus folgt:

Personen in Räumen, in denen ein Brand entsteht, können nur dann überleben, wenn durch eine schnelle Alarmierung eine ebenso rasche Brandbekämpfung eingeleitet wird. Dies ist besonders im Hinblick auf schlafende Personen zu berücksichtigen. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, kann sowohl der Personen- als auch der Sachschutz für den Fall, daß kein schneller Feuerwehreinsatz möglich ist, nur durch den Einsatz ortsfester Löschanlagen geleistet werden. Der Einsatz von ortsfesten Niederdruck-Wassernebellöschanlagen hat hierbei besonders positive Ergebnisse gezeigt.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kunkelmann, J.: Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztrep-
pen und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Woh-
nungen insbesondere bei Altbauten.
Teil 1:
- Brand- und Rauchausbreitung sowie brandschutztechnische
Maßnahmen bei Altwohngebäuden und Gebäuden aus dem
Bereich des Denkmalschutzes
 - Baurechtliche Anforderungen
 - Wirkungsweise von Sprinkler- und Wassernebellöschanlagen
 - Experimentelle Untersuchungen (Versuchsaufbau: 4-ge-
schossiger Treppenraum, Niederdruck-Wassernebellösch-
anlage)
- Forschungsbericht Nr. 120 der Arbeitsgemeinschaft der
Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Kata-
strophenschutz und zivile Verteidigung,
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2000)
- [2] Kunkelmann, J.: Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im
Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und
ortsfeste Niederdruck-Wassernebellöschanlagen.
Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag
der Stiftung Industrieforschung, Förderkennzeichen:
Nr. S 483, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an
der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2001
- [3] Kunkelmann, J.: Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wassernebellöschanlagen auf
die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten
Fassaden.

Teil 3:

- Literaturlauswertung (Wassernebellöschanlagen - Entwicklung, Löschrinzipien, Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen, Anlagentechnik, Normung)
- Brand- und Löschrersuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächendoppelfassade

Forschungsbericht Nr. 108 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1998)

- [4] Kunkelmann, J.: Auswirkung von Schallschutzverglasungen und vorgehängten bzw. doppelten Fassaden auf den Brandablauf sowie die Brand- und Rauchausbreitung innerhalb und außerhalb der Brandwohnung.

Teil 4: Brandversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Kastendoppelfassade

Forschungsbericht Nr. 114 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1999)

- [5] VEGLA: Technisches Handbuch "Glas am Bau"
Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen 1999

- [6] Schmid, J.,
et al.: Holz-Glas-Fassaden.
DGfH Innovations- und Service GmbH und Holzabsatzfonds,
München, Bonn 1999

- [7] 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 Lägern 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)

- [8] Hommel, G.: Handbuch der gefährlichen Güter.
9. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York,
1999
- [9] Mommsen, H.: Der Gesundheits-Brockhaus.
4. Auflage, Mannheim 1990
- [10] Bogenberger, S., Lexikon Medizin.
et al.: 3. Auflage, Verlag Urban & Schwarzenberg, München
- [11] Mayr, J.: Brandschutzatlas.
Baulicher Brandschutz Band 1 und 2
FeuerTRUTZ GmbH, Verlag für Brandschutzpublikationen;
Wolfratshausen, 1995
- [12] Kordina, K.; Holz Brandschutz Handbuch
Meyer-Ottens, C.: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.,
2. Auflage, München, 1994

- [13] Kordina, K.; Brandverhalten von Holzkonstruktionen.
Meyer-Ottens, C.: Informationsdienst Holz;
Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (EGH) in der Deutschen
Gesellschaft für Holzforschung, München, 1977
- [14] Nutsch, W. et al.: Fachkunde für Schreiner.
Verlag Europa-Lehrmittel, 13. Auflage,
Haan-Gruiten, 1987
- [15] Küttinger, G., Holzrahmenbau.
et al.: Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des
Deutschen Baugewerbes e.V. Bonn, 2. Auflage,
Bruderverlag, Karlsruhe 1992
- [16] Kolb, J.: Systembau mit Holz.
Baufachverlag AG, Dietikon (Schweiz) 1988
- [17] Miller, J.: Häuser aus Holz.
DuMont Buchverlag, Köln 2000
- [18] Lips-Ambs, F.-J.: Holzbau heute.
DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co.,
Leinfelden-Echterdingen 1999
- [19] Fritzen, K., Holzrahmenbau mehrgeschossig.
et al.: Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des
Deutschen Baugewerbes e.V. Bonn
Bruderverlag, Karlsruhe 1996
- [20] Bruckner, H., Naturbaustoffe.
Schneider, U.: Werner Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf 1998

- [21] Wesche, J.: Wohngesundheit im Holzbau - Brandschutz.
Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. und Forst-
absatzfonds, München, Bonn 1998
- [22] Kunkelmann, J.: Brandschutz in mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise.
Vorsorgemaßnahmen für Alt- und Neubauten.
Bundesbaublatt, Heft 7/2000, S. 38 - 42
- [23] Becker, K.; Holzbau und Brandschutz in Hessen.
Tichelmann, K.: Informationsdienst Holz, Arbeitsgemeinschaft Holz e.V.,
Düsseldorf 1994
- [24] Becker, K., Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen
Tichelmann, K., zum Brandschutz mehrgeschossiger Gebäude in Holzbauweise.
Hosser, D., Untersuchungsbericht Teil 1: Theoretische Grundlagenunter-
El-Hariri, M., suchungen.
Wesche, J.: DGfH-Forschungsvorhaben F-96/10 im Auftrag des Deutschen
Instituts für Bautechnik, Darmstadt, Braunschweig 1997
- [25] Rupp, M.: Bestandsaufnahme und Analyse von Brandschäden bei Holz-
bauten - Ursache, Verlauf, Bewertung -
Diplomarbeit an der Fachhochschule Augsburg, 1997
- [26] Gräser, T.: Naturstoffe in Wohnungen und ihre Verbrennungsprodukte.
Brandschutz / Deutsche Feuerwehrzeitung, 7/1994, S.426 - 434
- [27] vfdb: Schadstoffe bei Bränden.
vfdb-Richtlinie, Referat 10: Umweltschutz, Entwurf Mai 1996, vfdb-
Zeitschrift 3/96, S. 134 - 142

- [28] Buff, K.; Greim, H.: Abschätzung der gesundheitlichen Folgen von Großbränden. Literaturstudie Teilbereich Toxikologie Schriftenreihe der Schutzkommission beim Bundesminister des Innern, neue Folge Band 25, Bundesamt für Zivilschutz, Bonn 1997
- [29] Föhl, A., Basmer, P., Wagner, D.: Untersuchung der Löschverfahren und Löschmittel zur Bekämpfung von Bränden gefährlicher Güter: Bewertung von Adsorptionsmaterialien für die GC/MS-Analyse von Pflanzenschutzmittel-Brandgasen. Forschungsbericht Nr. 103 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1996)
- [30] Fischer, B.: Technischer Brandschutz im Rahmen des Brandrettungskonzeptes. 8. Brandschutz-Tagung: Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGFH), Nürnberg 1998
- [31] Kunkelmann J.: Sprinkleranlagen - Auslösung, Löschwirksamkeit, Anwendungsgrenzen. Fachtagung "Wasser als modernes Löschmittel", Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1999
- [32] John R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß. Teil 2: Optische Brandrauchdichte Forschungsbericht Nr. 50 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten. Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1983)

- [33] John R.: Rauch- und Wärmeabzug bei Bränden in großen Räumen.
VFDB-Zeitschrift, 1/88
- [34] Föhl, C.A.: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen.
Forschungsbericht Nr. 118 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung,
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2000)
- [35] Beilicke G.: Zusammenstellung von Heizwerten für die Brandlastberechnung.
Brandschutz Explosionsschutz - Aus Forschung und Praxis, Band 15, 1. Auflage, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1987
- [36] Schatz,H.
Kunkelmann,J.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 2: Literaturübersicht und Berechnungsgrundlagen für die Wärmeübertragung bei Tropfen in einer Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 54 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- [37] Kunkelmann,J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 7: Literaturübersicht über die Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 76 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1990)

- [38] Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 80 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)
- [39] Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 9: Simulation der Wasserbeaufschlagung eines Sprinklers.
Forschungsbericht Nr. 83 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)
- [40] Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 10: Weiterführende Literaturübersicht über die Brandausbreitung sowie über die Wechselwirkungen des Tropfenschwarmes eines Sprinklers mit einer Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 84 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1993)
- [41] Friedman, R.: An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke.
Journal of Fire Protection
Engineering, 4(3), 1992, S. 81 - 92

10. TABELLEN

Tabelle 1: Versuchsaufbau und Meßtechnik

<p>Brandraum</p>	<p>Innenabmessungen: Höhe: 2,5 m, Länge: 4,09 m * Breite: 2,52 m > Grundfläche: 10,3 m² Vordere Wand: Holzrahmenbauwand mit 625 mm Rastermaß</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erdgeschoß: <i>Außenwand</i> <ul style="list-style-type: none"> • Vollholzständer, 60mm * 140 mm, Fichte/Tanne-Holz • Beplankung innen und außen mit OSB (Oriented Strand Board)-Flachpreßplatten, 15 mm dick • Dämmstoff: Flachsdämmplatten (normalentflammbar - B2), 140 mm dick alternativ: Zellulosedämmstoff (normalentflammbar - B2) <p><i>Installationsraum</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Lattung, 40 mm * 60 mm, Fichte/Tanne-Holz • Dämmstoff: Flachsdämmplatten (normalentflammbar - B2), 60 mm dick alternativ: Zellulosedämmstoff (normalentflammbar - B2, Fülldichte: 35 kg/m³) • Beplankung innen mit OSB-Platten, 15 mm dick • Öffnungen (Durchmesser: 68 mm) für Steckdosen (Gefach 1 u. 2, Höhe-Mittelpunkt): 0,3 m), Lichtschalter (Gefach 1, Höhe-Mittelpunkt: 1,1 m) und Verteiler- bzw. Abzweigdose (Gefach 1, Höhe-Mittelpunkt: 2,3 m), mit Kunststoff-Federdeckel <p><i>Decke</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Brettstapeldecke</u>: im vorderen Bereich des Brandraumes aus 13 Kanthölzern, 55 mm * 150 mm => Länge der Decke: 715 mm, Dicke: 150 mm • <u>Holzbalkendecke</u>: im vorderen Bereich des Brandraumes hinter der Brettstapeldecke, Außenabmessungen: Breite: 1250 mm, Länge: 760 mm, Rahmen aus Kanthölzern, Fichte/Tanne-Holz, 40 mm * 60 mm; Dämmstoff: Flachsdämmplatten (normalentflammbar - B2), 60mm dick; Deckenunterseite: Gipskartonplatte ohne Feuerschutz, 12,5 mm dick • <u>Porenbetondachplatten</u> im Anschluß an die Holzdecke <p><i>Türöffnung von der Brandversuchshalle in den Brandraum:</i> Öffnung gesamt: Breite: 970 mm, Höhe: 2500 mm (incl. Oberlicht) Oberlicht: Glasfläche: Breite: 970 mm, Höhe: 390 mm (Höhe mit Holzrahmen: 470 mm), Floatglas, 4 mm dick, Holztür (OSB-Platte, alternativ Holztür mit Röhrenspanstreifen)</p> <p><i>Türöffnung vom Brandraum in den Treppenraum:</i> siehe Treppenraumbeschreibung</p> <p><i>Hintere Wand:</i> Porenbetonmauerwerk <i>Seitenwände:</i> Porenbetonmauerwerk <i>Boden:</i> Abbrandwaage, darüber Konstruktion aus Porenbetondachplatten <i>Innenverkleidung im Bereich des Mauerwerks, der Decke</i> (ausgenommen Bereich der Holzdecke) und des Bodens: Fibersilikat-Feuerschutzbauplatten</p>
<p>Obergeschoß über dem Brandraum</p>	<p><i>Außenwand:</i> Holzrahmenbauwand mit 625 mm Rastermaß im vorderen Bereich des Brandraumes, Höhe: 2,5 m</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vollholzständer, 60mm * 140 mm, Fichte/Tanne-Holz • Beplankung innen und außen mit OSB (Oriented Strand Board)-Flachpreßplatten, 15 mm dick • Dämmstoff: Flachsdämmplatten (normalentflammbar - B2), 140 mm dick alternativ: Zellulosedämmstoff (normalentflammbar - B2)

zu Tabelle 1: Versuchsaufbau und Meßtechnik

<p>Treppenraum</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 4 geschossig (EG + 3 Obergeschosse), Gesamthöhe: 10 m, Stockwerkshöhe: 2,5 m • Tragkonstruktion: Regallagerkonstruktion aus Stahlprofilen • Verkleidung: Fichte/Tanne Rauhsplund mit Nut und Feder (Breite: ca. 130 mm, 20 mm dick) • Treppen: Einläufige gegenläufige Treppen mit Podesten in den jeweiligen Geschoßhöhen Treppenauflänge: 3.650 mm Treppenlaufbreite: 1.050 mm Steigung: 175 mm Steigungen: 14 Treppenbauform: aufgesattelte Treppen mit <ul style="list-style-type: none"> - Trittstufen aus Fichte/Tanne-Massivholzdielen (14 Stück je Treppe, Länge: 1.050 mm, Breite: 300 mm, 40 mm dick) - Setzstufen (optional) aus Fichte/Tanne-Massivholzbrettern (Länge: 1.050 mm, Breite: 174 mm, 20 mm dick) - Treppenwangen aus Kiefer-Massivholzdielen (Länge: 4.500 mm, Breite: 320 mm, 70 mm) • Podeste: Länge: 1.400 mm, Breite: 2.650 mm 1 Podest bestehend aus 3 Podestbalken (Fichte/Tanne Bauholz, Länge: 1.400 mm, Breite: 160 mm, Stärke: 100 mm) und Fichte/Tanne Rauhsplund-Dielung (20 mm dick) • Geländer: Geländerabstand: 130 mm <ul style="list-style-type: none"> - Geländerhöhe (senkrecht): 900 mm - Geländerpfosten und Geländerfüllung aus Fichte/Tanne-Latten (24 * 48 mm) - Geländerhandlauf aus Fichte/Tanne Rauhsplund (Breite: 130 mm, 20 mm dick) • Treppenaug: Abstand der Treppen: 580 mm • Tür - Brandversuchshalle <=> Treppenraum Öffnung gesamt: Breite: 1000 mm, Höhe: 2000 mm, Holztür mit Röhrenspanstreifen • Türöffnung - Treppenraum <=> Brandraum hinter dem Treppenraum Öffnung gesamt: Breite: 970 mm, Höhe: 2200 mm (incl. Oberlicht) Oberlicht: Glasfläche: Breite: 970 mm, Höhe: 390 mm (Höhe mit Holzrahmen: 470 mm), Floatglas, 4 mm dick • Beobachtungsfenster: im Bereich der Podeste, in den Türen, seitlich neben der Tür (Brandversuchshalle <=> Treppenraum) • Rettungswegkennzeichnung im Erdgeschoß und im Bereich der Podeste
<p>Rauch- und Wärmeabzug im Treppenraum</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ohne • natürlich (1 m² große Öffnung in der Außenwand an der obersten Stelle des Treppenraumes über Kopfhöhe) • maschinell (Absaugung durch Abgasreinigungsanlage direkt aus dem Treppenraum, Volumenstrom: 10.000 m³/h im Normzustand)
<p>Wasserebellöschanlage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Systemtechnik Herzog GmbH • ortsfeste Niederdruckanlage • <u>Brandraum</u> 1 Sprühkopf mit 1 - 5 offenen Dralldüsen, Abstand Mitte Sprühkopf-Decke: 110 mm • <u>Treppenraum</u> 3 Sprühhohreinheiten - getrennt aktivierbar 8 Sprühköpfe je Sprühhohreinheit - getrennt aktivierbar 1 - 5 offene Dralldüsen je Sprühkopf • Betriebsüberdruck: <ul style="list-style-type: none"> <u>minimal: 4 bar</u> Tropfengrößen: - Arithmetischer Mittelwert $D_{10} = 9,1 \mu\text{m}$ - Sauter-Durchmesser $D_{32} = 20,8 \mu\text{m}$ - Volumenbezogene Tropfendurchmesser $D_{V,10\%} = 10,1 \mu\text{m}$ $D_{V,50\%} = 17,3 \mu\text{m}$ $D_{V,90\%} = 33,4 \mu\text{m}$ $D_{V,99\%} = 47,0 \mu\text{m}$ - Anzahlbezogener Tropfendurchmesser $D_{A,50\%} = 10,0 \mu\text{m}$ <u>maximal: 8 bar</u> Tropfengrößen: - Arithmetischer Mittelwert $D_{10} = 8,3 \mu\text{m}$ - Sauter-Durchmesser $D_{32} = 15,8 \mu\text{m}$ - Volumenbezogene Tropfendurchmesser $D_{V,10\%} = 9,5 \mu\text{m}$ $D_{V,50\%} = 16,9 \mu\text{m}$ $D_{V,90\%} = 32,1 \mu\text{m}$ $D_{V,99\%} = 46,0 \mu\text{m}$ - Anzahlbezogener Tropfendurchmesser $D_{A,50\%} = 9,0 \mu\text{m}$ • Wasservolumenstrom in Abhängigkeit vom Betriebsüberdruck, der aktivierten Sprühhohreinheiten, der aktivierten Sprühköpfe, der Anzahl von Düsen je Sprühkopf und dem Düsentyp • Auslösung der Löschanlage: manuell u.a. nach Auslösen von Indikatorsprinklern mit unterschiedlichen RTI-Werten (optional) oder nach Auslösen von Brandmeldern an verschiedenen Positionen im Brand- bzw. Treppenraum

zu Tabelle 1: Versuchsaufbau und Meßtechnik	
Indikatorsprinkler	<ul style="list-style-type: none"> • Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: 5 mm Glasfaß, Nennauslösetemperatur: 68 °C, mittlerer RTI-Wert: ca. 100 m^{1/2} s^{1/2} • Sp1*: 3 mm Glasfaß, Nennauslösetemperatur: 68 °C, mittlerer RTI-Wert: ca. 50 m^{1/2} s^{1/2} • Positionen: <ul style="list-style-type: none"> - zentral an der Decke im Brandraum Sp1, Sp1* - zentral im Treppenauge in 4 m (1,5 m über dem Podest der 1. Etage: Sp3) und 6,5 m Höhe (1,5 m über dem Podest der 2. Etage: Sp4) - zentral unter dem Podest der 3. Etage (Sp5)
Brandmelder	<p>foto-elektronischer Rauchmelder</p> <p>Positionen: <ul style="list-style-type: none"> - zentral an der Decke im Brandraum neben dem Sprühkopf bzw. in 1 m Abstand vom Sprühkopf - zentral im Treppenauge an der Treppenraumdecke </p>
Meßtechnik und Meßdatenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserbeaufschlagung • Temperaturen an verschiedenen Meßpositionen (Brandraum, Treppenraum) • Wasservolumenstrom an verschiedenen Meßpositionen (Brandraum, Treppenraum) • Wasserdruck an verschiedenen Meßpositionen (Brandraum, Treppenraum) • Dynamischer Druck der Luft bzw. der Brandgase (=> Luft- bzw. Brandgasgeschwindigkeit) an den Türöffnungen am Treppenraum • Strömungsgeschwindigkeit an 1 m²-Öffnung (3. Etage) • Abbrandmasse, Abbrandrate, Wärmefreisetzung im Brandraum (Abbrandwaage) • Rauchdichte an diversen Meßpositionen im Treppenraum • Brandgasanalyse (Brandraum, Treppenraum) • Meßdatenerfassung und -auswertung mittels PC
Kamera- und Videotechnik	<p>Farbvideokameras:</p> <p>Positionen: <ul style="list-style-type: none"> - Holzrahmenbauwand des Brandraumes - seitliches Beobachtungsfenster am Treppenraum (Erdgeschoß) - Eingangstür zum Treppenraum (Erdgeschoß) - Beobachtungsfenster 1. Etage - Podest - Beobachtungsfenster 2. Etage - Podest - Beobachtungsfenster 3. Etage - Podest - 1 m²-Öffnung (3. Etage) </p> <p>Fotoaufnahmen</p>

