

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Entwicklung von Grundlagen für
ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der
erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen
von Bränden mit Wasser durch die Feuerwehr

186

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder
Arbeitskreis V
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 186

**Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische
Methoden zur Berechnung der erforderlichen
Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser
durch die Feuerwehr**

von

Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl (Projektleiter)

Prof. Dr. Elke Jahn

Dipl.-Ing. Monika Kutz

Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt -

Heyrothsberge

Januar 2016

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: <div style="text-align: center;">186</div>	Titel des Berichtes Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser durch die Feuerwehr	ISSN: <div style="text-align: center;">0170-0060</div>	
Autoren: Dipl.-Ing. Monika Kutz, Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl, Prof. Dr. Elke Jahn, Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke	durchführende Institution: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: BOR Frank Mehr		
Nummer des Auftrages: <div style="text-align: center;">85 (2/2014)</div>	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Datum des Berichtes: <div style="text-align: center;">Januar 2016</div>			
Seitenzahl: <div style="text-align: center;">76</div>	Bilder: <div style="text-align: center;">85</div>	Tabellen: <div style="text-align: center;">10</div>	Literaturverweise: <div style="text-align: center;">22</div>
Kurzfassung: Im Vorhaben wurden die Löschintensitäten für Feststoffbrände der Klasse A im Raum nach ISO 9705 bis zu einem Maximalwert der Heat Release Rate von ca. 1 MW ermittelt. In PDA-Messungen wurden charakteristische Werte wie Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten und in Verteilungsversuchen die auf die Grundfläche der Normholzkrippe bezogenen Löschwasserraten bestimmt. Als Brandobjekt diente ein Normholzstapel 8A nach DIN EN 3. In Anlehnung an die Hilfsfrist der Feuerwehr wurden Vorbrennzeiten von 8 und 12 Minuten gewählt. Zur Ermittlung des Löscherfolgs wurde die Kombination von Temperatur im Innern der Holzkrippe und der Verlauf der Heat Release Rate verwendet. In den Versuchen wurden kritische Löschintensitäten, bezogen auf die Grundfläche des Brandes, von 11,2 bis 14 l/min m ² ermittelt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass unter dem Wert von ca. 11,2 l/min m ² im ungünstigsten Fall keine Löschung eintritt.			
Schlagwörter: Brandbekämpfung, Heat Release Rate, kritische Löschintensität, Experiment			

INHALTSVERZEICHNIS

	VERZEICHNIS DER BILDER	
	VERZEICHNIS DER TABELLEN	
	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN	
1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	2
3	VERSUCHSAPPARATUR	3
3.1	Versuchsaufbau	3
3.2	Messanordnung	5
4	SPRÜHBILDUNTERSUCHUNGEN	10
4.1	Verteilungsdichte des Wassers	10
4.2	Untersuchung der Tropfenspektren mittels PDA-Messungen	17
4.2.1	Messprinzip	17
4.2.2	Beschränkungen	18
4.2.3	Gemittelte Tropfengrößenparameter	18
4.2.4	Möglichkeiten der statistischen Analyse	19
4.2.5	Versuchsdurchführung	20
4.2.6	Versuchsergebnisse	21
5	BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE	29
5.1	Brandversuche mit Normholzkrippe 8A und Löschwasseraufbringung von oben	31
5.1.1	Brand- und Löschversuche mit Löschdüse A	31
5.1.2	Brand- und Löschversuche mit Löschdüse B	40
5.1.3	Brand- und Löschversuche mit Löschdüse C	47
5.2	Brandversuche mit größeren Holzkrippen	53
5.3	Brandversuche mit Normholzkrippe 8A und Löschwasseraufbringung von der Seite	58
5.3.1	Seitliche Löschwasseraufbringung mit Düse A	59
5.3.2	Seitliche Löschwasseraufbringung mit Düse B	62
5.3.3	Seitliche Löschwasseraufbringung mit Düse C	66
5.4	Zusammenfassung der Brandversuche	69
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	70
	LITERATUR	74
	ANHANG	

