

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER
DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse´.

- Teil 2:
- Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m²- Brandraum
 - Auslöseverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen
 - Vergleich der Löschwirkung von Nieder- und Hochdruck-Wassernebel

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

144

Forschungsbericht Nr. 144

**Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete
und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche
Löschwassermengen in Abhängigkeit einer
`Brandgefahrenklasse`.**

- Teil 2:
- Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m²- Brandraum
 - Auslöseverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und thermischen Glasfaser-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen
 - Vergleich der Löschwirkung von Nieder- und Hochdruck-Wassernebel

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Oktober 2010

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT HOCHDRUCK-WASSERNEBEL	3
2.1	Versuchsaufbau, Messtechnik und Versuchsdurchführung	3
2.2	Auslegung von Düsen und Sprühkopf - Tropfenmessungen und Kaltversuche	4
3.	BRANDVERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER WÄRMEFREISETZUNG	6
3.1	Br2V1 – Tür: zu, Fenster: auf – Zündung Brandlast VR, Brandlast Nr. 2	8
3.2	Br3V1 – Tür: zu, Fenster: auf – Zündung Brandlast VR. Brandlast Nr. 3	9
4.	BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	10
4.1	HDSC135B1 – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung) – Zündung 5 Brandlasten im Raum Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 1	10
4.2	HDSC135B2 – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung) – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 2	14
4.3	HDSC135B3 – Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 2	16
4.4	HDSC135B4 – Tür: auf, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 2	18
4.5	HDSC135B5 – Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Rauchmelder RM _{ZEN} Brandlast Nr. 2	20
4.6	HDSC135B6 – Tür: zu, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Rauchmelder RM _{ZEN} Brandlast Nr. 2	22

4.7	HDSC135B7 – Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 3	24
4.8	HDSC135B8 – Tür: zu, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 3	27
4.9	HDSC135B9 – Tür: zu, Fenster auf – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 3	29
4.10	HDSC135B10 – Tür: auf, Fenster auf – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 3	31
4.11	HDSC80B1 – Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 3	33
4.12	HDSC80B2 – Tür: zu, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP _{ZEN} Brandlast Nr. 3	36
5.	VERGLEICH DER LÖSCHWIRKUNG VON NIEDER- UND HOCHDRUCK-WASSERNEBEL	38
6.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	42
7.	LITERATURVERZEICHNIS	47
8.	TABELLEN	50
9.	BILDER	57

BERICHTSKENNBLETT

Nummer des Berichtes: 144	Titel des Berichtes: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse`. Teil 2: <ul style="list-style-type: none"> • Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m²- Brandraum • Auslöseverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen • Vergleich der Löschwirkung von Nieder- und Hochdruck-Wassernebel 	ISSN: 0170-0060	
Autor: Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: 201 (3/2006)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Oktober 2010			
Seitenzahl: 132	Bilder: 70	Tabellen: 3	Literaturverweise: 16
Kurzfassung: <p>In den vorliegenden Untersuchungen wurden mit kleinen Modellbrandlasten die Verhältnisse bei einem Entstehungsbrand im 25 m² - Brandraum der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bei anschließendem Löscheinsatz mit ortsfester Hochdruck-Wassernebellöschanlage sowie das Ansprechverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und von thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen (Tür: zu/auf, Fenster: zu/auf/gekippt) untersucht. Bei den im Realmaßstab durchgeführten Versuchen konnte u. a. folgendes festgestellt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund der relativ kleinen Modellbrandlasten ist die Wärmefreisetzungs- und Braundrauchentwicklung geringer als bei größeren Bränden. Dies führt dazu, dass Indikatorsprinkler und Rauchmelder erst nach relativ langer Zeit auslösen. Insbesondere hat die Temperaturentwicklung im Brandraum einen entscheidenden Einfluss auf das Auslöseverhalten der thermischen Glasfass-Auslöseelemente. • Bei den Versuchen ergab sich eine zum Teil sehr deutliche asymmetrische Temperaturverteilung unter der Raumdecke, und dies bereits ohne Windeinfluss auf die Öffnung. Diese Verteilung ist nur bedingt durch die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen aufgrund der unterschiedlichen Öffnungszustände von Tür und Fenster erklärbar. Auch die Brandlastgröße sagt bei den durchgeführten Versuchen nicht unbedingt etwas über die Geschwindigkeit der Temperaturentwicklung aus. Dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Auslösung von Rauchmeldern und von thermischen Glasfass-Auslöseelementen. • Während des Löscheinsatzes ergibt sich eine beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Braundrauchaerosol. Dies hält noch einige Minuten nach Abstellen der Löschanlage an, wobei die Öffnungszustände von Fenster und Tür nicht verändert wurden. • Der tiefsitzende Glutbrand der Holzkrippe konnte durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden. Die Restglut wurde manuell abgelöscht. Die weitere Brandausbreitung auf die im Umfeld der gezündeten Holzkrippe befindliche Brandlast in Form von Sofakissen wurde jedoch beträchtlich reduziert. • Man erkennt aus den durchgeführten Versuchen mit unterschiedlichen Brandlasten und unterschiedlichen Ventilationsbedingungen, dass selbst bei dem hier verwendeten relativ kleinen Raum große Unterschiede bzgl. des Ansprechverhaltens (Temperatur und Zeit) von Rauchmeldern und thermischen Glasfassauslöseelementen sowohl innerhalb des Raumes als auch beim Vergleich vermeintlich identischer Versuche auftreten. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung von Brandmeldeanlagen mit Zweimelderabhängigkeit und der entsprechenden zeitlichen Auslöseverzögerung der Melder, insbesondere im Hinblick auf die Auslösung von Löschanlagen bzw. der Alarmierung der Feuerwehr. • Bzgl. dem Niederschlagen von Gasen und Dämpfen durch Wassernebel kann folgende Aussage gemacht werden: Die Löslichkeit von Ammoniak, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Chlor in Wasser ist gegenüber Kohlenmonoxid und Kohlendioxid weitaus größer. Hieraus ist unmittelbar einleuchtend, dass das Niederschlagen dieser Gase mit Wassernebel Sinn macht, dagegen das Niederschlagen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid und damit die Reduktion dieser Gase in der Raumluft nur eine untergeordnete Rolle spielt. • Aufgrund des relativ kleinen Brandraumes mit einer Grundfläche von 25 m² besteht weiterhin großer Untersuchungsbedarf beim Einsatz von Wassernebel z.B. in großen Hallen, Tunneln etc. bzgl. des Einflusses von Ventilationsströmungen auf die Löschwirkung bei den unterschiedlichen Arten von Wassernebel. <p>Ein Vergleich der hier durchgeführten Untersuchungen und sonstigen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik dokumentierten nationalen und internationalen Untersuchungen legt den Schluss nahe, dass Niederdruck-Wassernebel Vorteile in der Brandbekämpfung gegenüber Hochdruck-Wassernebel sowohl bei flüssigen als auch bei festen Brandstoffen aufweist.</p>			
Schlagwörter: Brand- und Rauchausbreitung, Raumbrand, Abbrandrate, Wärmefreisetzung, Rauchmelder, thermische Glasfassauslöseelemente, Zweimelderabhängigkeit, Sprinkler, Hochdruck-Wassernebel, Niederdruck-Wassernebel, Sichtverhältnisse, Braundrauch, Niederschlagen von Gasen und Dämpfen mit Wassernebel			

1. EINLEITUNG

Die seit Jahren andauernde Diskussion darüber, welcher Wasserdampf (Nieder-, Mittel- oder Hochdruck) für die Brandbekämpfung optimal ist, ist noch nicht zu einem Abschluss gekommen.

Hierbei muss u. a. auch unterschieden werden, ob z.B. Brände mit flüssigen oder festen Brandstoffen bekämpft werden sollen.

Ganz entscheidend sind insbesondere die Lüftungsbedingungen bei der Löschwirkung von Wasserdampf. Je feiner die Tropfen sind, desto leichter können diese durch von außen aufgedrängte Luft-Strömungen abgelenkt werden und stehen dann ggf. am Brandherd nicht mehr zur Löschung zur Verfügung.

In den bisherigen Untersuchungen von Kunkelmann [1 bis 7] wurden sowohl im Versuchstreppenraum der FFB [1] bis [6] als auch im 10 m² [3] und im 25 m² - Brandraum [7] der Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit kleinen Versuchsbränden die Verhältnisse bei einem Entstehungsbrand und anschließendem Löscheinsatz mit ortsfester Wasserlöschanlage untersucht.

Der Brand wurde in den bisherigen Versuchen mit einer Niederdruck- [1 – 7], einer Hochdruck-Wasserdampflöschanlage [6] oder einer Sprinkleranlage mit Normalsprinkler [1], [2] bekämpft.

Mit Hilfe verschiedener Messeinrichtungen wurden jeweils vor allem der zeitliche Verlauf von Temperatur, Druck, Rauchdichte und den verschiedenen Schadstoffkonzentrationen gemessen. Mit mehreren Videokameras wurde die Brand- und Rauchentwicklung jeweils aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

Bei den Versuchen im Versuchstreppenraum [2], [6] wurde auch der Einfluss von außen aufgedrängten Strömungen (z.B. Wind) auf Öffnungen mitberücksichtigt. Dieser kann sich erheblich auf die Verrauchung und das Löschergebnis auswirken.

In der vorliegenden Arbeit werden weitergehende Untersuchungen mit Hochdruck-Wasserdampf im 25 m² - Brandraum beschrieben.

In dieser Arbeit wird besonderer Wert auf unterschiedliche Ventilationsverhältnisse im Brandraum (realisiert durch unterschiedliche Öffnungszustände des Fensters und der Tür) gelegt.

Obwohl der Windeinfluss auch bei dem hier verwendeten 25 m² - Brandraum und vergleichbaren Szenarien, wie frühere Untersuchungen an der FFB gezeigt haben, aufgrund des erheblichen Einflusses nicht vernachlässigt werden kann, mussten die Versuche aus Gründen der projektbedingten Beschränkung auf die Variation sonstiger Einflussgrößen, jedoch ohne Windeinfluss durchgeführt werden.

Aufgrund des relativ kleinen Brandraumes mit einer Grundfläche von 25 m² besteht weiterhin großer Untersuchungsbedarf beim Einsatz von Wasserdampf z.B. in großen Hallen, Tunneln etc. bzgl. des Einflusses von Ventilationsströmungen auf die Löschwirkung bei den unterschiedlichen Arten von Wasserdampf.

2. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT HOCHDRUCK- WASSERNEBEL

2.1. Versuchsaufbau, Messtechnik und Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau, die Messtechnik und die Versuchsdurchführung sind den **Bildern 1.1 und 1.2** sowie **Tabelle 1** zu entnehmen.

Als Messgrößen wurden Temperaturen an verschiedenen Positionen im Brandraum, der Volumenstrom am Sprühkopf sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Konzentration im Brandraum als Funktion der Zeit aufgezeichnet.

Auf die messtechnische Erfassung der Rauchdichte (Extinktionskoeffizient) wurde im Gegensatz zu den Versuchen im Treppenraum (siehe [6]) verzichtet.

In den Untersuchungen wurden Brandlasten bei den jeweiligen Versuchen gemäß **Bild 1.1** eingesetzt.

Zur Branddetektion im Raum werden Rauchmelder und fotoelektronische Rauchmelder verwendet.

Indikatorsprinkler sind Sprinklerköpfe ohne Löschfunktion. Diese werden über eine Rohrleitung mit Druckluft beaufschlagt. Bei der hydraulischen Sprengung des Glasfasses aufgrund der Wärmeeinwirkung des Brandes ergibt sich ein schlagartiger Druckabfall, der am jeweiligen Manometer auf einem Anzeige-Tableau außerhalb des Brandraumes angezeigt wird. Das Auslöseverhalten dieser Sprinkler entspricht dem Auslöseverhalten in einer Trockensprinkleranlage.

Auf dem Anzeige-Tableau wird weiterhin das Ansprechen der Rauchmelder an den verschiedenen Positionen im Raum über Leuchtdioden visuell angezeigt.

Als Indikatorsprinkler (Sprinkler ohne Löschfunktion) wurden Sprinkler mit 68°C Nennauslösetemperatur und 3 mm Glasfass (mittlerer RTI-Wert: ca. $50 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{1/2}$) verwendet, die im

Vergleich zu Sprinklern mit 5 mm Glasfass, besonders im Hinblick auf den Personenschutz, deutlich kürzere Auslösezeiten unter gleichen Randbedingungen liefern.

Das Ansprechen des Indikatorsprinklers zentral neben dem Sprühkopf wurde bei der überwiegenden Anzahl der Versuche als Auslösekriterium für die Wassernebellöschanlage verwendet.

Bei zwei Versuchen wurde abweichend hiervon das Ansprechen des Rauchmelders zentral neben dem Sprühkopf ebenfalls als Auslösekriterium für die Wassernebellöschanlage verwendet.

Als Rauchmelder wurden handelsübliche Heimrauchmelder nach dem fotoelektronischen Prinzip mit VdS-Zulassung verwendet.

Bei den Versuchen wurden außer dem Druck am Sprühkopf und dem Auslösekriterium Rauchmelder oder Indikatorsprinkler auch die Ventilationsbedingungen (Tür bzw. Fenster geöffnet oder geschlossen) variiert, jedoch ohne eine zusätzliche voreingeprägte Außenströmung (Windeinfluss).

2.2. Auslegung von Düsen und Sprühkopf - Tropfenmessungen und Kaltversuche

Der Hochdruck-Sprühkopf wurde von der Forschungsstelle für Brandschutztechnik so konzipiert, dass ein maximaler Volumenstrom von 13 l/min bei einem Druck von 135 bar (Überdruck) versprüht wurde.

Dieser Volumenstrom wurde gewählt, um direkte Vergleichsversuche zu einer Niederdruck-Wassernebellöse (4 bar) zu erhalten (siehe Versuche im Holztreppenraum, Kunkelmann [6]).

Bei einem Druck von 80 bar liefert dieser Hochdruck-Sprühkopf einen Volumenstrom von 10 l/min.

Bei den eingesetzten Hochdruckdüsen (**Tabelle 1**) handelt es sich um Dralldüsen. Die Düsen erzeugen einen kreisförmigen Hohlkegel und weisen einen Bohrungsdurchmesser von 1,2 mm auf.

Die **Bilder 2.1** und **2.2** zeigen verschiedene Kalsprühversuche sowohl mit der Einzeldüse als auch dem Sprühkopf jeweils bei 135 bar im Freien, im Brandraum und im Treppenraum mit und ohne Windeinfluss.

Bild 2.3 zeigt den volumetrisch mittleren Tropfendurchmesser D_{30} (50% des zerstäubten Gesamtvolumens haben Tropfen, deren Durchmesser kleiner oder größer ist) der verwendeten Düsen. Maßgeblich ist hierbei die Kurve für 80 bar. Für den Bohrungsdurchmesser 1,2 mm der hier verwendeten Einzeldüsen ergibt sich ein Wert von ca. 37 μm .

Für den Druck 135 bar liegen keine Tropfenmessungen vor. Bei dem höheren Druck ergibt sich qualitativ eine Verschiebung zu etwas geringeren Tropfengrößen als bei 80 bar.

Bild 2.4 zeigt beispielhaft den Verlauf des mittleren Tropfendurchmessers (arithmetisches Mittel aller Tropfendurchmesser) D_{10} , des volumetrisch mittleren Tropfendurchmessers D_{30} sowie des Sauter-Durchmessers (Verhältnis: Summe aller Tropfenvolumina / Summe aller Tropfenoberflächen) D_{32} über einem Sprühradius von 80 mm - hier allerdings für einen Druck von 50 bar und einen Bohrungsdurchmesser von 2,3 mm.

Eine wesentliche Aussage dieser Kurven ist, dass die Tropfengrößen des verwendeten Düsentyps im Zentrum unter der Düsenaustrittsöffnung kleiner sind als im Randbereich. Beispielsweise steigt der Sauter-Durchmesser, der vorzugsweise zur Beschreibung von Wärme- und Stoffaustauschprozessen herangezogen wird, von 30 μm im Zentrum der Düse auf 100 μm beim Radius 80 mm an.

Bild 2.5 zeigt beispielhaft die Tropfengeschwindigkeitsverteilung und **Bild 2.6** die Volumendichte über einem Sprühradius von 80 mm - ebenfalls für einen Druck von 50 bar und einen Bohrungsdurchmesser von 2,3 mm. Die entsprechenden Bilder für die verwendete 1,2 mm Einzeldüse bei den Drücken 80 bar oder 135 bar stehen der Forschungsstelle nicht zur Verfügung.

3. BRANDVERSUCHE ZUR BESTIMMUNG DER WÄRMEFREISETZUNG

Zur Bestimmung der Wärmefreisetzung über den gesamten Zeitraum des Abbrennens der beiden Brandlasten Nr. 2 und Nr. 3 nach **Bild 1.1** wurden 2 Vorversuche ohne Löscheinsatz bei geschlossener Tür und geöffnetem Fenster durchgeführt.

Die Wärmefreisetzung wurde mittels einer Abbrandwaage an Position VR im Brandraum ermittelt.

Die Abbrandmasse ΔM ergibt sich aus der Differenz zwischen Anfangsmasse M_a und der noch nicht verbrannten Masse der Stoffe zum Zeitpunkt t zu

$$M = M_a - M(t) \quad (1)$$

Die zeitliche Abbrandrate \dot{M} ergibt sich aus

$$\frac{d(\Delta M)}{dt} = \frac{dM}{dt} = \dot{M} \quad (2)$$

Hiernach ergibt sich der Zusammenhang zwischen der in der Zeiteinheit freigesetzten Wärmemenge, d.h. dem Wärmestrom (Brutto) \dot{Q} und der Abbrandrate \dot{M} für einen homogenen Stoff bei vollständiger Verbrennung.

$$\dot{Q} = \dot{M} \times H_u \quad (3)$$

Bei einer aus mehreren Komponenten zusammengesetzten Brandlast sind die Massenströme und Heizwerte der Einzelkomponenten zu berücksichtigen, was aber insbesondere in einem fortgeschrittenen Brandstadium nicht mehr möglich ist. Die gemessenen Abbrandkurven charakterisieren daher das Abbrandverhalten der gesamten Brandlast, da schon nach kurzer Zeit die Trennung der Vorgänge auf die verschiedenen Komponenten nicht mehr möglich ist.

Für den Heizwert H_u wird der gewichtete Heizwert aus den Komponenten der Brandlast eingesetzt. Dieser ergibt sich nach folgender Beziehung:

$$\bar{H}_u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times H_{u,i}}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n p_i \times H_{u,i} \quad (4)$$

Der aufsteigende fühlbare Wärmestrom ist wesentlich geringer als der nach Gleichung (3) errechnete Wärmestrom (Brutto). Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch unvollständige Verbrennung der Heizwert H_u nicht erreicht wird und Wärme durch Strahlung an die Umgebung abgegeben wird. Eine unvollständige Verbrennung entsteht z.B. durch den Einfluss flammenhemmender Zusätze auf die Verbrennung, durch Sauerstoffmangel sowie durch nicht ausreichende Zündenergien zur Zündung der durch Wärmeeinwirkung entstandenen und nach oben abströmenden Zersetzungsgase und -dämpfe und führt u. a. zu Rußbildung.

Der Restwärmestrom (fühlbarer Wärmestrom) \dot{Q}_f beträgt je nach verwendeter Brandlast und geometrischer Anordnung ca. 70 % des theoretischen Wertes (Wärmestrom (Brutto)). Der fühlbare Wärmestrom ist der Wärmestrom, der oberhalb des brennenden Stoffes auftritt, und der im wesentlichen sowohl für das Ansprechen von thermisch wirkenden Auslöseelementen einer Löschanlage verantwortlich ist als auch bei der thermischen Auslegung von Decken oder Dächern, z.B. von Lagergebäuden, berücksichtigt werden muss.

Bei den nachfolgenden Versuchen werden quantitative Aussagen nur zum Wärmestrom (Brutto) gemacht.

3.1. Br2V1 - Tür: zu, Fenster: auf – Zündung Brandlast VR, Brandlast Nr.: 2

Für die Brandlast Nr. 2 in Versuch Br2V1 gemäß **Bild 1.1** ergibt sich folgende Berechnung des mittleren Heizwertes:

Brandlast Nr.2				
	Heizwert [MJ/kg]	Einzelmasse	Massenanteil	Heizwert (massenanteilbezogen)
Holz	16,8 MJ/kg	2 kg	0,8458	14,209 MJ/kg
Kissen aus Polyester	22,6 MJ/kg	0,325 kg	0,1375	3,108 MJ/kg
Spiritus	25,3 MJ/kg	0,0395 kg (50 ml)	0,0167	0,423 MJ/kg
Gesamt	-	2,3645 kg	$\Sigma = 1$	$\bar{H}_u = 17,74 \text{ MJ/kg}$

Tabelle 2 und **Bild 3.1** geben Auskunft zu den Auslösezeiten von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern sowie über den zeitlichen Verlauf der Temperaturen und des Wärmestromes (Brutto).

Die Videoprints in den **Bildern 3.3 und 3.4** zeigen im Vergleich die Verrauchung bei den Versuchen Br2V1 und Br3V1 beim Ansprechen der Rauchmelder und Indikatorsprinkler.

Die Wärmefreisetzung beträgt bei diesem Versuch nach 1 min ca. 2 kW, der maximale Wert von 81 kW wird nach 5 min 29 s erreicht.

Die Videoauswertung des Versuches zeigt, dass das Kissen bereits nach 42 s durchbrennt. Hierdurch greift das Kissen mit dem gegenüber Holz größeren Heizwert früh in das Brandgeschehen ein.

Aufgrund der geringen Wärmefreisetzung sprechen bei diesem Versuch nur die Indikatorsprinkler VR und ZEN an.

3.2. Br3V1 - Tür: zu, Fenster: auf – Zündung Brandlast VR, Brandlast Nr.: 3

Für die Brandlast Nr. 3 in Versuch Br3V1 gemäß **Bild 1.1** ergibt sich folgende Berechnung des mittleren Heizwertes:

Brandlast Nr.3				
	Heizwert [MJ/kg]	Einzelmasse	Massenanteil	Heizwert (massenanteilbezogen)
Holz	16,8 MJ/kg	4 kg	0,7062	11,864 MJ/kg
Kissen aus Polyester	22,6 MJ/kg	1,625 kg	0,2869	6,484 MJ/kg
Spiritus	25,3 MJ/kg	0,0395 kg (· 50 ml)	0,0069	0,176 MJ/kg
Gesamt	-	5,6645 kg	$\Sigma = 1$	$\bar{H}_u = 18,52 \text{ MJ/kg}$

Tabelle 2 und **Bild 3.2** geben Auskunft zu den Auslösezeiten von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern sowie über den zeitlichen Verlauf der Temperaturen und des Wärmestromes (Brutto) sowie die Wärmeströme beim Auslösen der Rauchmelder und Indikatorsprinkler.

Die Videoprints in den **Bildern 3.3 und 3.4** zeigen im Vergleich die Verrauchung bei den Versuchen Br2V1 und Br3V1 beim Ansprechen der Rauchmelder und Indikatorsprinkler.

Die Videoauswertung des Versuches zeigt, dass das Kissen erst nach 1 min 37 s, also 55 s später als bei Versuch Br2V1 durchbrennt. Einen Einfluss können hier die größeren Strömungswiderstände innerhalb der Krippe aufgrund der doppelten Höhe gegenüber Versuch Br2V1 haben. Wie frühere Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zur Flammenausbreitungsgeschwindigkeit zwischen Lagerstapeln gezeigt haben, haben die Abstände einen zum Teil beträchtlichen Einfluss (siehe Kunkelmann [11]).

Die Temperaturen sind bei Versuch Br2V1 im Zeitraum bis ca. 6 min hierdurch höher als bei Versuch Br3V1.

Ebenfalls ist die Abbrandrate bei Versuch Br2V1 im Zeitraum bis ca. 6,5 min höher als bei Versuch Br3V1.

Im Mittel lösten die Rauchmelder infolge von größerer Brandlast und Wärmefreisetzung bei Versuch Br3V1 schneller aus als bei Versuch Br2V1.

Das Temperaturniveau im Bereich der Rauchmelder ist bei Versuch Br3V1 niedriger als bei Versuch Br2V1.

Die Wärmefreisetzung beträgt bei diesem Versuch nach 1 min ca. 7 kW, der maximale Wert von 163 kW wird nach 8 min 35 s erreicht.

Aufgrund der größeren Wärmefreisetzung gegenüber Versuch Br2V1 sprechen bei diesem Versuch sämtliche 5 Indikatorsprinkler an.

Nicht unmittelbar erklärbar ist, dass trotz der größeren Wärmefreisetzung bei diesem Versuch die Indikatorsprinkler VR und ZEN später ansprechen als bei Versuch Br2V1.

4. BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

4.1. HDSC135B1

- Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)– Zündung 5 Brandlasten im Raum
Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 1

Die **Bilder 4.1 bis 4.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Ausschließlich bei diesem Versuch wurden 5 im Brandraum verteilte Brandlasten nahezu gleichzeitig gezündet (übrige Versuche nur Brandlast an der Position VR). Hierdurch ergab sich eine deutlich schnellere Entwicklung der Wärmefreisetzung als bei den übrigen Versuchen.

Erkennbar wird dies aus der erheblich kürzeren Zeit bis zur Auslösung der Rauchmelder (Mittelwert: 51 s) und der Indikatorsprinkler (Mittelwert: 1 min 21 s) nach **Tabelle 2**, im Vergleich zu den weiteren Versuchen.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und 3 min nach dessen Beendigung.

Bild 4.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke unmittelbar neben den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid (in 1,5 m Höhe).

Weiterhin geben dieses Bild und **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löschzeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wasserdampf nicht vollständig gelöscht werden konnte. Die Restglut wurde mit Wasser manuell abgelöscht.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 4.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 3 min 24 s wurden ca. 44 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Der Versuchsablauf zeigt, dass bei gleichmäßig verteilter Brandlast (und gleichzeitiger Zündung) die Strömung des heißen Brandrauchs ebenfalls als gleichmäßig bezeichnet werden kann. Dies führte zu einer nur geringen Streuung der Einzelwerte der Auslösezeiten von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern und den jeweils zugeordneten Temperaturwerten, wie der **Tabelle 2** entnommen werden kann.

Bereits nach 1 min wird eine Temperatur von ca. 60°C (TB7) an der Decke erreicht.

Die Fensteröffnung hatte in der Frühphase der Brandentwicklung darauf offenbar nur geringen Einfluss, auch weil sich bedingt durch die Lage der Oberkante der Fensteröffnung im Raum eine, wenn auch nur wenige cm dicke, Rauchsicht ausbilden konnte, bei insgesamt guter Strömungssymmetrie (vgl. hierzu die in **Bild 1.1** angegebenen Raumabmessungen).

Die Tabellenwerte in **Tabelle 2** weisen bezüglich der Gaskonzentrationen aus, dass der im vfdb-Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [8] in Tabelle 3.4 genannte CO-Grenzwert für kurze Aufenthaltsdauer (< 5 min) mit 500 ppm kurzfristig erreicht wurde (Messstelle in 1,5 m Höhe).

An dieser Stelle soll allerdings bemerkt werden, dass die Löslichkeit von Gasen im Wasserdampf bei der Bestimmung der Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid nicht berücksichtigt wurde.

Die Löslichkeit von Gasen in Wasser ist von der Gasart, vom Druck und von der Temperatur abhängig. Je höher der Druck, desto mehr Gas ist in Wasser löslich. Öffnet man z.B. eine Flasche kohlendioxidhaltiges Mineralwasser, so entweicht Kohlendioxid – zur Herstellung wurde Kohlendioxid in natürliches Mineralwasser eingepresst und gelöst. Dieser Fall des erhöhten Druckes in feinverteiltem Wasserdampf liegt im vorliegenden Fall der Brandbekämpfung nicht vor.

Allerdings nimmt mit höherer Temperatur die Löslichkeit in Wasser ab.

Bei Müller [15] findet man eine Zusammenstellung für die Löslichkeit verschiedener Gase in Wasser (Löslichkeit in g Gas je kg Wasser bei 101,3 kPa) nach **Tabelle 3**.

Man erkennt, dass die Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser wesentlich größer als die von Kohlenmonoxid und Sauerstoff ist. Daher dürfte z.B. der gemessene Wert für die Kohlendioxid-Konzentration zu niedrig sein. Eine quantitative Aussage kann hier allerdings für die gemessenen Gaskomponenten nicht gemacht werden.

Man erkennt in der Tabelle weiterhin, dass die Löslichkeit von Ammoniak, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Chlor gegenüber Kohlenmonoxid und Kohlendioxid weitaus grö-

ßer sind. Hieraus ist unmittelbar einleuchtend, dass das Niederschlagen dieser Gase mit Wasserdampf Sinn macht, dagegen das Niederschlagen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Unter den hier dargestellten Versuchsbedingungen – die gemessenen Temperaturen erreichten die in der Tabelle 2 genannten Werte nur unter der Raumdecke – wäre auch ein ungefährlicher kurzfristiger Aufenthalt von ungeschützten Personen im Brandraum während des Versuchs ohne bleibende Schäden möglich gewesen, auch wenn lokal höhere Werte für die Rauchdichte als für Rettungswege tolerierbar aufgetreten sind (siehe auch Kunkelmann [6]).

Dieses zeigt auch die Zusammenstellung der Auswirkungen der unterschiedlichen Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid auf den menschlichen Organismus bei Bränden im Vergleich mit einem nicht bekämpften Wohnzimmerbrand (Kunkelmann [9]) nach **Bild 4.5**: Tödliche Sauerstoff- und Brandgaskonzentrationen können bei Bränden z.B. in Wohnräumen bereits unter 3 Minuten auftreten.

Bei der hier durchgeführten Brandbekämpfung mit Hochdruck-Wasserdampf werden die kritischen Konzentrationen für Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid nicht erreicht.

Das nachfolgende **Bild 4.6** zeigt die Zeiten bis zum Auftreten eines Flashovers (siehe Kunkelmann [10]). Diese Zeiten sind zum einen der internationalen Literatur entnommen worden, zum anderen aus Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Im Mittel trat der Flashover nach 7 Minuten bei Versuchsbränden auf. Aus den angegebenen Zeiten ist abzuleiten, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Feuerwehr erst nach einem Flashover eintrifft, relativ hoch ist. Dieser Flashover wird jedoch durch die frühzeitige Brandbekämpfung mit der eingesetzten Löschanlage, unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit von Löschanlagen (definiert durch die Versagenswahrscheinlichkeit) wirksam verhindert.

4.2. HDSC135B2

- Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung) – Zündung Brandlast VR
- Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 2

Im Gegensatz zu Versuch HDSC135B1 wurde die Brandlast nur an Position VR gezündet.

Die **Bilder 5.1 bis 5.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang. Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 5.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke unmittelbar neben den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin geben dieses Bild und **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Aufgrund der Tatsache, dass der zentrale Indikatorsprinkler nicht auslöste, wurde die Löschanlage manuell nach 8 min 58 s ausgelöst.