Tabelle 2: Meßstellenplan

Position	Meßstellen- bezeichnung	Position der Meßstellen
[1]	ΔM	Abbrandwaage unter dem Brandraumboden
Löschwasser im Treppenraum		
[2]	V_{gesamt}	Löschwasservolumenstrom gesamt (Magnetisch-induktiver Durchflußmesser)
[3]	$p_{W,T,u,l}$	Überdruck am untersten Wassernebelsprühkopf der linken Steigleitung (Piezoresistiver Druckmeßumformer)
[4]	$p_{W,T,o,l}$	Überdruck am obersten Wassernebelsprühkopf der linken Steigleitung (Piezoresistiver Druckmeßumformer)
[5]	$p_{W,T,u,M}$	Überdruck am untersten Wassernebelsprühkopf der mittleren Steigleitung (Piezoresistiver Druckmeßumformer)
[6]	$p_{W,T,o,M}$	Überdruck am obersten Wassernebelsprühkopf der mittleren Steigleitung (Piezoresistiver Druckmeßumformer)
Löschwasser im Brandraum		
[7]	V_{Br}	Löschwasservolumenstrom am Wassernebelsprühkopf im Brandraum (Magnetisch-induktiver Durchflußmesser)
[8]	$p_{W,B}$	Überdruck am Wassernebelsprühkopf im Brandraum (Piezoresistiver Druckmeßumformer)
Dynamischer Druck p (=>Strömungsgeschwindigkeit) (Prandtl-Staurohre) und dazugehörige Temperaturmeßstellen (T) (Mantel-Thermoelemente, NiCr-Ni(K), Mantel d=1,5 mm)		
Eingangstür zum Treppenraum		
[9]	p_{TR1}	zentral im <u>unteren Drittel</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Halle
[10]	p_{TR2}	zentral im <u>unteren Drittel</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Treppenraum
[11]	T_{TRu}	Temperaturmeßstelle im Bereich von p_{TR1} und p_{TR2}
[12]	p_{TR3}	zentral in den <u>oberen zwei Dritteln</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Halle
[13]	p_{TR4}	zentral in den <u>oberen zwei Dritteln</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Treppenraum
[14]	T_{TRo}	Temperaturmeßstelle im Bereich von p_{TR3} und p_{TR4}
Eingangstür zum Brandraum		
[15]	p_{BR1}	zentral im <u>unteren Drittel</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Brandraum
[16]	p_{BR2}	zentral im <u>unteren Drittel</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Treppenraum
[17]	T_{BRu}	Temperaturmeßstelle im Bereich von p_{BR1} und p_{BR2}
[18]	p_{BR3}	zentral in den <u>oberen zwei Dritteln</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Brandraum

zu Tabelle 2: Meßstellenplan		
[19]	p_{BR4}	zentral in den <u>oberen zwei Dritteln</u> der Tür, Sondenöffnung Richtung Treppenraum
[20]	T_{BR0}	Temperaturmeßstelle im Bereich von p_{BR3} und p_{BR4}
Maschineller Rauch- und Wärmeabzug (RWA) (Ansaugstutzen der Abgasreinigungsanlage) Natürlicher Rauch- und Wärmeabzug (1 m ² - Öffnung)		
[21]	v_{RWA}	Strömungsgeschwindigkeit (Flügelradanemometer)
[22]	T_{RWA}	Temperaturmeßstelle am Flügelradanemometer
Weitere Temperaturmeßstellen (Mantel-Thermoelemente, NiCr-Ni(K), Mantel d=1,5 mm)		
Brandraum		
[23]	T_{B1}	zentral im Brandraum, <u>Indikatorsprinkler Sp1 u. Sp1*</u> , 10 cm unter der Decke
[24]	T_{B2}	vordere rechte Ecke des Brandraumes (Blick von außen auf die Holzständerwand), 20 cm Entfernung von den Wänden, 5 cm unter der Decke (Holzbalkendecke)
[25]	T_{B3}	vordere linke Ecke des Brandraumes (Blick von außen auf die Holzständerwand), 20 cm Entfernung von den Wänden, 5 cm unter der Decke (Holzbalkendecke)
Eingangstür zum Brandraum - Treppenraumseite		
[26]	T_{BRSt}	Mitte Oberkante Tür (zentral über dem Oberlicht), <u>Indikatorsprinkler Sp2</u>
[27]	T_{BRl}	Gedachte Decke des Ergeschosses, 250 mm von der Brandraumwand, über der linken Türseite
[28]	T_{BRre}	Gedachte Decke des Ergeschosses, 250 mm von der Brandraumwand, über der rechten Türseite
		s. a. 2 Temperaturmeßstellen T_{BRu} und T_{BR0} bei den Prandtl-Rohren
Eingangstür zum Treppenraum - Treppenraumseite		
[29]	T_{TRSt}	Mitte Oberkante Tür (unterhalb vom Sturz)
		s. a. 2 Temperaturmeßstellen T_{TRu} und T_{TR0} bei den Prandtl-Rohren
Holzrahmenbauwände		
Gefach 1 (Außenwand + Installationsraum)		
[30]	$T_{Gf1,St1; u}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 100 mm oberhalb Mitte Öffnung - <u>Steckdose</u> - Öffnung (Höhe - Mittelpunkt der Öffnung: 0,3 m)
[31]	$T_{Gf1,St1; m}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 100 mm oberhalb Mitte Öffnung - <u>Lichtschalter</u> - Öffnung (Höhe - Mittelpunkt der Öffnung: 1,1 m)
[32]	$T_{Gf1,St1; o}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 100 mm oberhalb Mitte Öffnung - <u>Verteiler- bzw. Abzweigdose</u> (Höhe - Mittelpunkt der Öffnung: 2,3 m)
[33]	$T_{Gf1,St1; 2}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, an vertikaler Lattung des Installationsraumes anliegend (<u>ungefähr gegenüber Ständer 1 der Außenwand</u>) anliegend im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 2500 mm von der Unterkante der OSB-Platte vertikal nach oben
[34]	$T_{Gf1,St1; 3}$	Außenwand , unter der dazwischenliegenden OSB-Platte, an <u>Ständer 1 der Außenwand</u> anliegend im Dämmmaterial, Höhe: 400 mm über dem Boden

zu Tabelle 2: Meßstellenplan		
[35]	$T_{Gf 1, St1; 4}$	Außenwand , unter der dazwischenliegenden OSB-Platte, an <u>Ständer 1 der Außenwand</u> anliegend im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 2500 mm von der Unterkante der OSB-Platte vertikal nach oben
[36]	$T_{Gf 1, St2; 5}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, an vertikaler Lattung des Installationsraumes anliegend, (<u>ungefähr gegenüber Ständer 2 der Außenwand</u>) im Dämmmaterial, Höhe: 400 mm vom Boden
[37]	$T_{Gf 1, St2; 6}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, an vertikaler Lattung des Installationsraumes anliegend, (<u>ungefähr gegenüber Ständer 2 der Außenwand</u>) in einer Entfernung von 2500 mm von der Unterkante der OSB-Platte vertikal nach oben
[38]	$T_{Gf 1; 7}$	Installationsraum , Mitte im Gefach 1, unter der Oberfläche der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial
[39]	$T_{Gf 1, St2; 8}$	Außenwand , unter der dazwischenliegenden OSB-Platte, an <u>Ständer 2 der Außenwand</u> anliegend im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 100 mm oberhalb Mitte Öffnung, Höhe: 400 mm vom Boden
[40]	$T_{Gf 1, St2; 9}$	Außenwand , unter der dazwischenliegenden OSB-Platte, an <u>Ständer 2 der Außenwand</u> anliegend im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 2500 mm von der Unterkante der OSB-Platte vertikal nach oben
[41]	$T_{Gf 1; 10}$	Außenwand , <u>Mitte im Gefach 1</u> , unter der Oberfläche der dazwischenliegenden OSB-Platte, im Dämmmaterial
Gefach 2 (Außenwand + Installationsraum)		
[42]	$T_{Gf 2, St4; 1}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 100 mm oberhalb Mitte Öffnung - <u>Steckdosenöffnung</u> (Höhe - Mittelpunkt der Öffnung: 0,3 m)
[43]	$T_{Gf 2, St4; 2}$	Installationsraum , unter der brandraumseitigen OSB-Platte, an vertikaler Lattung des Installationsraumes anliegend (<u>ungefähr gegenüber Ständer 4 der Außenwand</u>), im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 2500 mm von der Unterkante der OSB-Platte vertikal nach oben
[44]	$T_{Gf 2, St4; 3}$	Installationsraum , <u>Mitte im Gefach 2</u> , unter der Oberfläche der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial
[45]	$T_{Gf 2, St4; 4}$	Außenwand , unter der dazwischenliegenden OSB-Platte, an <u>Ständer 4 der Außenwand</u> anliegend im Dämmmaterial, Höhe: 400 mm vom Boden
[46]	$T_{Gf 2, St4; 5}$	Außenwand , unter der dazwischenliegenden OSB-Platte, an <u>Ständer 4 der Außenwand</u> anliegend im Dämmmaterial, in einer Entfernung von 2500 mm von der Unterkante der OSB-Platte vertikal nach oben
[47]	$T_{Gf 2; 6}$	Außenwand , <u>Mitte im Gefach 2</u> , unter der Oberfläche der brandraumseitigen OSB-Platte, im Dämmmaterial
Gefach 4 (Außenwand)		
[48]	$T_{Gf 4; 1}$	Unterkante OSB-Platte, Mitte, außen, auf der Oberfläche der äußeren OSB-Platte
[49]	$T_{Gf 4; 2}$	Unterkante OSB-Platte, Mitte, innen, unter der Oberfläche der äußeren OSB-Platte im Dämmmaterial der Außenwand
Gefach 5 (Außenwand)		
[50]	$T_{Gf 5; 1}$	Unterkante OSB-Platte, Mitte, außen, auf der Oberfläche der äußeren OSB-Platte
[51]	$T_{Gf 5; 2}$	Unterkante OSB-Platte, Mitte, innen, unter der äußeren OSB-Platte im Dämmmaterial der Außenwand

zu Tabelle 2: Meßstellenplan		
Gefach 6 (Außenwand)		
[52]	$T_{Gr6,1}$	250 mm über Unterkante OSB-Platte, Mitte, außen, auf der Oberfläche der äußeren OSB-Platte
[53]	$T_{Gr6,2}$	250 mm über Unterkante OSB-Platte, Mitte, innen, unter der äußeren OSB-Platte im Dämmmaterial der Außenwand
Treppenraum		
Erdgeschoß		
[54]	T1; EG	linke Treppenraumseite, Höhe Unterkante des 1. Podestes gegenüber, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[55]	T2; EG	linke Treppenraumseite, Höhe Unterkante des 1. Podestes gegenüber, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[56]	T3; EG	1/3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[57]	T4; EG	2/3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[58]	T5; EG	rechte Treppenraumseite, unter dem 1. Podest, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[59]	T6; EG	rechte Treppenraumseite, unter dem 1. Podest, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[60]	T7; EG	zentral im Treppenauge (Freiraum zwischen den Treppen), Mitte des Stockwerkes
1. Etage		
[61]	T1; 1E	rechte Treppenraumseite, Höhe Unterkante des 2. Podestes, gegenüber, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[62]	T2; 1E	rechte Treppenraumseite, Höhe Unterkante des 2. Podestes, gegenüber, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[63]	T3; 1E	1/3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[64]	T4; 1E	2/3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[65]	T5; 1E	linke Treppenraumseite, unter dem 2. Podest, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[66]	T6; 1E	linke Treppenraumseite, unter dem 2. Podest, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[67]	T7; 1E	zentral im Treppenauge (Freiraum zwischen den Treppen), Mitte des Stockwerkes, <u>Indikatorsprinkler Sp3</u>
2. Etage		
[68]	T1; 2E	linke Treppenraumseite, Höhe Unterkante des 3. Podestes, gegenüber, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[69]	T2; 2E	linke Treppenraumseite, Höhe des 3. Podestes, gegenüber, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[70]	T3; 2E	1/3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[71]	T4; 2E	2/3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[72]	T5; 2E	rechte Treppenraumseite, unter dem 3. Podest, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[73]	T6; 2E	rechte Treppenraumseite, unter dem 3. Podest, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[74]	T7; 2E	zentral im Treppenauge (Freiraum zwischen den Treppen), Mitte des Stockwerkes, <u>Indikatorsprinkler Sp4</u>

zu Tabelle 2: Meßstellenplan		
3. Etage		
[75]	T1; 3E	linke Treppenraumseite, unter dem Dach, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[76]	T2; 3E	linke Treppenraumseite, unter dem Dach, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[77]	T3; 3E	1/ 3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[78]	T4; 3E	2/ 3 Stockwerkshöhe unter der Treppe, Stufenmitte, am Holz anliegend
[79]	T5; 3E	rechte Treppenraumseite, unter dem Dach, hinten, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[80]	T6; 3E	rechte Treppenraumseite, unter dem Dach, vorne, jeweils 0,5 m Abstand von den Treppenraumwänden
[81]	T7; 3E	zentral im Treppenauge (Freiraum zwischen den Treppen), Mitte des Stockwerkes
Gaskonzentrationen		
[82]	O _{2, TR,0}	Sauerstoffkonzentration Treppenraum - <u>zentral im obersten Stockwerk</u> <u>halbe Etagenhöhe</u>
[83]	CO _{2, TR,0}	Kohlendioxidkonzentration Treppenraum - <u>zentral im obersten Stockwerk</u> <u>halbe Etagenhöhe</u>
[84]	CO _{TR,0}	Kohlenmonoxidkonzentration Treppenraum - <u>zentral im obersten Stockwerk</u> <u>halbe Etagenhöhe</u>
[85]	CO _{2, TR,z}	Kohlendioxidkonzentration Treppenraum - <u>zentral im Treppenraumquerschnitt</u> <u>auf halber Treppenraumhöhe</u>
Rauchdichtemessung (Maurer-Lichtmeßgerät)		
[86]	RD1	Podest der 3. Etage, 1,5 m Höhe
[87]	RD2	Podest der 2. Etage, 1,5 m Höhe
Videokameras		
[88]	Vid1	Holzrahmenbauwand
[89]	Vid2	Beobachtungsfenster: linke Treppenraumseite
[90]	Vid3	Beobachtungsfenster: Eingangstür zum Treppenraum
[91]	Vid4	Beobachtungsfenster: Podest der 1. Etage
[92]	Vid5	Beobachtungsfenster: Podest der 2. Etage
[93]	Vid6	Beobachtungsfenster: Podest der 3. Etage
[94]	Vid7	Natürlicher Rauch- und Wärmeabzug (1 m ² -Öffnung)

Tabelle 3: Brand- und Löschversuche

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)									
Brand- und Löschversuche	Brandraumtemperatur (Maximalwert)	Temperatur am Ständer der Holzbauwand - Außenwand (Maximalwert)	Temperatur im Installationsraum (Maximalwert)	Temperaturen im Treppenraum (Maximalwerte)	Brandmelder Brand [Br]- u. Treppenraum [Tr] (fotoelektr. Rauchmelder)	Indikatordrinkler Auslösezeitpunkte u. -temperaturen Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: Glasfaß: 5mm, 68°C RTI= ca. 100 (ms) ^{1/2} Sp1*: Glasfaß: 3 mm, 100 68°C, RTI= ca. 50 (ms) ^{1/2}	Löschanlage Auslösezeitpunkt Löschzeit Löschwassermenge	Rauch- und Wärmeabzug (RWA) im Treppenraum	1. Abbrandmasse 2. Abbrandrate (Mittelwert) 3. Wärmestrom theoretisch (Mittelwert)
Versuche mit festen Brandstoffen									
Versuch H 1 Brand im Brandraum Brandlast: ca. 167 kg (1 Brandlastpalette mit Zündwanne (0,5 l n-Heptan)) Zündkrippe im hinteren Bereich des Brandraumes Türen: * Halle>Brandraum: zu * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 5 Düsen (4 Düsen am Umfang + Zentraldüse, ca. 8 bar, 80 l/min) Dämmstoff: Flachs - normalentfl. (B2)	vor dem 1. Löschein-satz: $T_{gr, 180} = 180^{\circ}\text{C}$ (2min 0s) vor dem 2. Löschein-satz: $T_{gr, 351} = 351^{\circ}\text{C}$ (12min 0s)	Gefach 1: $T_{gr, 92, 9} = 44^{\circ}\text{C}$ (12min 40 s)	Gefach 1: $T_{gr, 91, 9} = 77^{\circ}\text{C}$ (16min 20s)	unter Podest d. 1.Etage: $T_{z, 90} = 29^{\circ}\text{C}$ (13min 40s) unter Podest d. 2.Etage: $T_{z, 115} = 50^{\circ}\text{C}$ (12min 40s) unter Podest d. 3.Etage: $T_{z, 21} = 36^{\circ}\text{C}$ (12min 50s) unter d. Dach: $T_{z, 31} = 34^{\circ}\text{C}$ (13min 0s)	ohne	Sp1: 1min 55s bei TB1= ca. 179°C Sp2: 13min 1s bei TBRST= ca. 71°C Sp3, Sp4: keine Auslösung	1. Löscheinsatz: Sp1 1min 55s bis 3min= 1min 5s: ca. 87 l 2. Löscheinsatz: Sp2 13min 1s bis 17min 50s= 4min 49s: ca. 385 l gesamt: 5min 54 s: ca. 472 l	maschinell (10.000 m³/h im Normzustand nach der 2. Auslösung der Löschanl. (Sp2))	bis 1. Löscheinsatz 1. ca. 1 kg 2. ca. 0,52 kg/min 3. ca. 0,14 MW (bei mittlerem Heizwert: ca. 16,5 MJ/kg)
Versuch H 2 Brand im Brandraum Brandlast: ca. 167 kg (1 Brandlastpalette mit Zündwanne (0,5 l n-Heptan)) Zündkrippe im vorderen Bereich des Brandraumes Türen: * Halle>Brandraum: zu * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 5 Düsen (4 Düsen am Umfang + Zentraldüse, ca. 4 bar, 60 l/min) Dämmstoff: Flachs - normalentfl. (B2)	$T_{gr, 515} = 515^{\circ}\text{C}$ (7min 0s) $T_{gr, 723} = 723^{\circ}\text{C}$ (7min 0s)	Gefach 1: $T_{gr, 92, 9} = 81^{\circ}\text{C}$ (12min 40 s)	Gefach 1: $T_{gr, 91, 9} = 406^{\circ}\text{C}$ (7min 0s)	unter Podest d. 1.Etage: $T_{z, 60} = 76^{\circ}\text{C}$ (12min 33s) unter Podest d. 2.Etage: $T_{z, 115} = 119^{\circ}\text{C}$ (7min 0s) unter Podest d. 3.Etage: $T_{z, 21} = 76^{\circ}\text{C}$ (19min 30s) unter d. Dach: $T_{z, 31} = 81^{\circ}\text{C}$ (12min 10s)	ohne	Sp1: 1min 53 s bei TB1= ca. 171°C Sp2: 7min 3s bei TBRST= ca. 185°C Sp3, Sp4: keine Auslösung	Löscheinsatz: Sp2 7min 3s bis 11min 11s gesamt: 4min 8s: ca. 248 l	maschinell (10.000 m³/h im Normzustand nach Auslösung der Löschanl. (Sp2))	bis Löscheinsatz 1. ca. 5 kg 2. ca. 0,71 kg/min 3. ca. 0,2 MW (bei mittlerem Heizwert: ca. 16,5 MJ/kg)
Versuch H 3 Brand im Brandraum Brandlast: ca. 167 kg (1 Brandlastpalette mit Zündwanne (0,5 l n-Heptan)) Zündkrippe im vorderen Bereich des Brandraumes Türen: * Halle>Brandraum: zu * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhangstreifen (Höhe: 10 cm, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 4 Düsen (4 Düsen am Umfang, ca. 4 bar, 48 l/min) Dämmstoff: Flachs - normalentfl. (B2)	$T_{gr, 353} = 353^{\circ}\text{C}$ (4min 30s) $T_{gr, 380} = 380^{\circ}\text{C}$ (4min 30s)	Gefach 1: $T_{gr, 92, 9} = 68^{\circ}\text{C}$ (10min 10 s)	Gefach 1: $T_{gr, 91, 9} = 106^{\circ}\text{C}$ (11min 40s)	unter Podest d. 1.Etage: $T_{z, 60} = 77^{\circ}\text{C}$ (9min 0s) unter Podest d. 2.Etage: $T_{z, 115} = 94^{\circ}\text{C}$ (4min 30s) unter Podest d. 3.Etage: $T_{z, 21} = 82^{\circ}\text{C}$ (8min 20s) unter d. Dach: $T_{z, 31} = 80^{\circ}\text{C}$ (7min 10s)	Brandmelder Br direkt neben dem Sprühkopf Br: 30s max. Brandraumtemp.: $T_{gr, 29} = 29^{\circ}\text{C}$ Tr: 3min 15s max. Brandraumtemp.: $T_{gr, 270} = 270^{\circ}\text{C}$	Sp1: 1min 44 s bei TB1= ca. 145°C Sp2: 4min 33s bei TBRST= ca. 155°C Sp3, Sp4: keine Auslösung	Löscheinsatz: Sp2 1. 4min 33s bis 14min 0s= 9min 27s: 454 l 2. 14min 20s bis 16min 20s= 2min 0s: 96 l 3. 16min 50s bis 18min 10s= 1min 20s: 64 l gesamt: 12min 47s: ca. 614 l	ohne	bis 1. Löscheinsatz 1. ca. 2 kg 2. ca. 0,44 kg/min 3. ca. 0,12 MW (bei mittlerem Heizwert: ca. 16,5 MJ/kg)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

zu Tabelle 3: Brand- und Löscherische

Brand- und Löscherische	Brandraumtemperatur (Maximalwert)	Temperatur am Ständer der Holzhallenbauwand (Maximalwert)	Temperatur im Installationsraum (Maximalwert)	Temperaturen im Treppenraum (Maximalwerte)	Brandmelder Treppenraum (Tr) (fotoelektr. Rauchmelder)	Indikatordrinkler Auslösezeitpunkte u. -temperaturen Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: Glasfaß: 5mm, 68°C RTI= ca. 100 (ms) ^{1/2} Sp1*; Glasfaß: 3 mm, 68°C, RTI= ca. 50 (ms) ^{1/2}	Löschanlage Auslösezeitpunkt Löscherzeit Löscherwasser-menge	Rauch- und Wärmeabzug (RWA) im Treppenraum	1. Abbrandmasse 2. Abbrandrate (Mittelwert) 3. Wärmestrom theoretisch (Mittelwert)
<p>Brand- und Löscherische</p> <p>Versuch H 5 Brand im Treppenraum (Podest 1. Etage, am Geländer) Brandlast: ca. 12,6 kg (1 Zündkrippe mit Zündwanne (0,5 l n-Heptan)) am Geländer Türen: * Halle > Brandraum: zu * Halle > Treppenraum: auf * Brandraum > Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: mittleres Sprührohr im Treppenauge aktiv (8 Sprühebenen mit insgesamt 16 Sprühköpfen und 56 Düsen, ca. 4 bar in Sprühebene 8 (Dachbereich, ca. 475 l/min) Bestückung der Sprühköpfe: Sprühebene 1, 2, 3, 5, 6, 7: beide Sprühköpfe mit je 3 Düsen Sprühebene 4 und 8: beide Sprühköpfe mit je 5 Düsen</p>	Umgebungs-temperatur	Umgebungs-temperatur	Umgebungs-temperatur	unter Podest d. 1. Etage: Umgebungs-temp.: ca. 20°C unter Podest d. 2. Etage: Umgebungs-temp.: ca. 20°C unter Podest d. 3. Etage: T _{2,2E} = 43°C (1min 4s) T _{1,3E} = 31°C (7min 10s)	Br: keine Auslösung Tr: 58s	Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: keine Auslösung	Löscherinsatz: 1. 1min 4s bis 2min 30s = 1min 26s, 680 l 2. 3min 40s bis 4min 10s = 30s, 238 l 3. 6min 30s bis 7min 20s = 50s, 396 l gesamt: 2min 46s: ca. 1314 l	natürlich (1 m ² große Öffnung in 3. Etage über Kopfhöhe nach dem Löscherinsatz)	bis 1. Löscherinsatz 1. ca. 1 kg 2. ca. 0,94 kg/min 3. ca. 0,26 MW (bei mittlerem Heizwert: ca. 16,8 MJ/kg)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

zu Tabelle 3: Brand- und Löschsversuche

Brandraumtemperatur (Maximalwert)	Temperatur am Ständer der Holzbauwand (Maximalwert)	Temperatur im Installationsraum (Maximalwert)	Temperaturen im Treppenraum (Maximalwerte)	Brandmelder (Br-) u. Treppenraum (Tr) (fotoelektr. Rauchmelder)	Indikatorsprinkler Auslösezeitpunkte u. -temperaturen Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: Glasfaß: 5mm, 68°C RTI= ca. 100 (ms) ^{1/2} Sp1*: Glasfaß: 3 mm, 68°C, RTI= ca. 50 (ms) ^{1/2}	Löschanlage Auslösezeitpunkt Löschzeit Löschwassermenge	Rauch- und Wärmeabzug (RWA) im Treppenraum	1. Abbrandmasse (Mittelwert) 2. Abbrandrate (Mittelwert) 3. Wärmestrom theoretisch (Mittelwert)
Versuche mit flüssigen Brandstoffen								
Brand- und Löschsversuche								
Versuch Ö 1 Brand im Brandraum Brandlast: 1 Bratpfanne mit 0,6 l auf Flammpunkttemperatur (ca. 350°C) vorgeheiztem Pflanzenöl, Höhe der Bratpfanne: 45 cm (Untersatz: Holzkrippe und 3 Pastenbrenner) Türen: * Halle>Brandraum: auf * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 4 Düsen (4 Düsen am Umfang, ca. 4 bar, 48 l/min) Dämmstoff: Zellulose (Installationsraum, Gefäch1), Flachs (übrige Gefache des Installationsraumes und der Außenwand) - normalentflammbar (B2)	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung
Versuch Ö 2 Brand im Brandraum Brandlast: 1 Bratpfanne mit 0,6 l auf Flammpunkttemperatur (ca. 350°C) vorgeheiztem Pflanzenöl, Höhe der Bratpfanne: 45 cm (Untersatz: Holzkrippe und 3 Pastenbrenner) Türen: * Halle>Brandraum: zu * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 4 Düsen (4 Düsen am Umfang, ca. 4 bar, 48 l/min) Dämmstoff: Zellulose (Installationsraum, Gefäch1), Flachs (übrige Gefache des Installationsraumes und der Außenwand) - normalentflammbar (B2)	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung	keine Messung
				Br: nicht vorhanden Tr: keine Auslösung	Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: keine Auslösung Sp5: keine Auslösung	Löschsinsatz: (bei einer Flammenlänge von ca. 0,8m - 1m) 2min 20s bis 3min 2s gesamt: 42s: ca. 34 l	ohne	bis Löschsinsatz 1. ca. 0,27 kg (300ml) 2. ca. 0,12 kg/min 3. ca. 0,08 MW (bei Heizwert: 42 MJ/kg)
				Br: nicht vorhanden Tr: keine Auslösung	Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: keine Auslösung	Löschsinsatz: (bei einer Flammenlänge von ca. 0,8m - 1m) 1min 40s bis 2min 22s gesamt: 42s: ca. 34 l	ohne	bis Löschsinsatz 1. ca. 0,19 kg (210ml) 2. ca. 0,11 kg/min 3. ca. 0,08 MW (bei Heizwert: 42 MJ/kg)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

zu Tabelle 3: Brand- und Löschversuche

Brand- und Löschversuche	Brandraumtemperatur (Maximalwert)	Temperatur am Ständer der Holzhaut (Maximalwert)	Temperatur im Installationsraum (Maximalwert)	Temperaturen im Treppenraum (Maximalwerte)	Brandmelder (Br) u. Treppenraum (Tr) (fotolektr. Rauchmelder)	Indikatordrinkler Auslösezeitpunkte u. -temperaturen Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: Glasfaß: 5mm, 68°C RTI= ca. 100 (ms) ^{1/2} Sp1*: Glasfaß: 3 mm, 68°C, RTI= ca. 50 (ms) ^{1/2}	Löschanlage Auslösezeitpunkt Löschzeit Löschwassermenge	Rauch- und Wärmeabzug (RWA) im Treppenraum	1. Abbrandmasse (Mittelwert) 2. Abbrandrate (Mittelwert) 3. Wärmestrom theoretisch (Mittelwert)
Versuche mit flüssigen Brandstoffen									
Versuch Ö 3 Brand im Brandraum Brandlast: 1 Braipfanne mit 0,6 l auf Flammpunkttemperatur (ca. 350°C) vor-geheiztem Pflanzenöl), Höhe der Braipfanne: 85 cm (Herd-Höhe, Untersatz: Holz-krippe und 3 Pastenbrenner), Toilettenpapierstreifen Türen: * Halle>Brandraum: auf * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: Sprühkopf mit 5 Düsen (4 Düsen am Umfang + Zentraldüse, ca. 4 bar, 60 l/min) Dämmstoff: Zellulose (Installationsraum, Gefach1), Flachs (übrige Gefache des Installationsraumes und der Außenwand)-normalentflammbar (B2)	$T_{Br} = 79^{\circ}\text{C}$ (1min 45s) $T_{Bz} = 358^{\circ}\text{C}$ (1min 50s)	Gefach 1: $T_{gr, 60,0} = 16^{\circ}\text{C}$ (Umgebungstemperatur) Gefach 6: $T_{gr, 1,0} = 64^{\circ}\text{C}$ (1min 50s)	Gefach 1: $T_{gr, 60,0} = 27^{\circ}\text{C}$ (4min 10s)	Umgebungstemperatur	Brandmelder Br 1m hinter dem Sprühkopf Br: 1min 11s max. Brandraumtemp.: $T_{Bz} = 70^{\circ}\text{C}$ Tr: keine Auslösung	Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: keine Auslösung	Löscheinsatz: (36 s nach Auslösung von Brandmelder Br) 1min 47s bis 2min 10s gesamt: 23s: ca. 23 l (Ölbrand gelöscht, Pastenbrenner unter der Pfanne konnten nicht gelöscht werden)	ohne	bis Löscheinsatz 1. ca. 0,41 kg (450ml) 2. ca. 0,23 kg/min 3. ca. 0,16 MW (bei Heizwert: 42 MJ/kg)
Versuch Ö 4 Brand im Brandraum Brandlast: 1 Braipfanne mit 0,6 l auf Flammpunkttemperatur (ca. 350°C) vor-geheiztem Pflanzenöl), Höhe der Braipfanne: 85 cm (Herd-Höhe, Untersatz: Holzkrippe und 3 Pastenbrenner), Toilettenpapierstreifen Türen: * Halle>Brandraum: auf * Halle>Treppenraum: auf * Brandraum>Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 5 Düsen (4 Düsen am Umfang + Zentraldüse, ca. 4 bar, 60 l/min) Dämmstoff: Zellulose (Installationsraum, Gefach1), Flachs (übrige Gefache des Installationsraumes und der Außenwand)-normalentflammbar (B2)	$T_{Br} = 57^{\circ}\text{C}$ (1min 0s) $T_{Bz} = 227^{\circ}\text{C}$ (1min 10s)	Gefach 1: $T_{gr, 60,0} = 18^{\circ}\text{C}$ (Umgebungstemperatur) Gefach 6: $T_{gr, 1,0} = 37^{\circ}\text{C}$ (1min 10s)	Gefach 1: $T_{gr, 60,0} = 22^{\circ}\text{C}$ (2min 40s)	Umgebungstemperatur	Brandmelder Br 1m hinter dem Sprühkopf Br: 43s max. Brandraumtemp.: $T_{Bz} = 37^{\circ}\text{C}$ Tr: keine Auslösung	Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: keine Auslösung	Löscheinsatz: (4 s nach Auslösung von Brandmelder Br) 47s bis 1min 10s gesamt: 23s: ca. 23 l (Ölbrand gelöscht, Pastenbrenner unter der Pfanne konnten nicht gelöscht werden)	ohne	bis Löscheinsatz 1. ca. 0,23 kg (250ml) 2. ca. 0,29 kg/min 3. ca. 0,2 MW (bei Heizwert: 42 MJ/kg)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

zu Tabelle 3: Brand- und Löschversuche		Brandraumtemperatur (Maximalwert)	Temperatur am Ständer der Holzbauwand (Maximalwert)	Temperatur im Installationsraum (Maximalwert)	Temperaturen im Treppenraum (Maximalwerte)	Brandmelder Brand [Br]- u. Treppenraum [Tr] (fotoelektr. Rauchmelder)	Indikatordrinkingler Auslösezeitpunkte u. -temperaturen Sp1, Sp2, Sp3, Sp4, Sp5: Glasfaß: 5mm, 68°C RTI= ca. 100 (ms) ³ Sp1*: Glasfaß: 3 mm, 68°C, RTI= ca. 50 (ms) ³	Löschanlage Auslösezeitpunkt Löschzeit Löschwassermenge	Rauch- und Wärmeabzug (RWA) im Treppenraum	1. Abbrandmasse (Mittelwert) 2. Abbrandrate (Mittelwert) 3. Wärmestrom theoretisch (Mittelwert)
Versuche mit festen und flüssigen Brandstoffen										
Versuch H 4										
Brand im Brandraum										
Brandlast: ca. 167kg (1 Brandlastpal. mit Zündwanne (0,5 l n-Heptan) und 1 Bratpfanne mit 0,2 l auf Flammpunkttemperatur (ca. 350°C) vorgeheiztem Pflanzenöl), Höhe der Bratpfanne: 45 cm (Untersatz: Holzkruppe und 3 Pastenbrenner) Türen: * Halle > Brandraum: zu * Brandraum > Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 4 Düsen (4 Düsen am Umfang, ca. 4 bar, 48 l/min) Dämmstoff: Zellulose (Installationsraum, Gefach 1), Flachs (übrige Gefache des Installationsraumes und der Außenwand)-normalentflammbar (B2)										
$T_{Br} = 416^{\circ}\text{C}$ (6min 47s) $T_{Br} = 469^{\circ}\text{C}$ (6min 50s)	Gefach 1: $T_{Gr, Br, P} = 25^{\circ}\text{C}$ (9min 10s)	Gefach 1: $T_{Gr, Br, P} = 88^{\circ}\text{C}$ (11min 30s)	unter Podest d. 1. Etage: $T_{2EG} = 34^{\circ}\text{C}$ (9min 10s) unter Podest d. 2. Etage: $T_{5, 1E} = 94^{\circ}\text{C}$ (6min 50s) unter Podest d. 3. Etage: $T_{2, 3E} = 57^{\circ}\text{C}$ (7min 0s) unter d. Dach: $T_{9, 3E} = 44^{\circ}\text{C}$ (7min 10s)	Brandmelder Br 1m hinter dem Sprühkopf Br: 32s max. Brandraumtemp.: $T_{Br} = 43^{\circ}\text{C}$ Tr: 6min 6s max. Brandraumtemp.: $T_{Tr} = 414^{\circ}\text{C}$	Sp1*: 1min 31s bei TB1= ca. 153°C Sp2*: 6min 47s bei TBRST= ca. 91°C Sp3, Sp4: keine Auslösung	Löscheinsatz: Sp2 1. 6min 47s bis 10min 15s= 3min 28s; 166 l 2. 11min 10s bis 13min 10s= 2min 0s; 96 l gesamt: 5min 28s; ca. 262 l	natürlich (1 m ² große Öffnung in 3. Etage über Kopfhöhe nach Löschtbe-ginn)	bis 1. Löscheinsatz 1. ca. 2,3 kg 2. ca. 0,34 kg/min 3. ca. 0,1 MW (bei mittlerem Heizwert: ca. 16,6 MJ/kg)		
Versuch H 6										
Brand im Brandraum										
Brandlast: ca. 168kg (1 Brandlastpal. mit Zündwanne (0,5 l n-Heptan) und 1 Bratpfanne mit 1 l auf Flammpunkttemperatur (ca. 350°C) vorgeheiztem Pflanzenöl), Höhe der Bratpfanne: 45 cm (Untersatz: Holzkruppe und 3 Pastenbrenner) Türen: * Halle > Brandraum: zu * Halle > Treppenraum: auf * Brandraum > Treppenraum: auf mit Vorhang (vollständig, unterhalb des Oberlichtes) Wassernebel: 1 Sprühkopf mit 5 Düsen (4 Düsen am Umfang + Zentraldüse, ca. 4 bar, 60 l/min) Dämmstoff: Zellulose (Installationsraum, Gefach 1), Flachs (übrige Gefache des Installationsraumes und der Außenwand)-normalentflammbar (B2)										
$T_{Br} = 153^{\circ}\text{C}$ (1min 43s) $T_{Br} = 359^{\circ}\text{C}$ (2min 0s)	Gefach 1: $T_{Gr, Br, P} = 18^{\circ}\text{C}$ (Umgebungstemperatur)	Gefach 1: $T_{Gr, Br, P} = 35^{\circ}\text{C}$ (11min 30s)	unter Podest d. 1. Etage: $T_{2EG} = 21^{\circ}\text{C}$ (1min 10s) unter Podest d. 2. Etage: $T_{5, 1E} = 30^{\circ}\text{C}$ (2min 0s) unter Podest d. 3. Etage: $T_{9, 3E} = 28^{\circ}\text{C}$ (1min 30s) unter d. Dach: $T_{9, 3E} = 26^{\circ}\text{C}$ (2min 20s)	Brandmelder Br 1m hinter dem Sprühkopf Br: 38s max. Brandraumtemp.: $T_{Br} = 30^{\circ}\text{C}$ Tr: 2min 19s max. Brandraumtemp.: $T_{Tr} = 170^{\circ}\text{C}$	Sp1*: 1min 26s bei TB1= ca. 140°C Sp1: 1min 43s bei TB1= ca. 153°C Sp2, Sp3, Sp4: keine Auslösung	Löscheinsatz: Sp1 Intervall-Löschen 1. 1min 43s 2. 1min Löschchen ½ min Pause 3. 1min Löschchen ½ min Pause 4. 1min Löschchen ½ min Pause 5. 1min Löschchen ½ min Pause 6. 1min Löschchen gesamt: 7min; ca. 420 l	natürlich (1 m ² große Öffnung in 3. Etage über Kopfhöhe nach Löschtbe-ginn)	bis 1. Löscheinsatz 1. ca. 1 kg 2. ca. 0,58 kg/min 3. ca. 0,16 MW (bei mittlerem Heizwert: ca. 16,7 MJ/kg)		

Tabelle 4: Brandlast und Heizwertberechnung

Stoff	Heizwert H_u MJ/kg	Masse kg	Massenanteil
Versuche: H1, H2, H3			
Holzrippen (Kiefer, Holzfeuchte: ca. 10 %)	16	156	0,934
Vorhang (50% Baumwolle, 50% Polyester) - ohne Brandschutzausrüstung	20	0,55	0,003
Linoleum	21	9	0,054
Nadelfilzteppichboden (Polypropylen)	43	1,1	0,007
n-Heptan	44,7	0,35 (0,5 l)	0,002
Mittlerer Heizwert (entsprechend der Massenanteile) bzw. Gesamtsumme	16,5	167	1
Versuch: H5			
Holzrippen (Kiefer, Holzfeuchte: ca. 10 %)	16	12,6	0,969
n-Heptan	44,7	0,35 (0,5 l)	0,027
Mittlerer Heizwert (entsprechend der Massenanteile) bzw. Gesamtsumme	16,8	13	1
Versuch: H4			
Holzrippen (Kiefer, Holzfeuchte: ca. 10 %)	16	156	0,934
Vorhang (50% Baumwolle, 50% Polyester) - ohne Brandschutzausrüstung	20	0,55	0,003
Linoleum	21	9	0,054
Nadelfilzteppichboden (Polypropylen)	43	1,1	0,007
Pflanzenöl	42	0,18 (0,2 l)	0,001
n-Heptan	44,7	0,35 (0,5 l)	0,002
Mittlerer Heizwert (entsprechend der Massenanteile) bzw. Gesamtsumme	16,6	167,2	1
Versuch: H6			
Holzrippen (Kiefer, Holzfeuchte: ca. 10 %)	16	156	0,930
Vorhang (50% Baumwolle, 50% Polyester) - ohne Brandschutzausrüstung	20	0,55	0,003
Linoleum	21	9	0,054
Nadelfilzteppichboden (Polypropylen)	43	1,1	0,007
Pflanzenöl	42	0,9 (1 l)	0,005
n-Heptan	44,7	0,35 (0,5 l)	0,002
Mittlerer Heizwert (entsprechend der Massenanteile) bzw. Gesamtsumme	16,7	167,9	1

11. BILDER

Möglichkeiten der Brandübertragung

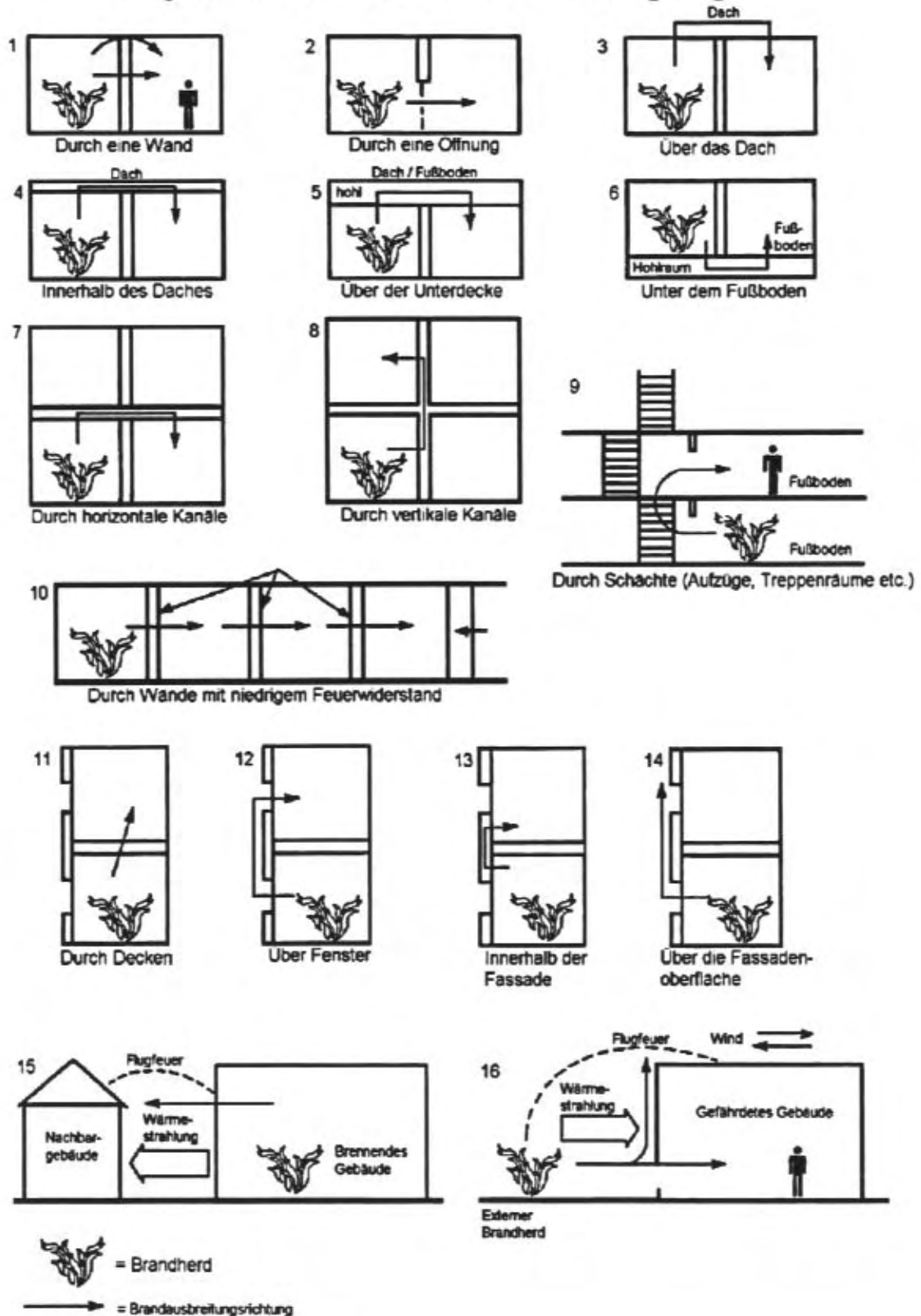


Bild 1: Möglichkeiten der Brandübertragung innerhalb und zwischen Gebäuden.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John



**Brand in einem Wohnzimmer (Brandraum: 25 m²)
mit Löscheinsatz der Feuerwehr**

Bild 2: Vollbrand in einem Wohnzimmer mit Löscheinsatz der Feuerwehr in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



**Versuch 6: Wohnzimmereinrichtung vor und nach dem Versuch
(Feuerwehreinsatz)**



Bild 3: Brand in einem Wohnzimmer - Wohnzimmereinrichtung vor und nach dem Brand bzw. Feuerwehreinsatz.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brand- und Rauchausbreitung bei der Ganzflächendoppelfassade



Bild 4: Brand- und Rauchausbreitung sowie Zerstörung von Verglasungen bei Gebäuden mit Ganzflächendoppelfassaden - Außenfassade mit Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), Brandlast: Wohnzimmereinrichtung.

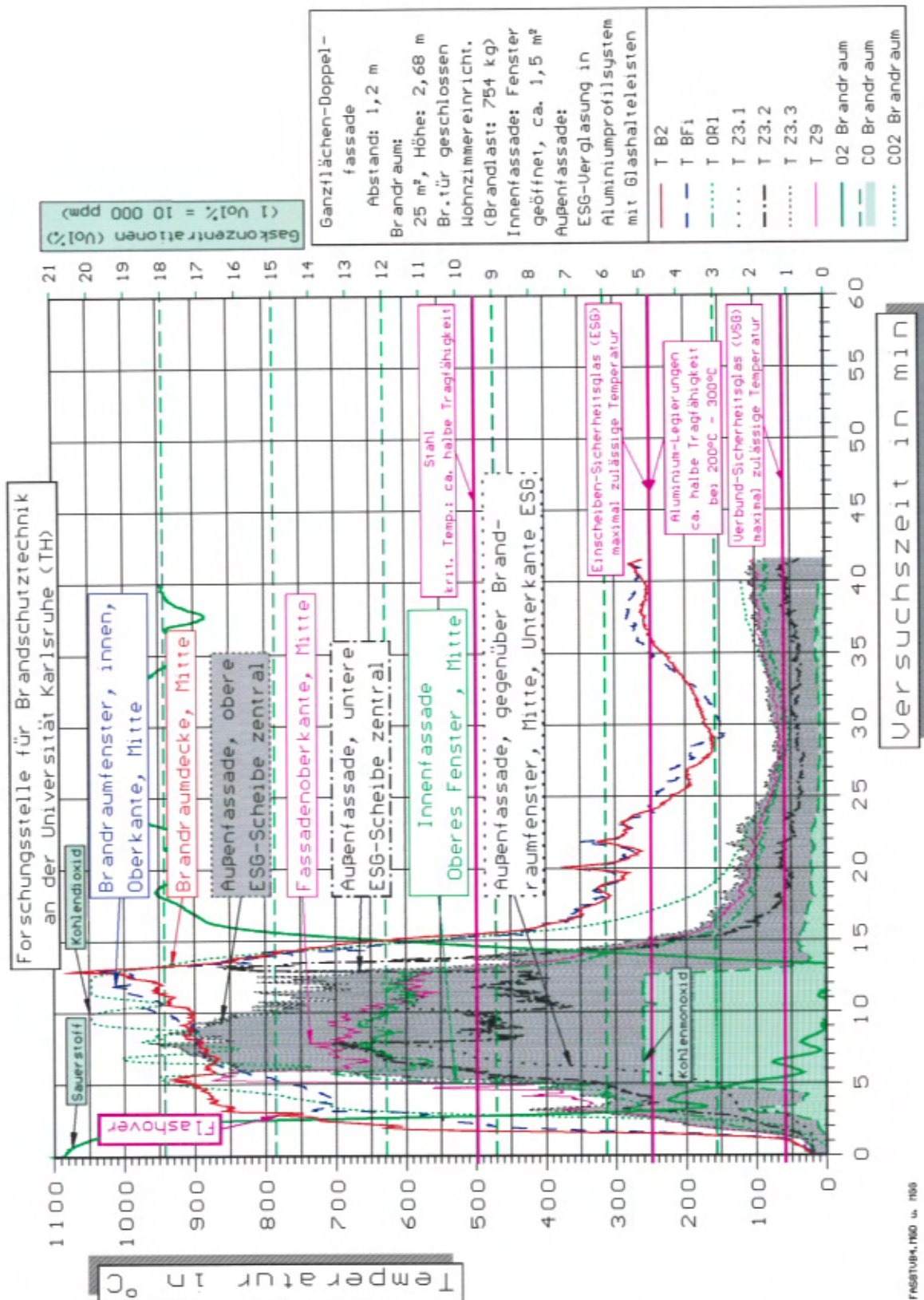


Bild 5: Brand- und Rauchausbreitung sowie Zerstörung von Verglasungen bei Gebäuden mit Ganzflächendoppelfassaden (Brandlast: Wohnzeilereinrichtung). Ausgewählte zeitliche Temperaturverläufe bzw. Brandgaskonzentrationen, kritische Temperaturen für Bauteile aus Stahl und Aluminium-Legierungen sowie Verglasungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brand- und Rauchausbreitung bei der Kastendoppelfassade

Vertikale und horizontale Stahlabschottungen



Bild 6: Brand- und Rauchausbreitung sowie Zerstörung von Verglasungen bei Gebäuden mit Kastendoppelfassaden (hier: vertikale und horizontale Stahlabschottungen, Außenfassade mit Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG)) - Brandlast: Brandlastpaletten mit 166 kg bzw. 332 kg (überwiegend Holzkrippen).