Der Beginn des Löschvorganges wurde willkürlich festgelegt, weil das grundsätzlich vorgesehene Auslösekriterium, nämlich die erfolgte thermische Auslösung durch Platzen des Glasfasses am zentral im Raum unter der Decke angebrachten Indikatorsprinkler, nicht erfolgte. Das Platzen war während der Branddauer aufgrund des während des Versuchs beobachteten zeitlichen Temperaturverlaufs an der Temperaturmessstelle T_{B2} nicht mehr zu erwarten.

Dies ist Folge der in Fensternähe (offenes Fenster) platzierten Brandlast, die zu einer deutlich asymmetrischen Temperaturverteilung unter der Raumdecke führt.

Nach 3 min ergibt sich eine Temperatur von ca. 95°C (T_{B7}) an der Decke über der Brandlast.

Der Indikatorsprinkler ISP_{VR} sprach nach dem daneben positionierten Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) mit 1 min 34 s min Zeitverzug an.

Die unterhalb der Messstelle „VR“ angeordnete Brandlast führte auch dazu, dass der darüber positionierte Rauchmelder RM_{VR} als erster Rauchmelder ansprach; die anderen Rauchmelder reagierten demgemäß verzögert.

Für den Versuch wird keine Löschwassermenge und Löschzeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 5.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 7 min 38 s wurden ca. 99 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

Beim Vergleich des Versuchs HDSC135B2 mit dem Vorversuch Br2V1 ergeben sich bei Versuch Br2V1 ca. 1 min bis 2 min längere Ansprechzeiten der Rauchmelder. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die schnellere Brand- und Brandrauchentwicklung in der Anfangsphase aufgrund der größeren Rohbauöffnung (1,42 m²) bei Versuch HDSC135B2 gegenüber dem offenen Fenster bei Versuch Br2V1 (1 m²) zurückzuführen

Aufgrund der etwas größeren Rohbauöffnung (1,42 m²) bei Versuch HDSC135B2 gegenüber dem offenen Fenster bei Versuch Br2V1 (1 m²) ergibt sich bei der kleineren Öffnung aufgrund des Aufheizvorganges ein etwas höheres Temperaturniveau im Brandraum. Dies führt dazu, dass der Indikatorsprinkler bei Versuch Br2V1 mit 2 min 30 s schneller auslöste als bei Versuch HDSC135B2 (3 min 4 s). Gleichzeitig löste der Indikatorsprinkler bei Versuch Br2V1 aus, bei HDSC135B2 dagegen nicht.

4.3. HDSC135B3

- Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 2

Im Unterschied zu Versuch HDSC135B2 waren bei diesem Versuch die Tür als auch das Fenster geschlossen.

Die **Bilder 6.1 bis 6.4** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 6.5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin geben dieses Bild und **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löschzeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wasserdampf nicht gelöscht werden konnte.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 6.5** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 8 min 10 s wurden 106 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Da bei diesem Versuch Tür und Fenster, abweichend von den in Abschnitt 4.1 und 4.2 beschriebenen Versuchen HDSC135B1 und HDSC135B2, geschlossen waren, entwickelte sich die Rauchströmung auch abweichend von den vorbeschriebenen Versuchen.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 100°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Da der Rauch innerhalb des Raumes gehalten wurde und somit die Wärmekonzentration höher als bei geöffnetem Fenster war, löste der zentral angebrachte Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} aus, im Gegensatz zu dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Versuch HDSC135B2.

Der Indikatorsprinkler ISP_{VR} sprach nach dem daneben positionierten Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) mit 36 s Zeitverzug an.

Infolge des durch Brandeinwirkung nicht zerstörten Fensters blieb auch während des Löschvorganges der Raum geschlossen.

Es ist zu vermuten, dass als unmittelbare Folge hieraus die CO_2 -Konzentration den entsprechenden Wert bei geöffnetem Fenster deutlich (um nahezu das 5-fache) überstieg. Allerdings lag der Spitzenwert der CO-Konzentration auf demselben Niveau wie bei Versuch HDSC135B2. Wenn man davon ausgeht, dass beim Löscheinsatz von Wassernebel bei Holzkrippen ein vergleichbares CO / CO_2 -Verhältnis zu erwarten ist, so wird dies durch die Messwerte allerdings nicht bestätigt.

Aus einem Messwert von maximal 400 ppm CO ergibt sich keine nennenswerte Gefährdung bei Kurzzeitexposition.

Die relativ geringe Streubreite der Auslösezeiten der Rauchmelder wird auf das durch das geschlossene Fenster bei ebenfalls geschlossener Tür verursachte gleichmäßige Strömungsbild der Rauchströmung bzw. Rauchsichtbildung im Brandraum hervorgerufen. Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.4. HDSC135B4

- Tür: auf, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 2

Bei diesem Versuch waren die Tür geöffnet und das Fenster gekippt, also die Luftverbindung mit dem Luftraum außerhalb des Brandraumes hergestellt.

Die sonstigen Parameter entsprechen dem unter 4.3 beschriebenen Versuch HDSC135B3.

Die **Bilder 7.1 bis 7.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 7.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch wird keine Löschwassermenge und Löszeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 7.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von ca. 11 min wurden 143 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Das Auslöseverhalten der Rauchmelder streute noch weniger als bei Versuch HDSC135B3. Die Auslösezeiten liegen tendenziell niedriger, ohne dass sich ein Grund hierfür aus dem Vergleich der in Bild 6.5 (Versuch HDSC135B3) und Bild 7.4 (Versuch HDSC135B4) wiedergegebenen Temperaturkurven finden lässt.

Auch aus den bei Auslösung festgestellten Temperaturen lässt sich keine unmittelbare Begründung für dieses Verhalten finden.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 115°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Die Werte der Rauchmelder liegen jedenfalls enger beieinander als die Auslösewerte für die Indikatorsprinkler, welche stärker streuen.

Der Zeitverzug, mit dem der Indikatorsprinkler ISP_{VR} nach dem daneben befindlichen Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) ansprach, betrug 12 s.

Die Schadstoffkonzentrationen sind auf ähnlicher Höhe wie beim Versuch HDSC135B3.

Eine mögliche Begründung hierfür ist dadurch gegeben, dass die von der Wassernebelanlage erzeugten, nach unten gerichteten Wassertropfen den Rauch aus der deckennahen Schicht einsaugen und damit der Messstelle in Brandraummitte, 1,5 m oberhalb des Brandraumbodens, zuführen, woraus sich Konzentrationen in ähnlicher Größenordnung ableiten lassen. Diese liegen also auf ähnlichem Niveau, so dass auch im Hinblick auf eine mögliche Personengefährdung dieselben Schlussfolgerungen zu ziehen sind, also keine nennenswerte Gefährdung bei Kurzzeitexposition.

4.5. HDSC135B5

- Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Rauchmelder RM_{ZEN}, Brandlast Nr. 2

Der hier durchgeführte Versuch ist bezüglich der eingestellten Parameter mit dem unter 4.3 aufgeführten Versuch HDSC135B3 zu vergleichen. Die wesentliche Abweichung besteht jedoch darin, dass die Löschanlage als Folge der Brandmeldung durch den zentral unter der Brandraumdecke montierten Rauchmelder ausgelöst wurde.

Die **Bilder 8.1 und 8.2** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 8.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch wird keine Löschwassermenge und Löschzeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 8.3** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 15 min 9 s wurden 197 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Vergleicht man den in den **Bildern 6.5** (Versuch HDSC135B3) und **8.3** (Versuch HDSC135B5) wiedergegebenen Temperaturverlauf direkt oberhalb der Brandlast, so wird deutlich, dass die Brandentwicklung bei Versuch HDSC135B5 langsamer als bei Versuch HDSC135B3 verlief. Das erklärt das spätere Auslöseverhalten von RM_{VR} direkt oberhalb der Brandlast (HDSC135B5: 2 min 58 s, HDSC135B3: 2 min 6 s), nicht jedoch die fast gleiche Auslösezeit der Rauchmelder RM_{ZEN} bei beiden Versuchen, und die bei Auslösung der Rauchmelder typisch niedrigere Temperatur bei Versuch HDSC135B5 bei sonst gleicher Brandlast. Hierbei ist nicht außer Acht gelassen, dass Auslösezeitpunkt, Rauchtemperatur bei Auslösung des Rauchmelders und Rauchdichte nicht unmittelbar korreliert sind.

Bei identischer Brandlast und damit erwarteter Korrelation zwischen Rauchtemperatur und Rauchdichte bei gleichen Verbrennungsbedingungen legt dieses den Schluss nahe, dass die Rauchmelder (gleiches Fabrikat und Modell vorausgesetzt) zur Streuung des Auslösezeitpunktes nicht unerheblich beitragen.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 70°C an der Decke über der Brandlast erreicht.

Der geringere CO_2 -Wert bei Versuch HDSC135B5 (4.100 ppm) im Vergleich zu Versuch HDSC135B3 (10.900 ppm) kann damit zusammenhängen, dass bei Versuch HDSC135B5 bereits nach 3 min 16 s, bei Versuch HDSC135B3 erst nach 6 min 44 s mit dem Löscheintritt begonnen wurde und somit im geschlossenen Raum beim Versuch HDSC135B3 durch längere Vorbrenndauer eine höhere CO_2 -Konzentration vorhanden war. Dies erklärt sich auch aus entsprechend unterschiedlichen O_2 -Konzentrationen. Die O_2 -Konzentration ist bei Versuch HDSC135B5 höher (20,5 Vol.-%) als bei Versuch HDSC135B3 (19,4 Vol.-%). Allerdings findet sich keine unmittelbare Erklärung dafür, dass der CO -Wert auf demselben Niveau ist.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.6. HDSC135B6

- Tür: zu, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Rauchmelder RM_{ZEN}, Brandlast Nr. 2

Der hier durchgeführte Versuch ist bezüglich der eingestellten Parameter mit dem unter 4.5 aufgeführten Versuch HDSC135B5 zu vergleichen. Auch bei diesem Versuch wurde die Löschanlage als Folge der Brandmeldung durch den zentral unter der Brandraumdecke montierten Rauchmelder ausgelöst. Der Unterschied zu Versuch HDSC135B5 bestand darin, dass bei diesem Versuch das Fenster gekippt war.

Die **Bilder 9.1 bis 9.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 9.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löschzeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wasserdampf nicht gelöscht werden konnte.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 9.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 14 min 50 s wurden 193 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Bei diesem Versuch waren die Auslösezeiten und Temperaturen unmittelbar neben den Rauchmeldern etwas geringer als bei Versuch HDSC135B5, ausgenommen beim Rauchmelder RM_{ZEN}, der für die Auslösung der Löschanlage herangezogen wurde. Dies ergab auch eine etwas höhere Temperatur am Rauchmelder aufgrund der späteren Auslösung der Löschanlage.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 70°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Der maximale CO₂-Wert war bei gekipptem Fenster (HDSC135B6) niedriger als bei geschlossenem Fenster (Versuch HDSC135B5). Der Unterschied dürfte aus dem Luftwechsel über das gekippte Fenster resultieren. Die beiden anderen Gaskomponenten Sauerstoff und Kohlenmonoxid waren bei beiden Versuchen gleich. Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.7. HDSC135B7

- Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 3

Bei diesem und den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurde die größere Brandlast Nr. 3 gewählt.

Bezüglich der Ventilationsbedingungen „Tür: zu, Fenster: zu“ ist dieser Versuch mit Versuch HDSC135B3 (Brandlast Nr. 2, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Indikatorsprinkler ISP_{ZEN}) und Versuch HDSC135B5 (Brandlast Nr. 2, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Rauchmelder RM_{ZEN}) vergleichbar.

Die **Bilder 10.1 bis 10.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 10.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch wird keine Löschwassermenge und Löschzeit bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Die weitere Brandausbreitung auf die seitlich neben der Holzkrippe liegenden Kissen wurde durch den Wassernebel reduziert.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 10.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 14 min 37 s wurden 190 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Bei Versuch HDSC135B7 ergeben sich trotz der größeren Brandlast Nr. 3 gegenüber dem ebenfalls bei geschlossener Tür und geschlossenem Fenster durchgeführten Versuchen HDSC135B3 und HDSC135B5 größere Zeiten beim Ansprechen der Rauchmelder bzw. Indikatorsprinkler.

Der Temperaturanstieg an der Decke über der Brandlast ist bei Versuch HDSC135B7 langsamer als bei den beiden anderen Versuchen.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 60°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Ein Grund für die spätere Auslösung sämtlicher im Raum verteilten Rauchmelder könnte eine Verschmutzung der Rauchmelder aufgrund vorheriger Versuche sein, da jeweils nur die beim Brand zerstörten Rauchmelder bzw. die Rauchmelder ausgetauscht wurden (überwiegend Rauchmelder direkt über der Brandlast), die nach Betätigung der Prüftaste nicht mehr reagierten.

Bei diesem Versuch löste der Indikatorsprinkler ISP_{VR} 27 s vor dem Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) aus. Da bei jedem Versuch der Rauchmelder oberhalb der Brandlast aufgrund der Wärmeeinwirkung ausgetauscht werden mußte, ist die langsamere Auslösung beim Rauchmelder entgegen der Erwartungen nicht unmittelbar erklärbar.

Aus dem Vergleich der Temperaturen im Bereich der Brandlast und an der Decke zu Beginn des Versuches ergeben sich bei Versuch HDSC135B3 eine um ca. 2°, bei Versuch HDSC135B5 um ca. 3°C, und bei Versuch HDSC135B7 ebenfalls um ca. 3° höhere Tem-

peratur an der Decke. Hierdurch ergeben sich keine gravierenden Einflüsse bezüglich der Strömung des noch relativ kalten Rauchs in der frühen Brandentwicklungsphase an die Decke und des Einflusses einer wärmeren Deckenzone.

Es können daher nur sehr bedingt Rückschlüsse bezüglich der verzögerten Auslösezeit der Rauchmelder im Gegensatz zu den in [5] durchgeführten Versuchen im erheblich höheren Holztreppenraum gezogen werden. Bei den Versuchen im Holztreppenraum ergaben sich beträchtliche Verzögerungen (Auslösezeiten im Bereich zwischen 44 s und 2 min 17 s) bei der Auslösung aufgrund einer höheren Temperatur an der Treppenraumdecke (Temperaturschichtung aufgrund der Erwärmung durch die Beleuchtung und Aufsteigen der wärmeren Luft im Treppenraum), wie **Bild 10.5** zu entnehmen ist.

Aufgrund der späteren Auslösung durch den Indikatorsprinkler bei Versuch HDSC135B7 (6 min 52 s) gegenüber HDSC135B5 (Rauchmelder, 3 min 16 s) ergeben sich eine niedrigere Sauerstoff-Konzentration und höhere Werte für die maximale Konzentration von CO₂ und CO bei Versuch HDSC135B7.

Die gegenüber Versuch HDSC135B7 bei Versuch HDSC135B3 ermittelte niedrigere O₂-Konzentration und höhere CO₂-Konzentration ist trotz der schnelleren Auslösung der Löschanlage (6 min 44 s bei Versuch HDSC135B3) nicht unmittelbar erklärbar.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten allerdings die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.8. HDSC135B8

- Tür: zu, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 3

Bezüglich der Ventilationsbedingungen „Tür: zu, Fenster: gekippt“ ist dieser Versuch mit Versuch HDSC135B6 (Brandlast Nr. 2, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Rauchmelder RM_{ZEN}) vergleichbar, weist allerdings die größere Brandlast Nr. 3 auf.

Die **Bilder 11.1 bis 11.3** zeigen die eingesetzte Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 11.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Bei diesem Versuch ergab sich zwischen den beiden Rauchmeldern VL und HR der größte Unterschied in der Auslösezeit von 3 min 26 s. Der Grund hierfür dürften Asymmetrien der Auftriebsströmung im Raum aufgrund der Ventilationsverhältnisse sein.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löszeit angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Die weitere Brandausbreitung auf die seitlich neben der Holzkrippe liegenden Kissen wurde durch den Wassernebel reduziert.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 11.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 13 min wurden 169 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Trotz der größeren Brandlast weist Versuch HDSC135B8 größere Zeiten bis zum Ansprechen der Rauchmelder VL, VR und ZEN auf als bei Versuch HDSC135B6.

Ebenfalls ist das Temperaturniveau an den Rauchmeldern beim Ansprechen höher als bei Versuch HDSC135B6.

Bei diesem Versuch löste der Indikatorsprinkler ISP_{VR} ebenfalls vor dem Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) aus. Der zeitliche Verzug betrug 11 s.

Da bei jedem Versuch der Rauchmelder oberhalb der Brandlast aufgrund der Wärmeeinwirkung ausgetauscht werden musste und Rauchmelder bei dieser Versuchsreihe erwartungsgemäß vor den Sprinklern auslösen sollten, ist die langsamere Auslösung beim Rauchmelder nicht erklärbar.

Der Temperaturanstieg an der Decke über der Brandlast ist bei Versuch HDSC135B8 wesentlich langsamer als bei Versuch HDSC135B6.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 55°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Durch das spätere Auslösen der Löschanlage und die größere Brandlast bei Versuch HDSC135B8 sind die Maximalwerte der CO₂- und CO-Konzentration zum einen höher, zum anderen treten sie früher auf als bei Versuch HDSC135B6.

Die minimale O₂-Konzentration ist allerdings bei Versuch HDSC135B8 etwas niedriger als bei HDSC135B6. Dies könnte daran liegen, dass aufgrund der größeren Wärmefreisetzung

mehr Wasser verdampft und dadurch die Sauerstoffverdrängung (Inertisierungseffekt) größer ist.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.9. HDSC135B9

- Tür: zu, Fenster: auf – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 3

Bezüglich der Ventilationsbedingungen „Tür: zu, Fenster: auf“ ist dieser Versuch mit Versuch HDSC135B2 (Brandlast Nr. 2, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Rauchmelder RM_{ZEN}) vergleichbar, weist allerdings die größere Brandlast Nr. 3 auf.

Die **Bilder 12.1 bis 12.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf/ Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 12.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löschzeit angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Die weitere Brandausbreitung auf den seitlich neben der Holzkrippe liegenden Kissen wurde durch den Wasserdampf reduziert.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 12.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 12 min wurden 156 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Im Gegensatz zu Versuch HDSC135B2 (manuelle Auslösung der Löschanlage nach 8 min 58 s) löste der Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} aufgrund der größeren Wärmefreisetzung bei diesem Versuch aus, aber allerdings erst nach 8 min 41 s.

Der Temperaturanstieg an der Decke über der Brandlast ist bei Versuch HDSC135B9 jedoch wesentlich langsamer als bei Versuch HDSC135B2, allgemein im Vergleich zu anderen Versuchen extrem langsam.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 50°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Bei diesem Versuch löste der Indikatorsprinkler ISP_{VR} ebenfalls vor dem Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) aus. Der zeitliche Verzug betrug allerdings nur 1 s.

Da bei jedem Versuch der Rauchmelder oberhalb der Brandlast aufgrund der Wärmeeinwirkung ausgetauscht werden musste und Rauchmelder bei dieser Versuchsreihe erwartungsgemäß vor den Sprinklern auslösen sollten, ist die langsamere Auslösung beim Rauchmelder nicht erklärbar.

Die Ansprechzeiten der Rauchmelder sind bei Versuch HDSC135B9 generell größer als bei Versuch HDSC135B2, trotz der größeren Brandlast.

Die maximale CO₂-Konzentration ist um mehr als das 3-fache höher als bei Versuch HDSC135B2. Der CO-Wert ist geringfügig höher, die O₂-Konzentration entsprechend niedriger als bei Versuch HDSC135B2.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

Beim Vergleich des Versuchs HDSC135B9 mit dem Vorversuch Br3V1 (beide Versuche mit identischer Fensteröffnung von 1 m²) ergeben sich bei Versuch HDSC135B9 über 2 min längere Ansprechzeiten der Rauchmelder, die Ansprechzeiten der Indikatorsprinkler sind hingegen bei Versuch HDSC135B9 etwas kürzer.

Allerdings lösten die Indikatorsprinkler an den Positionen VL und HL bei Versuch HDSC135B9 im Gegensatz zu Versuch Br3V1 nicht aus. Ein Grund hierfür könnte der Löscheinsatz bei Versuch HDSC135B9 sein, der die Auslösung dieser Indikatorsprinkler verhinderte.

4.10. HDSC135B10

- Tür: auf, Fenster: auf – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN}, Brandlast Nr. 3

Bei diesem Versuch waren sowohl die Tür als auch das Fenster vollständig geöffnet.

Die **Bilder 13.1 bis 13.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 13.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Kon-

zentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löschzeit angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Die weitere Brandausbreitung auf die seitlich neben der Holzkrippe liegenden Kissen wurde durch den Wassernebel reduziert.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 13.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 11 min 43 s wurden 152 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 13 l/min).

Aufgrund der vollständig geöffneten Tür und des vollständig geöffneten Fensters ergaben sich bei diesem Versuch die längsten Ansprechzeiten für Rauchmelder und Indikatorsprinkler.

Der Temperaturanstieg an der Decke über der Brandlast ist bei Versuch HDSC135B10 im Vergleich zu anderen Versuchen extrem langsam.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 50°C (TB7) an der Decke über der Brandlast erreicht.

Die Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid liegen im mittleren Bereich aller durchgeführten Versuche.

Der Indikatorsprinkler ISP_{VR} sprach nach dem daneben positionierten Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) mit 1 min 51 s Zeitverzug an.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.11. HDSC80B1

- Tür: zu, Fenster: zu – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 3

Bei diesem Versuch wurde gegenüber den vorherigen Versuchen der Druck auf 80 bar abgesenkt.

Bezüglich der Ventilationsbedingungen „Tür: zu, Fenster: zu“ ist dieser Versuch mit Versuch HDSC135B3 (Brandlast Nr. 2, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Indikatorsprinkler ISP_{ZEN}) und mit Versuch HDSC135B7 (Brandlast Nr. 3, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Indikatorsprinkler ISP_{ZEN}) vergleichbar.

Die **Bilder 14.1 bis 14.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 14.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Bei diesem Versuch ergab sich bei den beiden Indikatorsprinklern VR und ZEN der größte Unterschied in der Auslösezeit von 5 min 33 s. Der Grund hierfür dürften Asymmetrien der Auftriebsströmung im Raum aufgrund der Ventilationsverhältnisse sein.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löschzeit angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Die weitere Brandausbreitung auf die seitlich neben der Holzkrippe liegenden Kissen wurde durch den Wassernebel reduziert.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 14.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 9 min 25 s wurden 94 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 10 l/min).

Versuch HDSC80B1 weist allerdings wesentlich kürzere Auslösezeiten der Rauchmelder insbesondere gegenüber Versuch HDSC135B7 auf.

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 100°C an der Decke über der Brandlast erreicht.

Der maximale CO₂-Wert ist allerdings mit 12.800 ppm der höchste aller durchgeführten Versuche.

Die minimale O₂-Konzentration liegt mit 19,6 Vol.-% zusammen mit Versuch HDSC135B3 (19,4 Vol.-%) im untersten Bereich.

Man erkennt aber hieraus, dass Wassernebel nicht dieselbe Wirkung wie Inertgase haben kann. Bei Inertgasen erfolgt eine Sauerstoffreduzierung auf unter 15 Vol.-% und führt dann bei den meisten brennbaren Stoffen zum Abbruch der Flammenreaktion bzw. bei gasförmigen, flüssigen und flüssig werdenden Brandstoffen ohne Sauerstoff in der Molekularstruktur zum völligen Erlöschen des Brandes. Nach VdS 3527 [16] liegen die Entzündungsgrenzen

für z.B.

- Kunststoffe bei ca. 16,0 Vol.-% Sauerstoff,
- Fichtenholz (Palettenholz unbehandelt) bei 17,0 Vol.-% Sauerstoff
- Wellpappe bei 15,0 Vol.-% Sauerstoff
- Papier bei 14,1 Vol.-% Sauerstoff
- Methanol bei 11,0 Vol.-% Sauerstoff

Der Indikatorsprinkler ISP_{VR} sprach nach dem daneben positionierten Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) mit 1 min 5 s Zeirverzug an.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

4.12. HDSC80B2

– Tür: zu, Fenster: gekippt – Zündung Brandlast VR

Auslösung der Löschanlage nach Indikatorsprinkler ISP_{ZEN} , Brandlast Nr. 3

Diese Versuch wurde ebenfalls bei 80 bar gefahren.

Bezüglich der Ventilationsbedingungen „Tür: zu, Fenster: gekippt“ ist dieser Versuch mit Versuch HDSC135B6 (Brandlast Nr. 2, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Rauchmelder RM_{ZEN}) und Versuch HDSC135B8 (Brandlast Nr. 3, Auslösung der Löschanlage bei Ansprechen von Indikatorsprinkler ISP_{ZEN}) vergleichbar.

Die **Bilder 15.1 bis 15.3** zeigen die verwendete Brandlast sowie anhand von Videoprints die Brandentwicklung und die Veränderung der Sichtverhältnisse aufgrund des Brandrauches, des Sprühnebels und des Wasserdampfes vor, während und nach dem Löschvorgang.

Die Videoprints veranschaulichen die beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol während des Löschvorganges und nach dessen Beendigung.

Bild 15.4 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen an der Brandraumdecke an den Rauchmeldern bzw. Indikatorsprinklern, des Löschwasservolumenstromes sowie der Konzentration von Sauerstoff, Kohlendioxid sowie Kohlenmonoxid.

Weiterhin gibt dieses Bild sowie **Tabelle 2** Auskunft über die Auslösezeitpunkte der Rauchmelder und Indikatorsprinkler sowie den Minimalwert der Sauerstoffkonzentration und die Maximalwerte der Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidkonzentration.

Bei diesem Versuch ergab sich zwischen den beiden Indikatorsprinklern VR und ZEN der größte Unterschied in der Auslösezeit von 5 min 33 s. Der Grund hierfür dürften Asymmetrien der Auftriebsströmung aufgrund der Ventilationsverhältnisse sein.

Für den Versuch werden keine Löschwassermenge und keine Löszeit angegeben, da die Holzkrippe durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden konnte.

Die weitere Brandausbreitung auf die seitlich neben der Holzkrippe liegenden Kissen wurde durch den Wasserdampf reduziert.

Der zeitliche Verlauf des Löscheinsatzes kann dem Diagramm in **Bild 15.4** entnommen werden.

Die Löschanlage wurde solange betrieben, bis ein konstantes Temperaturniveau ohne Wiederanstieg der Temperaturen an der Decke im Brandraum erreicht wurde.

Während dieser Zeit von 9 min 8 s wurden 91 l Wasser verbraucht (Volumenstrom: 10 l/min).

Nach 3 min wird eine Temperatur von ca. 100°C an der Decke über der Brandlast erreicht.

Versuch HDSC80B2 weist kürzere Ansprechzeiten der Rauchmelder als Versuch HDSC135B6 und Versuch HDSC135B8 auf.

Der maximale CO₂-Wert ist mit 11.100 ppm der zweithöchste aller durchgeführten Versuche.

Aufgrund des gekippten Fensters ist der O₂-Gehalt etwas höher als bei Versuch HDSC80B2.

Der Indikatorsprinkler ISP_{VR} sprach nach dem daneben positionierten Rauchmelder RM_{VR} (beide unmittelbar oberhalb der Brandlast) mit 1 min 8 s Zeitverzug an.

Bzgl. der geringen Personengefährdung bei Kurzzeitexposition gelten die gleichen (positiven) Aussagen wie bei Versuch HDSC135B1.

5. VERGLEICH DER LÖSCHWIRKUNG VON NIEDER- UND HOCHDRUCK-WASSERNEBEL

Beim Vergleich der im Holztreppenraum der Forschungsstelle für Brandschutztechnik durchgeführten Brandversuche mit Niederdruck- und mit Hochdruck-Wassernebel (Kunkelmann [6]) wurde festgestellt, dass der Löschwasserbedarf beim Niederdruck-Wassernebel (Kaltsprühbilder von Niederdruck-Wassernebel siehe **Bild 16**) um ca. 20 % über dem von Hochdruck-Wassernebel bei gleichem Löschwasservolumenstrom liegt.

Der bei den Versuchen im Holztreppenraum verwendete Hochdruck-Wassernebelsprühkopf wurde auch bei den hier beschriebenen Versuchen im 25 m² - Brandraum verwendet. Als Brandlast wurde hier eine Holzkrippe aus relativ kleinen Kanthölzern (20 mm * 20 mm * 260 mm) mit großer spezifischer Oberfläche verwendet, bei der sehr schnell ein tiefsitzender Glutbrand entsteht.

Bei den Versuchen im Holztreppenraum hingegen wurde die Brandlast u.a. in Form eines Stapelbehälters aus Polypropylen mit Ergänzung durch Babywindeln neben dem Holzgeländer (u.a. Dachlatten mit Querschnitt 24 mm * 48 mm) aufgestellt. Hier war der Glutbrand bei Auslösung der Löschanlage noch nicht so ausgeprägt.

Ein Vergleich der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche mit Hochdruck-Wassernebel im Brandraum mit früher im gleichen Brandraum durchgeführten Brandversuchen mit Niederdruck-Wassernebel (**Bilder 17.1 bis 17.6** aus Kunkelmann [7]) zeigt jedoch, dass der Brand der Holzkrippe mit Niederdruck-Wassernebel gelöscht werden konnte und die Hölzer der Krippe im Wesentlichen nur an der Oberfläche angebrannt waren. (Das Auslösekriterium bei diesen Versuchen war nicht das Ansprechen eines Rauchmelders oder Indikatorsprinklers, sondern eine Temperatur von 200°C an der Oberkante der Fensteröffnung).

Aus **Bild 17.5** ist zu entnehmen, dass bei der bei den Versuchen mit Niederdruck-Wassernebel verwendeten Brandlast (siehe **Bild 17.1**) der zentral an der Decke angebrachte Rauchmelder bei einer Temperatur von 34°C ansprach. Die Wärmefreisetzung (Brutto) betrug hierbei ca. 20 kW. Der 3 mm-Indikatorsprinkler löste bei einer Deckentemperatur von 135°C und einer Wärmefreisetzung (Brutto) von ca. 300 kW aus.

Das positive Ergebnis ist zum einen mit großer Wahrscheinlichkeit auf die größeren Tropfen beim Niederdruck-Wassernebel, allerdings aber auch auf die wesentlich größere versprühte Löschwassermenge bis zum vollständigen Löschen des Brandes von 62 l/min (4,1 bar) bzw. 87 l/min (8,4 bar) beim Niederdruck-Wassernebel gegenüber 10 l/min bzw. 13 l/min beim Hochdruck-Wassernebel zurückzuführen. Bei diesen Versuchen mit Niederdruck-Wassernebel betrug die Löschzeit bei 62 l/min 4 min (Gesamtlöschwassermenge: 248 l) bzw. bei 87 l/min 3 min 18 s (Gesamtlöschwassermenge: 287 l).