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

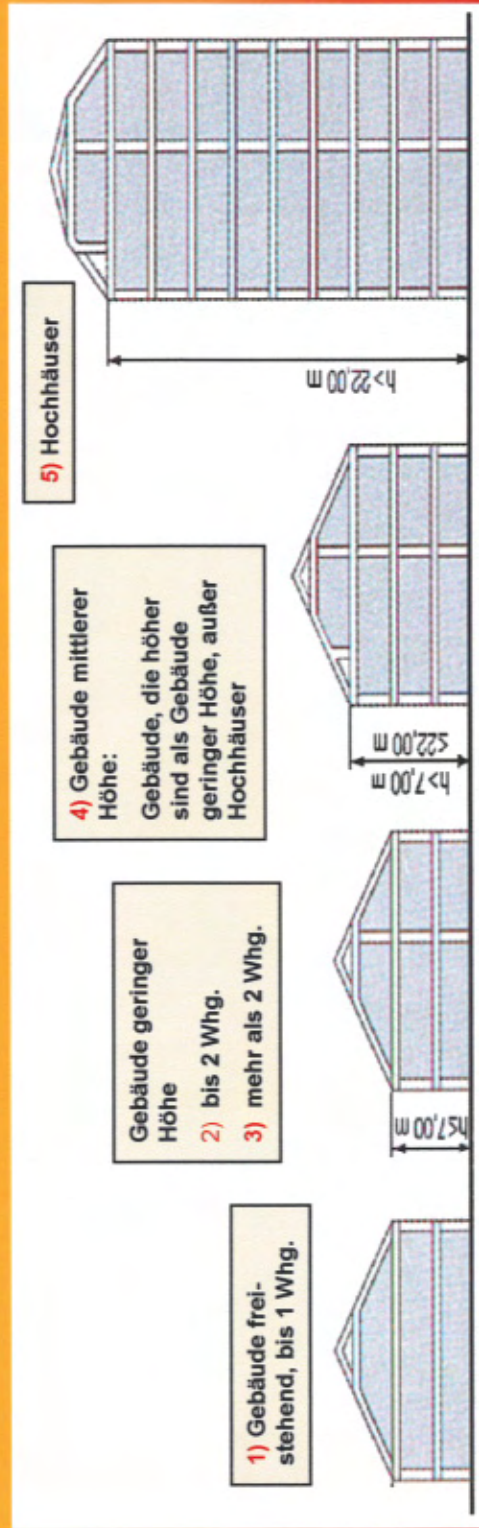
an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Gebäudeklassen nach Musterbauordnung bzw. Landesbauordnung



Aus der Sicht des baulichen Brandschutzes ist die Bestimmung der **Gebäudeklassen** und teilweise auch der Vollgeschosse von großer Bedeutung, da hiervon die Intensität der brandschutztechnischen Anforderungen, z.B. an tragende Wände, Decken bzw. an Flucht- und Rettungswege (Treppen und Treppenträume) abhängt.

Nach den Landesbauordnungen werden die Gebäude jeweils in unterschiedlichen Gebäudeklassen zusammengefasst. Die Einteilung ist in den einzelnen Bundesländern nicht einheitlich. Zum großen Teil wird jedoch zwischen den hier aufgeführten Gebäudeklassen unterschieden.

Für bauliche Anlagen und Räume besonderer Art oder Nutzung können besondere Anforderungen im Einzelfall gestellt werden. Hierzu zählen z.B. folgende Gebäudearten: Hochhäuser, Verkaufsstätten, Büro- und Verwaltungsgebäude, Schulen und Sportstätten, Altenheime, Versammlungsstätten, Krankenhäuser, Entbindungs- und Säuglingsheime

Bild 7: Gebäudeklassen nach den Muster- bzw. Landesbauordnungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Baustoffklassen nach DIN 4102

Baustoffklasse	Bauaufsichtliche Benennung	Beispiele
A	nichtbrennbare Baustoffe	
A1		Gips, Kalk, Zement, Steine, Beton, Glas, Asbestzementplatten, Gußeisen, Stahl, bestimmte Mineralfaser-Feuerschutzplatten (ohne organische Zusätze), Asbest-Calcium-Silikat-Platten, Fibersilikat-Feuerschutzbauplatten
A2		Gipskartonplatten mit geschlossener Oberfläche
B	brennbare Baustoffe	
B1	schwerentflamm-bare Baustoffe	Gipskartonplatten mit gelochter Oberfläche, Holzwolle-Leichtbauplatten, schwerentflammbare Spanplatten, Mineralfaser-Mehrschicht-Leichtbauplatten, bestimmte Kunststoff-Hartschaumplatten, bestimmte PVC-Erzeugnisse, Polystyrol-Partikel- und Extruderschaum mit Brandschutzausrüstung
B2	normalentflamm-bare Baustoffe	Holz- und Holzwerkstoffe über 2 mm Dicke, genormte Dachpappen und PVC-Bodenbeläge, Zellulose- und Flachsdämmstoffe mit Brandschutzausrüstung
B3	leichtentflamm-bare Baustoffe	Papier, Holzwolle, Holz unter 2 mm Dicke, Zellulose- und Flachsdämmstoffe ohne Brandschutzausrüstung

Bild 8: Baustoffklassen nach DIN 4102: "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen".



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Feuerwiderstandsklassen für Bauteile Bauaufsichtliche Benennungen - Benennungen nach DIN 4102-2

Bauaufsichtliche Benennung	Benennung nach DIN 4102①	Kurzbezeichnung
feuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 30 und aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 30-A
feuerhemmend und in den wesentlichen Teilen② aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 30 und in den wesentlichen Teilen② aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 30-AB
feuerhemmend (fh)	Feuerwiderstandsklasse F 30	F 30-B
feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 90 und aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 90-A
feuerbeständig (fb)	Feuerwiderstandsklasse F 90 und in den wesentlichen Teilen② aus nichtbrennbaren Baustoffen③	F 90-AB③
—④	Feuerwiderstandsklasse F 90	F 90-B

① Diese Benennung (nach DIN 4102-2, Tabelle 2) betrifft nur die Feuerwiderstandsfähigkeit des Bauteils; die bauaufsichtlichen Anforderungen an Baustoffe für den Ausbau, die in Verbindung mit dem Bauteil stehen, werden hiervon nicht berührt.

② Zu den wesentlichen Teilen gehören alle tragenden oder aussteifenden Teile; bei nichttragenden Bauteilen auch die Bauteile, die deren Standsicherheit bewirken (z.B. Rahmenkonstruktionen von nichttragenden Wänden). Außerdem bei raumabschließenden Bauteilen eine in Bauteilebene durchgehende Schicht, die bei der Prüfung nach DIN 4102-2 nicht zerstört werden darf. Bei Decken muß diese Schicht eine Gesamtdicke von mindestens 50 mm besitzen; Hohlräume im Innern dieser Schicht sind zulässig. Bei der Beurteilung des Brandverhaltens der Baustoffe können Oberflächen-Deckschichten oder andere Oberflächenbehandlungen außer Betracht bleiben.

③ In manchen Bundesländern sind hier brennbare Bestandteile nicht zulässig, was dann bedeutet, daß zur Erfüllung der bauaufsichtlichen Anforderung "feuerbeständig" die Feuerwiderstandsklasse F90-A erforderlich ist.

④ Ohne bauaufsichtliche Benennung.

Bild 9: Feuerwiderstandsklassen für Bauteile: Bauaufsichtliche Benennungen und Benennungen nach DIN 4102: "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen". (Mayr, J.: "Brandschutzatlas", FeuerTRUTZ GmbH, Wolfratshausen, 1995)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

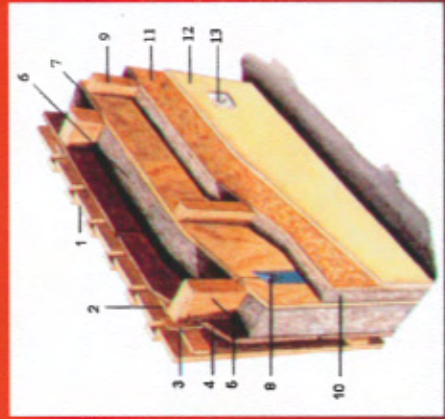
an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Beispiel für den Aufbau eines Gebäudes in Holzständerbauweise



Wandaufbau (Beispiel)

aussen

- 1 Vorhangfassade hinterlüftet
- 2 Lattung, 24 mm
- 3 Konterlattung, 20 mm
- 4 Holzfaserdämmplatte, bituminieret, 18 mm, mit Nut und Feder
- 5 Vollholzständer, 60 x 140 mm, Raster, 81,5 cm
- 6 Zellulosedämmstoff, 140 mm,
- 7 OSB-Holzwerkstoffplatte, 15 mm
- 8 luftdichte Abklebung der

Stoßfugen mit armierter Baupappe

- 9 Lattung, 40 x 60 mm (hochkant)
- 10 Installationsraum und zweite Dämmlage, 60 mm
- 11 OSB-Holzwerkstoffplatte, 11 mm

innen

- 12 Gipskartonplatte, 12,5 mm
- 13 Installationen ohne Durchbrechen der Winddichtung

Bild 10: Beispiel für den Aufbau eines Gebäudes in Holzständerbauweise.

(Foto: Firmenprospekt der 81^{FÖNF} high-tech & Holzbau AG, Hamburg)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

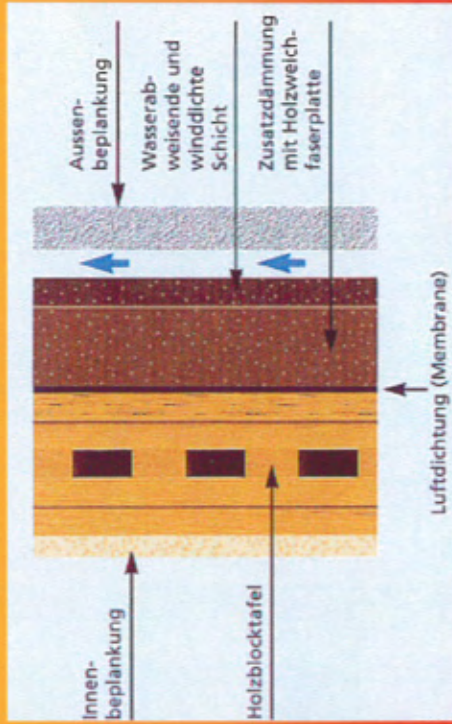
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Beispiel für den Aufbau eines Gebäudes in Holzblocktafelbauweise



Wandaufbau



Wandelementtypen



Elektroinstallation



Vorwandinstallation

Bild 11: Beispiel für den Aufbau eines Gebäudes in Holzblocktafelbauweise.

(Foto: LIGNOTREND Klimahaus AG, Weilheim)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Beispiel für den Aufbau eines Holzhauses in amerikanischer Bauweise



„platform frame“-Konstruktion

Holzrahmenkonstruktion mit Wänden und Decken aus einheitlich dimensionierten Bohlen mit aufgenagelter Brettverschalung. Die Austeifung der Wände wird fast nur über Gipskartonplatten hergestellt. Als Dämmstoff in den Wänden wird Mineralwolle verwendet.

Die geschosswise Bauart erlaubt, daß selbst 4 Geschosse ohne technisches Gerät, wie Kran oder Gerüst erstellt werden können.

Beispiel eines Gebäudes in München:

Ein Großteil der Wohnungen sind als zweigeschossige Maisonnetten übereinander angeordnet.

Das Gebäude wurde mit einer Sprinkleranlage und Rauchmeldern sowie einem zweiten baulichen Rettungsweg ausgestattet. Alle tragenden Teile gewährleisten eine Feuerwiderstandsdauer von 1 Std.

Bild 12: Beispiel für den Aufbau eines Holzgebäudes in amerikanischer Bauweise.

(„platform frame“-Konstruktion)

(Foto: Bayerisches Staatsministerium des Innern - Oberste Baubehörde, München)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Unterschiedliche Fassadengestaltung bei Gebäuden in Holzbauweise



Farbig gestrichene Verkleidung aus Holz oder Holzwerkstoffen



Verkleidung mit naturbelassenen Leisten



Holz-Glas-Fassade



Fassade mit mineralischem Außenputz

Bild 13: Unterschiedliche Fassadengestaltung bei Gebäuden in Holzbauweise.

(Fotos: *links u. oben Mitte:* Bayerisches Staatsministerium des Innern - Oberste Baubehörde, München; *unten Mitte:* Schwabenhaus, Heringen; *rechts:* Informationsdienst Holz "Holz-Glas-Fassaden", DGfH Innovations- u. Service GmbH, München)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

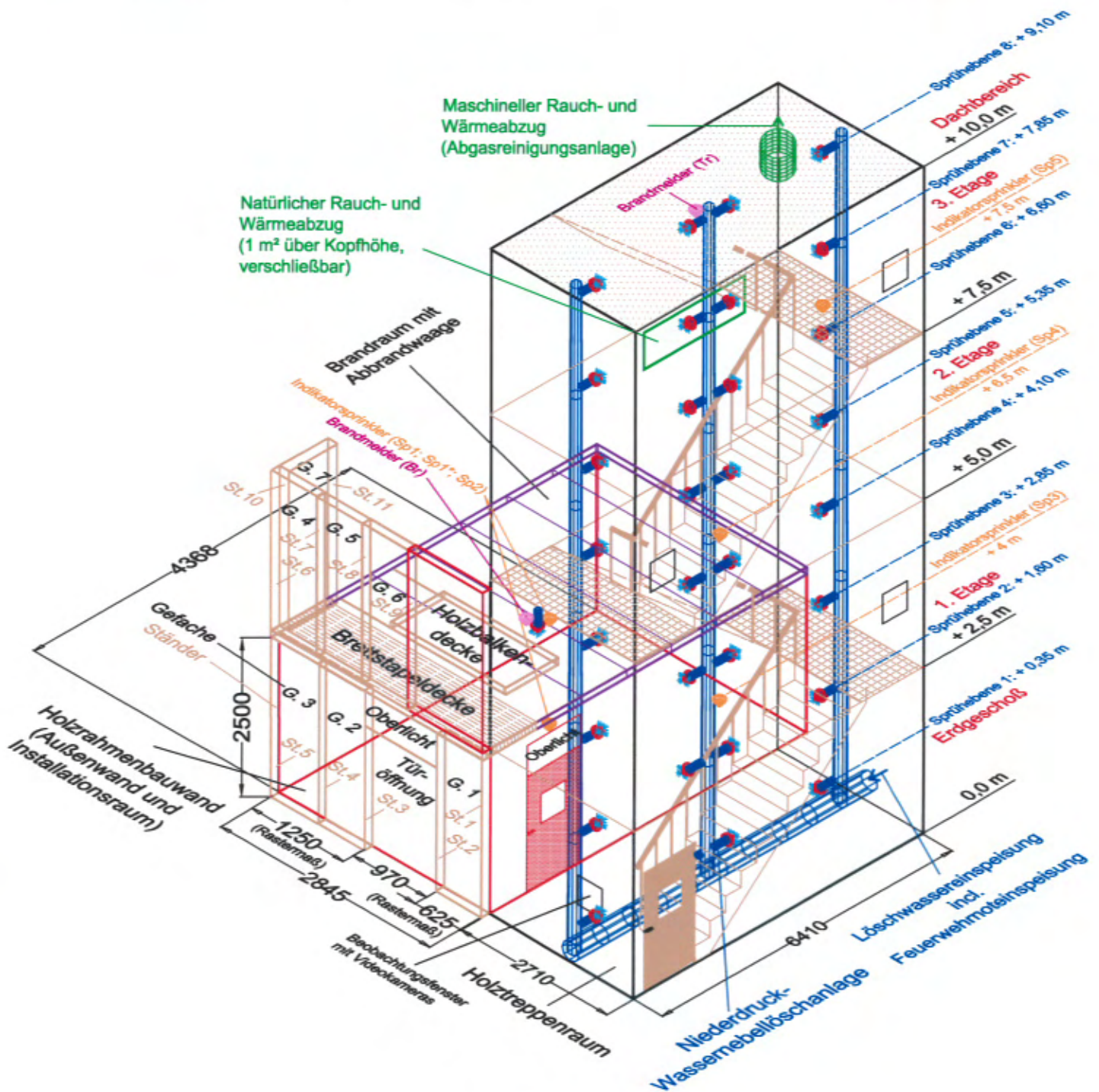


Bild 14: Versuchsholzgebäude mit Niederdruck-Wasserebellöschanlage an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- Versuchsaufbau (Konstruktionszeichnung)



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



1 Versuchsholzgebäude mit Brand- u. Treppenraum

2 Brandraum

2.1 Wassernebelprüfkopf, Indikator-sprinkler (Sp1, Sp1*) und Brand-melder Br (Foto-elektronischer Rauchmelder)

2.2 Versuche mit Festbrandstoff (Brandlastpalette)

2.3 Versuche mit Flüssigbrandstoff (Bratpfanne mit Pflanzenöl), Toilettenpapierstreifen an der Decke zur Beurteilung der Brandein- und Löschwirkung

2.4 Versuch mit Fest- und Flüssigbrandstoff (Brandlastpalette u. Bratpfanne mit Pflanzenöl)

Bild 15.1: Versuchsholzgebäude mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- Gesamtansicht und Brandraum

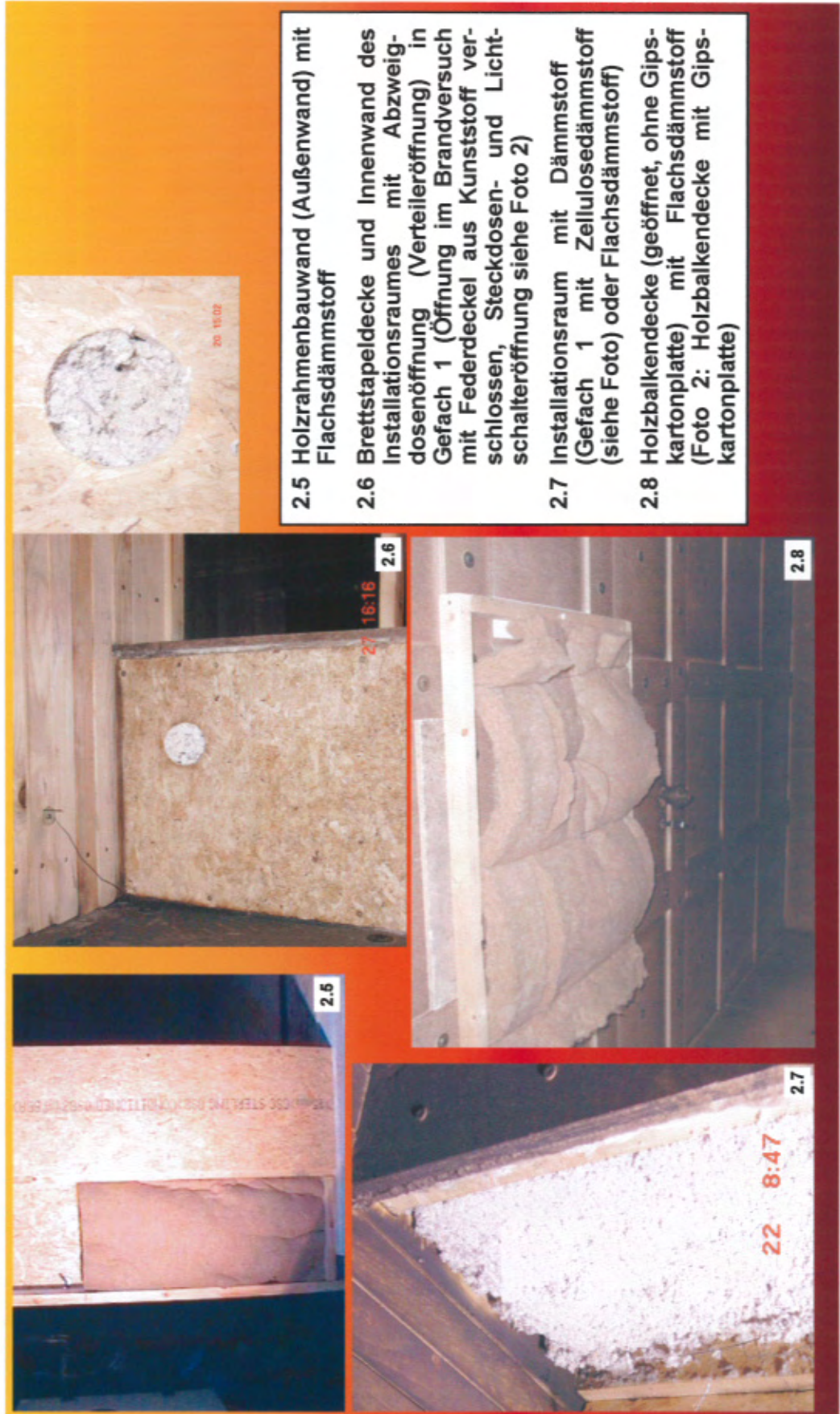


Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



2.5 Holzrahmenbauwand (Außenwand) mit Flachsdämmstoff

2.6 Brettstapeldecke und Innenwand des Installationsraumes mit Abzweigdosenöffnung (Verteileröffnung) in Gefach 1 (Öffnung im Brandversuch mit Federdeckel aus Kunststoff verschlossen, Steckdosen- und Lichtschalteröffnung siehe Foto 2)