Wie Krüger und Radusch [12] in ihren Untersuchungen zur Wasserzerstäubung im Stahlrohr gezeigt haben, gibt es Unterschiede bzgl. des Löschverhaltens bei brennbaren Flüssigkeiten mit Sprühnebeln unterschiedlicher Tropfengrößen.

Nach diesen Untersuchungen werden Brände von niedersiedenden Flüssigkeiten wie z. B. Autobenzin und Alkohol am günstigsten mit kleinen Tropfen (hier: Tropfendurchmesser $\approx 0,28$ mm) und hochsiedende Flüssigkeiten wie z.B. Dieselöl und Trafoöl am besten mit größeren Tropfen (hier: Tropfendurchmesser $\approx 0,49$ mm) bekämpft.

Nach Krüger und Radusch [12] können brennbare Flüssigkeiten mit einer Siedetemperatur $< 80^{\circ}\text{C}$ bei Anwendung zerstäubten Wassers in wirksamer Weise nur durch Flammenlöschung und nicht durch Flüssigkeitskühlung gelöscht werden, da die Wassertropfen beim Durchschlagen der Flammen eine Temperatur bis zu 80°C annehmen. Die Flammenlöschung gestaltet sich umso wirksamer, je größer die Wasserdampfbildung in den Flammen infolge feinerer Tröpfchen bzw. größerer Tropfenzahl in der Raumeinheit des Wasserstaubstrahles wird. Dabei gilt die Voraussetzung, dass das zerstäubte Wasser den Auftrieb des Feuers überwinden kann.

Brennbare Flüssigkeiten mit einer Siedetemperatur $> 80^{\circ}\text{C}$ können bei Anwendung zerstäubten Wassers ebenfalls durch Flammenlöschung, sodann aber auch durch Flüssigkeitskühlung gelöscht werden. Zur Flüssigkeitskühlung sind größere Tropfen zur Flammenlöschung wirksamer, da sie besser durch die Flammen hindurch zur Flüssigkeitsoberfläche durchschlagen. Je höher die Siedetemperatur der brennbaren Flüssigkeit, desto besser der Kühleffekt. Flüssigkeitskühlung ist nur solange möglich, wie die Flüssigkeitstemperatur in tieferen Schichten unter 100°C liegt.

In löschtechnischer Hinsicht bilden die hochsiedenden brennbaren Flüssigkeiten den Übergang zu den festen Brennstoffen.

Bei Bränden wirken also kleine Tropfen hauptsächlich durch Flammenlöschung und größere Tropfen schlagen in größerem Umfang durch die Flammenzone hindurch und wirken so durch Kühlung des brennenden Materials. Bei niedersiedenden Flüssigkeiten entfällt bei Eindringen der Tropfen die Kühlung, da keine wesentliche Temperaturdifferenz mehr zwischen Tropfen und Flüssigkeit besteht. Bei Bränden mit starkem Auftrieb wird das Hindurchschlagen durch die Flammenzone bei kleinen Tropfen verhindert und darüber hinaus durch den Auftrieb die Flammenlöschung eingeschränkt. Große Tropfen können mit ihrer größeren kinetischen Energie jedoch noch durch die Flammen hindurch in die Flüssigkeit eindringen, so dass beide Löscheffekte möglich sind. Liegt starker Auftrieb vor und siedet die Flüssigkeit bei hohen Temperaturen, so löschen größere Tropfen besser als kleinere. Die beim Abbrand von Transformatoren- und Dieselöl (hoher Siedebereich) gemessenen Temperaturen liegen 6,5 cm über der Behälteroberkante in der Tat höher als bei Benzin, Benzol, Alkohol und Petroleum, so dass entsprechend bei ersterem der Auftrieb größer sein muss. Die aufgestellte Theorie wird somit durch den Versuch bestätigt.

Nach Krüger und Radusch [12] lässt sich bei Drücken bis 10 bar und strömungstechnisch günstigen Düsen eine für die Brandbekämpfung ausreichende Zerstäubung erreichen.

Nach Untersuchungen von Mawhinney [13] des National Research Council Canada (NRCC) ist die Brandbekämpfung mit sehr feinen Tropfen, wie bei Hochdruck-Wassernebel in Schaltschränken, Doppelböden mit elektrischen Kabeln und Kabelpraitschen, nur bedingt möglich. Eine Brandbekämpfung mit Niederdruck-Wassernebel hat hier, aufgrund der größeren Tropfen, eine bessere Löschwirkung. Als optimale Tropfengröße (volumetrischer Tropfendurchmesser $D_{v0,9}$) wird der Bereich von $200 < D_{v0,9} < 400 \mu\text{m}$ angesehen.

Arvidson [14] hat Brand- und Löschversuche im Realmaßstab zur Simulation des Brandes eines LKW-Trailers auf einem Ro-Ro Transportschiff (Roll on Roll off) durchgeführt. Als Löschanlage wurde sowohl eine gewöhnliche Sprühwasserlöschanlage mit verschiedenen Düsen mit unterschiedlichen K-Faktoren und folgenden Betriebsdrücken und Wasserbeaufschlagungen

- 1,2 bar, 5 mm/min
- 1,9 bar, 15 mm/min
- 1,4 bar, 10 mm/min
- 4,9 bar, 10 mm/min

als auch ein Hochdruck-Wassernebellöschsystem mit einem Betriebsdruck von 84 bar und 100 bar sowie Wasserbeaufschlagungen von 3,75 mm/min, 4,6 mm/min und 5,8 mm/min verwendet.

Als Brandlast wurde die „EUR Std Plastic commodity“-Brandlast aus Standard-Euro-Holzpaletten mit Kartons und leeren Polystyrol-Tassen verwendet. Die Versuche wurden mit und ohne Dach über der Brandlast durchgeführt.

In Abhängigkeit vom Aufbau der Lagerstapel und der Anzahl an Paletten ergaben sich maximale Wärmefreisetzungen von ca. 9 MW (Aufbau mit 2 Reihen) und 25 MW (Aufbau mit 6 Reihen). Die Löschsysteeme wurden jeweils bei einer Wärmefreisetzung von ca. 5 MW manuell ausgelöst.

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass für die Brandbekämpfung eine Wasserbeaufschlagung von mindestens 10 mm/min erforderlich ist, während eine Wasserbeaufschlagung von 5 mm/min den Brand nur kontrolliert. Bei einer Wasserbeaufschlagung von 15 mm/min wurde der Brand unmittelbar unterdrückt.

Für eine effektive Brandbekämpfung ist es erforderlich, dass die Tropfen die Flammenzone durchdringen und die brennende Oberfläche erreichen.

Nach Auslösung der Hochdruck-Wassernebellöschanlage ergab sich im Gegensatz zur Niederdruckanlage keine Verminderung der Wärmefreisetzung. Die Gesamtwärmefreisetzung erhöhte sich während der Brandbekämpfung im Brandversuch ohne Dach über der Brandlast mit Hochdruck-Wassernebel von 5 MW (Auslösung) auf ca. 15 MW.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass ein Hochdruck-Wassernebelsystem höhere Durchflussraten im Vergleich zu gewöhnlichen Sprühwassersystemen für die Brandkontrolle benötigt.

Arvidson [14] kommt weiterhin zu der Aussage, dass die hier gewonnen Versuchsergebnisse auch auf Fahrzeugtunnel angewendet werden können.

Ein Vergleich der hier durchgeführten Untersuchungen und sonstigen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik dokumentierten nationalen und internationalen Untersuchungen legt den Schluss nahe, dass Niederdruck-Wassernebel Vorteile in der Brandbekämpfung gegenüber Hochdruck-Wassernebel sowohl bei flüssigen als auch bei festen Brandstoffen aufweist.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

In den vorliegenden Untersuchungen wurden mit kleinen Modellbrandlasten die Verhältnisse bei einem Entstehungsbrand im 25 m² - Brandraum der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bei anschließendem Löscheinsatz mit ortsfester Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage sowie das Ansprechverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und von thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen (Tür: zu / auf, Fenster: zu / auf / gekippt) untersucht.

In den Versuchen wurden der zeitliche Verlauf der Abbrandrate (=> Wärmefreisetzung), diverse Temperaturen, der Löschwasservolumenstrom und Druck sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Konzentration messtechnisch erfasst.

Bei den im Realmaßstab durchgeführten Versuchen mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m² - Brandraum konnte folgendes festgestellt werden:

- Aufgrund der relativ kleinen Modellbrandlasten ist die Wärmefreisetzungs- und Brandrauchentwicklung geringer als bei größeren Bränden. Dies führt dazu, dass Indikatorsprinkler und Rauchmelder erst nach relativ langer Zeit auslösen. Insbesondere hat die Temperaturentwicklung im Brandraum einen entscheidenden Einfluss auf das Auslöseverhalten der thermischen Glasfass-Auslöseelemente.

- Der Einfluss von Art, Aufbau und Position der Brandlast auf die Brand- und Brandrauchentwicklung ist ebenfalls nicht vernachlässigbar. Insbesondere erweist sich die offene Holzkrippe, zum einen wegen des glutbildenden Brandstoffes, zum anderen wegen des Aufbaus mit spezifisch großer Oberfläche als besonders kritisches Brandobjekt im Hinblick auf die Wärmefreisetzung und Brandrauchentwicklung. Bei verzögerter Auslösung einer Löschanlage, was insbesondere beim Einsatz von thermischen Glasfass-Auslöseelementen vorkommen kann, ist die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung eines tiefsitzenden Glutbrandes relativ groß.
- Bei den Versuchen ergab sich eine zum Teil sehr deutliche asymmetrische Temperaturverteilung unter der Raumdecke, und dies bereits ohne Windeinfluss auf die Öffnung. Diese Verteilung ist nur bedingt durch die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen aufgrund der unterschiedlichen Öffnungszustände von Tür und Fenster erklärbar. Auch die Brandlastgröße sagt bei den durchgeführten Versuchen nicht unbedingt etwas über die Geschwindigkeit der Temperaturentwicklung aus.
- Die fotoelektronischen Rauchmelder lösten in einem Temperaturbereich an der Decke im Mittel zwischen 40 bis 60°C aus. Die Indikatorsprinkler (3 mm Glasfass, Nennauslösetemperatur: 68 °C, mittlerer RTI-Wert: ca. 50 m^{1/2} s^{1/2}) lösten in einem Temperaturbereich im Mittel zwischen 80°C bis 100°C aus.
- Bei Ansprechen der Indikatorsprinkler wurden im Gegensatz zu den Rauchmeldern die von Glasherstellern angegebenen Werte für die maximal zulässige Einsatztemperatur von 60°C (kurzzeitig 80°C) von Normalglasverglasungen (Floatglas, Verbundsicherheitsglas) überschritten. Es besteht daher keine Gefahr für Normalverglasungen etwa im Bereich des Oberlichts von Wohnungseingangstüren bei Gebäuden aus dem Bestand, falls die Löschanlage bereits zum Zeitpunkt der Rauchmelder ausgelöst wird. Allerdings ist hierbei auch die Position der Brandlast entscheidend, und zwar ob die Brandlast direkt vor einer Verglasung gezündet wurde und die Verglasung direkt aufheizt oder weiter entfernt im Raum brennt.

- Einen entscheidenden Einfluss auf die Auslösung von Rauchmeldern und von thermischen Glasfass-Auslöseelementen haben die Ventilationsbedingungen (offene Türen und Fenster, Lüftungsanlagen, Windeinfluss mit kalter Luft im Winter und warmer Luft im Sommer etc.), die z.B. dazu führen können, dass Brandrauch- und Thermikströmungen abgelenkt werden und im Extremfall eine Auslösung der Elemente verhindern.
- Ursachen für die Fehlauflösungen, z.B. durch Zerstörung von Glasfass-Auslöseelementen, durch Verschmutzung von Rauchmeldern (Staub, Aerosole, Insektenlarven) und durch den Einfluss von Überspannungseinflüssen, Induktionen und indirekten Blitzeinwirkungen wurden in dieser Arbeit nicht untersucht.
- Weiterhin ergeben sich unterschiedlich schnelle Brandentwicklungen im Raum, die ebenfalls nur bedingt durch die unterschiedlichen Ventilationsbedingungen aufgrund der unterschiedlichen Öffnungszustände von Tür und Fenster erklärbar sind. Denkbar sind Einflüsse aufgrund von Strömungswiderständen innerhalb von realen oder für Versuche verwendeten Brandlasten. Wie frühere Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik zur Flammenausbreitungsgeschwindigkeit zwischen Lagerstapeln gezeigt haben, haben die Abstände einen zum Teil beträchtlichen Einfluss auf die Brand- und Rauchentwicklung. Ebenfalls haben unterschiedlich hohe Holzkrippen einen Einfluss auf die Brand- und Rauchentwicklung.
- Während des Löscheinsatzes ergibt sich eine beträchtliche Verschlechterung der Sicht im Brandraum durch das Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol. Dies hält noch einige Minuten nach Abstellen der Löschanlage an, wobei die Öffnungszustände von Fenster und Tür nicht verändert wurden.
- Der tiefsitzende Glutbrand der Holzkrippe konnte durch den Hochdruck-Wassernebel nicht gelöscht werden. Die Restglut wurde manuell abgelöscht. Die weitere Brandausbreitung auf die im Umfeld der gezündeten Holzkrippe befindliche Brandlast in Form von Sofakissen wurde jedoch beträchtlich reduziert. Holzkrippen zeichnen sich durch die offene Struktur und die große spezifische Oberfläche aus, die für die Brandbekämpfung mit dem Hochdruck-Wassernebel problematisch ist. Aufgrund der Position der Brandlast nicht direkt unter dem für die Auslösung der Löschanlage zuständigen Indikatorsprinkler oder Rauchmelder ergeben sich in der überwiegenden Anzahl der Versuche (ca. 1,5 m Abstand) Auslöseverzögerungen, von denen allerdings im realen Fall insbesondere

auch bei größeren Räumen immer auszugehen ist. In dieser Zeit brennen dadurch nicht nur die Oberflächen der Krippenhölzer, sondern es hat sich bereits ein tiefsitzender Glutbrand ausgebildet, der durch die sehr feinen Tropfen des Hochdruck-Wassernebels nicht mehr entscheidend bekämpft werden kann. Für die optimale Brandbekämpfung ist es daher ganz entscheidend, dass die Löschanlage automatisch und sehr frühzeitig ausgelöst wird.

- Niederdruck-Wassernebel weist nach ersten Erkenntnissen aufgrund seiner von Hochdruck-Wassernebel abweichenden Sprühcharakteristik Vorteile bei der Bekämpfung von tiefsitzenden Glutbränden auf.
- Die minimale O₂-Konzentration liegt bei den durchgeführten Versuchen bei 19,4 Vol.-% bei geschlossener Tür und geschlossenem Fenster. Man erkennt aber hieraus, dass Wassernebel nicht dieselbe Wirkung wie Inertgase haben kann. Bei Inertgasen erfolgt eine Sauerstoffreduzierung auf unter 15 Vol.-% und führt dann bei den meisten brennbaren Stoffen zum Abbruch der Flammenreaktion bzw. bei gasförmigen, flüssigen und flüssig werdenden Brandstoffen ohne Sauerstoff in der Molekularstruktur zum völligen Erlöschen des Brandes. Nach VdS 3527 [16] liegen die Entzündungsgrenzen für z.B.
 - Kunststoffe bei ca. 16,0 Vol.-% Sauerstoff,
 - Fichtenholz (Palettenholz unbehandelt) bei 17,0 Vol.-% Sauerstoff
 - Wellpappe bei 15,0 Vol.-% Sauerstoff
 - Papier bei 14,1 Vol.-% Sauerstoff
 - Methanol bei 11,0 Vol.-% Sauerstoff
- Die Konzentrationswerte für Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid blieben im Vergleich zu einem nicht frühzeitig bekämpften Brand im unkritischen Bereich. Allerdings treten hier auch Schwankungen selbst bei ähnlichen Versuchen auf, die mit den Ventilationsbedingungen und der Brandlastgröße ohne weiteres nicht erklärbar sind.
- Man erkennt aus den durchgeführten Versuchen mit unterschiedlichen Brandlasten und unterschiedlichen Ventilationsbedingungen, dass selbst bei dem hier verwendeten relativ kleinen Raum große Unterschiede bzgl. des Ansprechverhaltens (Temperatur und Zeit) von Rauchmeldern und thermischen Glasfassauslöseelementen sowohl innerhalb des Raumes als auch beim Vergleich vermeintlich identischer Versuche auftreten. Dies

hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auslegung von Brandmeldeanlagen mit Zweimelderabhängigkeit und der entsprechenden zeitlichen Auslöseverzögerung der Melder, insbesondere im Hinblick auf die Auslösung von Löschanlagen bzw. der Alarmierung der Feuerwehr.

- Bzgl. dem Niederschlagen von Gasen und Dämpfen durch Wasserdampf kann folgende Aussage gemacht werden: Die Löslichkeit von Ammoniak, Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff und Chlor in Wasser ist gegenüber Kohlenmonoxid und Kohlendioxid weit größer. Hieraus ist unmittelbar einleuchtend, dass das Niederschlagen dieser Gase mit Wasserdampf Sinn macht, dagegen das Niederschlagen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid und damit die Reduktion dieser Gase in der Raumluft nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- Aufgrund des relativ kleinen Brandraumes mit einer Grundfläche von 25 m² besteht weiterhin großer Untersuchungsbedarf beim Einsatz von Wasserdampf z.B. in großen Hallen, Tunneln etc. bzgl. des Einflusses von Ventilationsströmungen, insbesondere Wind einfluss auf die Löschwirkung bei den unterschiedlichen Arten von Wasserdampf.

Hieraus ergibt sich weiterhin die Fragestellung, inwieweit numerische Programme in der Lage sind, den Sachverhalt (Brandausbreitung und Löscheintritt) rechnerisch korrekt darzustellen, wenn es bereits bei der Wiederholung von Brandversuchen in einem relativ kleinen Raum zu erheblichen Unterschieden z.B. bzgl. der Auslösung von Rauchmeldern und thermischen Glasfass-Auslöseelementen kommt.

Ein Vergleich der hier durchgeführten Untersuchungen und sonstigen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik dokumentierten nationalen und internationalen Untersuchungen legt den Schluss nahe, dass Niederdruck-Wasserdampf Vorteile in der Brandbekämpfung gegenüber Hochdruck-Wasserdampf sowohl bei flüssigen als auch bei festen Brandstoffen aufweist.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kunkelmann J.: Rauchausbreitung in Treppenträumen ohne und mit Einfluss von ortsfesten Wasserlöschanlagen. [2004]
Teil 1:
- Vergleich des Auslöseverhaltens von fotoelektronischen Rauchmeldern bei Einsatz von Disconebel und Brandrauch.
 - Brand- und Löschversuche ohne Windeinfluss auf einen natürlichen Rauchabzug.
 - Vergleich von Normal-Sprinkler- mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage.
- Forschungsbericht Nr. 135 der ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2004)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._135.pdf
- [2] Kunkelmann, J.: Rauchausbreitung in Treppenträumen ohne und mit Einfluss von ortsfesten Wasserlöschanlagen. [2005]
Teil 2:
- Brand- und Löschversuche mit Windeinfluss auf einen natürlichen Rauchabzug.
 - Vergleich von Normal-Sprinkler- mit Niederdruck-Wassernebellöschanlage.
- Forschungsbericht Nr. 136 der ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2005)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._136.pdf
- [3] Kunkelmann J.: Entwicklung und Erprobung neuartiger Löschanlagen für den mehrgeschossigen Holzbau zur Brandbekämpfung und Fluchtwegsicherung. [2001]
Forschungsbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen: 0339852, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2001
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/Neuartige_Loeschanlagen_fuer_den_mehrgeschossigen_Holzbau_FFB_2001-2.pdf
- [4] Kunkelmann, J.: Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe(n) und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten. [2000]
Teil 1:
- Brand- und Rauchausbreitung sowie brandschutztechnische Maßnahmen bei Altbaugebäuden und Gebäuden aus dem Bereich des Denkmalschutzes
 - Baurechtliche Anforderungen
 - Wirkungsweise von Sprinkler- und Wassernebellöschanlagen
 - Experimentelle Untersuchungen (Versuchsaufbau: 4-geschossiger Treppenraum, Niederdruck-Wassernebellöschanlage)
- Forschungsbericht Nr. 120 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2000)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._120.pdf

- [5] Kunkelmann, J.: Einsatz von Wasserebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten.
Teil 2: Brand- und Löschversuche
Forschungsbericht Nr. 129 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2002)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._129.pdf
- [6] Kunkelmann, J.: Anwendungsbereiche für Wasserebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer 'Brandgefahrenklasse'.
Teil 1:
- Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wasserebel im Holztrepperraum (ohne und mit Windeinfluss auf einen natürlichen Rauchabzug).
- Vergleich mit Niederdruck-Wasserebel und Sprinkler.
Forschungsbericht Nr. 143 der ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2007),
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/AGF143_Kunkelmann_Anwendung_Wasserebel_Hochdruck_Teil_1-20_komp.pdf
- [7] Kunkelmann, J.: Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und ortsfeste Niederdruck-Wasserebellöschanlagen.
Forschungsvorhaben im Auftrag der Stiftung Industrie-Forschung, Förderkennzeichen Nr. S 483, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Karlsruhe, 2001
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/Verringerung_der_Temperaturen_an_Stahl_Glasfassaden_FB_2001-2.pdf
- [8] vfdb, Hosser, D.: Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“;
vfdb TB 04/01, 2. Auflage, Altenberge, Braunschweig, Mai 2009
http://www.vfdb.de/download/Leitfaden_Ingenieurmethoden_Juni_2009.pdf
- [9] Kunkelmann, J.: Auswirkung des Einsatzes ortsfester Wasserebellöschanlagen auf die Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden mit doppelten Fassaden.
Teil 3:
- Literaturlauswertung (Wasserebellöschanlagen - Entwicklung, Löschprinzipien, Einsatzgebiete, Anwendungsgrenzen, Anlagentechnik, Normung)
- Brand- und Löschversuche in einem Gebäudeausschnitt mit einer Ganzflächendoppelfassade
Forschungsbericht Nr. 108 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1998)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._108.pdf

- [10] Kunkelmann, J.: [2003] Flashover / Backdraft – Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen.
Forschungsbericht Nr. 130 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2003)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._130.pdf
- [11] Kunkelmann, J.: [1995] 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 - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1995)
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/IMK_Ber._Nr._95.pdf
- [12] Krüger, A.; Radusch, R.: [1956] Wasserzerstäubung im Strahlrohr.
Forschungsstelle für Feuerlöschtechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe,
Forschungsbericht Nr. 329 des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen, 1956
http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/Krueger_Radusch_Wasserzerstaebung_im_Strahlrohr.pdf
- [13] Mawhinney, J.R.: [1996] Findings of Experiments using Water Mist for Fire suppression in an electronic equipment room
Halon Options Technical Working Conference, May 7-9, 1996 (NMERI)
<http://www.bfrl.nist.gov/866/HOTWC/HOTWC2006/pubs/R0001214.pdf>
- [14] Arvidson, M.: [2010] Large-scale Water Spray and Water Mist Fire Suppression System Tests. Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, 17. – 19. 3.2010
http://www.hemmingfire.com/news/get_file.php3/id/147/file/284-297_Large-scale+water+spray.pdf
- [15] Müller M.: [2001-2005] Zusammenstellung für die Löslichkeit verschiedener Gase in Wasser.
<http://www.chempage.de/>, 2001-2005
- [16] VdS 3527 [2007] VdS- Richtlinie für Inertisierungs- und Sauerstoffreduzierungsanlagen – Planung und Einbau
VdS 3527: 2007-01,
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln
<http://www.vds.de/>
<http://www.beuth.de/langanzeige/VdS+3527/de/97482140.html&limitationtype=&searchaccesskey=MAIN>

8. TABELLEN

Tabelle 1: Versuchsaufbau und Messtechnik

Brandraum	Innenabmessungen: Höhe: 2,68 m, Länge: 5 m * Breite: 5 m; Grundfläche: 25 m ²
Wassernebel-löschanlage	<p>ortsfeste Hochdruck-Wassernebellöschanlage</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 Sprühkopf mit 4 offenen Dralldüsen der Firma Düsen-Schlick GmbH*) • Einzeldüse: kreisförmiger Hohlkegel, Streuungswinkel ca. 120° (bei 3 bar) • Bohrungsdurchmesser 1,2 mm (Herstellerangaben) • Sprühwinkel des Sprühkopfes ca. 110° • Position: zentral an der Decke • Betriebsdruck: 80 bar (ca. 10 l/min gesamt) oder fallweise 135 bar (ca. 13 l/min gesamt) • Tropfengrößen: siehe Diagramme zur Tropfengrößenverteilung (Bilder 2.3 bis 2.6) • Manuelle Auslösung der Wassernebellöschanlage nach Ansprechen des Indikatorsprinklers bzw. Rauchmelders zentral im Brandraum (vgl. Tabelle 2)
Indikator-sprinkler	<ul style="list-style-type: none"> • 5 Stück: 3 mm Glasfaß, Nennauslösetemperatur: 68°C, mittlerer RTI-Wert: ca. 50 m^{1/2} s^{1/2}) • Positionen: zentral an der Decke im Brandraum neben dem Sprühkopf sowie in den Ecken jeweils in 1 m Abstand von den Wänden
Brandmelder	<p>5 Stück: foto-elektronische Rauchmelder</p> <p>Positionen: zentral an der Decke im Brandraum neben dem Sprühkopf sowie in den Ecken jeweils in 1 m Abstand von den Wänden</p>
Messtechnik und Messdatenerfassung	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturen (Mantel-Thermoelemente, NiCr-Ni(K), Mantel d=1,5 mm) an verschiedenen Meßpositionen im Brandraum (zentral an der Decke im Brandraum neben dem Sprühkopf, in den Ecken jeweils in 1 m Abstand von den Wänden sowie zentral in 1,5 m Höhe an der Sonde der Brandrauchmessung) • Wasservolumenstrom am Sprühkopf (magnetisch-induktiver Durchflußmesser) • Wasserdruck (Manometer an der Hochdruckpumpe) • Brandrauchanalyse (kontinuierliche Gasanalysatoren): Sauerstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid zentral im Brandraum in 1,5 m Höhe • Meßdatenerfassung und -auswertung mittels PC

*) **Ausschlussklausel: Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine allgemeine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik verbunden.**

Tabelle 2: Versuchstabelle; Zusammenstellung von Messergebnissen

Versuch Nr.	Versuchsparameter	Rauchmelder						Indikatorsprinkler						Gaskonzentrationen		
		RM _{VL}	RM _{VR}	RM _{ZEN}	RM _{HL}	RM _{HR}	RM _{arMi}	ISP _{VL}	ISP _{VR}	ISP _{ZEN}	ISP _{HL}	ISP _{HR}	ISP _{arMi}	O _{2,min}	CO _{2,max}	CO _{max}
HDSC135B1	Zündung: sämtliche 5 Brandlasten (Nr. 1) im Brandraum (25 m ²) Verteilung der Brandlasten auf 3 m * 3 m (= 9 m ²) Tür: zu Fenster: auf (Rohbauöffnung 1,42m ²) Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP_{ZEN}	41s T _{B6} =35°C	1min2s T _{B7} =60°C	47s T _{B2} =37°C	1min T _{B5} =60°C	44 s; T _{B4} =47°C	51s 48°C	1min21s T _{B6} =96°C	1min21s T _{B7} =102°C	1min25s T _{B2} =101°C	1min16s; T _{B5} =102°C	1min20s T _{B4} =100°C	1min21s 100°C	19,7Vol.% 2min25s	6600ppm 2min25 s	500ppm 2min15 s
Br2V1	Zündung: Brandlast (Nr. 2) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: auf (1 m ²)	2min38s T _{B6} =44°C 49 kW	2min2s T _{B7} =62°C 31 kW	3min41s T _{B2} =64°C 69 kW	3min21s T _{B5} =50°C 65 kW	2min38s T _{B4} =46°C 49 kW	2min52s 53°C 53 kW	-	2min30s T _{B7} =80°C 46 kW	6min49s T _{B2} =85°C 77 kW	-	-	4min40s 83°C 62 kW	-	-	-
HDSC135B2	Zündung: Brandlast (Nr. 2) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: auf (Rohbauöffnung 1,42m ²) Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage durch Versuchsführer nach 8 min 58 s	1min59s T _{B6} =39°C	1min30s T _{B7} =58°C	1min46s T _{B2} =31°C	2 min18s T _{B5} =37°C	1min49s T _{B4} =36°C	1min52s 40°C	-	3min4s T _{B7} =99°C	Auslösung der Löschanlage durch Versuchsführer nach 8min 58s	-	-	3min4s 99°C	20,6Vol.% 8min55s	2300ppm 8min20s	400ppm 17min45s

zu Tabelle 2																
Versuch Nr.	Versuchsparameter	Rauchmelder						Indikatorsprinkler						Gaskonzentrationen		
		RM _{VL}	RM _{VR}	RM _{ZEN}	RM _{HL}	RM _{HR}	RM _{arMi}	ISP _{VL}	ISP _{VR}	ISP _{ZEN}	ISP _{HL}	ISP _{HR}	ISP _{arMi}	O _{2,min}	CO _{2,max}	CO _{max}
HDSC135B3	Zündung: Brandlast (Nr. 2) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: zu Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	2min34s T _{B6} =47°C	2min6s T _{B7} =72°C	3min20s T _{B2} =53°C	3min21s T _{B5} =50°C	2min33s T _{B4} =45°C	2min47s 53°C	4min10s T _{B6} =81°C	2min42s T _{B7} =95°C	6min44s T _{B2} =89°C	-	-	4min32s 88°C	19,4Vol.% 7 min 15 s	10900ppm 7 min	400 ppm 6min20s
HDSC135B4	Zündung: Brandlast (Nr. 2) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: auf Fenster: gekippt Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	2min16s T _{B6} =45°C	1min58s T _{B7} =79°C	2min34s T _{B2} =43°C	2min29s T _{B5} =42°C	2min15s T _{B4} =44°C	2min18s 51°C	4min48s T _{B6} =83°C	2min10s T _{B7} =89°C	6min30s T _{B2} =82°C	-	4min39s T _{B4} =83°C	4min32s 84°C	19,8Vol.% 6min50s	9600ppm 6min50s	400ppm 6min40s
HDSC135B5	Zündung: Brandlast (Nr. 2) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: zu Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Rauchmelder RM _{zen}	3min11s T _{B6} =41°C	2min58s T _{B7} =70°C	3min16s T _{B2} =39°C	-	3min T _{B4} =39°C	3min6s 47°C	-	-	-	-	-	-	20,5Vol.% 15min15s	4100ppm 16min30s	400ppm 13min50s

zu Tabelle 2																
Versuch Nr.	Versuchsparameter	Rauchmelder						Indikatorsprinkler						Gaskonzentrationen		
		RM _{VL}	RM _{VR}	RM _{ZEN}	RM _{HL}	RM _{HR}	RM _{arMi}	ISP _{VL}	ISP _{VR}	ISP _{ZEN}	ISP _{HL}	ISP _{HR}	ISP _{arMi}	O _{2,min}	CO _{2,max}	CO _{max}
HDSC135B6	Zündung: Brandlast (Nr. 2) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: gekippt Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Rauchmelder RM _{zen}	3min10s; T _{B6} =40°C	2min47s T _{B7} =66°C	3min29s T _{B2} =41°C	2min39s T _{B5} =30°C	2min10s T _{B4} =24°C	2min51s 40°C	-	-	-	-	-	-	20,5Vol.%; 18min5s	3000ppm; 19min25s	400ppm; 17min30s
HDSC135B7	Zündung Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: zu Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	4min21s T _{B6} =58°C	4min14s T _{B7} =89°C	4min22s T _{B2} =54°C	4min30s T _{B5} =50°C	3min51s T _{B4} =50°C	4min16s 61°C	5min57s T _{B6} =82°C	3min47s T _{B7} =95°C	6min52s T _{B2} =93°C	-	-	5min32s 88°C	19,7Vol.%; 8min	9200ppm; 8min10s	500ppm; 6min50s
HDSC135B8	Zündung Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: gekippt Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	5min7s T _{B6} =54°C	4min52s T _{B7} =103°C	5min7s T _{B2} =55°C	2min6s T _{B5} =26°C	1min41 T _{B4} =25°C	3min47s 53°C	-	4min41s T _{B7} =95°C	7min10s T _{B2} =86°C	-	-	5min55s 91°C	20,3Vol.%; 8min10s	5000ppm; 8min10s	500ppm; 14min45s

zu Tabelle 2																
Versuch Nr.	Versuchsparameter	Rauchmelder						Indikatorsprinkler						Gaskonzentrationen		
		RM _{VL}	RM _{VR}	RM _{ZEN}	RM _{HL}	RM _{HR}	RM _{arMi}	ISP _{VL}	ISP _{VR}	ISP _{ZEN}	ISP _{HL}	ISP _{HR}	ISP _{arMi}	O _{2,min}	CO _{2,max}	CO _{max}
Br3V1	Zündung: Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: auf	2min16s T _{B6} =38°C	46s T _{B7} =28°C	1min42s T _{B2} =34°C	2min25s T _{B5} =37°C	2min7s T _{B4} =38°C	1min51s 35°C	8min28s T _{B6} =77°C	4min41s T _{B7} =118°C	7min5s T _{B2} =84°C	7min47s T _{B5} =73°C	7min45s T _{B4} =80°C	7min9s 86°C	-	-	-
		23 kW	4 kW	14 kW	25 kW	20 kW	17 kW	163kW	74 kW	146 kW	159 kW	158 kW	140 kW			
HDSC135B9	Zündung Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: auf Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	4min12s T _{B6} =44°C	4min12s T _{B7} =84°C	4min14s T _{B2} =44°C	4min25s T _{B5} =42°C	4min3s T _{B4} =42°C	4min13s 53°C	-	4min11s T _{B7} = 84°C	8min41s T _{B2} =87°C	-	7min42s T _{B4} =90°C	6min51s 87°C	20,1Vol. % 8min15s	7500ppm 8min30s	500ppm 7min20s
HDSC135B10	Zündung Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: auf Fenster: auf Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 13 l/min, 135 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	4min23s T _{B6} =43°C	3min43s T _{B7} =63°C	5min24s T _{B2} =50°C	5min6s T _{B5} =42°C	4min40s T _{B4} =45°C	4min39s 49°C	-	5min34s T _{B7} =95°C	10min52s T _{B2} =83°C	-	-	8min13s 89°C	20,3Vol. % 7min45s	5000ppm 7min50s	400ppm 6min45s