2.7 Installationsraum mit Dämmstoff (Gefach 1 mit Zellulosedämmstoff (siehe Foto) oder Flachsdämmstoff)

2.8 Holzbalkendecke (geöffnet, ohne Gipskartonplatte) mit Flachsdämmstoff (Foto 2: Holzbalkendecke mit Gipskartonplatte)

Bild 15.2: Versuchsholzgebäude mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- Brandraum



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



3 Treppenraum

- 3.1 Treppenaug mit mittlerem Sprührohr u. Indikatordrinkler Sp3 u. Sp4 sowie ein Sprühkopf des linken bzw. rechten Sprührohres
- 3.2 Türöffnung zwischen Brand- und Treppenraum mit Oberlicht, Vorhang und Indikatordrinkler Sp2
- 3.3 Brandmelder Tr (Foto-elektronischer Rauchmelder) im Treppenaug (3.Etage)
- 3.4 Indikatordrinkler Sp5 zentral unter dem Podest der 2. Etage
- 3.5 Rettungsweg-Kennzeichnung
- 3.6 Natürlicher Rauch- und Wärmeabzug (1m² - Öffnung)
- 3.7 Maschineller Rauch- und Wärmeabzug (Abgasreinigungsanlage)
- 3.8 Brandlast (Zündkrippe mit Zündwanne) auf dem Podest der 1. Etage am Geländer

Bild 15.3: Versuchsholzgebäude mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- Treppenraum



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



- 4 Meß- und Videotechnik
- 4.1 Abbrandwaage unter dem Brandraumboden
- 4.2 Regenmesser zur Messung der Wasserbeaufschlagung am Boden (Foto: links) und in 1 m Höhe (Foto: rechts); Anzeigegeräte (Foto: Mitte)
- 4.3 Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
- 4.4 Piezoresistiver Druckmessumformer im Sprühkopf
- 4.5 Videokameras an den Beobachtungsfenstern, Übertragung der Aufnahmen auf eine Monitorwand im Foyer

Bild 15.4: Versuchsholzgebäude mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- Meß- und Videotechnik



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



4.6 Rauchdichtemessung mit Lichtmeßgerät (Maurer), Meßlicht-Empfänger und -geber im Treppenraum auf den Podesten der 2. und 3. Etage

4.7 Prandtl-Staurohre an Treppenraumtür und Zwischentür Brand-/Treppenraum

4.8 Flügelradanemometer an 1 m²-Öffnung der 3. Etage

4.9 Brandgasanalyse im Brand- und Treppenraum:
Kontinuierliche Gasanalysatoren für Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid

4.10 Manometer zur Ermittlung der Auslösezeitpunkte der Indikatord sprinkler

Bild 15.5: Versuchsholzgebäude mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage in der Brandversuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- Meßtechnik



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Wirkungsweise von Wassernebel

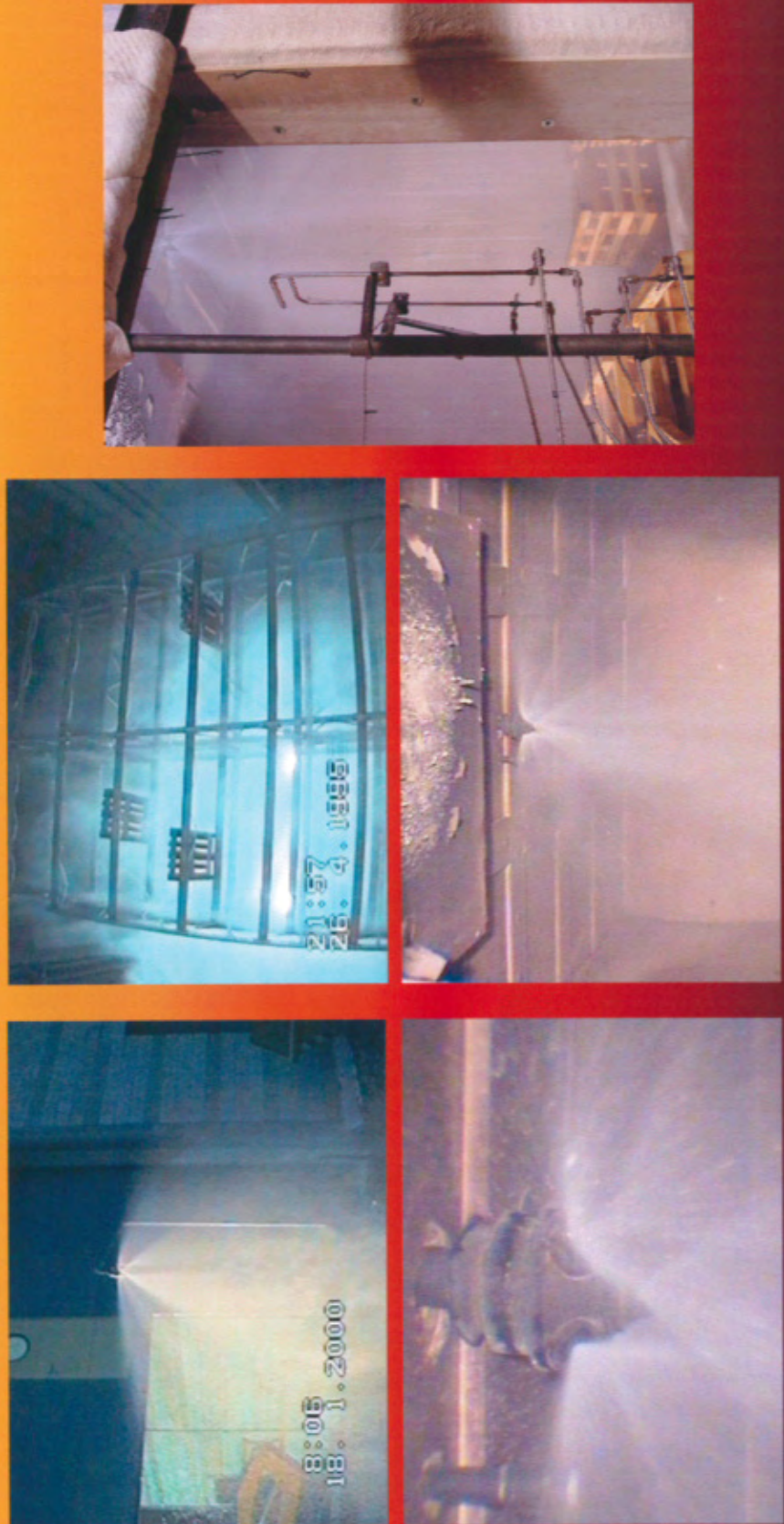
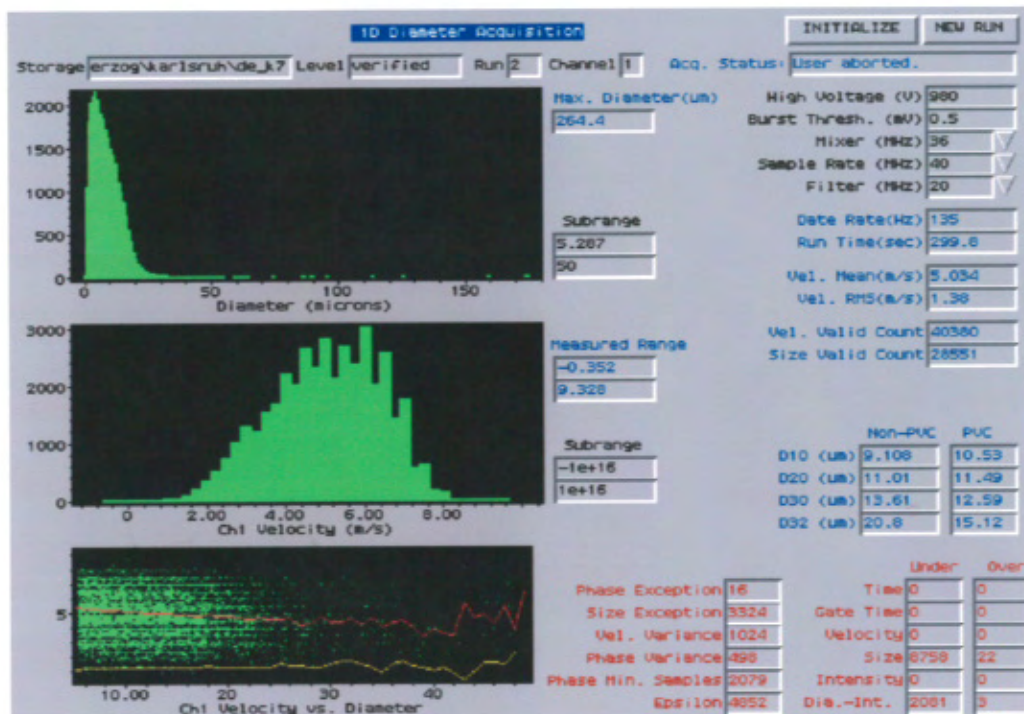


Bild 16: Wirkungsweise von Niederdruck-Wassernebel - Sprühbilder von Düsen bzw. Sprühköpfen - Kaltversuche: Einzelsprühköpfe (Foto: links oben, links unten, unten Mitte und rechts) sowie mehrere Sprühköpfe in Sprührohren über mehrere Etagen (Foto: oben Mitte).

Anzahl-/ Geschwindigkeitsverteilung der Tropfen



Volumenverteilung der Tropfen

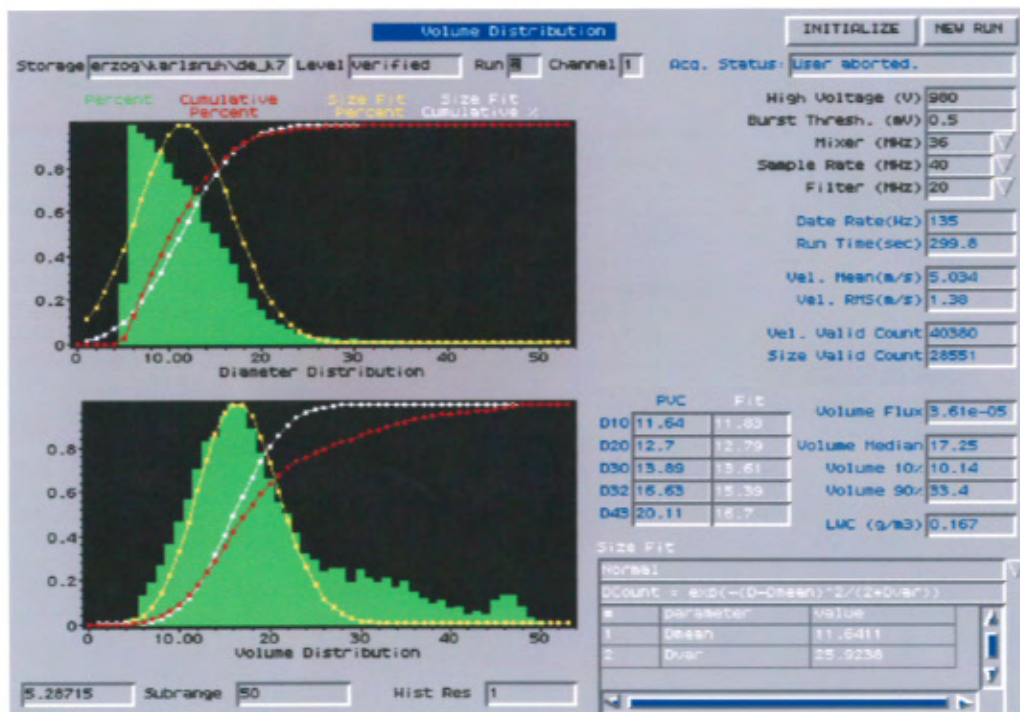
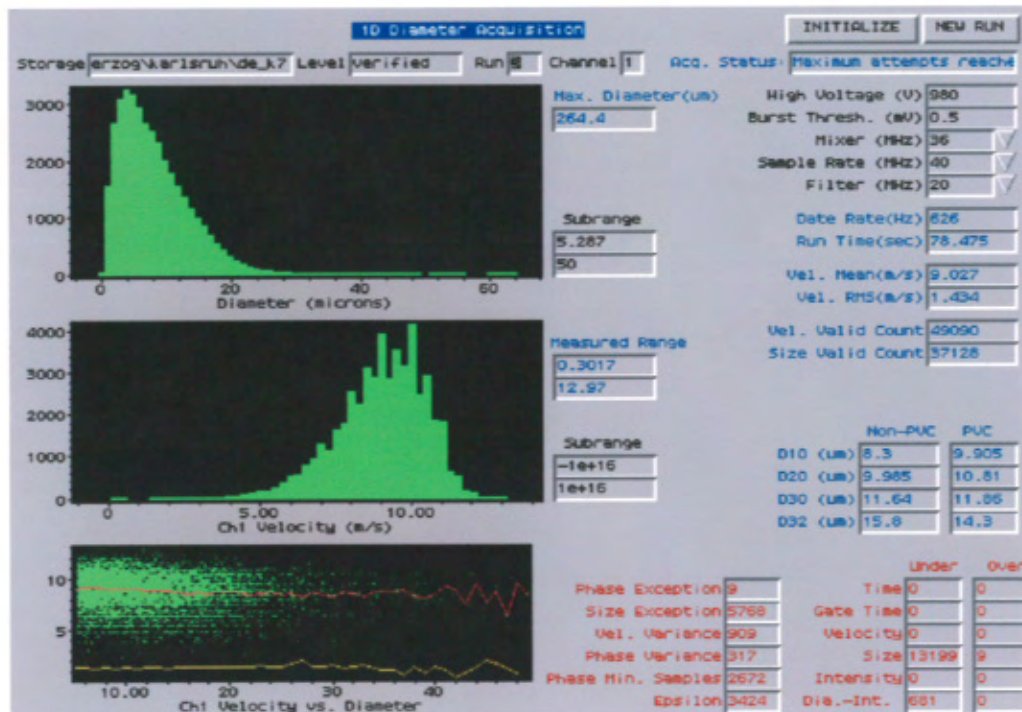


Bild 17.1: Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsmessung mit Phasen-Doppler-Anemometer in 1 m Entfernung unter der Wassernebeldüse (Einzeldüse) - **minimaler Betriebsdruck: 4 bar.**
(Firma Systemtechnik Herzog GmbH)

Anzahl-/ Geschwindigkeitsverteilung der Tropfen



Volumenverteilung der Tropfen

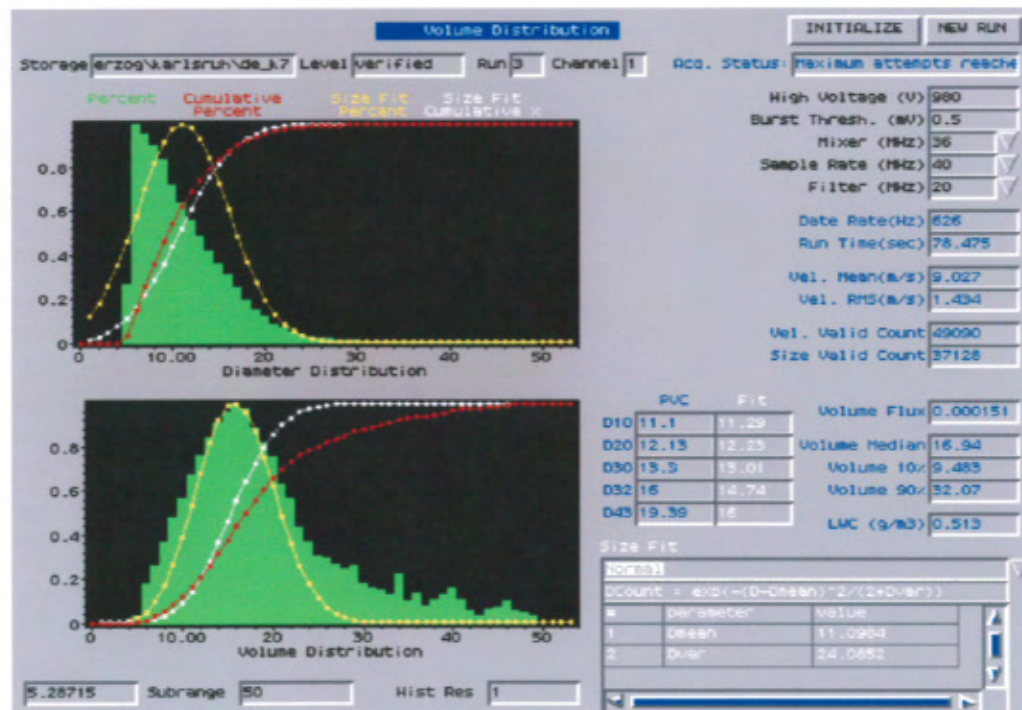


Bild 17.2: Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsmessung mit Phasen-Doppler-Anemometer in 1 m Entfernung unter der Wassernebeldüse (Einzeldüse).
 - maximaler Betriebsdruck: 8 bar
 (Firma Systemtechnik Herzog GmbH)

Wasserbeaufschlagung - Wassernebelprüfkopf - 1 Düse Messung am Boden

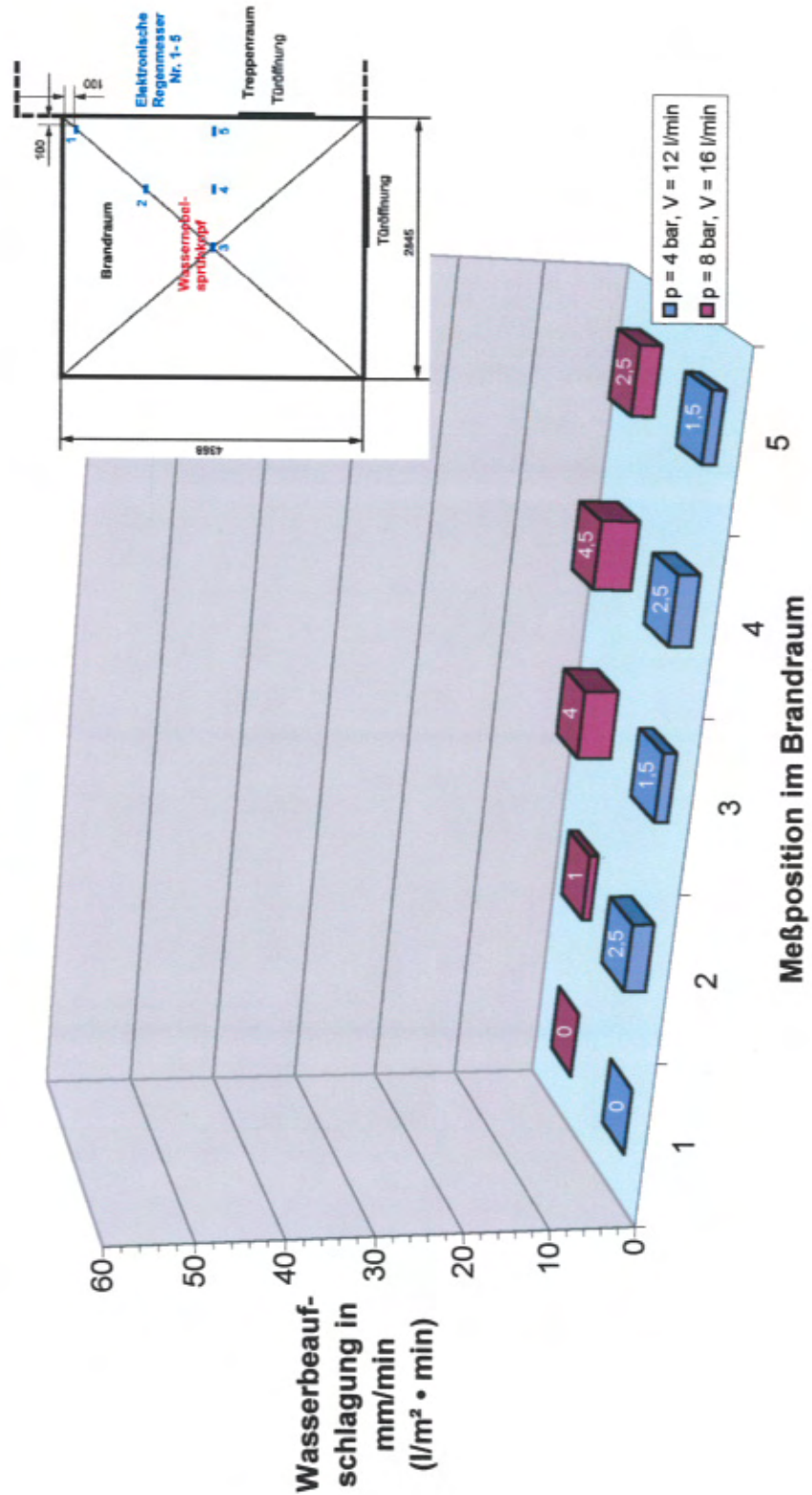


Bild 18.1: Messung der Wasserbeaufschlagung mit Regenmesser bei minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar).

1 Düse (Zentraldüse des Sprühkopfes): Messung am Boden

Wasserbeaufschlagung - Wassernebelprüfkopf - 1 Düse
Messung in 1 m Höhe

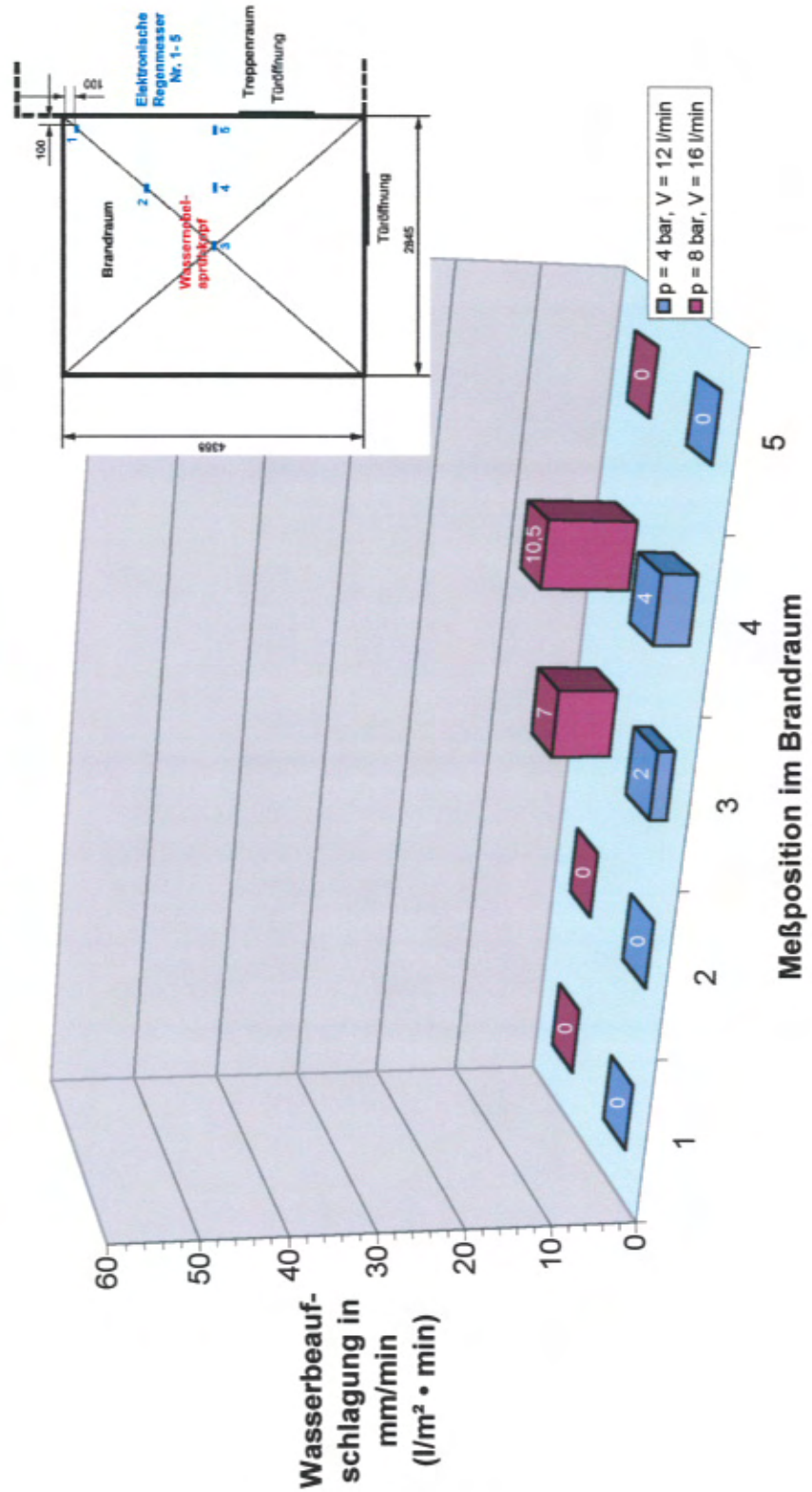


Bild 18.2: Messung der Wasserbeaufschlagung mit Regenmesser bei minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar).

1 Düse (Zentraldüse des Sprühkopfes): Messung in 1 m Höhe

Wasserbeaufschlagung - Wassernebelprüfkopf - 4 Düsen
Messung am Boden

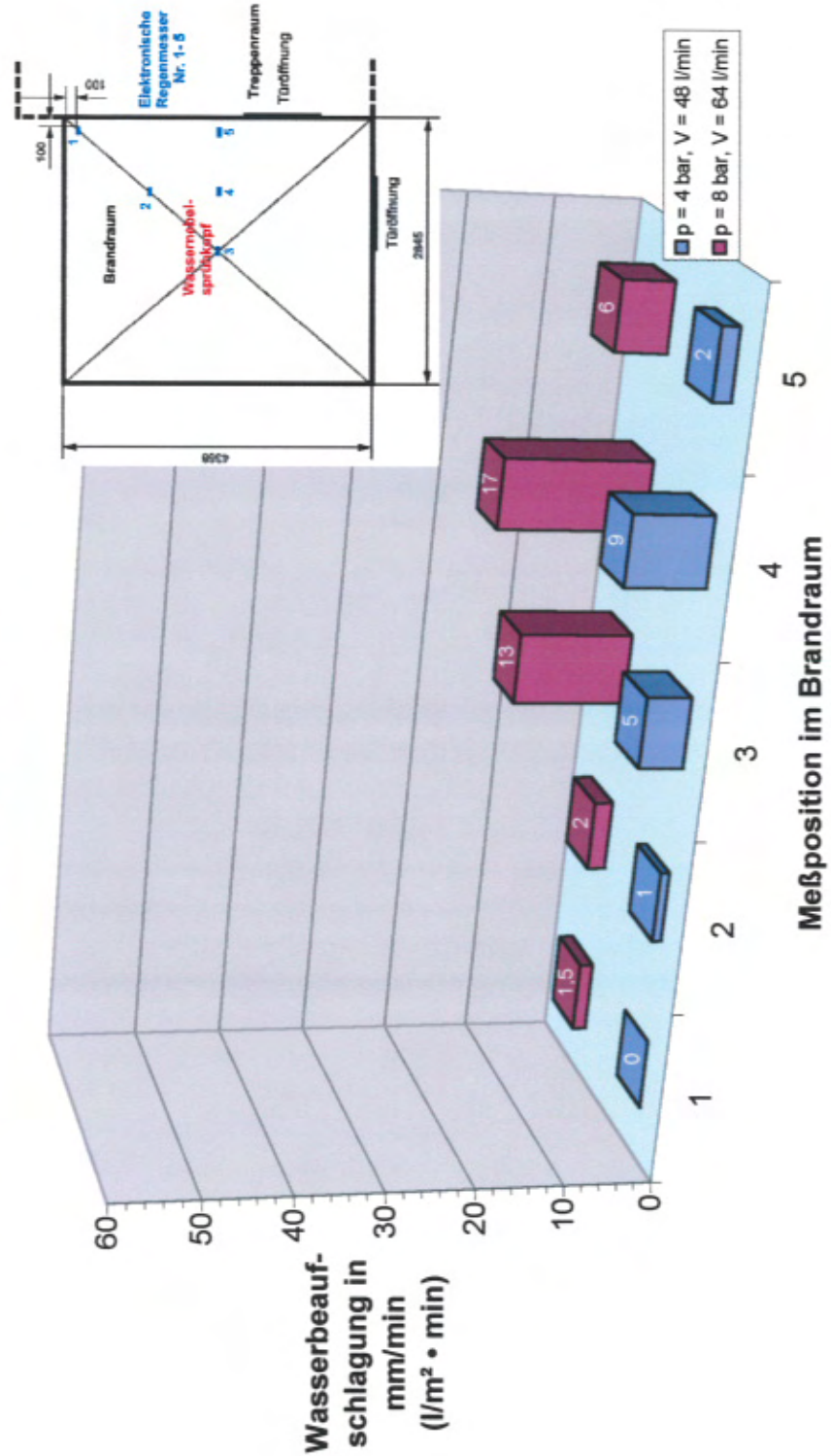


Bild 18.3: Messung der Wasserbeaufschlagung mit Regenmesser bei minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar).

4 Düsen am Umfang des Sprühkopfs: Messung am Boden

Wasserbeaufschlagung - Wassernebelprüfkopf - 4 Düsen
Messung in 1 m Höhe

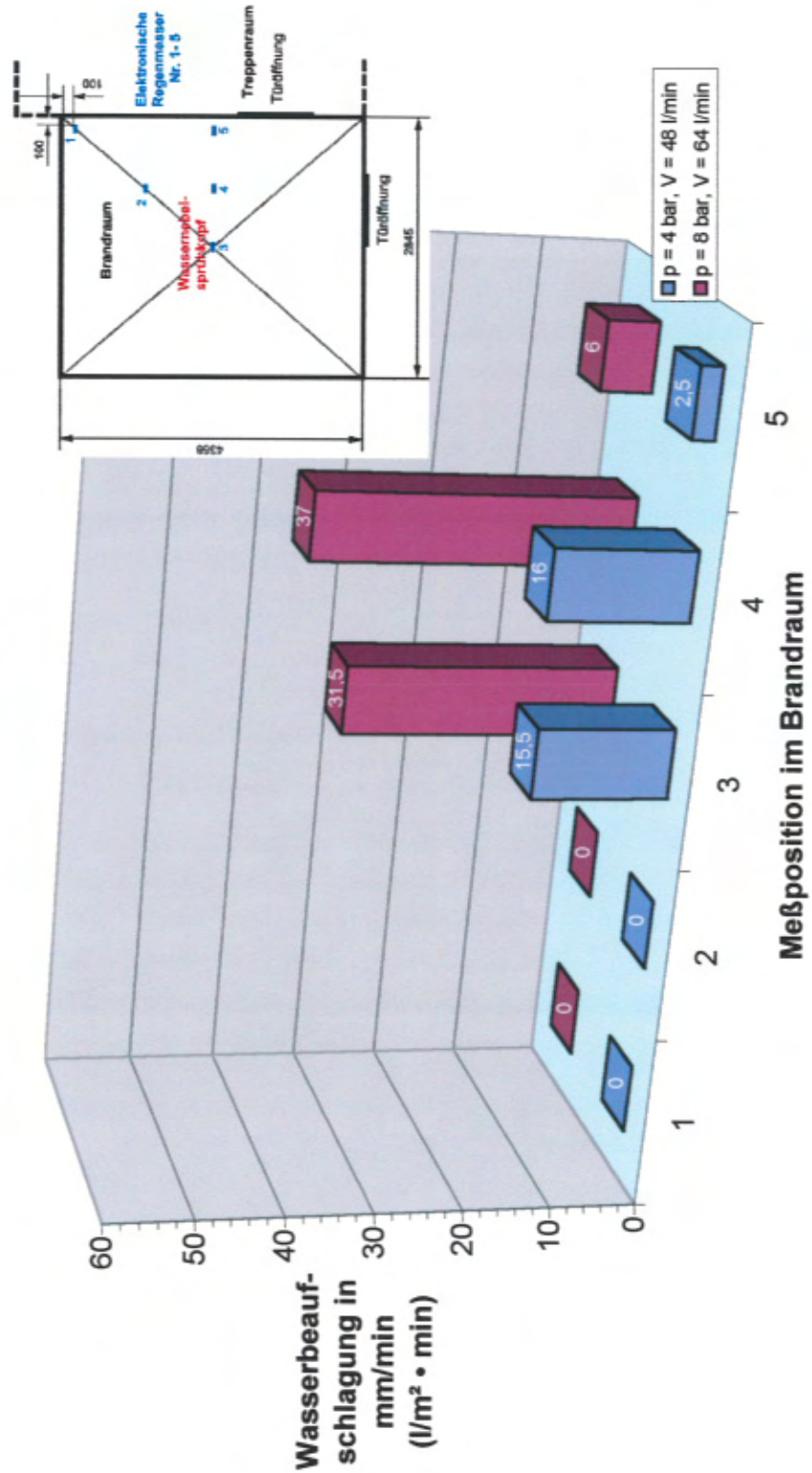


Bild 18.4: Messung der Wasserbeaufschlagung mit Regenmesser bei minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar).

4 Düsen am Umfang des Sprühkopfes: Messung in 1 m Höhe

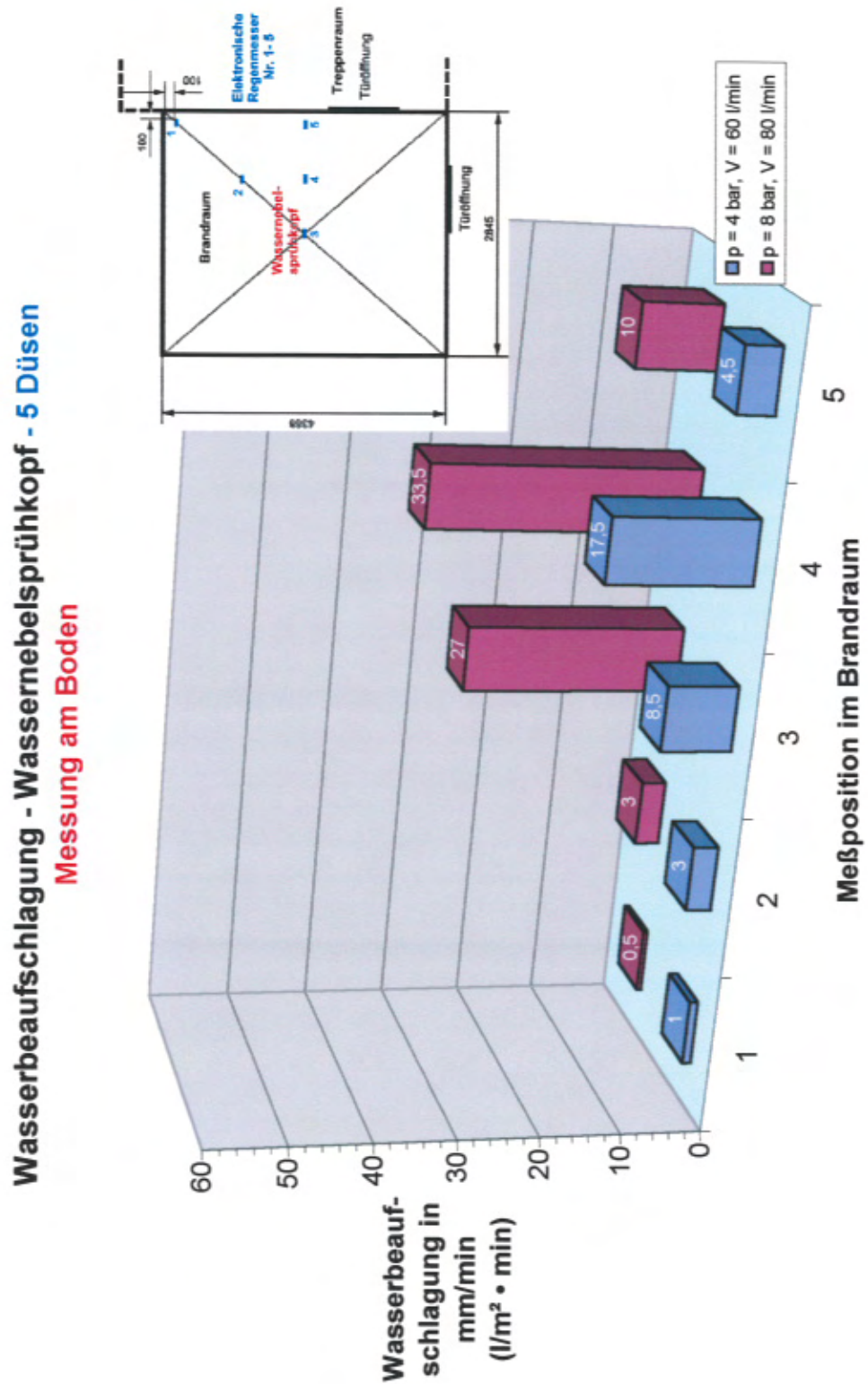


Bild 18.5: Messung der Wasserbeaufschlagung mit Regenmesser bei minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar).

5 Düsen (4 Düsen am Umfang des Sprühkopfes + Zentraldüse):
Messung am Boden

Wasserbeaufschlagung - Wassernebelsprühkopf - 5 Düsen

Messung in 1 m Höhe

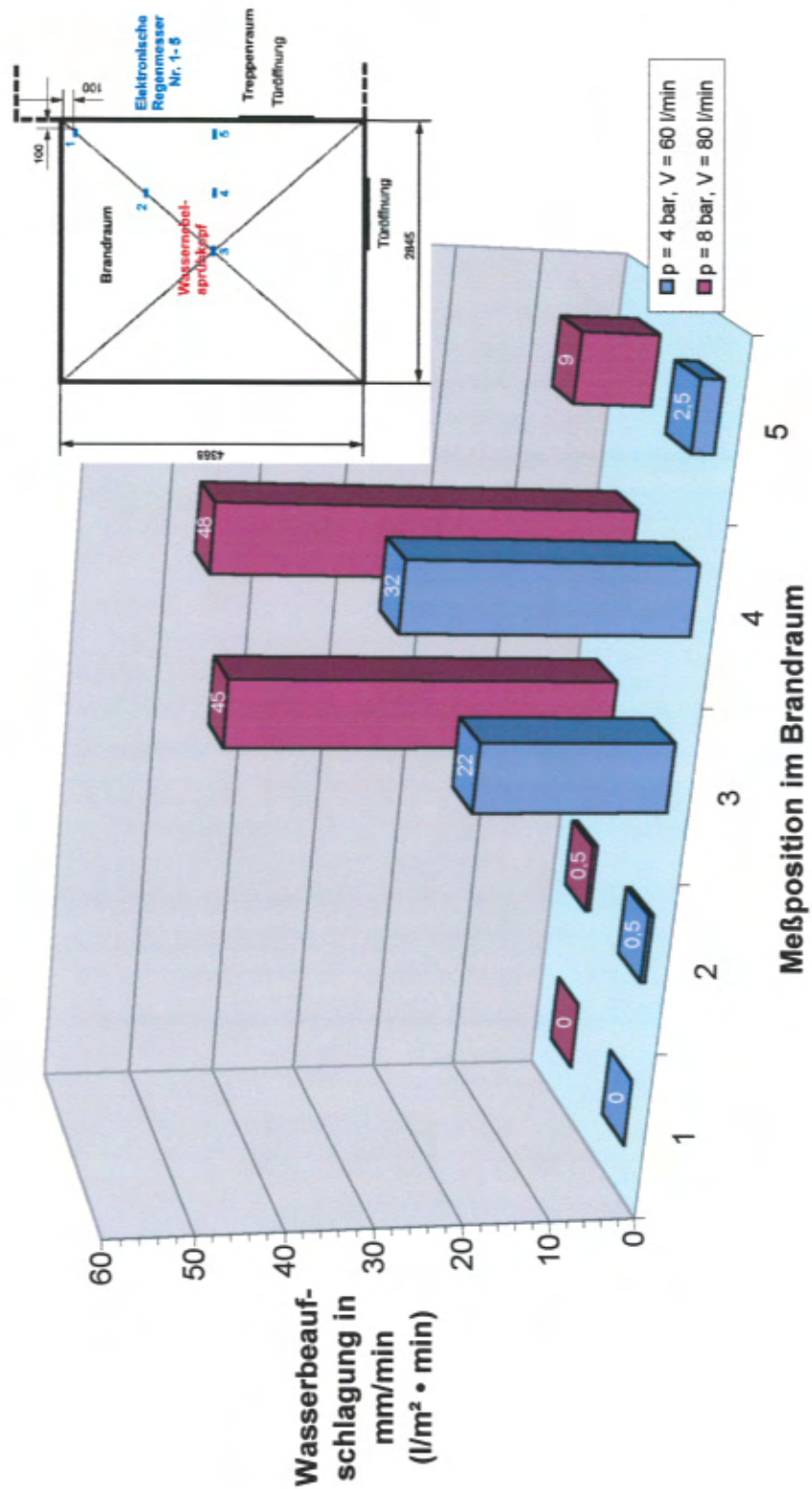


Bild 18.6: Messung der Wasserbeaufschlagung mit Regenmesser bei minimalem (4 bar) und maximalem Betriebsdruck (8 bar).

5 Düsen (4 Düsen am Umfang des Sprühkopfes + Zentraldüse):

Messung in 1 m Höhe



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H1)



1 min 55 s
Ind.spr. Sp1 (1. Löschbeginn)



13 min 32 s
maximale Verrauchung

Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage
Vergleich: Sichtverhältnisse bei Auslösung der Indikatorsprinkler - Sichtverhältnisse zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten (0,15 m⁻¹)



6 min 5 s
Extinktionskoeffizient= 0,15 m⁻¹



13 min 1 s
Ind.spr. Sp2 (2. Löschbeginn)

Bild 19.1: Versuch H1 - Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage. Vergleich der Sichtverhältnisse bei den Auslösezeiten der Indikatorsprinkler mit den Sichtverhältnissen, die zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind, vorliegen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H1



Zündkrippe angebrannt



Oberlicht über der Türöffnung Treppenraum >
Brandraum sowie über der Tür Versuchshalle >
Brandraum: keine Beschädigung, Vorhang
nicht angebrannt



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H1



Öffnungen und Federdeckel
des Installationsraumes von
Gefach 1: unten, Mitte, oben



Installationsraum von Gefach 1: kein Weiterglimmen des Flachsdämmstoffes
nach Löschende



Dem Brand zugewandte
Oberfläche des Flachsdämmstoffes



Dem Brand abgewandte
Oberfläche des Flachsdämmstoffes

Bild 19.3: Versuch H1 - Brandschäden

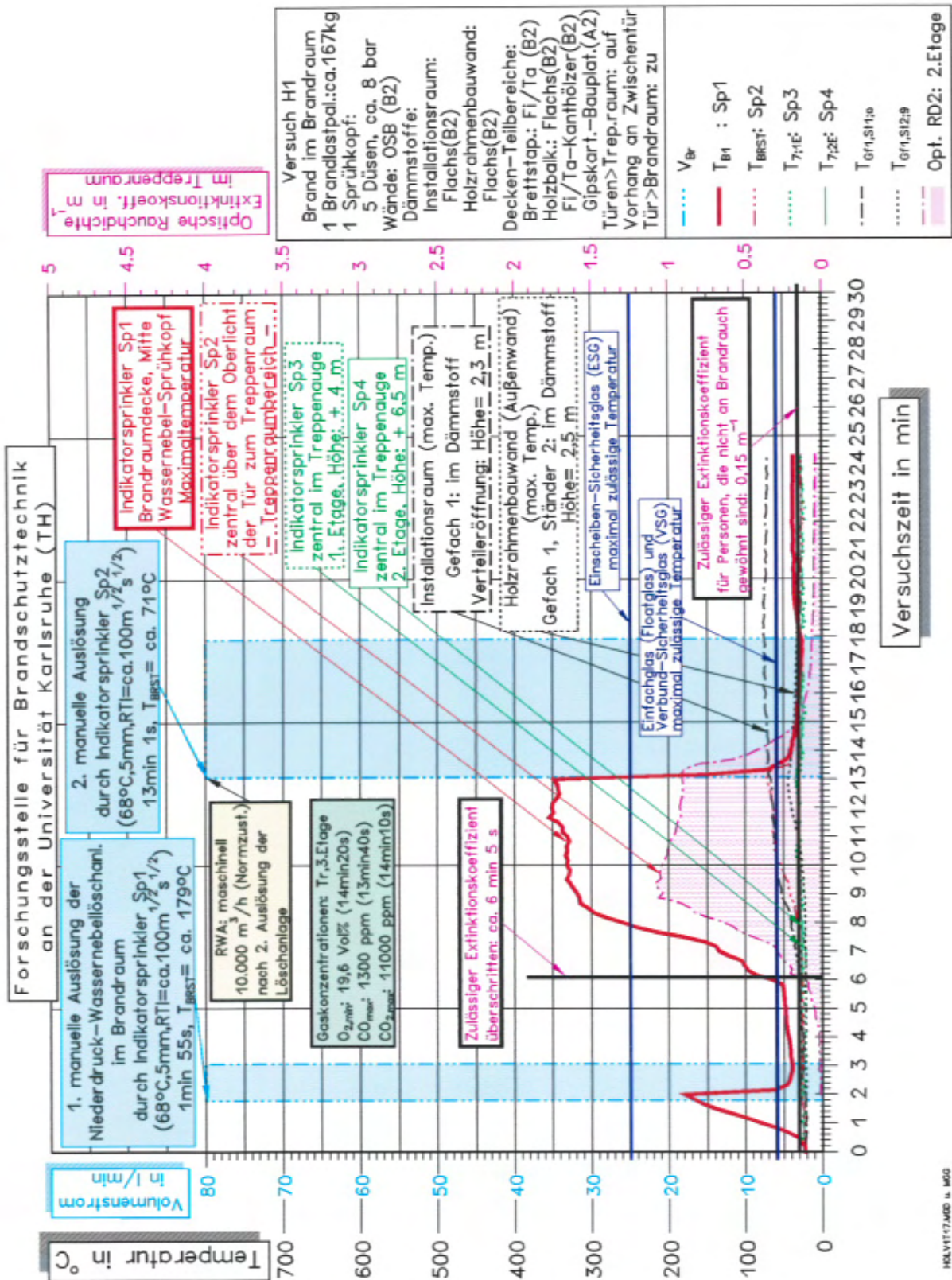


Bild 19.4: Versuch H1 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, optische Brandrauchdichte, Brandgaskonzentrationen, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)

0 s: Zündung



Holzrahmenbauwand



Treppenraum-Eingangstür



Erdgeschoss



1. Etage Podest



2. Etage Podest



3. Etage Podest

Bild 20.1: Versuch H2 - Ansicht: Brand- und Treppenraum.