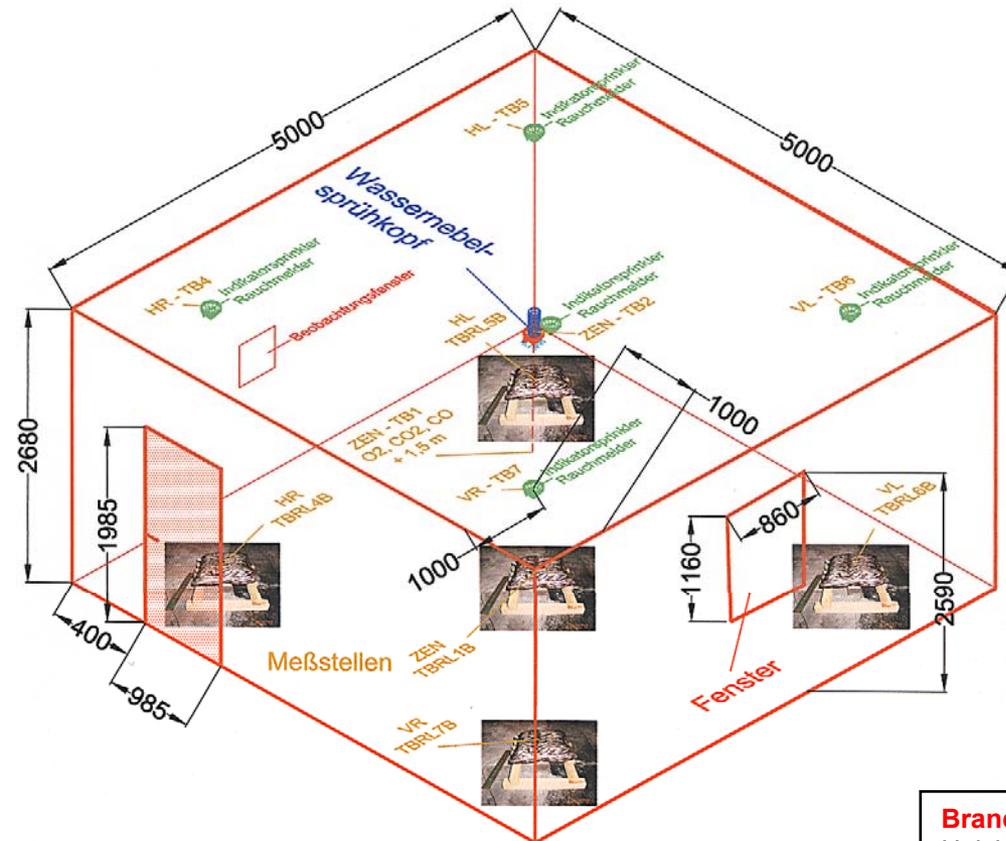
zu Tabelle 2																
Versuch Nr.	Versuchsparameter	Rauchmelder						Indikatorsprinkler						Gaskonzentrationen		
		RM _{VL}	RM _{VR}	RM _{ZEN}	RM _{HL}	RM _{HR}	RM _{arMi}	ISP _{VL}	ISP _{VR}	ISP _{ZEN}	ISP _{HL}	ISP _{HR}	ISP _{arMi}	O _{2,min}	CO _{2,max}	CO _{max}
HDSC80B1	Zündung Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: zu Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 10 l/min, 80 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	2min19s T _{B6} =41°C	1min41s T _{B7} =56°C	2min21s T _{B2} =36°C	2min38s T _{B5} =38°C	2min7s T _{B4} =37°C	2min13s 42°C	-	2min46s T _{B7} =96°C	7min23s T _{B2} =86°C	-	4min32s T _{B4} =80°C	4min54s 87°C	19,6Vol.% 7min45s	12800ppm 7min35s	500ppm 6min
HDSC80B2	Zündung Brandlast (Nr. 3) VR (bei T _{B7}), Brandraum (25 m ²) Tür: zu Fenster: gekippt Sprühkopf: zentral, 4 Düsen, 10 l/min, 80 bar Auslösung der Löschanlage: bei Indikatorsprinkler ISP _{zen}	2min18s T _{B6} =42°C	1min46s T _{B7} =55°C	2min15s T _{B2} =39°C	2min24s T _{B5} =28°C	2min11s T _{B4} =41°C	2min11s 41°C	4min14s T _{B6} =72°C	2min54s T _{B7} =89°C	8min27s T _{B2} =84°C	-	5min5s T _{B4} =78°C	5min8s 81°C	20,0Vol.% 9min35s	11100ppm 8min45s	400ppm 7min50s

Tabelle 3: Zusammenstellung für die Löslichkeit verschiedener Gase in Wasser (Löslichkeit in g Gas je kg Wasser bei 101,3kPa) nach Müller [15].

Gas	Temperatur in °C					
	0	20	25	40	60	80
Helium	0,0017	0,0015	0,0015	0,0014	0,0013	-
Argon	0,099	0,059	0,059	0,042	0,030	-
Wasserstoff	0,0019	0,0016	0,0015	0,0014	0,0012	0,0008
Stickstoff	0,0294	0,0190	0,0175	0,0139	0,0105	0,0066
Sauerstoff	0,0694	0,0434	0,0393	0,0308	0,0227	0,0138
Chlor	5,0	7,25	6,41	4,59	3,30	2,23
Ammoniak	897	529	480	316	168	65
Schwefelwasserstoff	7,07	3,85	3,38	2,36	1,48	0,77
Schwefeldioxid	228	113	94,1	54,1	-	-
Kohlenstoffmonoxid	0,0440	0,0284	0,0260	0,0208	0,0152	0,0098
Kohlenstoffdioxid	3,35	1,69	1,45	0,973	0,576	-
Methan	0,0396	0,0232	0,0209	0,0159	0,0114	0,0070
Ethan	0,132	0,062	0,0535	0,0366	0,0239	0,0134
Ethen	0,281	0,149	0,131	-	-	-

© 2001-2005 [Chempage.de] - Michael Müller - michael.mueller@rwth-aachen.de

9. BILDER



Fenster:

- Versuche HDSC135B1 und B2 mit Rohbauöffnung
Öffnungsfläche = ca. 1,42 m² (1050 mm * 1350 mm)
- übrige Versuche mit Wärmeschutzglasfenster (PVC-Rahmen)
(4-16-4, k=1,5 W/m²K), Glasfläche = ca. 1 m² (860 mm * 1160 mm)
Öffnungsfläche vollständig geöffnet = 1,14 m² (930 mm * 1230 mm)
Öffnungsfläche gekippt = ca. 0,15 m²



Versuche mit Abbrandwaage (ohne Löscheinsatz):

- Versuch Br2V1 (Tür: zu, Fenster: auf)
Brandlast Nr. 2 (Position VR)
- Versuch Br3V1 (Tür: zu, Fenster: auf)
Brandlast Nr. 3 (Position VR)

Brandlast



Brandlast Nr. 1
Vers.: HDSC135B1
4 Ecken + zentral



Brandlast Nr. 2
Vers.: HDSC135B2 - 6
nur Ecke VR



Brandlast Nr. 3
Übrige Versuche:
nur Ecke VR

Brandlast Nr. 1: Brandlast (einzeln, an 5 Positionen verwendet)

Holzkrippe: 2,8 kg - 4 Kanthölzer (500 mm * 50 mm * 50 mm)
Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g
5 Zündwannen (100 mm * 100 mm * 10 mm): je 50 ml Spiritus

Brandlast Nr. 2: Brandlast an 1 Position verwendet

Holzkrippe: 2 kg - 36 Kanthölzer (260 mm * 20 mm * 20 mm) + 2 * 2 (Unterlage)
Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g
Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus

Brandlast Nr. 3: Brandlast an 1 Position verwendet

Holzkrippe: 4 kg - 72 Kanthölzer (260 mm * 20 mm * 20 mm) + 2 * 2 (Unterlage)
5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Brandraum



Hochdruck-Sprühkopf mit 4 Düsen, zentral an der Brandraumdecke
Indikatorsprinkler: 68°C, 3 mm - Glasfass, RTI= ca. 50 m^{1/2} s^{1/2}
5 Stück - Anordnung: zentral und in den 4 Ecken
Rauchmelder: foto-elektronisch
5 Stück - Anordnung: zentral und in den 4 Ecken



Hochdruckpumpe



Anzeige-Tableau für Indikatorsprinkler (Manometer) und Rauchmelder (Leuchtdioden über den Manometern)

Kaltsprühversuche mit Hochdruck-Wassernebel



Einzeldüse
135 bar



Einzeldüse
135 bar



Einzeldüse im Treppenraum
135 bar



Sprühkopf mit 4 Düsen
135 bar



Sprühkopf mit 4 Düsen
135 bar



Sprühkopf (4 Düs.) im Treppenraum
135 bar

Kaltsprühversuche mit Hochdruck-Wassernebel



Sprühkopf mit 4 Düsen – 135 bar
Höhe des Sprühkopfes: 5 m



Radialgebläse zur Winderzeugung
Windgeschwindigkeit: 3 m/s



Einzeldüse – 135 bar
Ablenkung durch Radialgebläse (3 m/s)



Sprühkopf mit 4 Düsen – 135 bar
Ablenkung durch Wind im Freien
Windgeschwindigkeit: 3,2 m/s



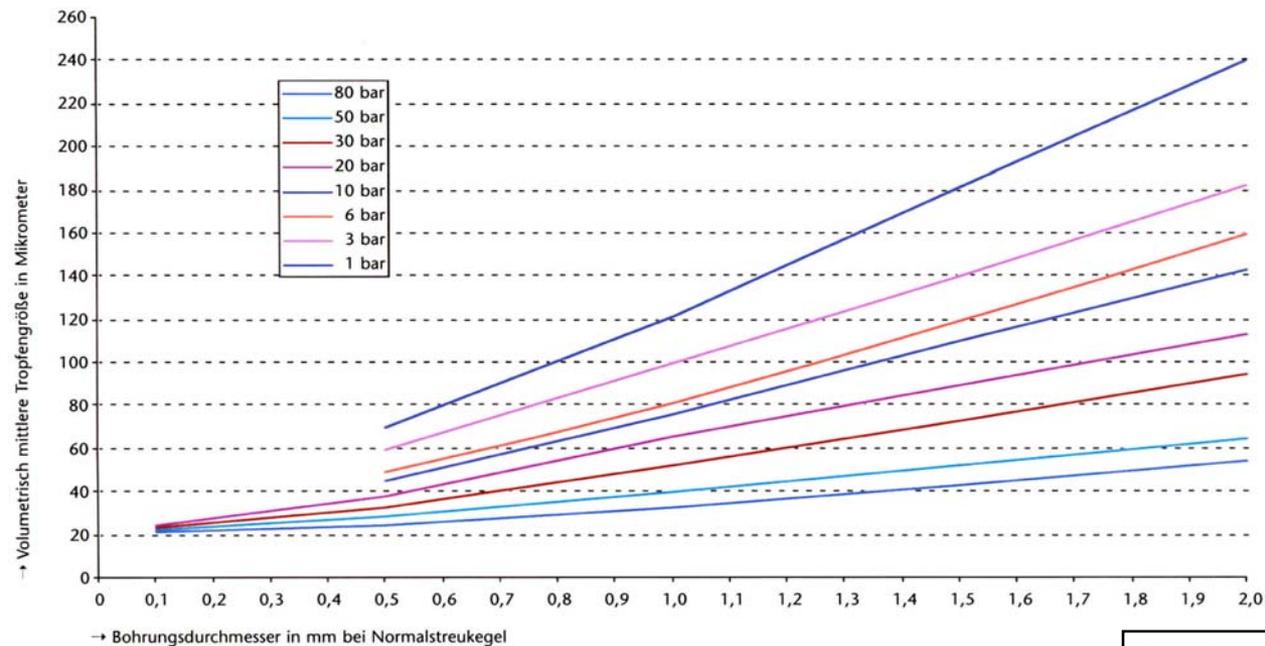
Sprühkopf (4 Düsen) im Brandraum
135 bar



Tropfengrößen

Hohlkegeldüsen

Volumetrisch mittlere Tropfengröße in Mikrometer



Ausschlussklausel: Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine allgemeine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik verbunden.

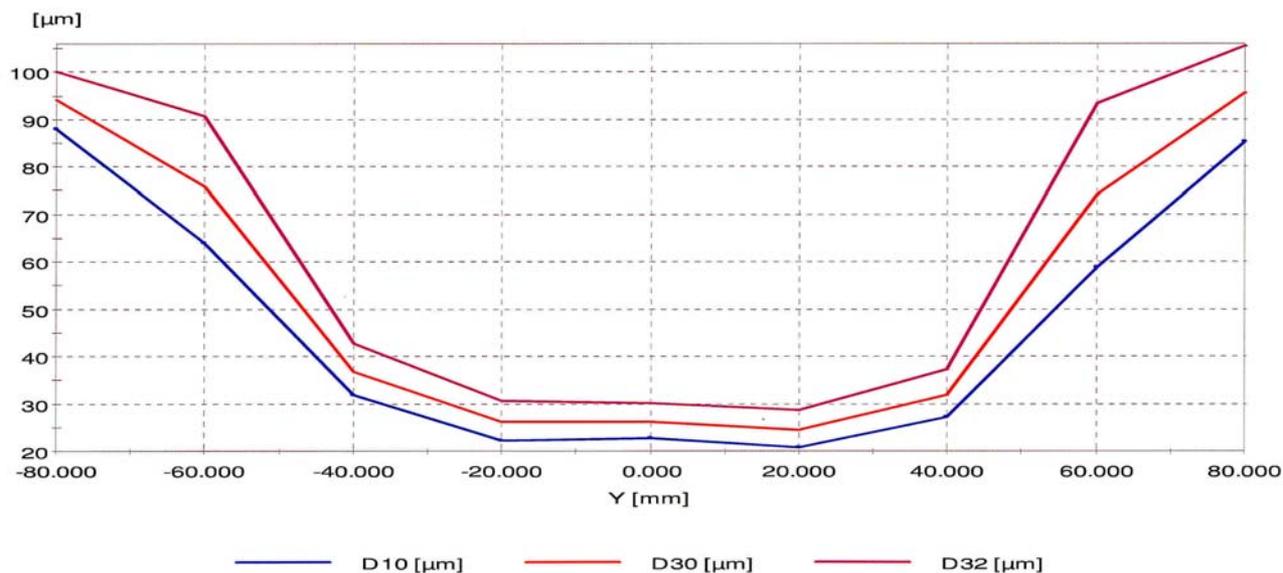
Bild 2.3: Hohlkegeldüsen (Firma Düsen-Schlick GmbH) – Volumetrisch mittlere Tropfendurchmesser
Bei den Versuchen verwendete Einzeldüsen (Hochdruck-Wassernebel): Bohrungsdurchmesser = 1,2 mm

www.duesen-schlick.de



Tropfengröße Mod. 121; Bohrung 2,3 mm
Durchsatz Wasser: 8,436 l/min bei 50,0 bar (ü)

Meßnummer: 138



Düsen-Schlick GmbH - Hutstr. 4 - 96253 Untersiemau/Germany - Tel.: 09565/9481-0

Seite 2

Ausschlussklausel: Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine allgemeine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik verbunden.

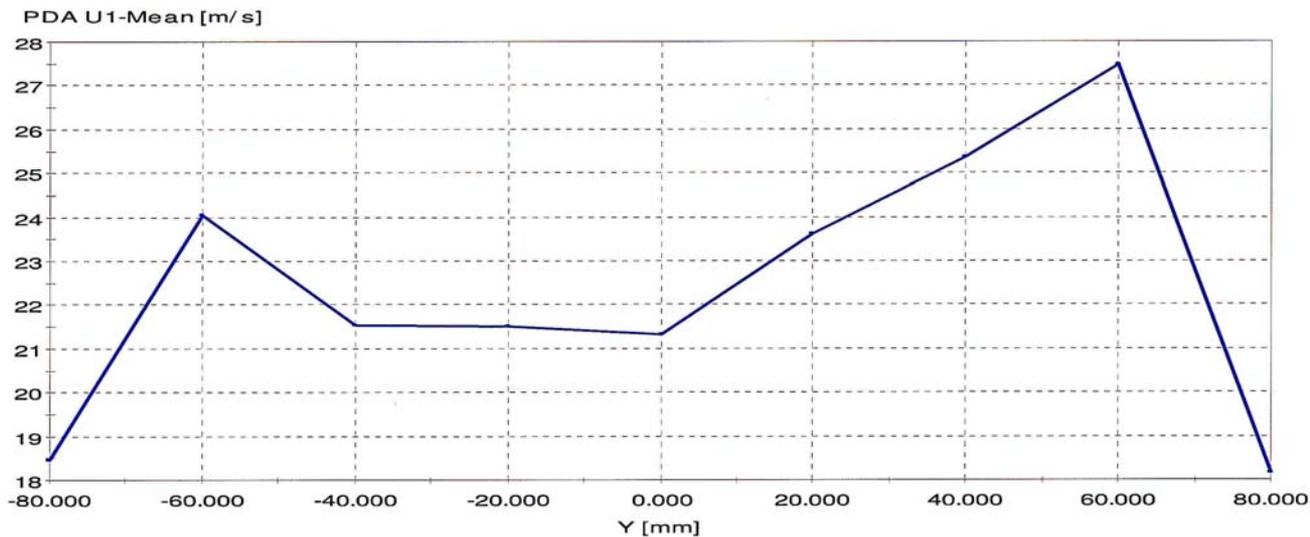
Bild 2.4: Hohlkegeldüsen (Firma Düsen-Schlick GmbH) - arithmetisches Mittel aller Tropfendurchmesser D_{10} , volumetrisch mittlerer Tropfendurchmessers D_{30} , Sauter-Durchmesser D_{32} , in Abhängigkeit vom Sprühradius

www.duesen-schlick.de



Geschwindigkeit Mod. 121; Bohrung 2,3 mm
Durchsatz Wasser: 8,436 l/min bei 50,0 bar (ü)

Meßnummer: 138



Düsen-Schlick GmbH - Hutstr. 4 - 96253 Untersiemau/Germany - Tel.: 09565/9481-0

Seite 3

Ausschlussklausel: Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine allgemeine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik verbunden.

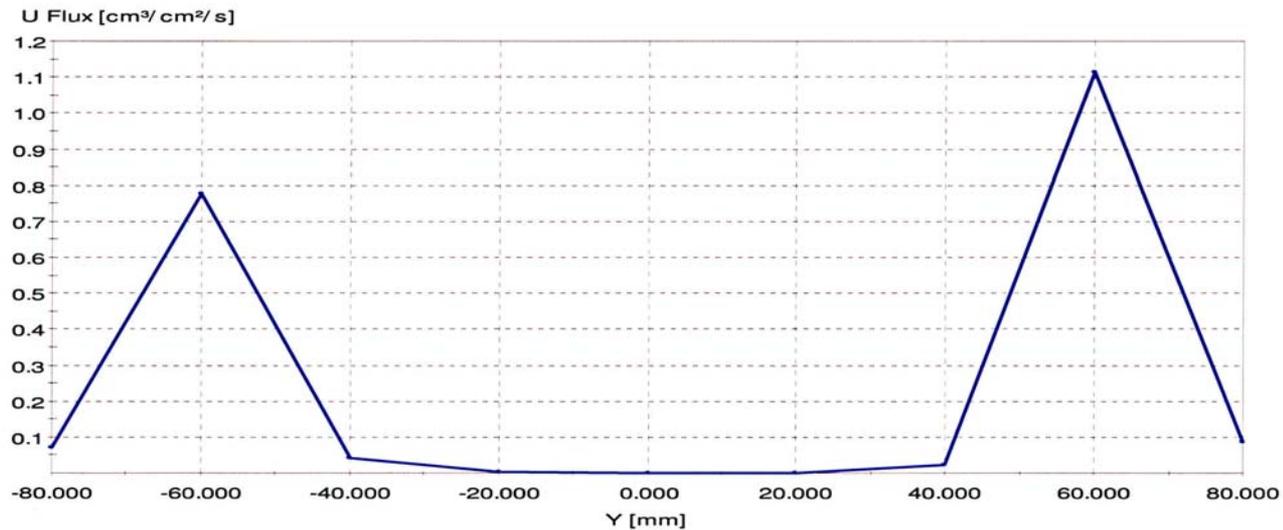
Bild 2.5: Hohlkegeldüsen (Firma Düsen-Schlick GmbH) – Mittlere Tropfengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Sprühradus

www.duesen-schlick.de



Volumenstromdichte Mod. 121; Bohrung 2,3 mm
Durchsatz Wasser: 8,436 l/min bei 50,0 bar (ü)

Meßnummer: 138

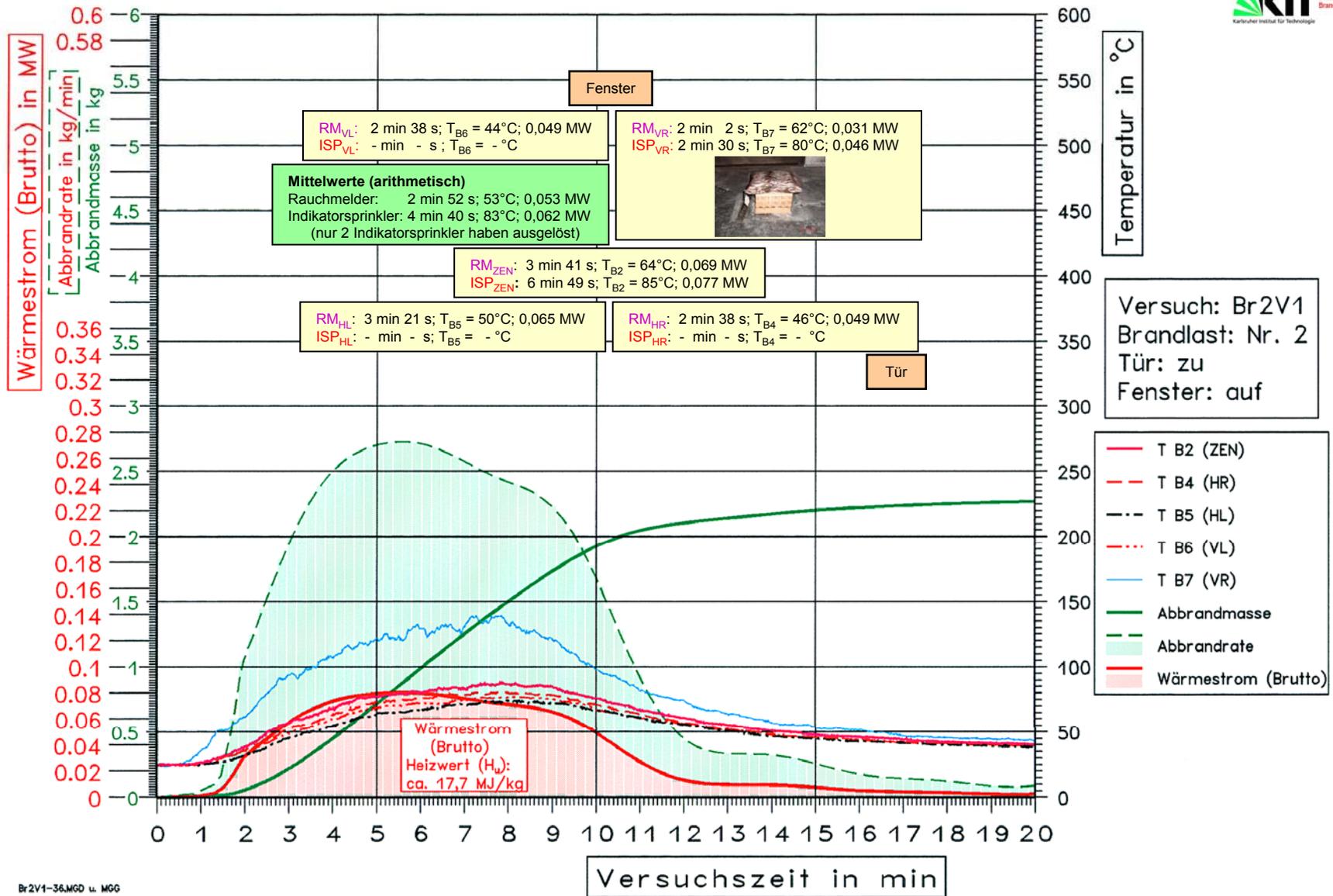


Düsen-Schlick GmbH - Hutstr. 4 - 96253 Untersiemau/Germany - Tel.: 09565/9481-0

Seite 4

Ausschlussklausel: Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine allgemeine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik verbunden.