Zeitpunkt: 0 s - Zündung



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)

1 min 53 s: Auslösung des Indikatorsprinklers Sp1 im Brandraum



Holzrahmenbauwand



Treppenraum-Eingangstür



Erdgeschoß



1. Etage Podest



2. Etage Podest

Unschärfe aufgrund technischer Defekte der Videokamera



3. Etage Podest

Bild 20.2: Versuch H2 - Ansicht: Brand- und Treppenraum.

Zeitpunkt: 1 min 53 s - Auslösung des Indikatorsprinklers Sp1 im Brandraum



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)

7 min 3 s: Auslösung des Indikatorsprinklers Sp2 im Treppenraum oberhalb des Oberlichtes - Löschbeginn: 0s



Holzrahmenbauwand



Treppenraum-Eingangstür



Erdgeschoß



1. Etage Podest



2. Etage Podest



3. Etage Podest

Bild 20.3: Versuch H2 - Ansicht: Brand- und Treppenraum.

Zeitpunkt: 7 min 3 s - Auslösung des Indikatorsprinklers Sp2 im Treppenraum
Löschbeginn



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)	Zeitlicher Verlauf des Löscheinsatzes
<p>9. 6. 2000 10:34:24</p> <p>Löschbeginn - 0 s</p>	<p>9. 6. 2000 10:34:27</p> <p>3 s</p>
<p>9. 6. 2000 10:34:30</p> <p>6 s</p>	<p>9. 6. 2000 10:36:47</p> <p>2 min 23 s Feuer aus</p>
<p>9. 6. 2000 10:36:46</p> <p>2 min 22 s</p>	
<p>9. 6. 2000 10:34:41</p> <p>17 s</p>	

Bild 20.4: Versuch H2 - Zeitlicher Verlauf des Löscheinsatzes im Brandraum



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)

Verrauchung des Treppenraumes im Erdgeschoß

Brandgasabsaugung (masch.) aus dem Treppenraum nach Auslösung d. Löschanlage



7 min 3 s

Löschbeginn



7 min 13 s



7 min 39 s



9 min 26 s

Feuer aus



11 min 11 s

Löschanlage aus

Bild 20.5: Versuch H2 - Zeitlicher Verlauf der Verrauchung des Treppenraumes im Erdgeschoß



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)

Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 1. Etage
Brandgasabsaugung (masch.) aus dem Treppenraum nach Auslösung d. Löschanlage

10 : 34
9 . 6 . 2000
6 min 45 s

10 : 34
9 . 6 . 2000
7 min 3 s
Löschbeginn

10 : 34
9 . 6 . 2000
7 min 6 s

10 : 35
9 . 6 . 2000
8 min 24 s

10 : 36
9 . 6 . 2000
9 min 26 s
Feuer aus

Bild 20.6: Versuch H2 - Zeitlicher Verlauf der Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 1. Etage









Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H2)	Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest d. 2. Etage Brandgasabsaugung (masch.) aus dem Treppenraum nach Auslösung d. Löschanlage		
 <p>10:33 19. 5. 2000</p>	6 min 33 s	 <p>10:34 19. 5. 2000</p>	7 min 3 s Löschbeginn
 <p>10:37 19. 5. 2000</p>	10 min 27 s	 <p>10:34 19. 5. 2000</p>	7 min 11 s
 <p>10:40 19. 5. 2000</p>	13 min 29 s	 <p>10:40 19. 5. 2000</p>	13 min 29 s

Unschärfe aufgrund technischer Defekte der Videokamera

Bild 20.7: Versuch H2 - Zeitlicher Verlauf der Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 2. Etage



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

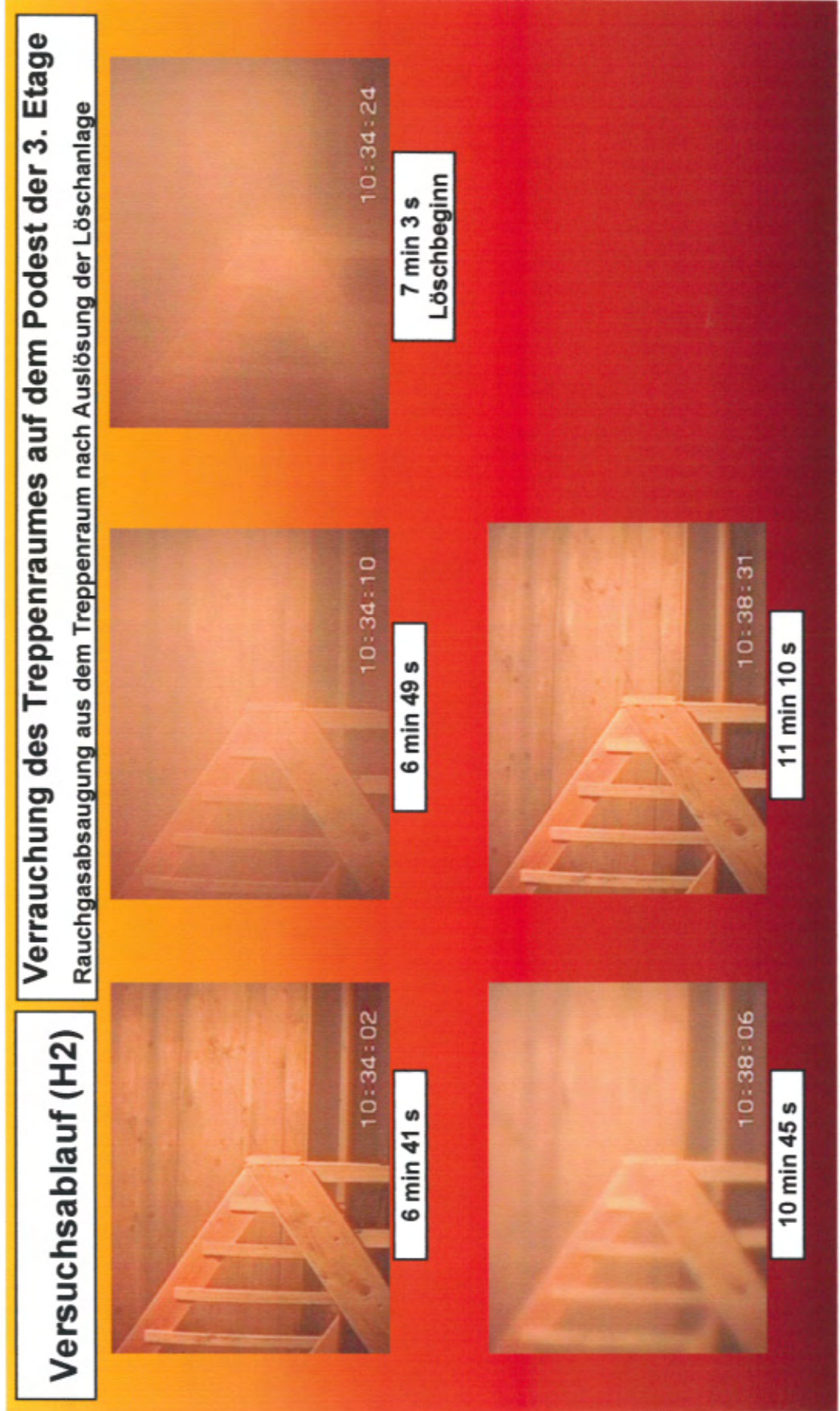


Bild 20.8: Versuch H2 - Zeitlicher Verlauf der Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann




Versuchsablauf (H2)	 <p>10:29:14</p>	1 min 53 s Indikatorsprinkler Sp1	 <p>10:33:31</p>	6 min 10 s Extinktionskoeffizient= 0,15 m ⁻¹
			 <p>10:34:24</p>	7 min 3 s Ind.sprink. Sp2 (Löschbeginn)
				7 min 50 s maximale Verrauchung

Bild 20.9: Versuch H2 - Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage. Vergleich der Sichtverhältnisse bei den Auslösezeiten der Indikatorsprinkler mit den Sichtverhältnissen, die zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind, vorliegen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H2



Zündkrippe angebrannt und umgefallen



Oberlicht über der Türöffnung: Treppenraum > Brandraum mit Rißbildung, Vorhang teilweise verbrannt



Öffnungen und Federdeckel des Installationsraumes von Gefach 1: unten, Mitte, oben



Tür (Versuchshalle > Brandraum), Oberlicht mit Rißbildung

Bild 20.10: Versuch H2 - Brandschäden



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H2

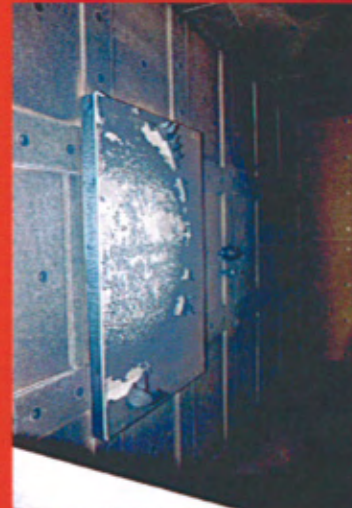


Dem Brand zugewandte Oberfläche des Flachsdämmstoffes



Dem Brand abgewandte Oberfläche des Flachsdämmstoffes

Installationsraum - kein Weiterglimmen des Flachsdämmstoffes nach Löschende



Holzbalkendecke - keine Rißbildung bzw. kein Durchbrand der Gipskartonplatte



Brettstapelecke
ca. 2 - 3 mm tief verbrannt

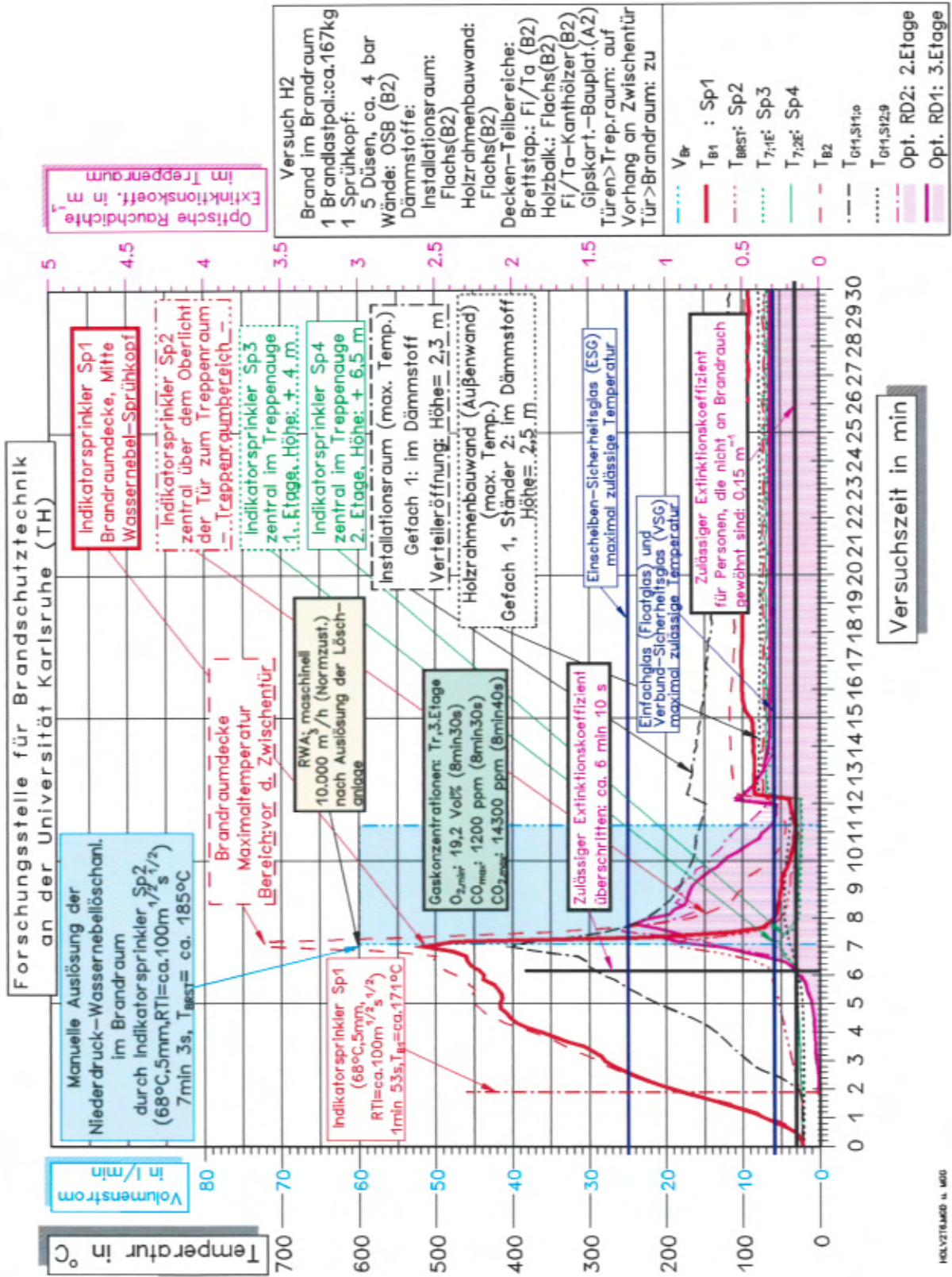


Bild 20.12: Versuch H2 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, optische Brandrauchdichte, Brandgaskonzentrationen, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

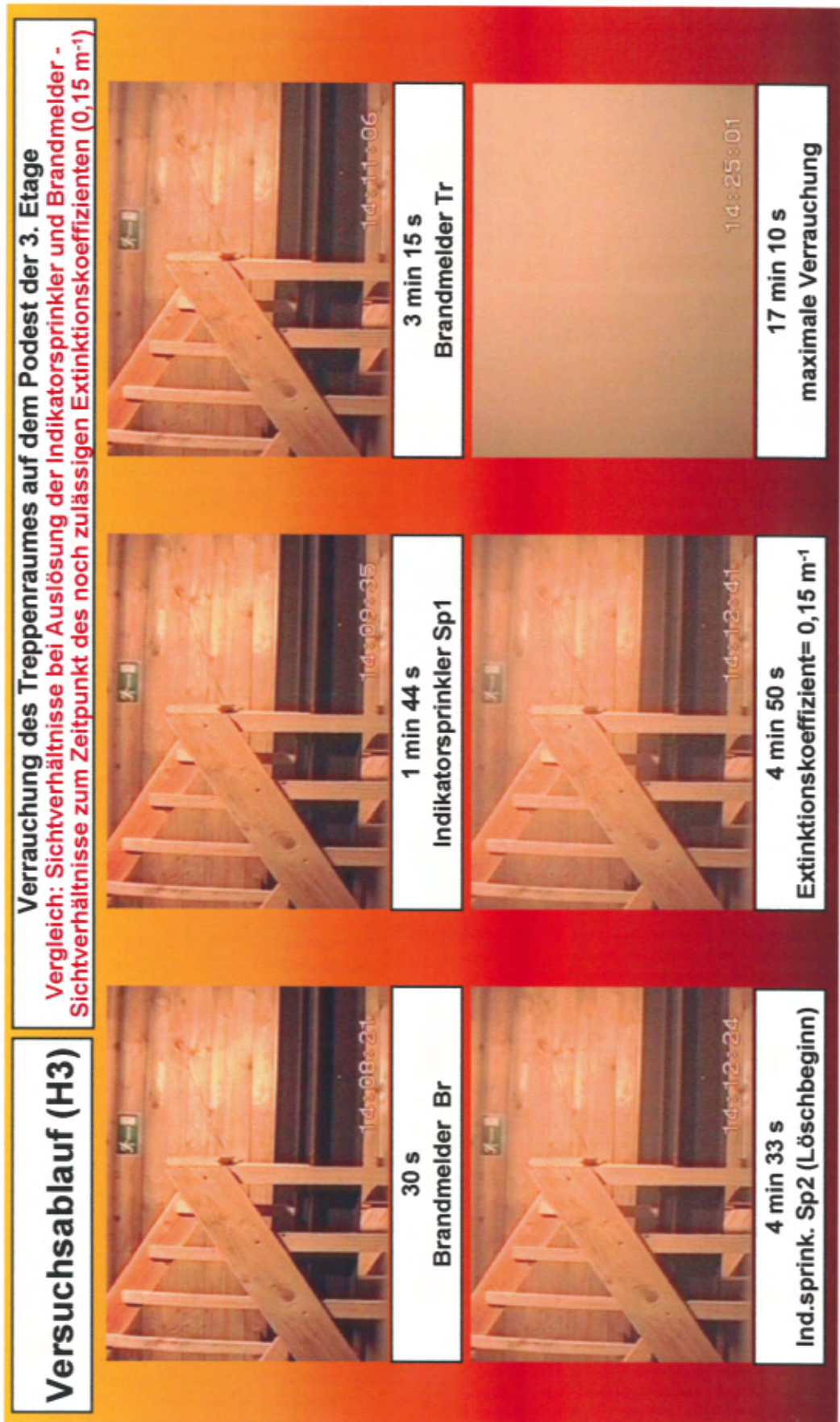


Bild 21.1: Versuch H3 - Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage. Vergleich der Sichtverhältnisse bei den Auslösezeiten der Indikatorsprinkler und Brandmelder mit den Sichtverhältnissen, die zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind, vorliegen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H3



Brandmelder neben dem Sprühkopf geschmolzen



Zündkrippe angebrannt und umgefallen



Gefach 1, Installationsraum: Dem Brand zugewandte Oberfläche des Flachsdämmstoffes im Bereich der Verteiler-(Abzweigdosens-)öffnung (Bild links u. Mitte): mit Brandspuren, Federdeckel geschmolzen; keine Brandspuren an der abgewandten Oberfläche (Bild rechts)



Gipskarton-Bauplatte der Holzbalkendecke leicht gebräunt



Oberlicht der Brandraumtür mit Rißbildung, Brettstapeldecke nicht beschädigt



Oberlicht und Vorhangstreifen der Türöffnung Brand-/Treppenraum vor dem Versuch
rechts: Oberlicht nach dem Versuch mit Rißbildung, Vorhangstreifen geschmolzen

Bild 21.2: Versuch H3 - Brandschäden

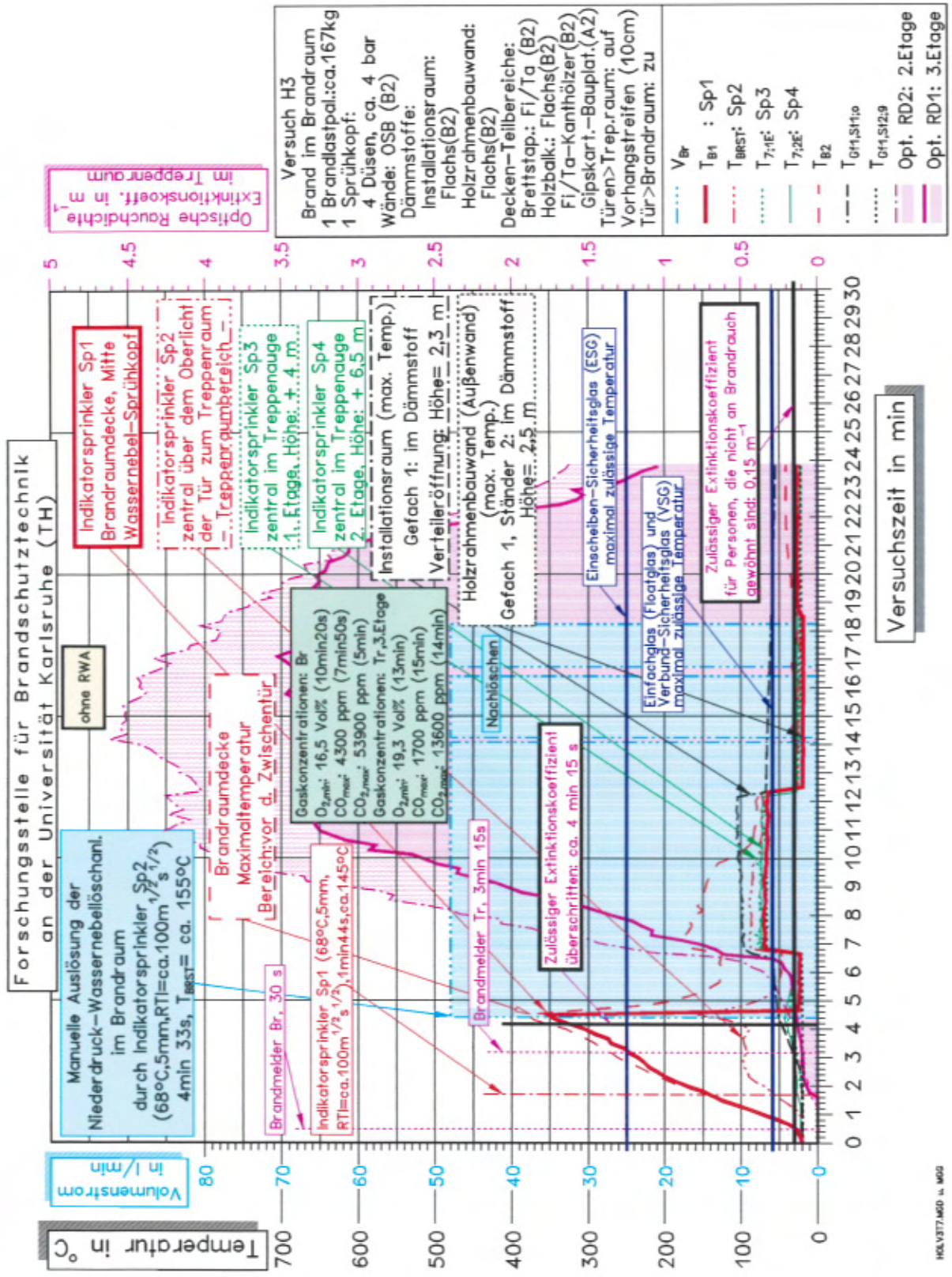


Bild 21.3: Versuch H3 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, optische Brandrauchdichte, Brandgaskonzentrationen, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H5)