Bild 2.6: Hohlkegeldüsen (Firma Düsen-Schlick GmbH) – Volumenstromdichte in Abhängigkeit vom Sprühradus



Br2V1-36.MGD u. MGG

Bild 3.1: Versuch Br2V1 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Abbrandrate, Wärmefreisetzung, Branddetektion

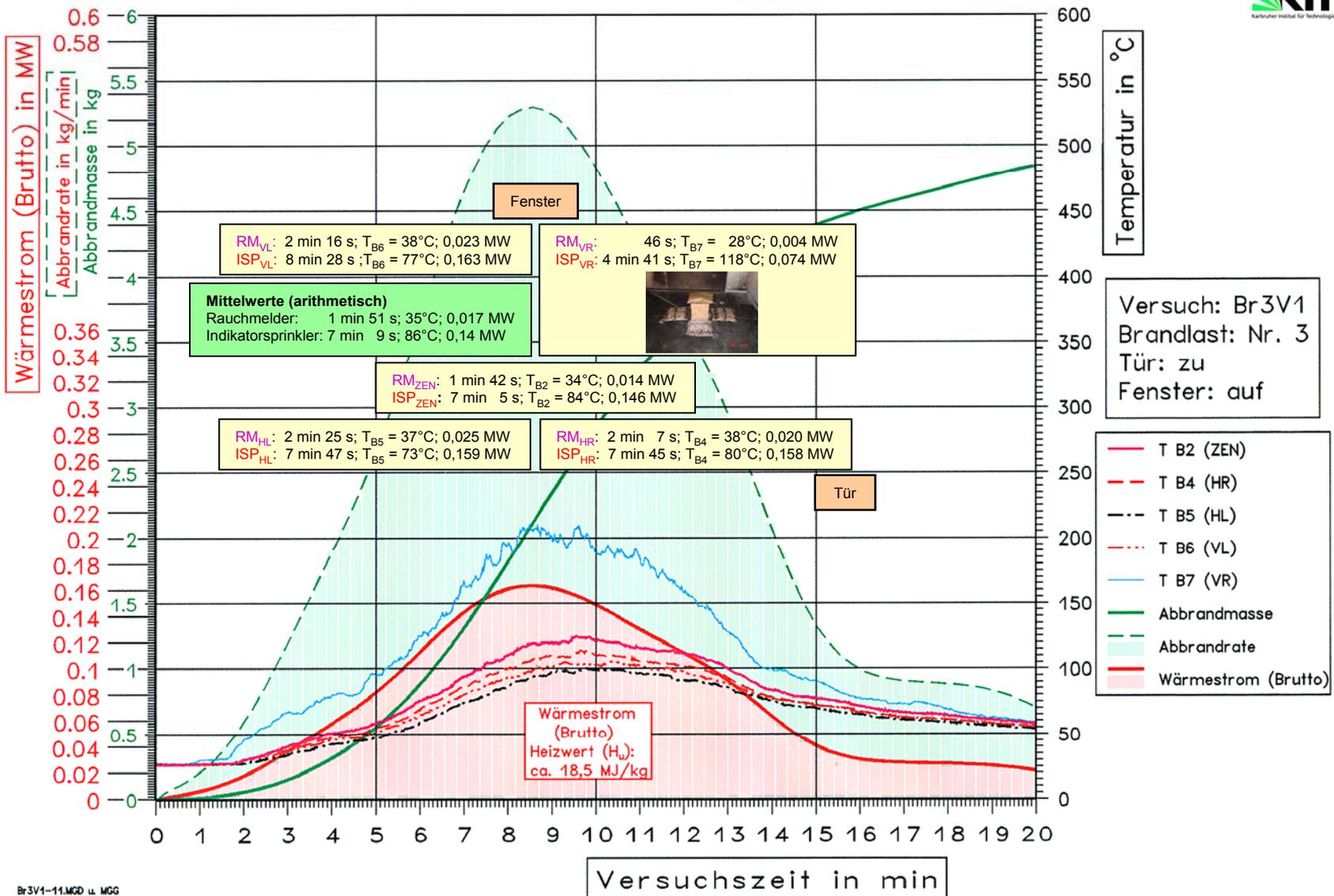


Bild 3.2: Versuch Br3V1 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Abbrandrate, Wärmefreisetzung, Branddetektion

Vergleich: Versuch Br2V1 – Versuch Br3V1: Tür: zu, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indicatorsprinklern

(Obere Bildreihe: Versuch Br2V1, untere Bildreihe: Versuch Br3V1 - Beobachtungsfenster)



Brandlast Nr. 2 (obere Bildreihe):

Holzkruppe: 2 kg
 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Brandlast Nr. 3 (untere Bildreihe):

Holzkruppe: 4 kg
 5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus

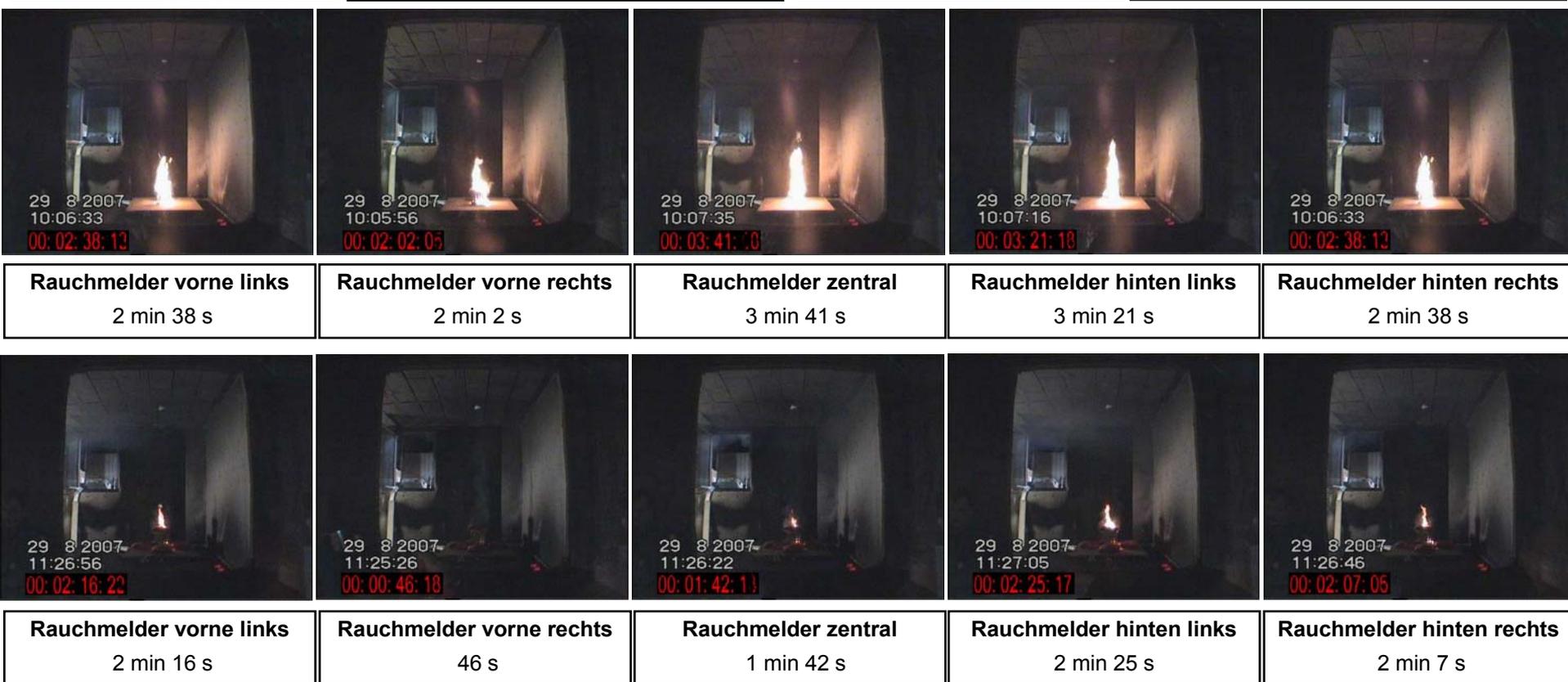


Bild 3.3: Vergleich der Brandentwicklung und Verrauchung bei den Versuchen Br2V1 und Br3V1

Vergleich: Versuch Br2V1 – Versuch Br3V1: Tür: zu, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern

(Obere Bildreihe: Versuch Br2V1, untere Bildreihe: Versuch Br3V1 - Beobachtungsfenster)



Brandlast Nr. 2 (obere Bildreihe):

Holzkrappe: 2 kg
Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g
Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Brandlast Nr. 3 (untere Bildreihe):

Holzkrappe: 4 kg
5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Ind.sprinkler vorne links

-

Ind.sprinkler vorne rechts

2 min 30 s

Ind.sprinkler zentral

6 min 49 s

Ind.sprinkler hinten links

-

Ind.sprinkler hinten rechts

-



Ind.sprinkler vorne links

8 min 28 s

Ind.sprinkler vorne rechts

4 min 41 s

Ind.sprinkler zentral

7 min 5 s

Ind.sprinkler hinten links

7 min 47 s

Ind.sprinkler hinten rechts

7 min 45 s

Bild 3.4: Vergleich der Brandentwicklung und Verrauchung bei den Versuchen Br2V1 und Br3V1

Versuch HDSC135B1: – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 1 (einzeln, an 5 Positionen verwendet):

Holzkruppe: 2,8 kg

Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g

5 Zündwannen (100 mm * 100 mm * 10 mm): je 50 ml Spiritus



Rauchmelder vorne links

41 s

Rauchmelder hinten rechts

44 s

Rauchmelder zentral

47 s

Rauchmelder hinten links

1 min

Rauchmelder vorne rechts

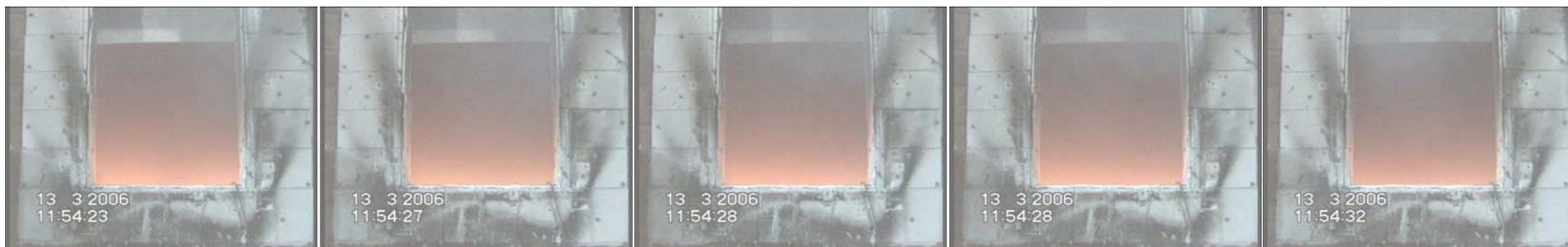
1 min 2 s

Bild 4.1: Versuch HDSC135B1 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC135B1: – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Ind.sprinkler hinten links

1 min 16 s

Ind.sprinkler hinten rechts

1 min 20 s

Ind.sprinkler vorne rechts

1 min 21 s

Ind.sprinkler vorne links

1 min 21 s

Ind.sprinkler zentral

1 min 25 s

Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

Versuch HDSC135B1: – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)

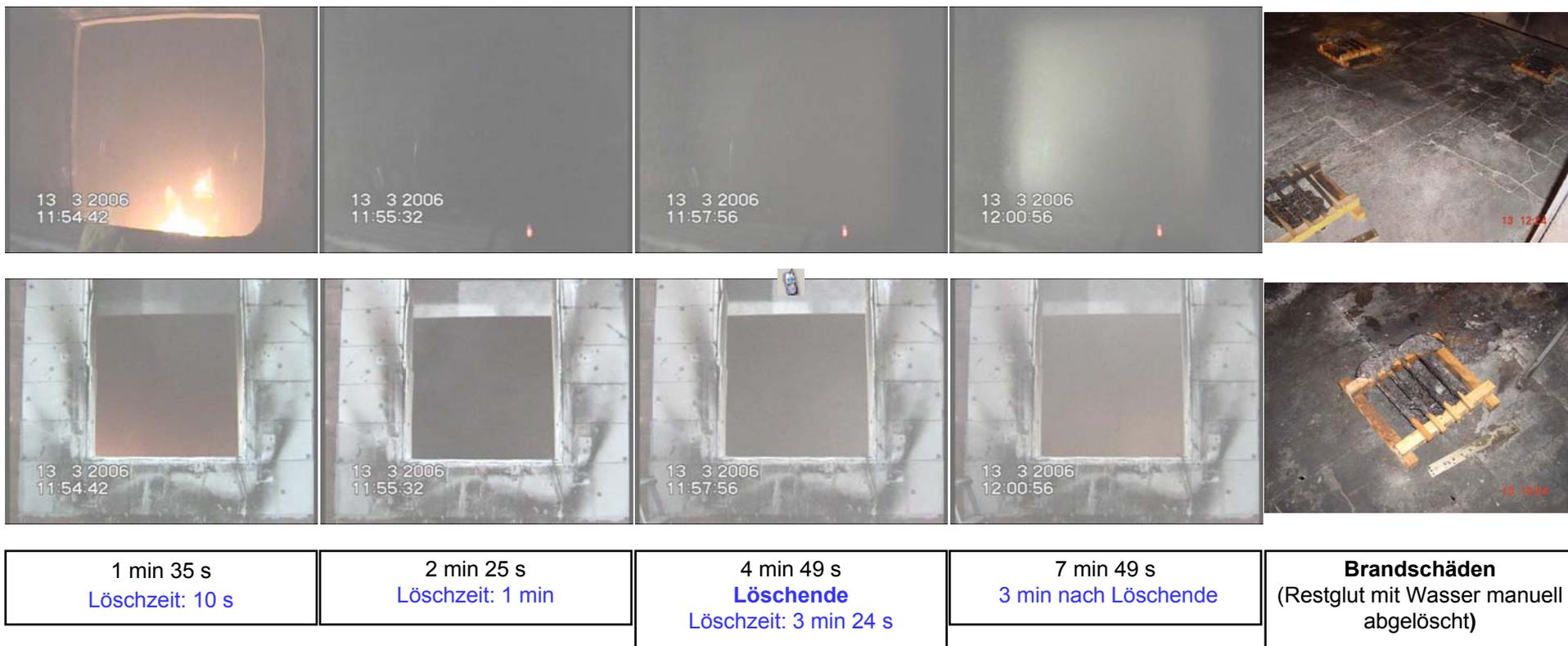


Bild 4.3: Versuch HDSC135B1 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

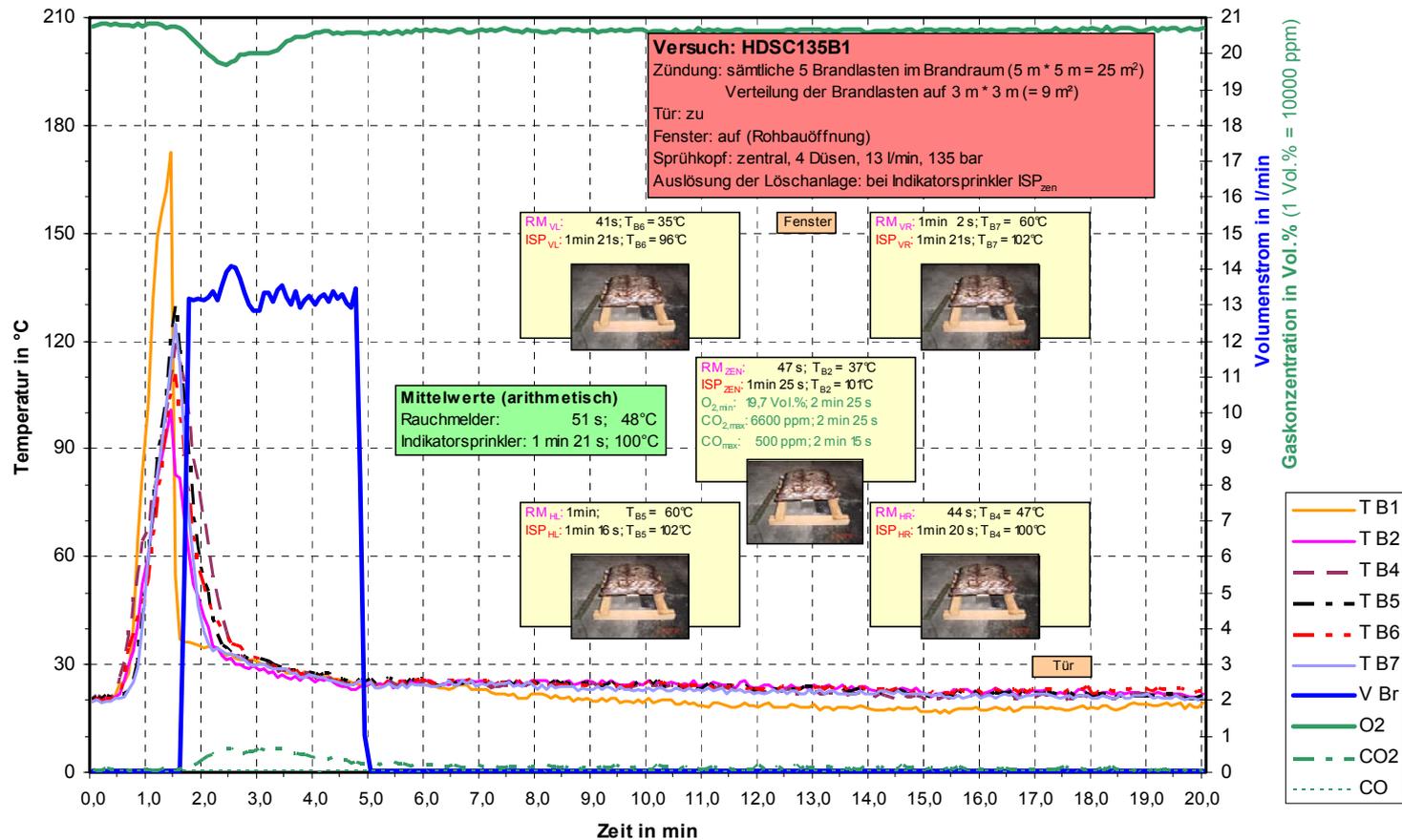


Bild 4.4: Versuch HDSC135B1 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Gefährdungen durch Brandrauch und Sauerstoffmangel bei Bränden

- **Sauerstoff:**
 - 12 Vol.-%: Sauerstoffmangelkrankheit: Kopfschmerzen, Gähnen, Konzentrationsmangel, rasche Ermüdbarkeit, Übelkeit, Sprachstörungen, Gangunsicherheit, Sehstörungen
 - 3 Vol.-%: baldiger Erstickungstod
- **Kohlendioxid:**
 - AGW-Wert: 5000 ppm*) (0,5 Vol.-%)
 - 3 - 4 Vol.-% (Kurzzeiteinwirk.): 300%ige Erhöhung der Atmung, leichtes Unbehagen
 - 5 - 6 Vol.-%: bei schnellem Anstieg der Konzentration: hämmernde Kopfschmerzen, Ohrensausen, Atemnot, Schweißausbruch, Ohnmacht
 - 12 - 15 Vol.-%: nach wenigen Minuten Atemstillstand, bewusstlos
- **Kohlenmonoxid:**
 - AGW-Wert: 30 ppm
 - 800 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 45 Min.
 - 1.600 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 20 Min.
 - 3.200 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 5 - 10 Minuten, Bewußtlosigkeit und Tod nach 20 Minuten
 - 6.400 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 2 - 3 Min., Tod nach 10 - 15 Min.
 - 12.000 ppm: Tod nach 5 Minuten

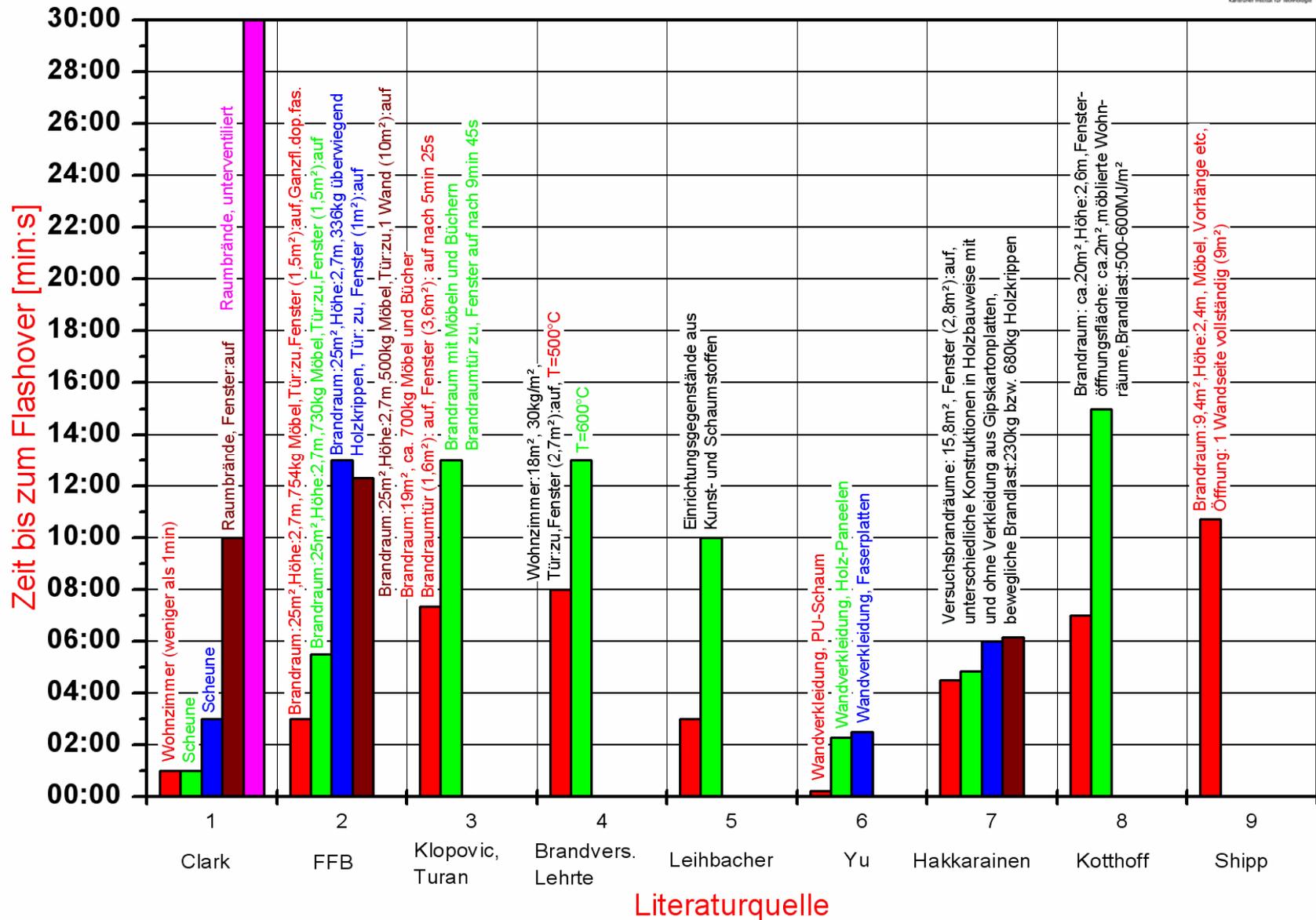
Beispiel: Wohnzimmerbrand an der FFB: **Brandraum in Massivbauweise - Flashover: ca. 3 Min.**

- Sauerstoff:** 12 Vol.% nach 2 min 40 s, 3 Vol% nach 4 min 42 s unterschritten
- Kohlendioxid:** 12 Vol.-% nach 3 min überschritten (Meßwert: max. ca. 200.000 ppm)
- Kohlenmonoxid:** 1.600 ppm nach 1 min 40 s, 3.200 ppm nach 2 min 25 s überschritten
12.000 ppm nach 2 min 54 s überschritten (Meßwert: über 50.000 ppm)

Die Gefahren durch die Brandrauchbestandteile Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe, Reizgase und sonstige Pyrolyseprodukte sind zusätzlich zu berücksichtigen. Wie diese Brandrauchbestandteile sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid und Kohlenmonoxidkonzentration in ihrer Zusammenwirkung den (menschlichen bzw. tierischen) Organismus schädigen, ist bis jetzt unzureichend geklärt.

*) 1 Vol.-% = 10.000 ppm **) Meßstelle: zentral, 1,5 m über dem Brandraumboden

Bild 4.5: Gefährdungen durch Brandrauch und Sauerstoffmangel bei Bränden nach Kunkelmann [10]



Literaturquelle

Bild 4.6: Zeit bis zum Auftreten des Flashovers nach Kunkelmann [10]

Versuch HDSC135B2: – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 2:

Holzkruppe: 2 kg

Kissen (Bezug und Füllung aus

Polyester): 325 g

Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Rauchmelder vorne rechts

1 min 30 s

Rauchmelder zentral

1 min 46 s

Rauchmelder hinten rechts

1 min 49 s

Rauchmelder vorne links

1 min 59 s

Rauchmelder hinten links

2 min 18 s

Bild 5.1: Versuch HDSC135B2 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC135B2: – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol)
 bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Ind.sprinkler vorne rechts
 3 min 4 s

Löschbeginn
 (keine Auslösung von
 Ind.sprinkler zentral -
 Auslösung der Löschanlage
 durch Versuchsleiter)
 8 min 58 s
 Löschzeit: 0 s

9 min 8 s
 Löschzeit: 10 s

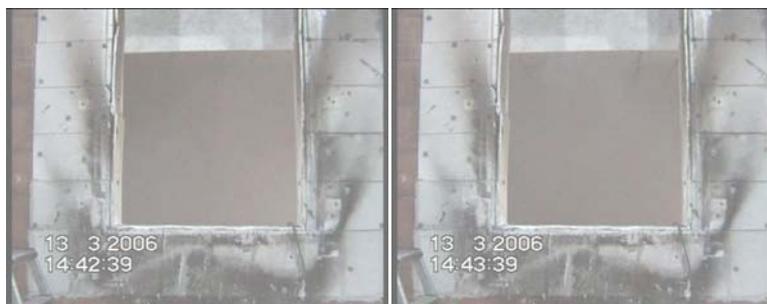
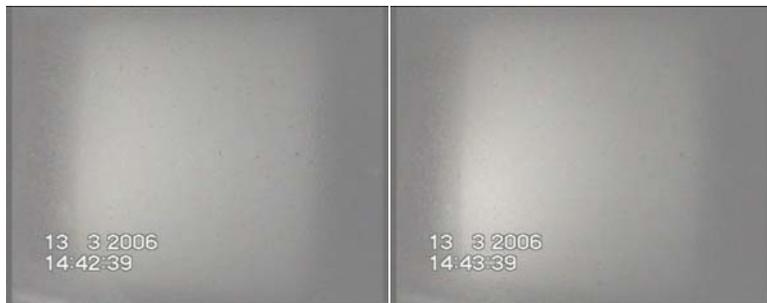
9 min 58 s
 Löschzeit: 1 min

13 min 58 s
 Löschzeit: 5 min

Versuch HDSC135B2: – Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung)

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



18 min 51 s
Löschende
 Löschzeit: 7 min 38 s

19 min 51 s
 1 min nach Löschende

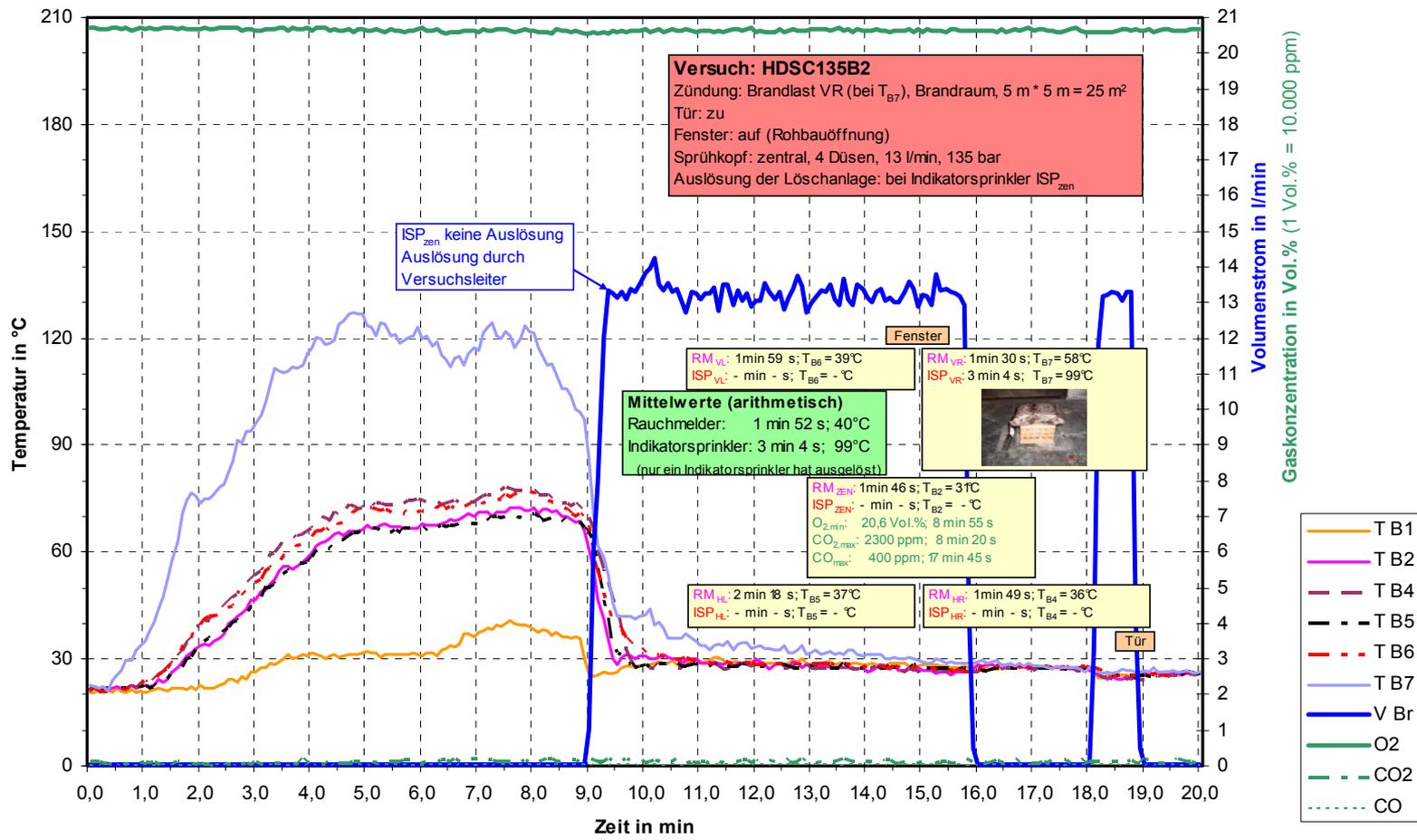


Bild 5.4: Versuch HDSC135B2 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC135B3: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 2:

Holzkruppe: 2 kg

Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g

Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Rauchmelder vorne rechts
über der Brandlast

2 min 6 s

Rauchmelder hinten rechts

2 min 33 s

Rauchmelder vorne links

2 min 34 s

Ind.sprinkler vorne rechts
über der Brandlast

2 min 42 s

Rauchmelder zentral

3 min 20 s

Bild 6.1 : Versuch HDSC135B3 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC135B3: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Rauchmelder hinten links

3 min 21 s

Ind.sprinkler vorne links

4 min 10 s

Ind.sprinkler zentral

6 min 44 s

Löschbeginn: 0 s

6 min 54 s

Löschzeit: 10 s

7 min 44 s

Löschzeit: 1 min

Versuch HDSC135B3: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol)
 bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.
 (Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)

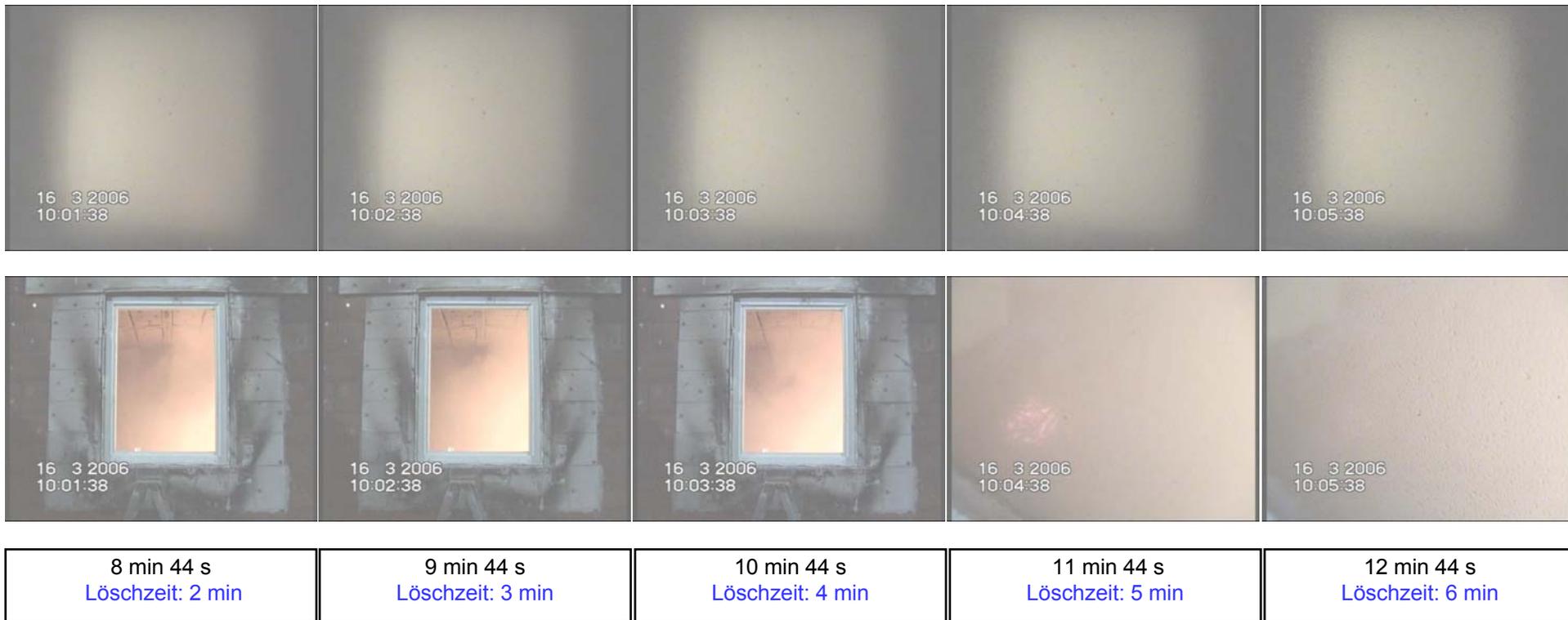
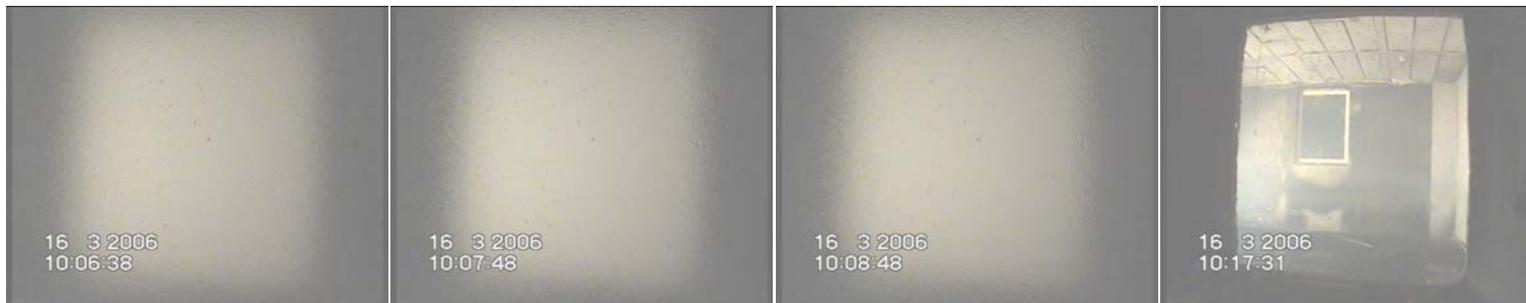


Bild 6.3: Versuch HDSC135B3 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC135B3: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol)
 bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.
 (Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:
 keine Löschwirkung bei der
 Holzkrippe (Restglut mit
 Wasser manuell abgelöscht)

13 min 44 s Löschzeit: 7 min	14 min 54 s Löschende: 8 min 10 s	15 min 54 s 1 min nach Löschende	24 min 37 s 9 min 43 s nach Löschende
---------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	--

Bild 6.4: Versuch HDSC135B3 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

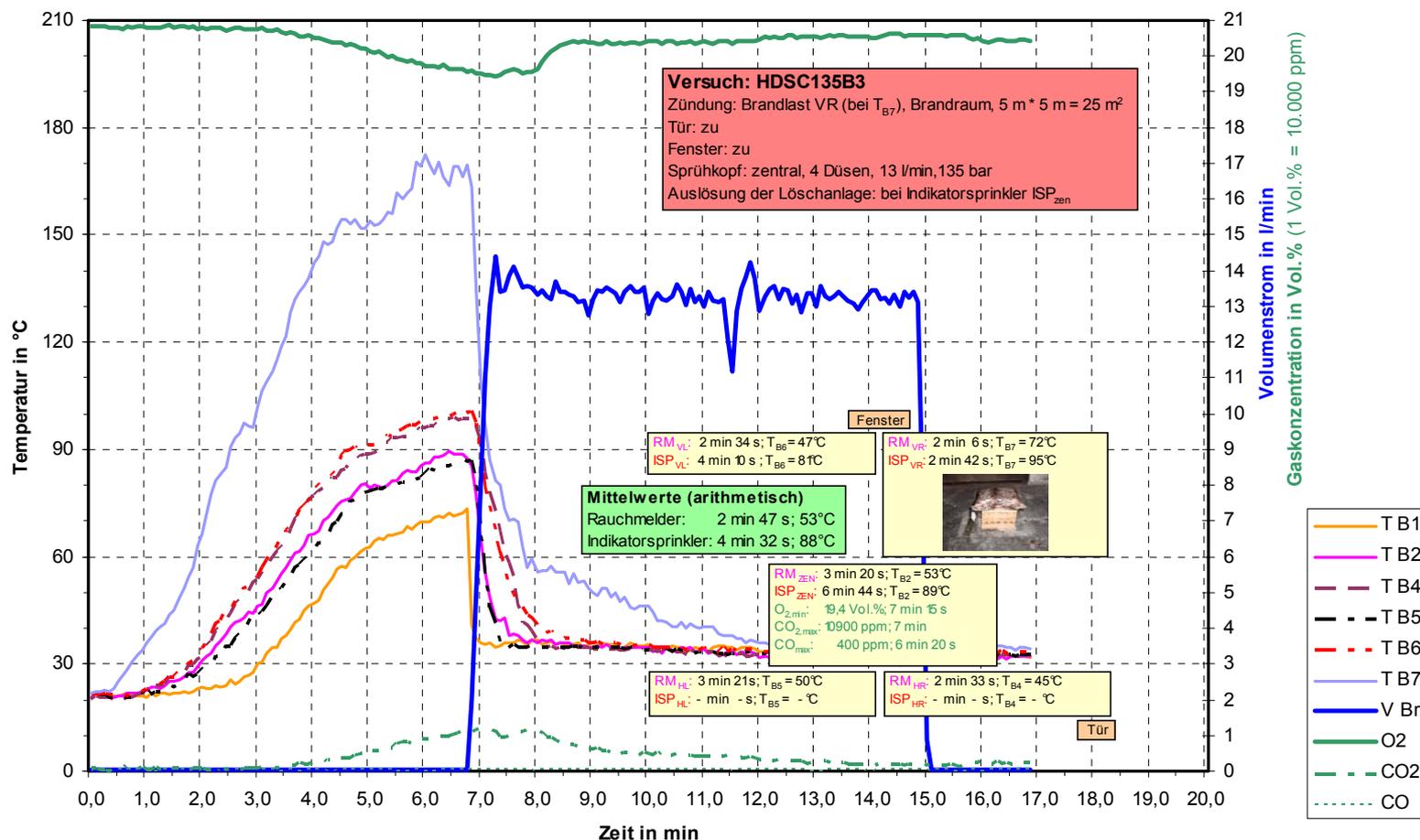


Bild 6.5: Versuch HDSC135B3 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC135B4: – Tür: auf, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 2:

- Holzkrippe: 2 kg
- Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g
- Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Rauchmelder vorne rechts	Ind.sprinkler vorne rechts	Rauchmelder hinten rechts	Rauchmelder vorne links	Rauchmelder hinten links
1 min 58 s	2 min 10 s	2 min 15 s	2 min 16 s	2 min 29 s

Bild 7.1: Versuch HDSC135B4 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC135B4: – Tür: auf, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol)
 bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.
 (Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



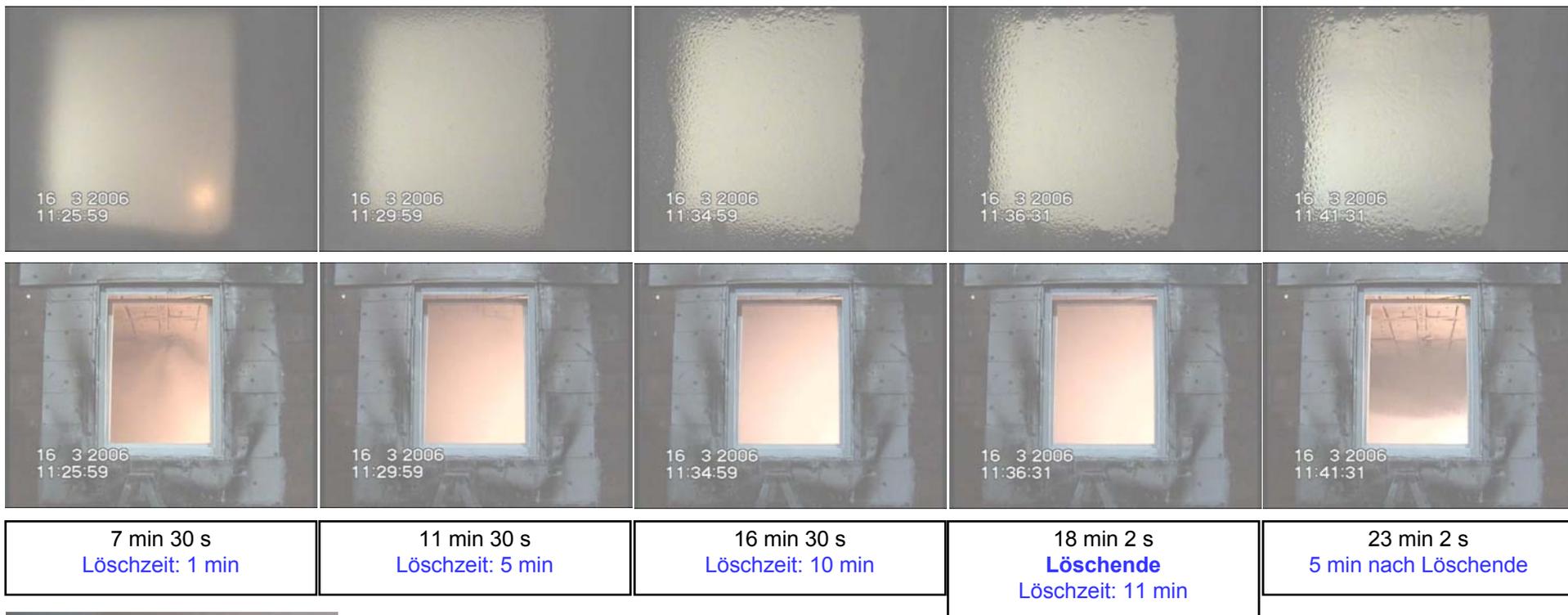
Rauchmelder zentral 2 min 34 s	Ind.sprinkler hinten rechts 4 min 39 s	Ind.sprinkler vorne links 4 min 48 s	Ind.sprinkler zentral 6 min 30 s	6 min 40 s Löschzeit: 10 s
			Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)	

Bild 7.2: Versuch HDSC135B4 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern B 29

Versuch HDSC135B4: – Tür: auf, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:
keine Löschwirkung bei der Holzkrippe
(Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

Bild 7.3: Versuch HDSC135B4 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

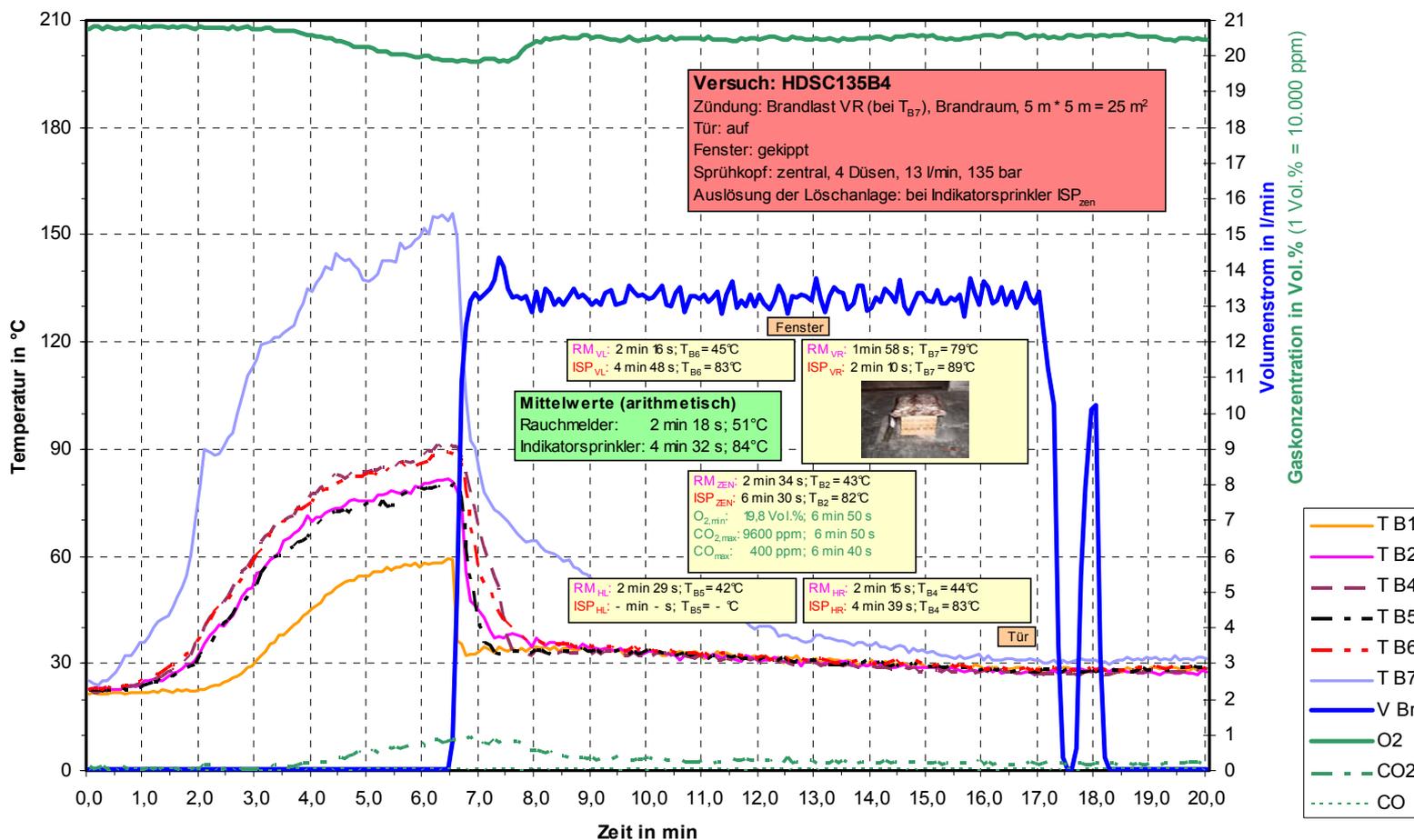


Bild 7.4: Versuch HDSC135B4 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC135B5: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 2:

Holzkruppe: 2 kg

Kissen (Bezug und Füllung aus

Polyester): 325 g

Zündwanne (100 mm * 100 mm *

10 mm): 50 ml Spiritus



Rauchmelder vorne rechts

2 min 58 s

Rauchmelder hinten rechts

3 min

Rauchmelder vorne links

3 min 11 s

Rauchmelder zentral

3 min 16 s

Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

3 min 26 s

Löschzeit: 10 s

Bild 8.1: Versuch HDSC135B5 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 17.3.2006 (nicht 17.4.2006)

Versuch HDSC135B5: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe Videoprints: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)

 17 3 2006 9:18:52	 17 3 2006 9:22:52	 17 3 2006 9:32:52	 17 3 2006 9:35:03	 17 3 2006 9:40:03
 17 4 2006 9:18:52	 17 4 2006 9:22:52	 17 4 2006 9:32:52	 17 4 2006 9:35:03	 17 4 2006 9:40:03
4 min 16 s Löschzeit: 1 min	8 min 16 s Löschzeit: 5 min	18 min 16 s Löschzeit: Löschpause (15 min)	20 min 27 s Löschende Löschzeit: 15 min 9 s	25 min 27 s 5 min nach Löschende



Brandschäden:
 nur geringe Löschwirkung bei der Holzkippe
 (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

Bild 8.2: Versuch HDSC135B5 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern
 Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 17.3.2006 (nicht 17.4.2006)

Versuch HDSC135B6: – Tür: zu, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 2:

- Holzkippe: 2 kg
- Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 325 g
- Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Rauchmelder hinten rechts 2 min 10 s	Rauchmelder hinten links 2 min 39 s	Rauchmelder vorne rechts 2min 47 s	Rauchmelder vorne links 3 min 10 s	Rauchmelder zentral 3 min 29 s
				Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

Bild 9.1: Versuch HDSC135B6 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern
 Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 17.3.2006 (nicht 17.4.2006)

Versuch HDSC135B6: – Tür: zu, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.
 (Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)

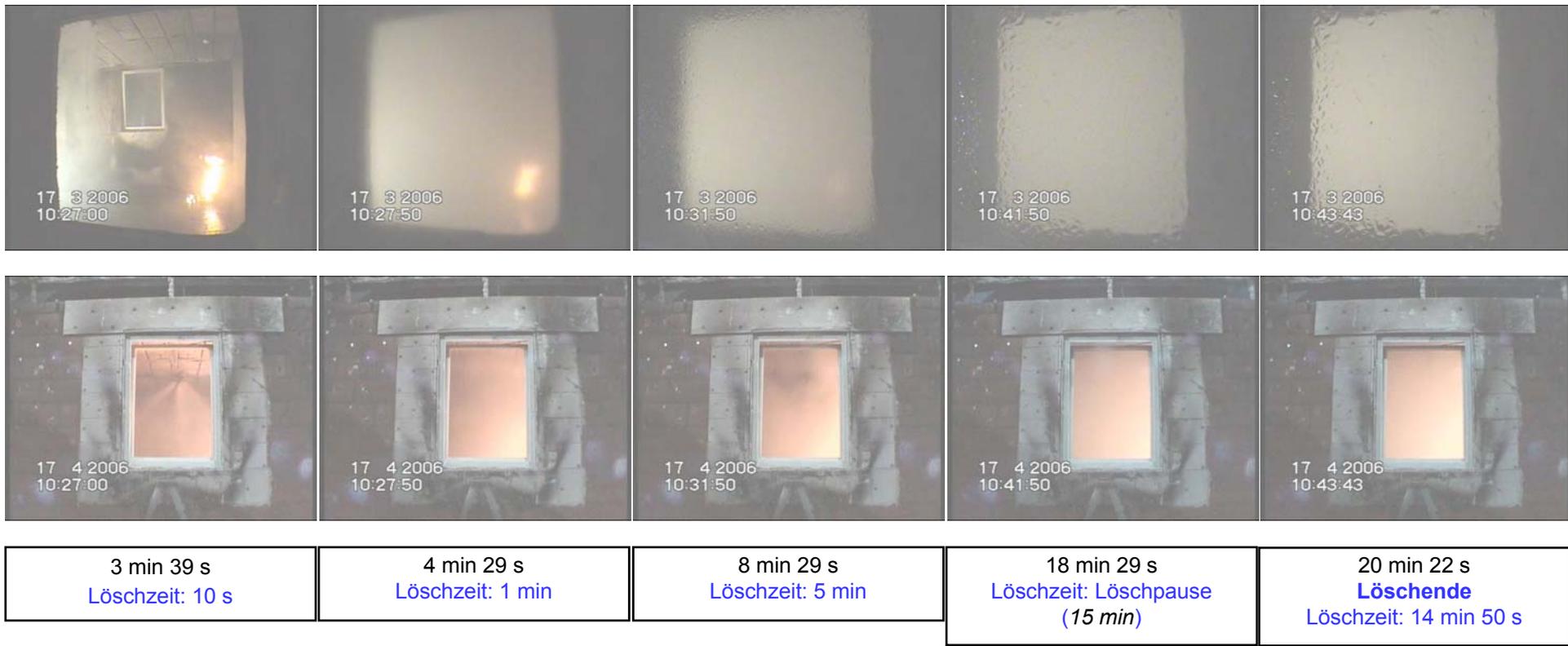


Bild 9.2: Versuch HDSC135B6 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 17.3.2006 (nicht 17.4.2006)

Versuch HDSC135B6: – Tür: zu, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:

nur geringe Löschwirkung bei der Holzkrippe
(Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

22 min 22 s
2 min nach Löschende

Bild 9.3: Versuch HDSC135B6 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 17.3.2006 (nicht 17.4.2006)

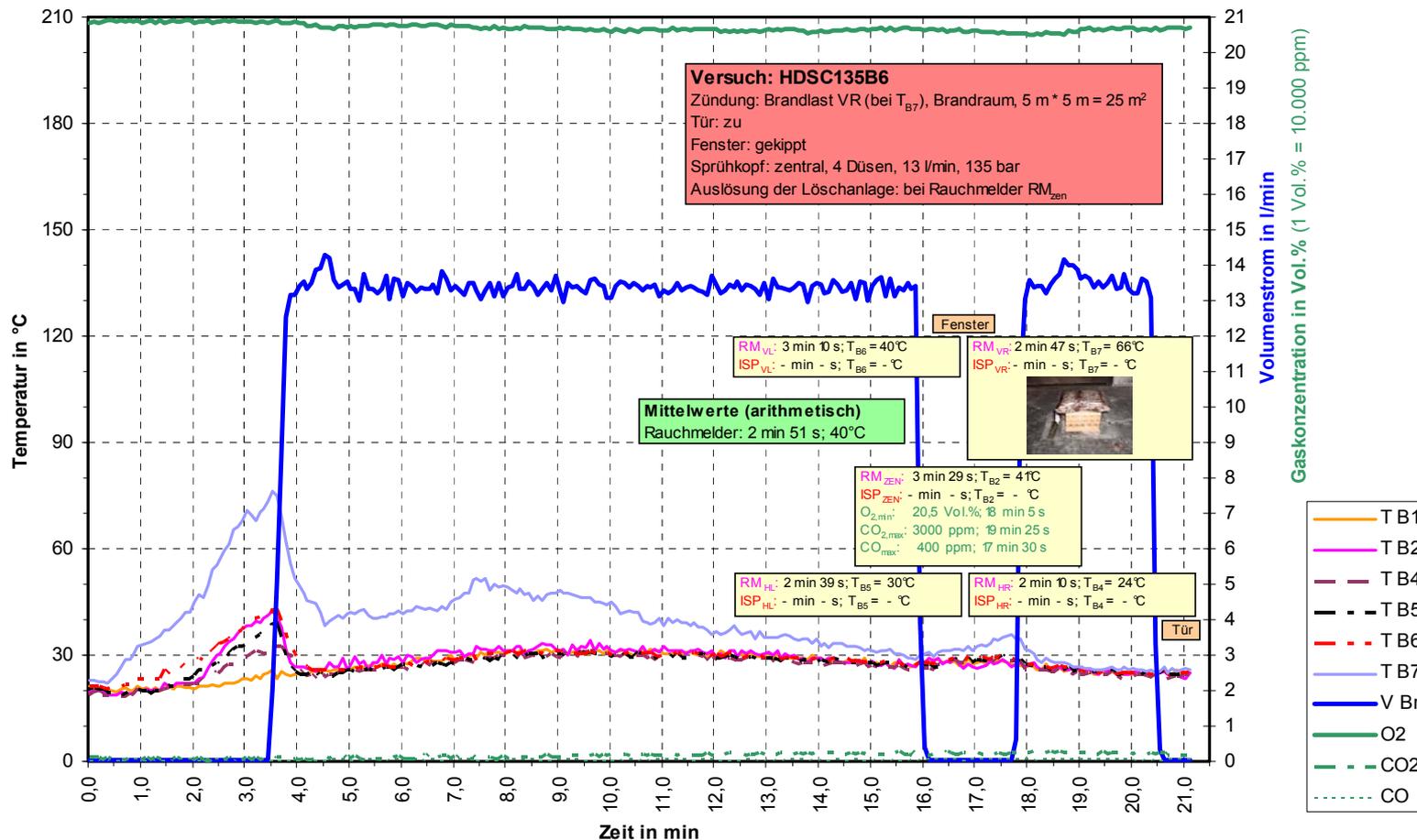


Bild 9.4: Versuch HDSC135B6 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC135B7: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



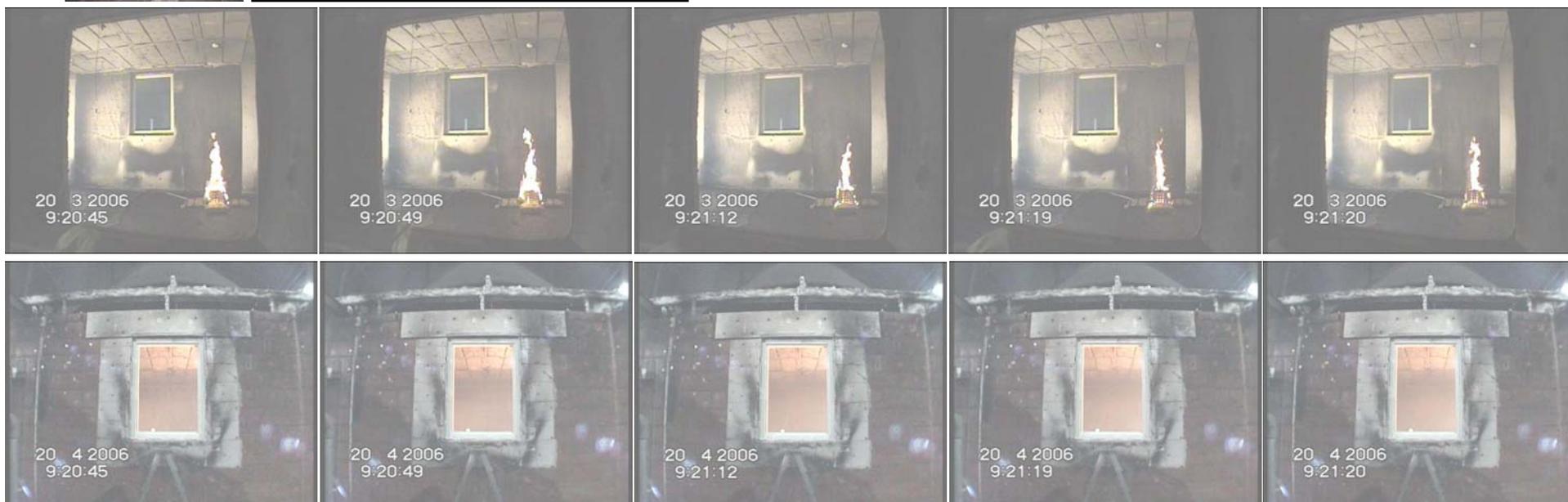
Brandlast Nr. 3:

Holzkruppe: 4 kg

5 Kissen (Bezug und Füllung aus

Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)

Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Ind.sprinkler vorne rechts

3 min 47 s

Rauchmelder hinten rechts

3 min 51 s

Rauchmelder vorne rechts

4 min 14 s

Rauchmelder vorne links

4 min 21 s

Rauchmelder zentral

4 min 22 s

Bild 10.1: Versuch HDSC135B7 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

Versuch HDSC135B7: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Rauchmelder hinten links

4 min 30 s

Ind.sprinkler vorne links

5 min 57 s

Ind.sprinkler zentral

6 min 52 s

Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

7 min 2 s

Löschzeit: 10 s

7 min 52 s

Löschzeit: 1 min

Bild 10.2: Versuch HDSC135B7 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

Versuch HDSC135B7: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:
 keine Löschwirkung bei der Holzkippe, die weitere Brandausbreitung auf den Kissen wird verhindert (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

11 min 52 s
 Löszeit: 5 min

21 min 52 s
 Löszeit: Löschpause
 (15 min)

24 min 2 s
Löschende
 Löszeit: 14 min 37 s

28 min 2 s
 4 min nach Löschende

Bild 10.3: Versuch HDSC135B7 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

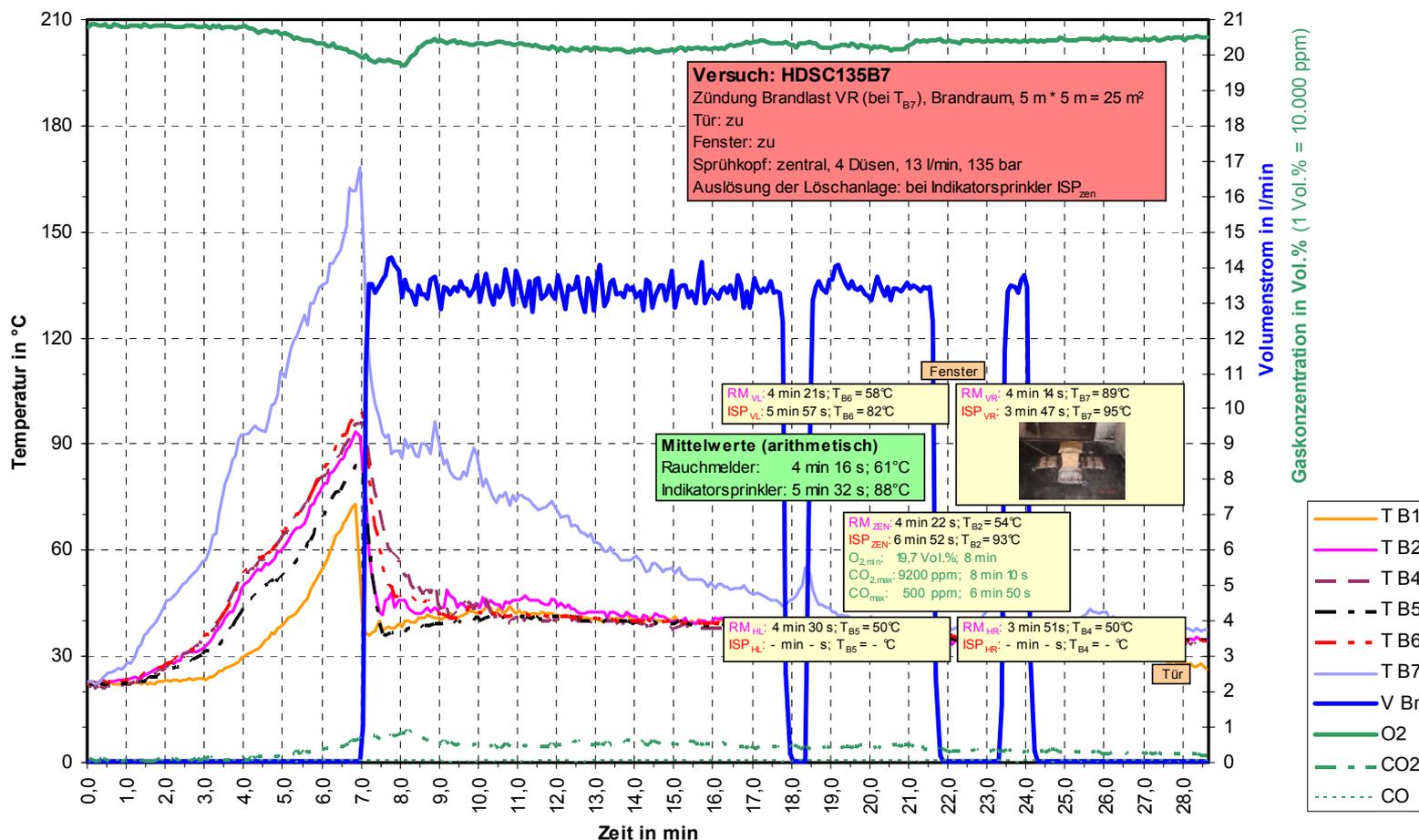


Bild 10.4: Versuch HDSC135B7 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Ansprechzeit eines foto-elektronischen Rauchmelders bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen im Treppenraum