58 s
Brandmelder Tr

Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage

Vergleich: Sichtverhältnisse bei Auslösung des Brandmelders - Sichtverhältnisse zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten ($0,15 \text{ m}^{-1}$)



1 min 4 s
Extinktionskoeffizient= $0,15 \text{ m}^{-1}$
Löschbeginn



6 min 50 s
maximale Verrauchung

Bild 22.1: Versuch H5 - Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage. Vergleich der Sichtverhältnisse bei der Auslösezeit des Brandmelders mit den Sichtverhältnissen, die zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind, vorliegen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H5



Zündkrippe angebrannt
und umgefallen,
keine Beschädigung des
Geländers und Podestes
durch Brandeinwirkung

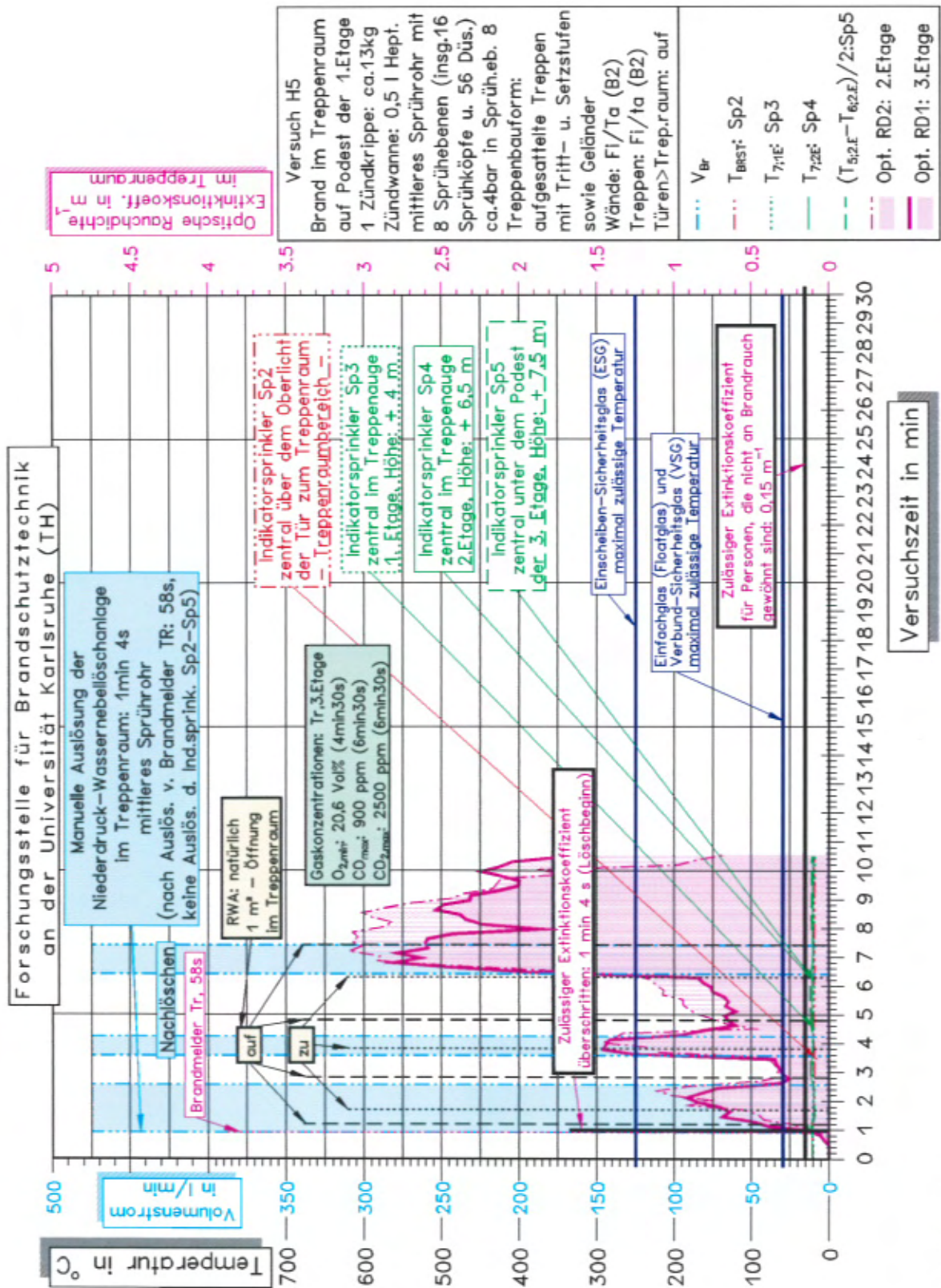


Bild 22.3: Versuch H5 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, optische Brandrauchdichte, Brandgaskonzentrationen, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch Ö4: Ablöschen einer brennenden Bratpfanne (Pflanzenöl) mit Niederdruck-Wassernebel



0 s: Aufstellen einer Bratpfanne mit vorgeheiztem Pflanzenöl (600 ml, Flammpunkt ca. 350 °C) auf Pastenbrenner



25 s



47 s: Löschbeginn
Löschzeit: 0 s



43 s : Auslösen des
Brandmelders



Löschzeit: ca. 0,5 s



46 s : kurz vor Löschbeginn

Bild 23.1: Versuch Ö4 - Zeitlicher Verlauf des Ablöschens einer brennenden Bratpfanne (Pflanzenöl) mit Niederdruck-Wassernebel.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuch Ö4: Ablöschen einer brennenden Bratpfanne (Pflanzenöl) mit Niederdruck-Wassernebel



48 s

Löschzeit: 1 s



57 s

Löschzeit: 10 s



1 min 1 s

Löschzeit: 14 s



1 min 5 s

Löschzeit: 18 s



1 min 10 s

Löschzeit: 23 s

Pflanzenölbrand gelöscht

Bild 23.2: Versuch Ö4 - Zeitlicher Verlauf des Ablöschens einer brennenden Bratpfanne (Pflanzenöl) mit Niederdruck-Wassernebel.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

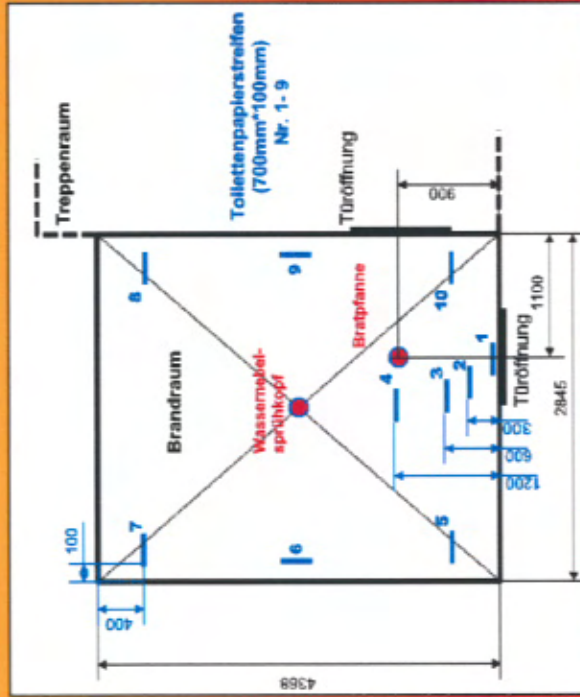
an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch Ö4



Toilettenpapierstreifen Nr. 1 - 5 im Türbereich vor dem Brand- u. Löschversuch



Toilettenpapierstreifen im Türbereich nach dem Brand- u. Löschversuch:
Nr. 1 - 3: vollständig erhalten, zum Teil leicht gebräunt
Nr. 4: im Deckenbereich angebrannt u. heruntergefallen
Nr. 5 - 10: vollständig erhalten
Nr. 10: leicht gebräunt (auf diesem Bild nicht erkennbar)



Restliches Pflanzenöl aus der Bratpfanne (über dem Löschwasser):
ca. 350 ml

Position der Toilettenpapierstreifen

Bild 23.3: Versuch Ö4 - Brandschäden

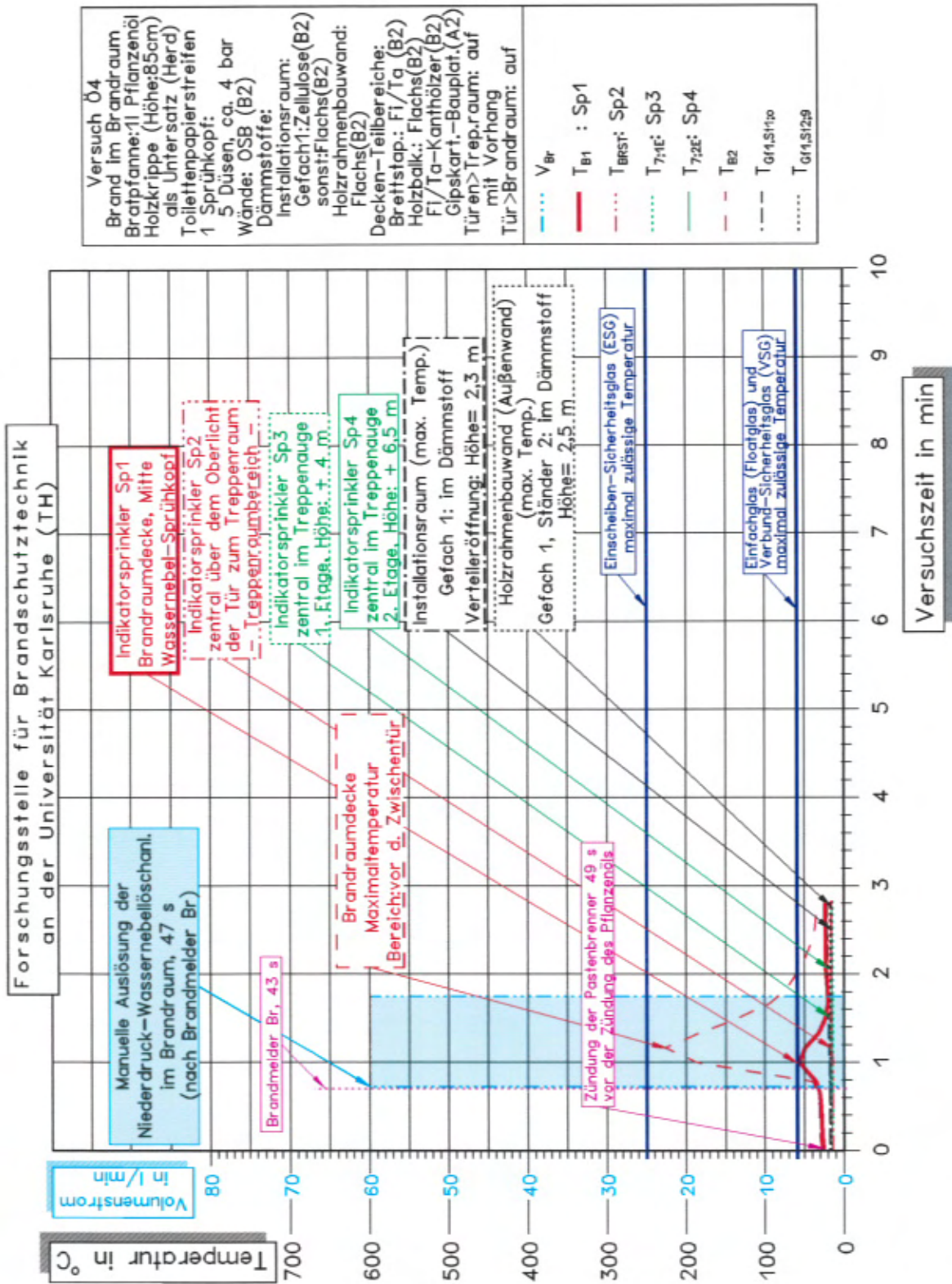


Bild 23.4: Versuch Ö4 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H4)

Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage
Vergleich: Sichtverhältnisse bei Auslösung der Indikatorsprinkler und Brandmelder - Sichtverhältnisse zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten (0,15 m⁻¹)







 <p>32 s Brandmelder Br</p>	 <p>1 min 31 s Indikatorsprinkler Sp1</p>	 <p>3 min 15 s Extinktionskoeffizient= 0,15 m⁻¹</p>
 <p>6 min 6 s Brandmelder Tr</p>	 <p>6 min 47 s Ind.sprink. Sp2 (Löschbeginn)</p>	 <p>16 min 30 s maximale Verrauchung</p>

Bild 24.1: Versuch H4 - Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage. Vergleich der Sichtverhältnisse bei den Auslösezeiten der Indikatorsprinkler und Brandmelder mit den Sichtverhältnissen, die zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind, vorliegen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H4



Zündkrippe angebrannt und umgefallen, Pflanzenöl vollständig verbrannt



Gefach 1, Installationsraum: Dem Brand zugewandte Oberfläche des Zellulosedämmstoffes im Bereich der Verteiler-(Abzweigdosens-)öffnung: leichte Brandspuren, Federdeckel geschmolzen



Türöffnung Brand-/Treppenraum: Oberlicht mit Rißbildung, Vorhang geschmolzen und heruntergefallen



Brandraumtür: Oberlicht mit Rißbildung
Leichte Brandspuren an der Gipskarton-Bauplatte (Kartonoberfläche) und der Brettstapeldecke (gebräunt)

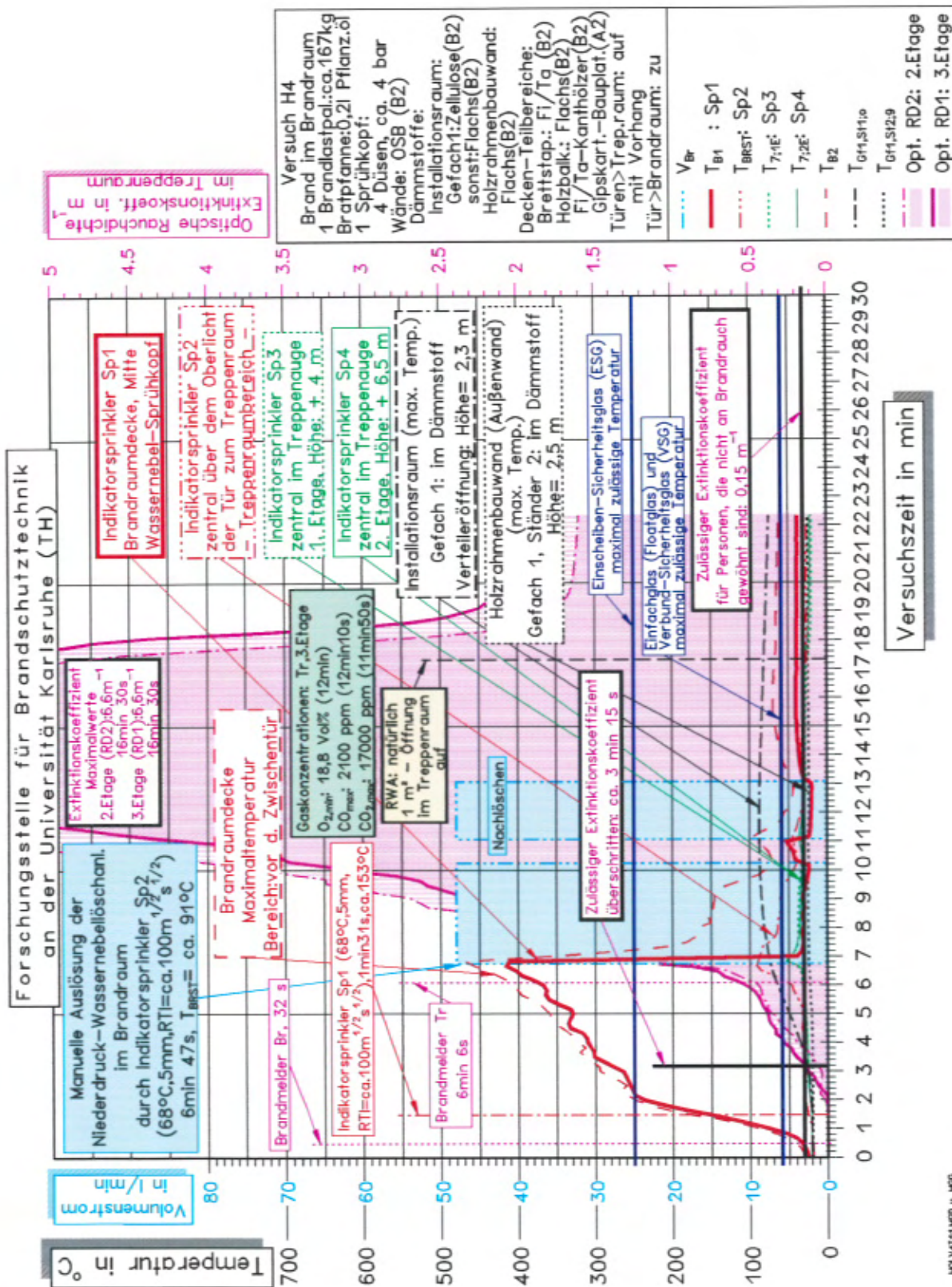


Bild 24.3: Versuch H4 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, optische Brauchdichte, Brandgaskonzentrationen, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.

HOLVAT1.MKD U. MGD



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Versuchsablauf (H6)

Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage

Vergleich: Sichtverhältnisse bei Auslösung der Indikatorsprinkler und Brandmelder - Sichtverhältnisse zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten (0,15 m⁻¹)



38 s
Brandmelder Br



1 min 26 s
Indikatorsprinkler Sp1*



1 min 43 s
Ind.sprink. Sp1 (Löschbeginn)



2 min 19 s
Brandmelder Tr



6 min 5 s
Extinktionskoeffizient= 0,15 m⁻¹



11 min 10 s
maximale Verrauchung

Bild 25.1: Versuch H6 - Verrauchung des Treppenraumes auf dem Podest der 3. Etage. Vergleich der Sichtverhältnisse bei den Auslösezeiten der Indikatorsprinkler und Brandmelder mit den Sichtverhältnissen, die zum Zeitpunkt des noch zulässigen Extinktionskoeffizienten für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt sind, vorliegen.



Forschungsstelle für Brandschutztechnik

an der Universität Karlsruhe (TH)

Leiter: Dipl.-Ing. Reiner John

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann



Brandschäden bei Versuch H6



Oberlichte nicht beschädigt,
Vorhang im oberen Bereich
angeschmolzen



Keine Brandspuren an der Gips-
karton-Bauplatte der Holzbal-
kendecke
Keine Brandspuren an der
Brettstapeldecke



Dem Brand zugewandte Oberfläche des Zellulosedämm-
stoffes im Bereich der Verteiler-(Abzweigdosens-)öffnung
von Gefach 1: keine Brandspuren, Federdeckel ge-
schmolzen, keine Brandspuren an den OSB-Platten



Zündkrippe angebrannt



Restliches Pflanzenöl aus der Bratpfanne
(über dem Löschwasser): ca. 200 ml

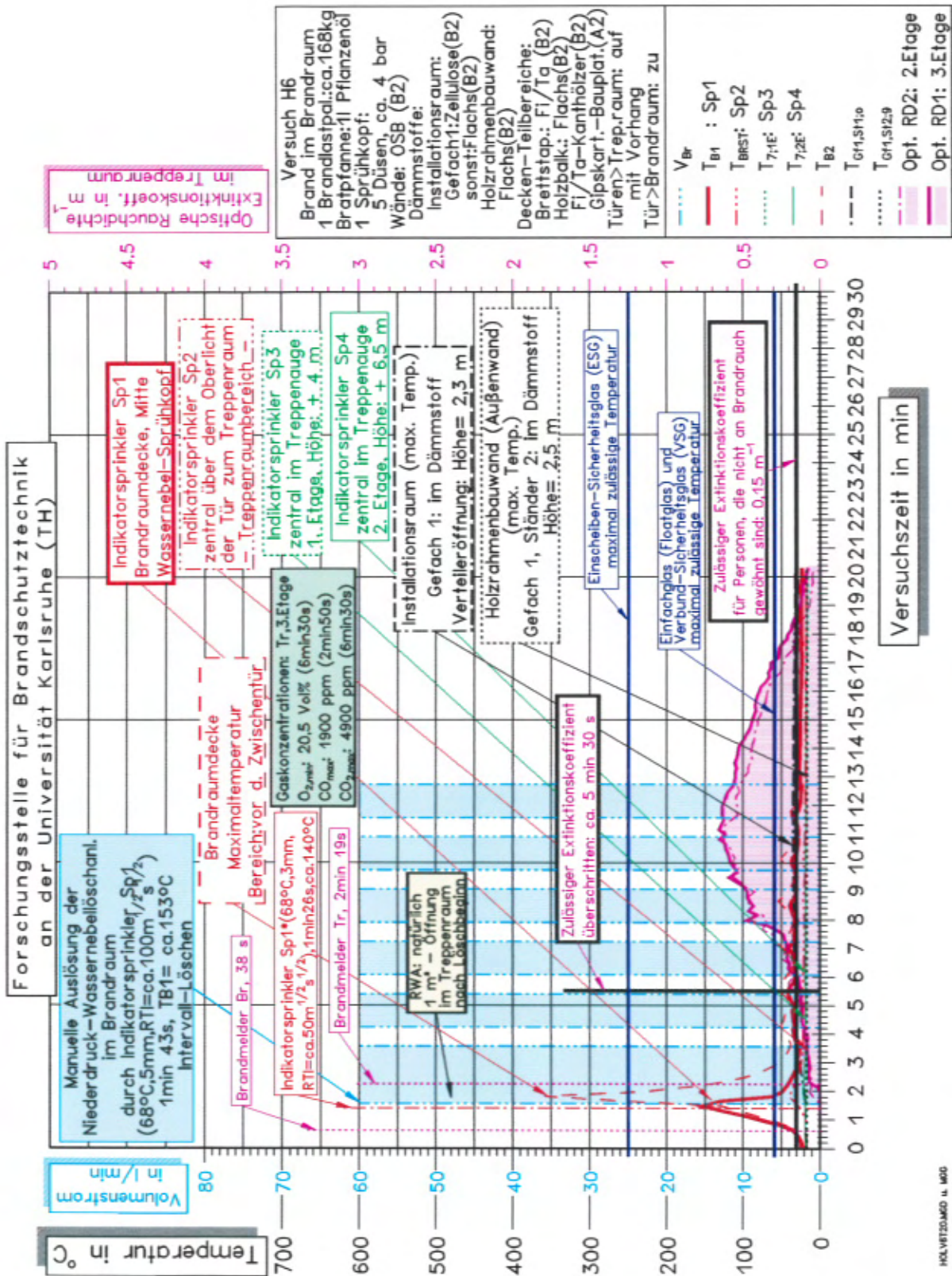


Bild 25.3: Versuch H6 - Ausgewählte Temperaturverläufe, Wasservolumenstrom, optische Brandrauchdichte, Brandgaskonzentrationen, maximal zulässige Temperaturen für Verglasungen.