Brand auf dem Podest der 1. Etage des Treppenraumes
(frühe Brandentwicklungsphase mit geringer Wärmefreisetzung vor Löschbeginn)
Rauchmelder: oberste (3.) Etage im Treppenraum, zentral im Treppenauge an der Decke

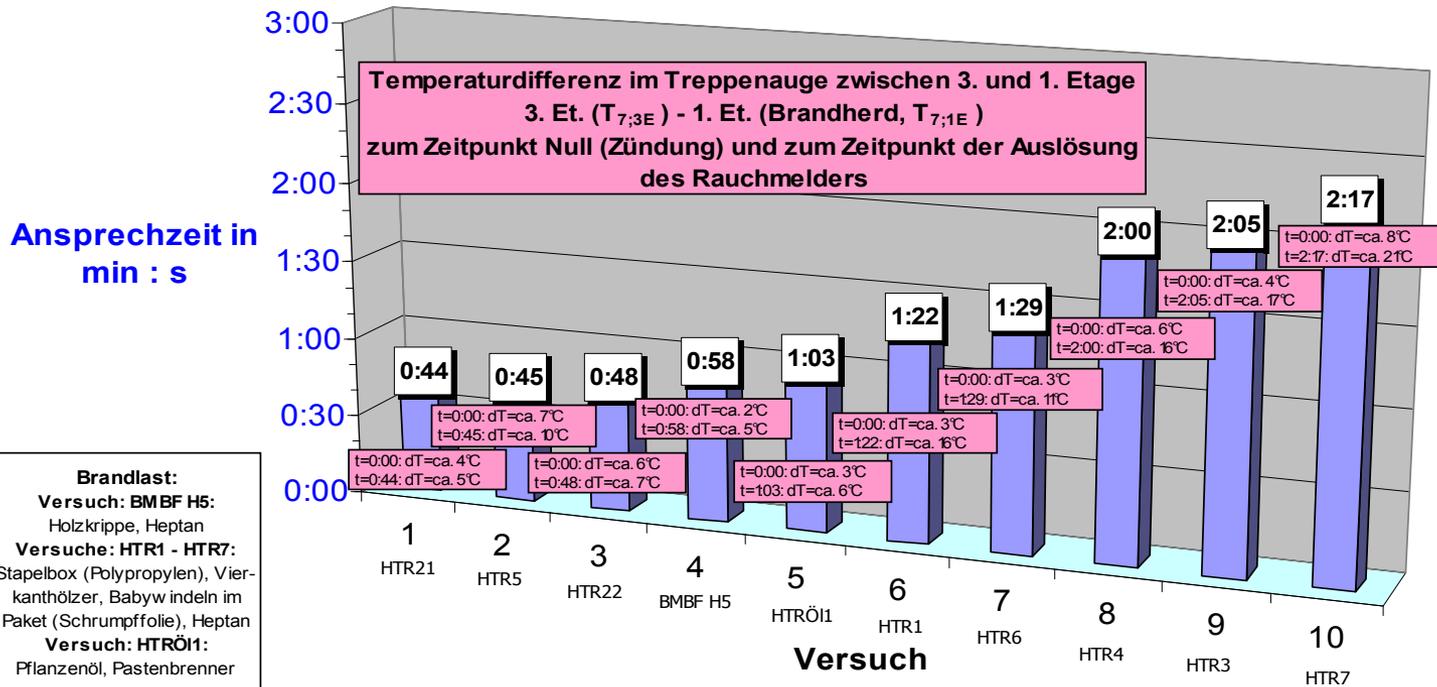


Bild 10.5: Ansprechzeiten eines fotot-elektronischen Rauchmelders bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen im Versuchstrepptenraum der FFB nach Kunkelmann [5]

Versuch HDSC135B8: – Tür: zu, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 3:

Holzkippe: 4 kg
 5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



Rauchmelder hinten rechts 1 min 41 s	Rauchmelder hinten links 2 min 6 s	Ind.sprinkler vorne rechts 4 min 41 s	Rauchmelder vorne rechts 4 min 52 s	Rauchmelder zentral 5 min 7 s
--	--	---	---	---

Bild 11.1: Versuch HDSC135B8 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

Versuch HDSC135B8: – Tür: zu, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.
(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Rauchmelder vorne links 5 min 7 s	Ind.sprinkler zentral 7 min 10 s Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)	7 min 20 s Löschzeit: 10 s	8 min 10 s Löschzeit: 1 min	12 min 10 s Löschzeit: 5 min
---	---	--------------------------------------	---------------------------------------	--

Bild 11.2: Versuch HDSC135B8 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz
Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006) B 45

Versuch HDSC135B8: – Tür: zu, Fenster: Fenster gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indicatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:

nur geringe Löschwirkung bei der Holzkippe, die weitere Brandausbreitung auf den Kissen wird verhindert (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

17 min 10 s
Löschzeit: 10 min

21 min
Löschende
Löschzeit: 13 min

24 min
3 min nach Löschende

Bild 11.3: Versuch HDSC135B8 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

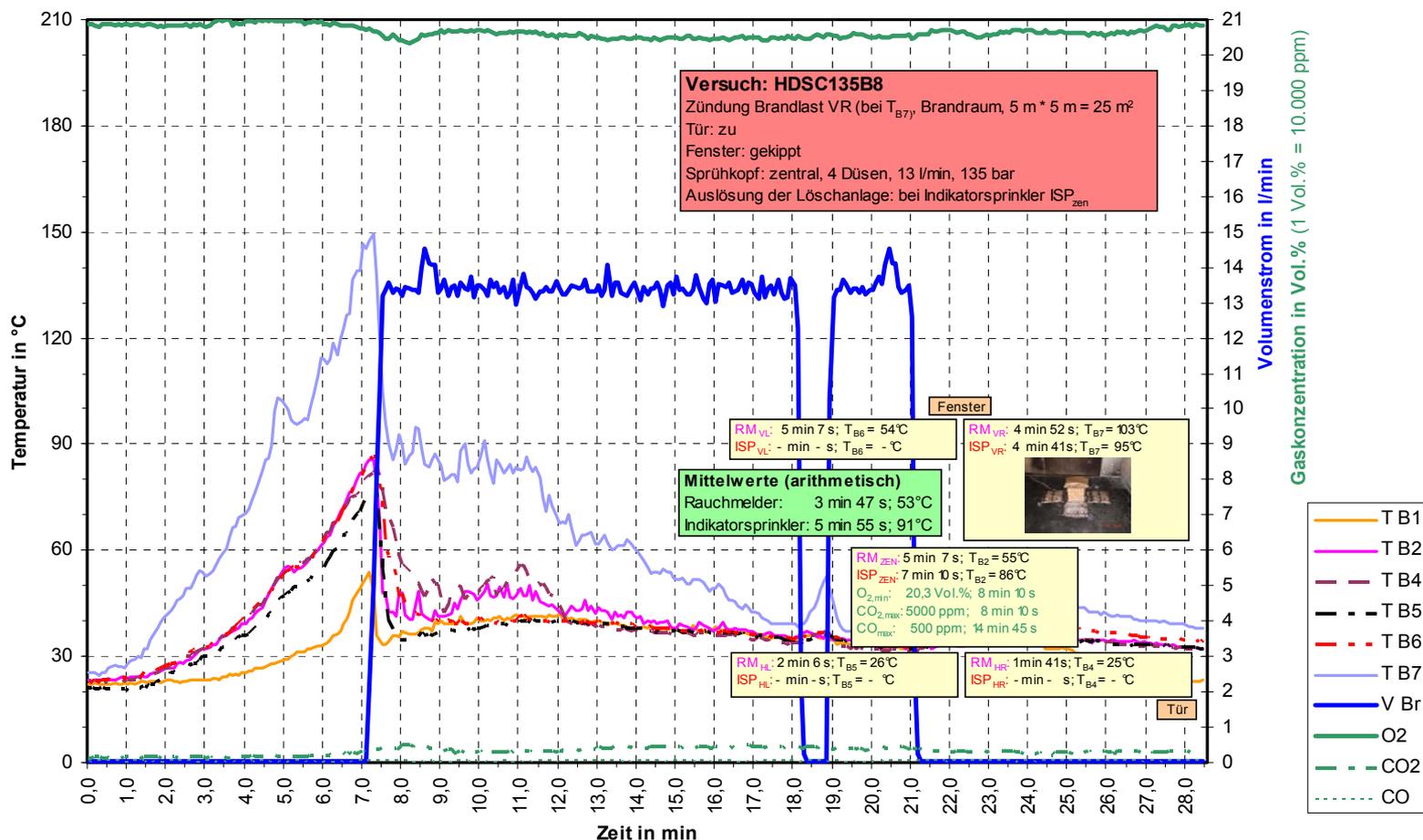


Bild 11.4: Versuch HDSC135B8 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC135B9: – Tür: zu, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 3:

Holzkippe: 4 kg
 5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus

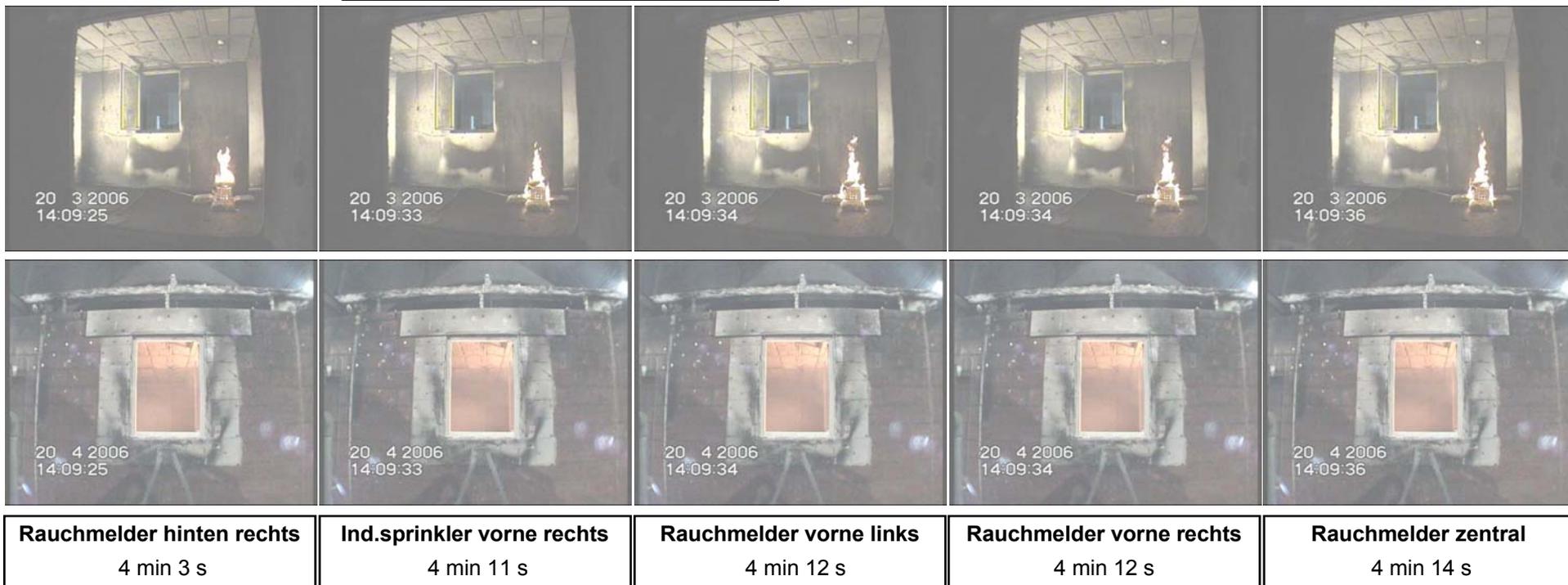


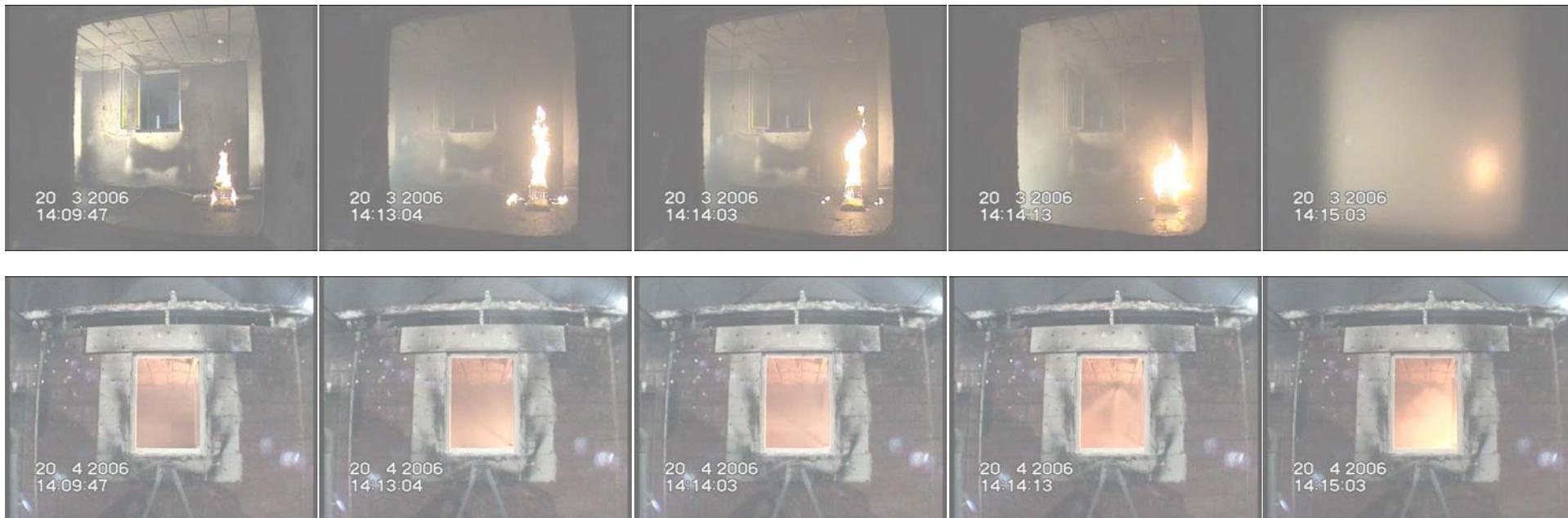
Bild 12.1: Versuch HDSC135B9 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

Versuch HDSC135B9: – Tür: zu, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Rauchmelder hinten links
4 min 25 s

Ind.sprinkler hinten rechts
7 min 42 s

Ind.sprinkler zentral
8 min 41 s
Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

8 min 51 s
Löschzeit: 10 s

9 min 41 s
Löschzeit: 1 min

Bild 12.2: Versuch HDSC135B9 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

Versuch HDSC135B9: – Tür: zu, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indicatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:
 keine Löschwirkung bei der Holzkrippe, die weitere Brandausbreitung auf den Kissen wird verhindert
 (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

13 min 41 s Löschzeit: 5 min	18 min 41 s Löschzeit: 10 min	22 min 45 s Löschende Löschzeit: 12 min	24 min 45 s 2 min nach Löschende
---------------------------------	----------------------------------	--	-------------------------------------

Bild 12.3: Versuch HDSC135B9 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 20.3.2006 (nicht 20.4.2006)

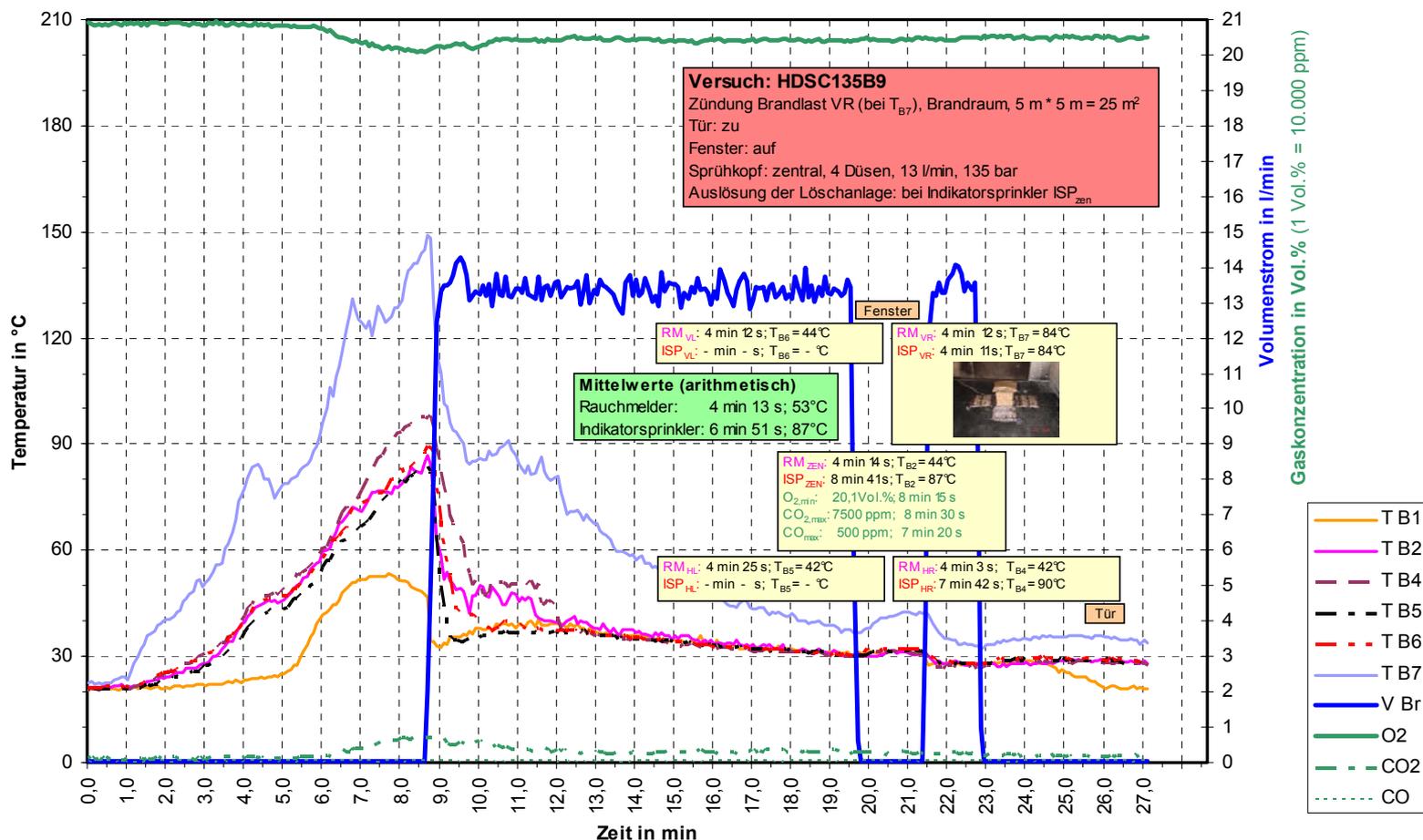


Bild 12.4: Versuch HDSC135B9 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC135B10: – Tür: auf, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 3:
 Holzkrippe: 4 kg
 5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus



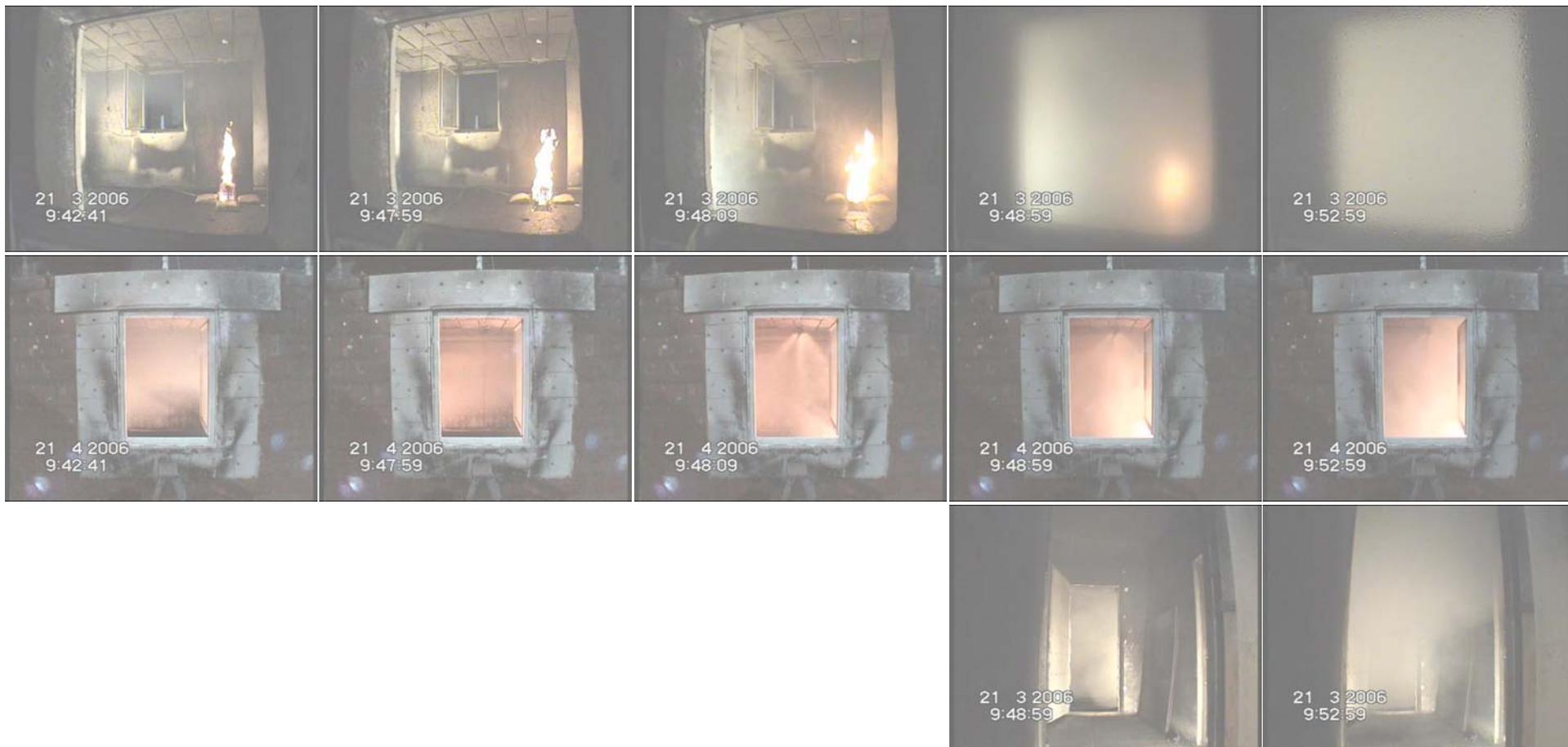
Rauchmelder vorne rechts	Rauchmelder vorne links	Rauchmelder hinten rechts	Rauchmelder hinten links	Rauchmelder zentral
3 min 43 s	4 min 23 s	4 min 40 s	5 min 6 s	5 min 24 s

Bild 13.1: Versuch HDSC135B10 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern
 Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 21.3.2006 (nicht 21.4.2006)

Versuch HDSC135B10: – Tür: auf, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, mittlere Reihe: Fenster, untere Reihe: Tür)



Ind.sprinkler vorne rechts
5 min 34 s

Ind.sprinkler zentral
10 min 52 s
Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

11 min 2 s
Löschzeit: 10 s

11 min 52 s
Löschzeit: 1 min

15 min 52 s
Löschzeit: 5 min

Bild 13.2: Versuch HDSC135B10 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern
 Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 21.3.2006 (nicht 21.4.2006)

Versuch HDSC135B10: – Tür: auf, Fenster: auf

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, mittlere Reihe: Fenster, untere Reihe: Tür)



Brandschäden:

keine Löschwirkung bei der Holzkrippe, die weitere Brandausbreitung auf den Kissen wird verhindert (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

20 min 52 s
Löschzeit: Löschpause
(10 min)

24 min 7 s
Löschende
Löschzeit: 11 min 43 s

26 min 7 s
2 min nach Löschende

Bild 13.3: Versuch HDSC135B10 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Berichtigung: Fehler bei Frontfenster-Videoprints - Datumsangabe: 21.3.2006 (nicht 21.4.2006)

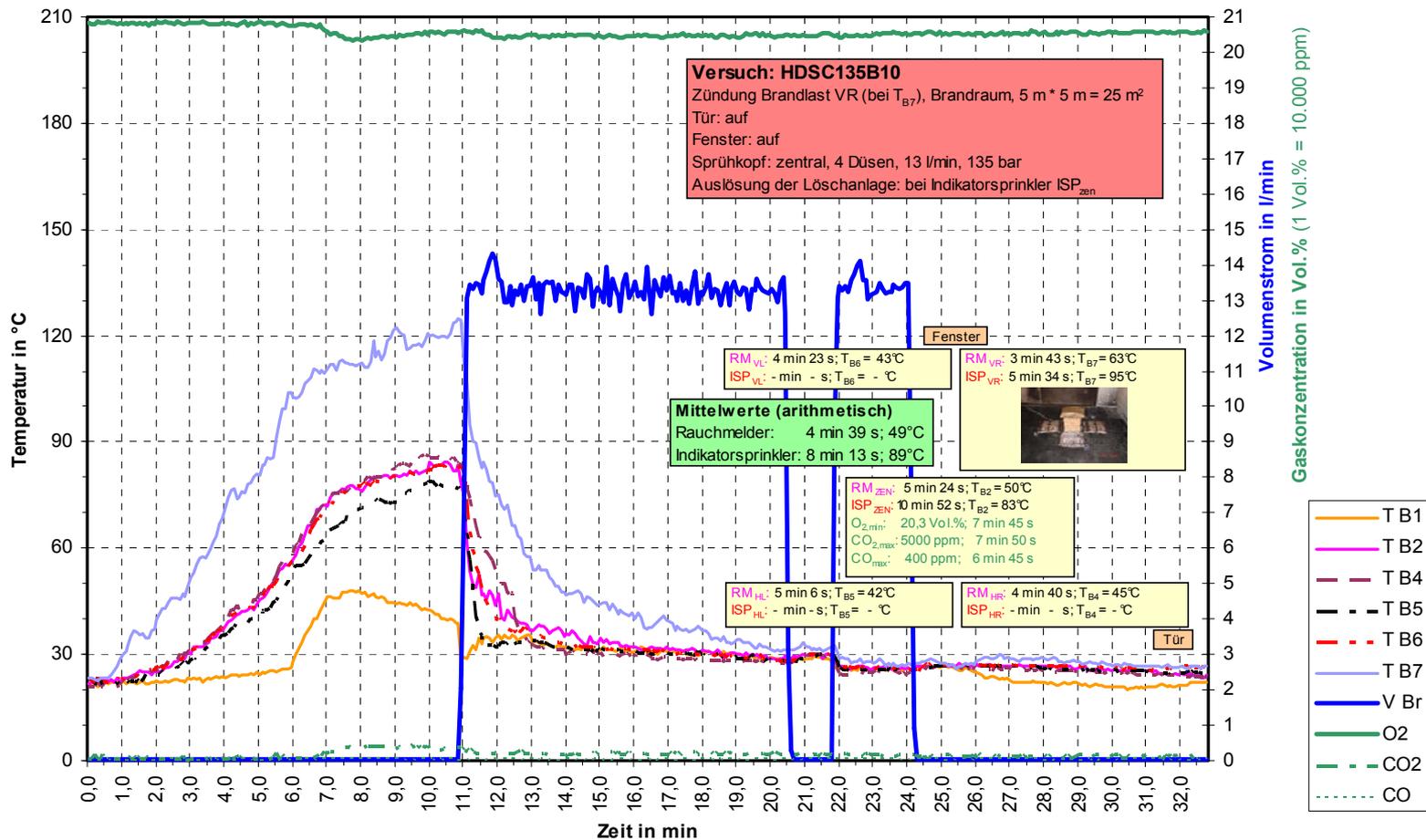


Bild 13.4: Versuch HDSC135B10 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC80B1: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 3:
 Holzkrippe: 4 kg
 5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus

 16 3 2006 14:23:12	 16 3 2006 14:23:38	 16 3 2006 14:23:50	 16 3 2006 14:23:52	 16 3 2006 14:24:09
 16 3 2006 14:23:12	 16 3 2006 14:23:38	 16 3 2006 14:23:50	 16 3 2006 14:23:52	 16 3 2006 14:24:09
Rauchmelder vorne rechts 1 min 41 s	Rauchmelder hinten rechts 2 min 7 s	Rauchmelder vorne links 2 min 19 s	Rauchmelder zentral 2 min 21 s	Rauchmelder hinten links 2 min 38 s

Bild 14.1: Versuch HDSC80B1 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC80B1: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



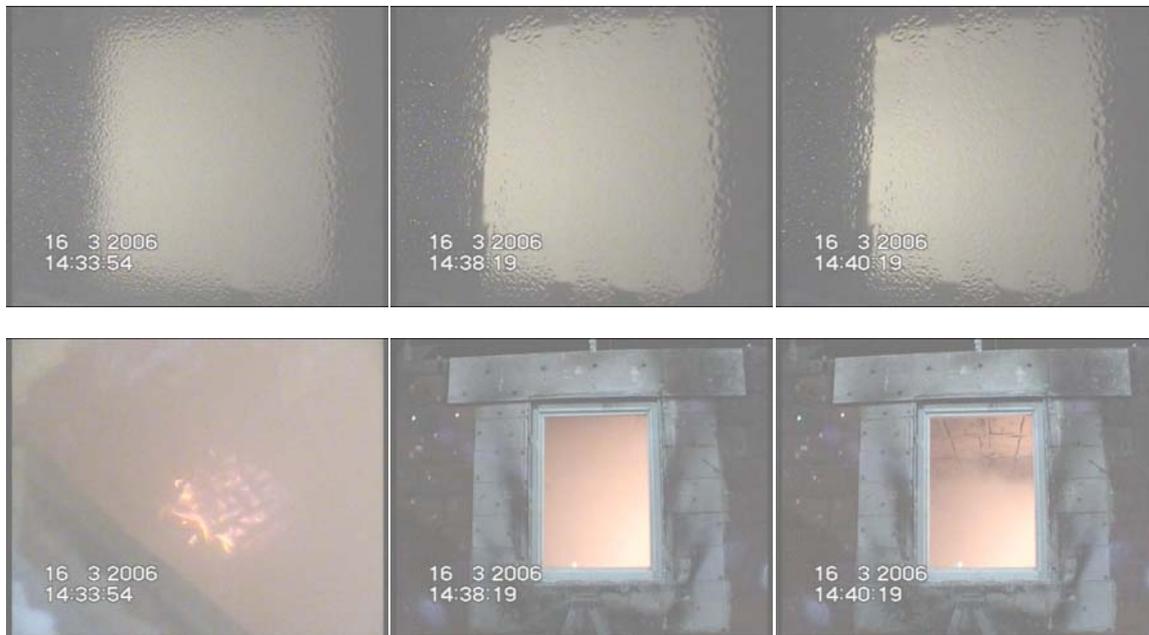
Ind.sprinkler vorne rechts 2 min 46 s	Ind.sprinkler hinten rechts 4 min 32 s	Ind.sprinkler zentral 7 min 23 s Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)	7 min 33 s Löschzeit: 10 s	8 min 23 s Löschzeit: 1 min
---	--	---	--------------------------------------	---------------------------------------

Bild 14.2: Versuch HDSC80B1 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern B 57

Versuch HDSC80B1: – Tür: zu, Fenster: zu

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



12 min 23 s Löschzeit: 5 min	16 min 48 s Löschende Löschzeit: 9 min 25 s	18 min 48 s 2 min nach Löschende
---------------------------------	--	-------------------------------------

Brandschäden:
keine Löschwirkung bei der Holzkrippe (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

Bild 14.3: Versuch HDSC80B1 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern B 58

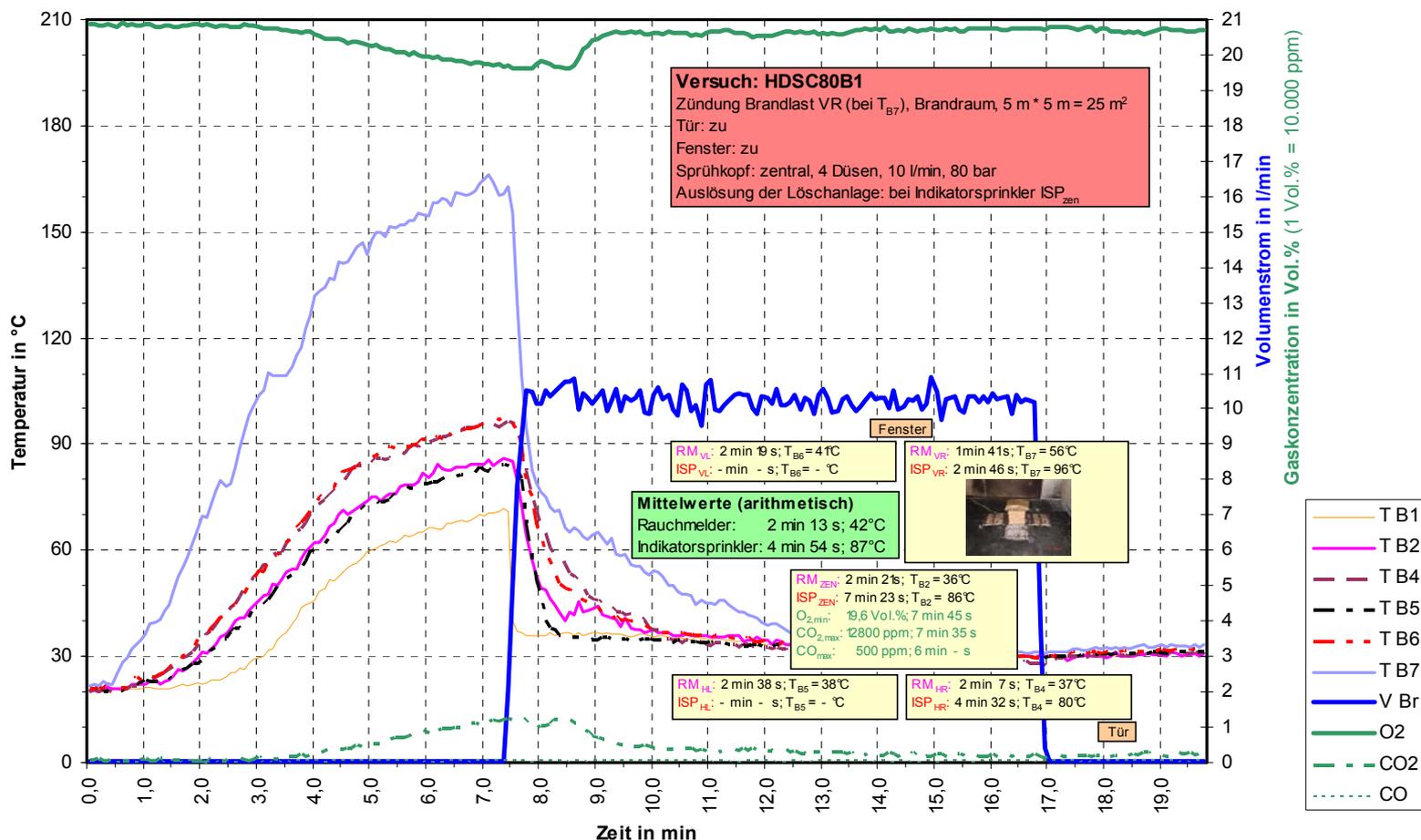


Bild 14.4: Versuch HDSC80B1 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperaturen, Branddetektion, Löscheinsatz

Versuch HDSC80B2: – Tür: zu, Fenster: gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandlast Nr. 3:

Holzkippe: 4 kg
 5 Kissen (Bezug und Füllung aus Polyester): 1,625 kg (5 * 0,325 kg)
 Zündwanne (100 mm * 100 mm * 10 mm): 50 ml Spiritus

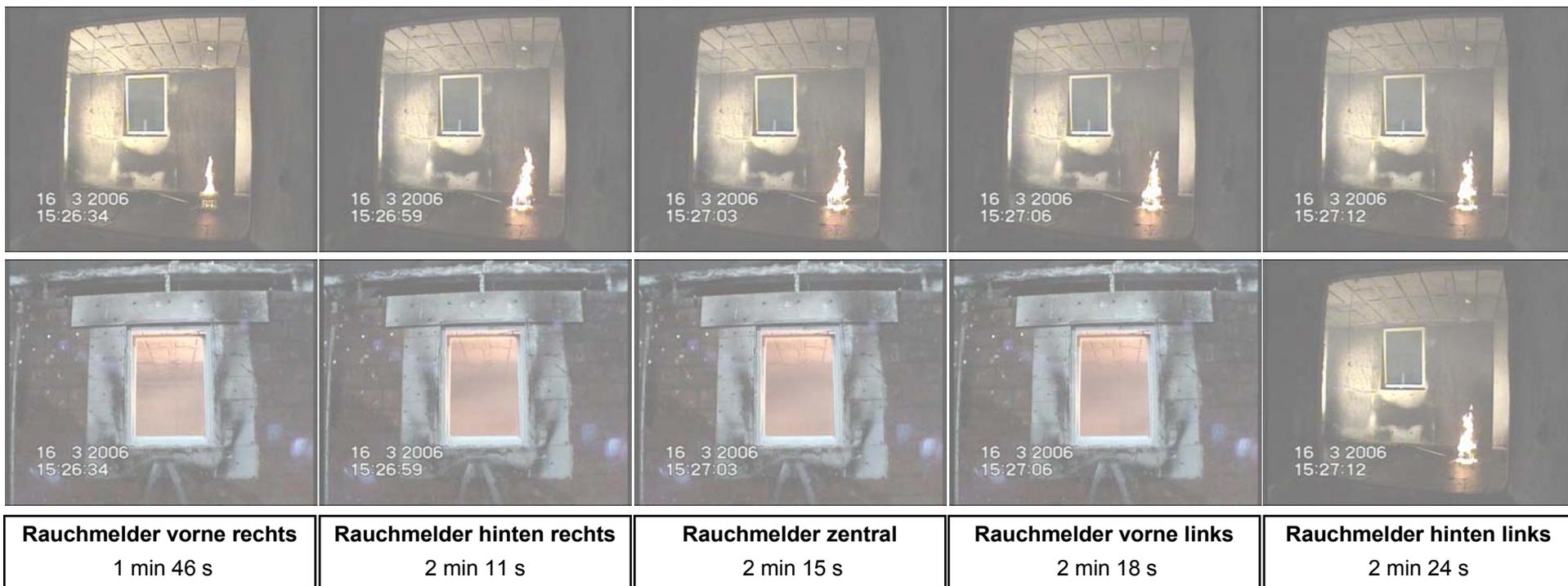


Bild 15.1: Versuch HDSC80B2 – Brandentwicklung u. Verrauchung bei der Auslösung von Rauchmeldern u. Indikatorsprinklern

Versuch HDSC80B2: – Tür: zu, Fenster: gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol)
 bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Ind.sprinkler vorne rechts
 2 min 45 s

Ind.sprinkler vorne links
 4 min 14 s

Ind.sprinkler hinten rechts
 5 min 5 s

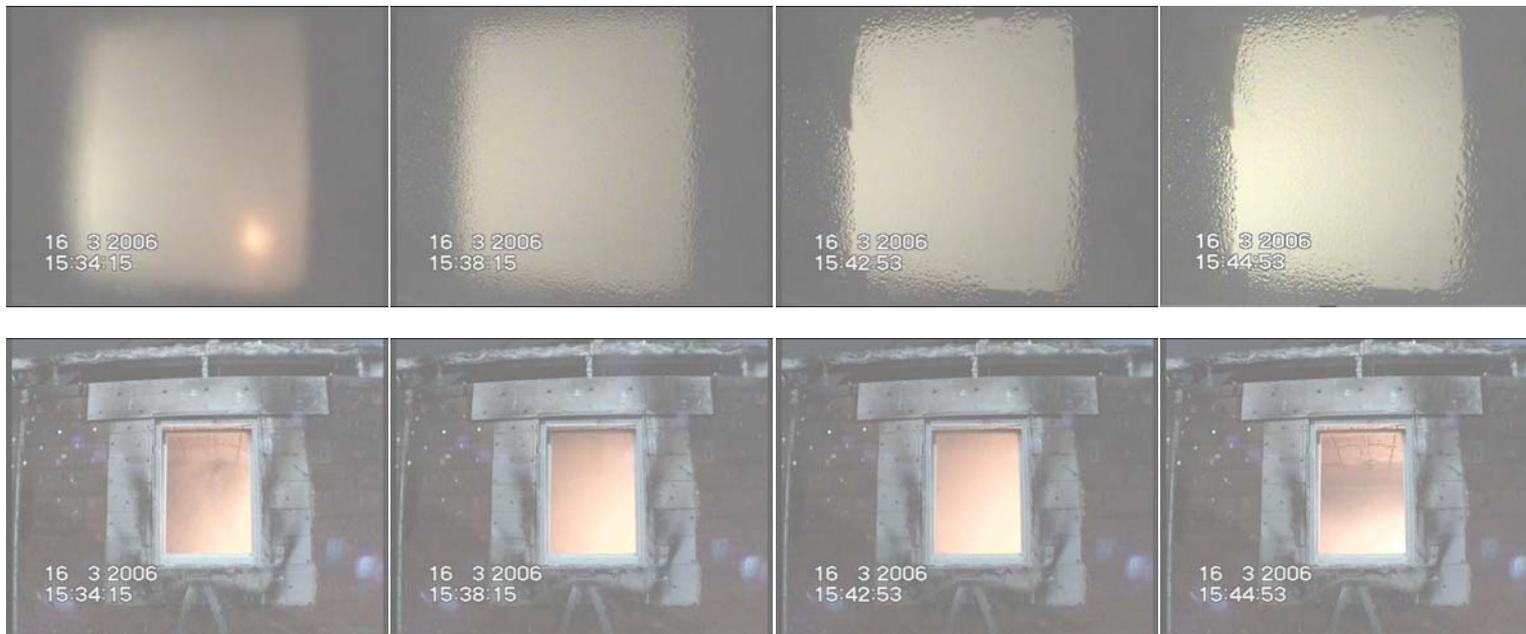
Ind.sprinkler zentral
 8 min 27 s
Löschbeginn (Löschzeit: 0 s)

8 min 37 s
Löschzeit: 10 s

Versuch HDSC80B2: – Tür: zu, Fenster: gekippt

Brandentwicklung u. Verrauchung (Sprühnebel / Wasserdampf / Brandrauch aerosol) bei der Auslösung von Rauchmeldern und Indikatorsprinklern.

(Obere Reihe: Beobachtungsfenster, untere Reihe: Fenster)



Brandschäden:
 keine Löschwirkung bei der Holzkippe
 (Restglut mit Wasser manuell abgelöscht)

9 min 27 s
 Löszeit: 1 min

13 min 27 s
 Löszeit: 5 min

18 min 5 s
Löschende
 Löszeit: 9 min 8 s

20 min 5 s
 2 min nach Löschende

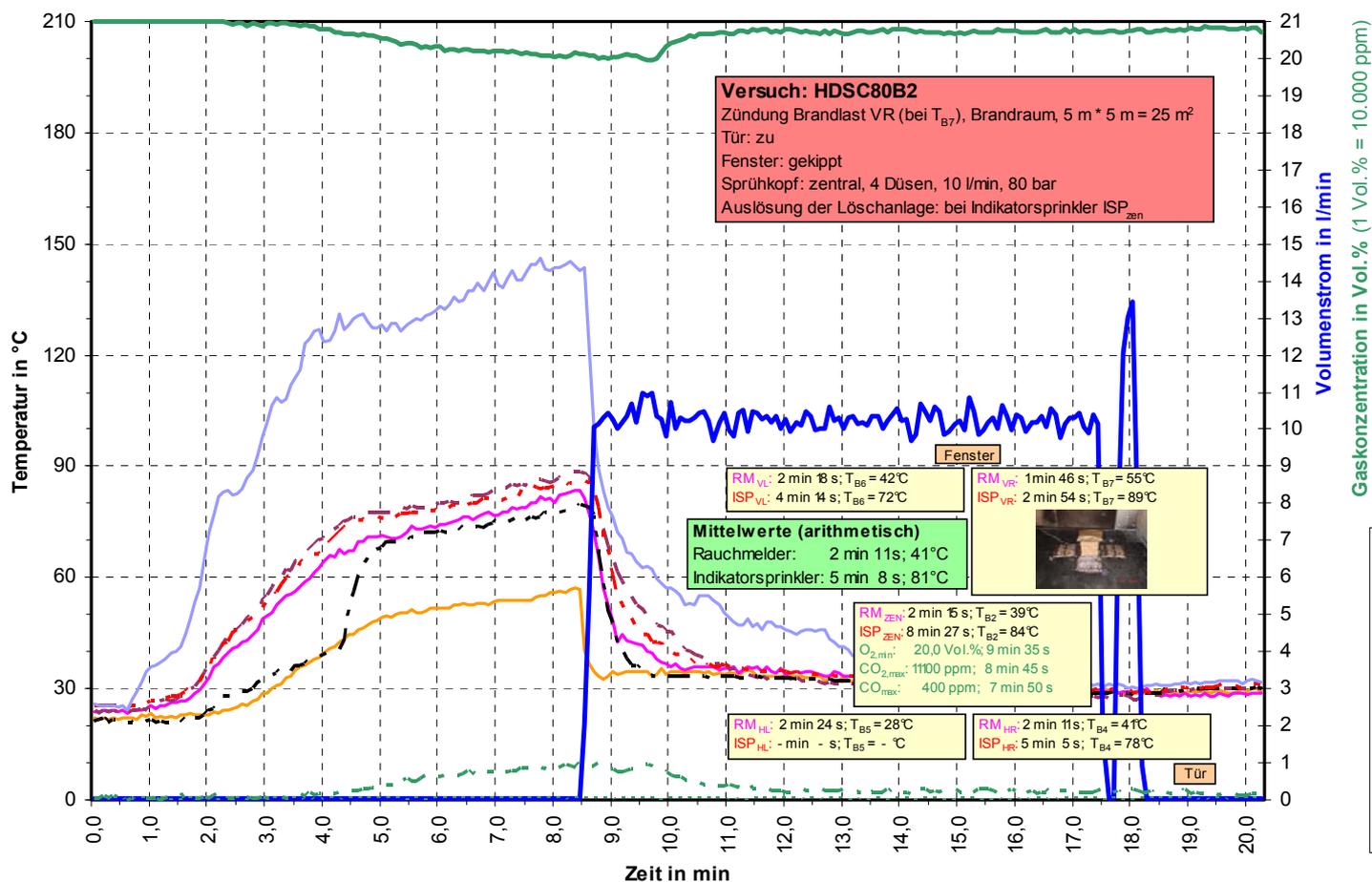
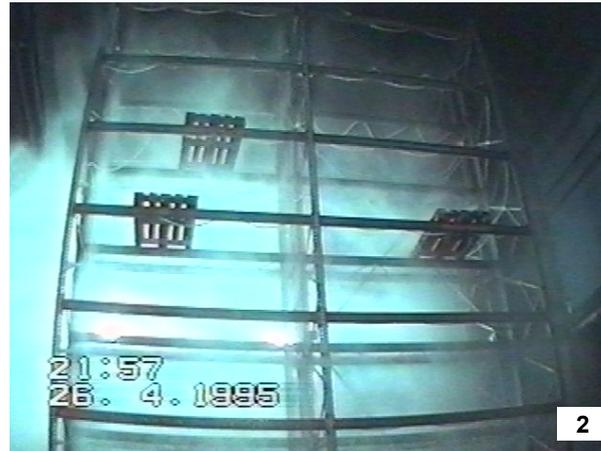


Bild 15.4: Versuch HDSC80B2 – Zeitlicher Verlauf und Auslösezeiten: Temperatur, Branddetektion, Löscheinsatz

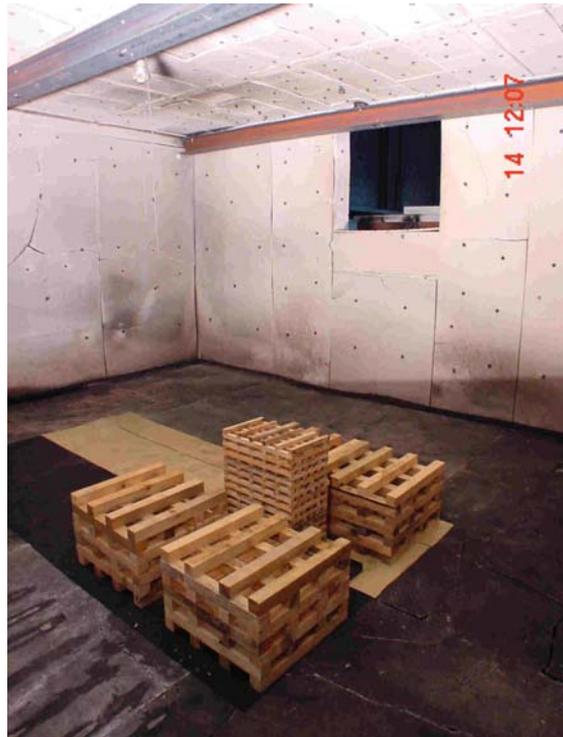
Kaltsprühversuche mit Niederdruck-Wassernebel (Betriebsdruck: 4 bar)



- 1 Versuchshalle - Sprühkopf mit 5 Düsen
- 2 Hochregallager - 3 Steigrohre mit Sprühköpfen
- 3, 4, 5 Brandraum des Versuchsholzgebäudes – Sprühkopf mit 5 Düsen
- 6 Holztreppenraum – Sprühkopf mit 1 Düse zentral

Bild 16: Kaltsprühversuche mit Niederdruck-Wassernebel (Betriebsdruck: 4 bar) nach Kunkelmann [3]

Versuche mit Niederdruck-Wassernebel



Brandraum (25 m²) mit Stahlträgern an der Decke, Fensteröffnung (Rohbauöffnung: 1 m²) und Niederdruck-Wassernebelsprühkopf (zentral), bei Versuch 4 zusätzlich Rauchmelder (zentral) neben dem Sprühkopf (hier nicht abgebildet)

Brandlast: ca. 100 kg (Holzkrippen: 88 kg, Linoleum: 10,5 kg, Nadelfilzteppichboden: 1,1 kg, Zündwanne mit 0,5 l Heptan)

Niederdruck-Wassernebelsprühkopf (5 Einzeldüsen)

- Betriebsdruck: 8,4 bar (Versuch 2)
87 l/min gesamt (17,4 l/min je Einzeldüse)
Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung: 1 m²)
- Betriebsdruck: 4,1 bar (Versuch 4)
62 l/min gesamt (12,4 l/min je Einzeldüse)
Tür: zu, Fenster: auf (Rohbauöffnung: 1 m²)

Versuch mit Niederdruck-Wassernebel

(Versuch 2: 8,4 bar, 87 l/min)



1 min 30 s

Beobachtungsfenster



6 min 27 s

Beobachtungsfenster

Löschbeginn: 0 s

(manuelle Auslösung der Löschanlage bei 200°C an der Oberkante der Fensteröffnung)



6 min 27 s

Fensteröffnung

Löschbeginn: 0 s



6 min 30 s nach Zündung

Beobachtungsfenster

Löschzeit: 3 s



6 min 57 s nach Zündung

Beobachtungsfenster

Löschzeit: 30 s



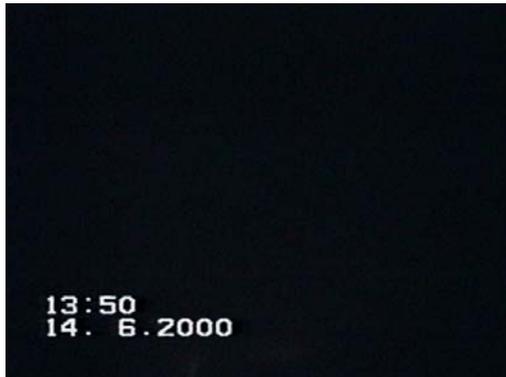
6 min 57 s nach Zündung

Fensteröffnung

Löschzeit: 30 s

Versuch mit Niederdruck-Wassernebel

(Versuch 2: 8,4 bar, 87 l/min)



7 min 27 s
Beobachtungsfenster
Löschzeit: 1 min



7 min 27 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 1 min



8 min
Fensteröffnung
Löschzeit: 1 min 33 s



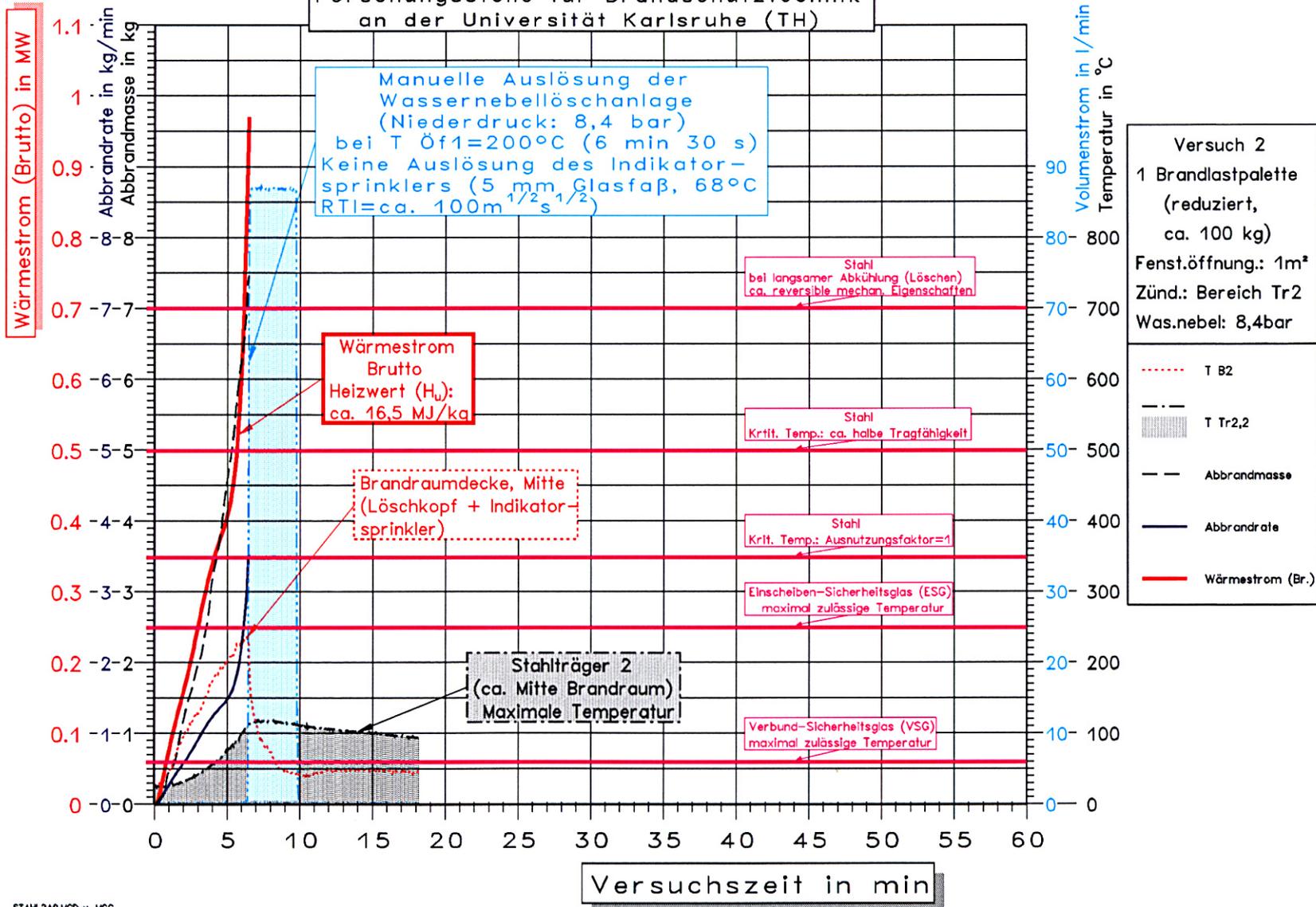
9 min
Fensteröffnung
Löschzeit: 2 min 33 s



9 min 53 s
Fensteröffnung
Löschzeit: 3 min 26 s
Löschende

Bild 17.3: Versuch 2 mit Niederdruck-Wassernebel (Betriebsdruck: 8,4 bar, Volumenstrom: 87 l/min) nach Kunkelmann [7]

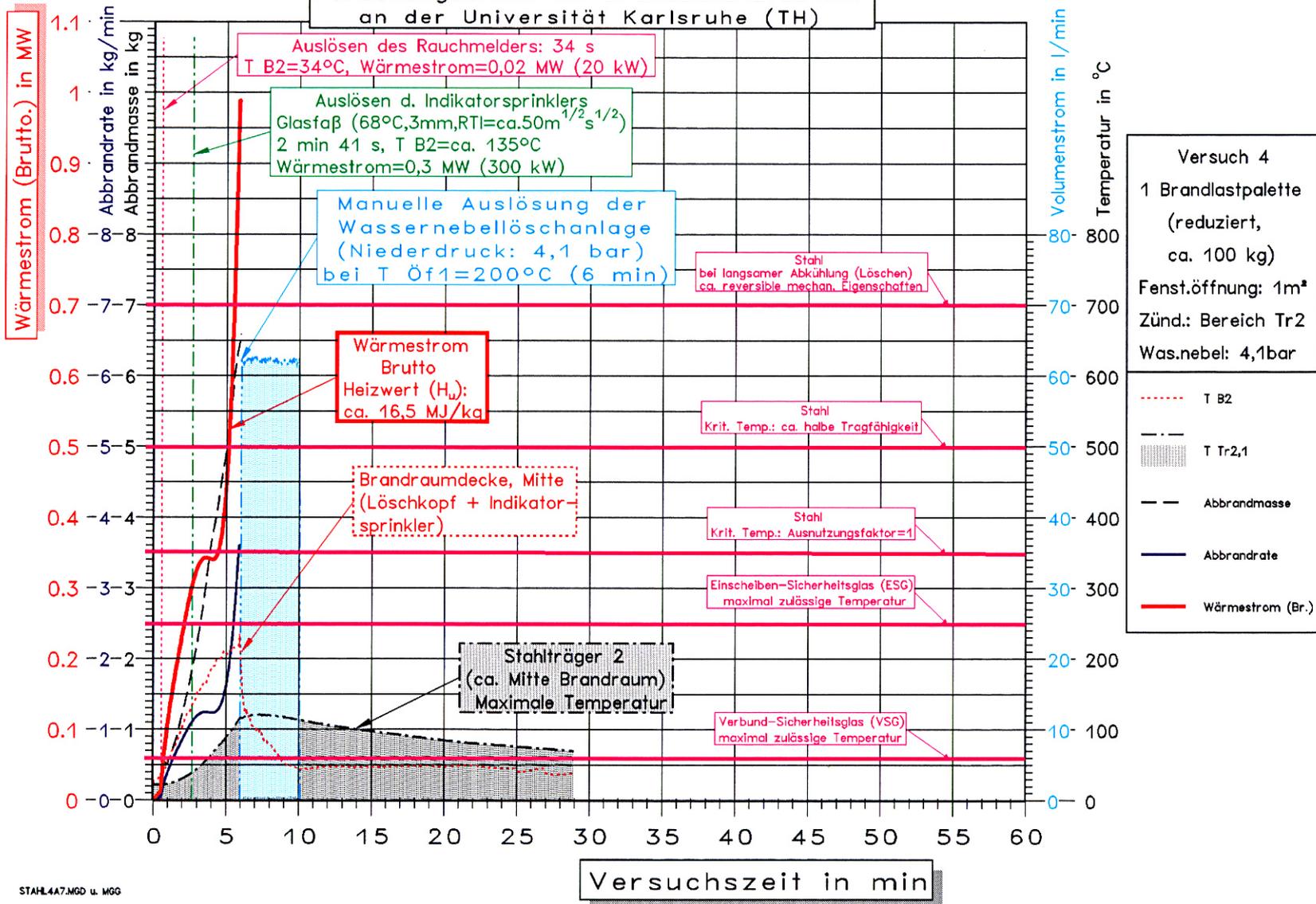
Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)



STAHL2A9.MGD u. MGD

Bild 17.4: Versuch 2 mit Niederdruck-Wassernebel (Betriebsdruck: 8,4 bar, Volumenstrom: 87 l/min) nach Kunkelmann [7]

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)



STAHL4A7.MGD u. MGG

Bild 17.5: Versuch 4 mit Niederdruck-Wassernebel (Betriebsdruck: 4,1 bar, Volumenstrom: 62 l/min) nach Kunkelmann [7]

Versuche mit Niederdruck-Wassernebel - Brandschäden



Betriebsdruck: 8 bar - 87 l/min gesamt (17,4 l/min je Einzeldüse)

Zündkrippenhölzer an der Oberfläche leicht angebrannt



Betriebsdruck: 4 bar - 62 l/min gesamt (12,4 l/min je Einzeldüse)

Zündkrippenhölzer im unteren Bereich stärker verbrannt, dadurch Zusammenfallen der Holzkippe, Hölzer im oberen Bereich leicht angebrannt

**Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den
Homepages der**

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

<http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/>

und des

Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge

<http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/index.php?id=25361>

eingesehen werden.