VERZEICHNIS DER BILDER

- 3.1 Versuchsapparatur im Brandraum 2
- 3.2 Brennkammer der Versuchsapparatur nach Neuaufbau
- 3.3 Versuchsanordnung im Brandcontainer
- 3.4 Seitenansicht des Brandcontainers mit Anordnung der Temperatur- und Geschwindigkeitsmessstellen
- 3.5 Vorderansicht des Brandcontainers mit Anordnung der Temperatur- und Geschwindigkeitsmessstellen
- 3.6 Beheizte Probenahmesonde für die FTIR-Messung am Messstutzen des Abgasrohres
- 3.7 Anordnung der Thermoelemente TC3, TC4, TC5 im Innern der Krippe - links: Holzkrippe mit 8 Lagen; rechts: Position der Thermoelemente in der Krippe
- 3.8 Lage der Messstelle TC2 für die Oberflächentemperatur sowie Messstellen TC6 und Bid08 für die Gasgeschwindigkeit
- 3.9 Position des wassergekühlten Wärmestromsensors
- 4.1 Anordnung der Messgefäße auf der Messfläche von 1m² Größe auf dem PDA-Messplatz
- 4.2 Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse A bei 4 bar
- 4.3 Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse A bei 5 bar (oben) und 6 bar (unten)
- 4.4 Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse B bei 2 bar (oben) und 3 bar (unten)
- 4.5 Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse C bei 4 bar (oben) und 6 bar (unten)
- 4.6 Messanordnung (optische Bank)
- 4.7 Bedienstand in der Messkabine
- 4.8 Erfassungsbildschirm
- 4.9 Verteilung der Durchmesser (D32)
- 4.10 Verteilung der Geschwindigkeiten
- 4.11 „Punktwolken“-Darstellung
- 4.12 Auswahlverfahren nach Intensitätsprinzip
- 4.13 Messraster der PDA-Messung (Draufsicht)
- 4.14 Tropfengeschwindigkeitsverteilung auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 6 bar (unten) mit Löschdüse A
- 4.15 Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser) auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 6 bar (unten) mit Löschdüse A
- 4.16 Tropfengeschwindigkeitsverteilung auf der Messfläche bei 1 bar (oben) und 3 bar (unten) mit Löschdüse B
- 4.17 Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser) auf der Messfläche bei 1 bar (oben) und 3 bar (unten) mit Löschdüse B
- 4.18 Tropfengeschwindigkeitsverteilung auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 5 bar (unten) mit Löschdüse C

- 4.19 Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser) auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 5 bar (unten) mit Löschdüse C
- 5.1 Temperaturen über der Brandquelle für Versuche mit Löschdüse A
- 5.2 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse A
- 5.3 Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse A
- 5.4 Temperaturen an der Oberfläche der Krippe (TC1, TC2) für Versuche mit Löschdüse A
- 5.5 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse A
- 5.6 Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse A
- 5.7 Vergleich der HRR für Versuche HK5 (3 bar), HK6 (4 bar), HK7 (6 bar) und HK8 (5 bar) mit Löschdüse A
- 5.8 Vergleich der Raumtemperaturen (über der Quelle) für die Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)
- 5.9 Vergleich der Raumtemperaturen (in der Ecke) für die Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)
- 5.10 Krippentemperatur (TC1 und TC2) für die Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)
- 5.11 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8min (HK7) und 12 min (HK23)
- 5.12 Gastemperatur in der Krippe (TC5) für die Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)
- 5.13 Vergleich der HRR für Versuche HK7 und HK23 mit Löschdüse A und 6 bar
- 5.14 Temperaturen über der Brandquelle für Versuche mit Löschdüse B
- 5.15 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse B
- 5.16 Temperaturen an der Krippenoberfläche (TC1, TC2) für Versuche mit Löschdüse B
- 5.17 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse B
- 5.18 Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse B
- 5.19 Vergleich der HRR für Versuche HK16 (1 bar), HK17 (2 bar), HK18 (3 bar) mit Löschdüse B
- 5.20 Vergleich der Raumtemperaturen (in der Ecke) für die Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)
- 5.21 Krippentemperatur (TC1 und TC2) für die Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)
- 5.22 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)
- 5.23 Gastemperatur in der Krippe (TC5) für die Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)
- 5.24 Vergleich der HRR für Versuche HK18 und HK25 mit Löschdüse B und 3 bar

- 5.25 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse C
- 5.26 Temperaturen an der Krippenoberfläche (TC1, TC2) für Versuche mit Löschdüse C
- 5.27 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse C
- 5.28 Gastemperatur in der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse C nach 8 min
- 5.29 Vergleich der HRR für Versuche HK9 (4 bar), HK10 (5 bar), HK12 (6 bar) mit Löschdüse C
- 5.30 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse C
- 5.31 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Löschversuche mit Düse C bei 5 bar nach 8 min (HK10) und 12 min (HK24)
- 5.32 Gastemperatur in der Krippe (TC5) für die Löschversuche mit Düse C bei 5 bar nach 8 min (HK10) und 12 min (HK24)
- 5.33 Vergleich der HRR für Versuche HK10 und HK25 mit Löschdüse B und 3 bar
- 5.34 Gemessene Raumtemperaturen in der Ecke in den Versuchen HK21 und HK22
- 5.35 Abbrandrate der Versuche mit Holzkrippen von 0,8 m x 0,8 m Grundfläche
- 5.36 Ermittelte HRR für Versuche mit größeren Holzkrippen (HK22 und HK26)
- 5.37 Gemessene Raumtemperaturen in der Ecke in den Versuchen HK22 und HK26
- 5.38 Oberflächentemperaturen (TC3, TC4) im Innern der Krippe in den Versuchen HK21, HK22 und HK26
- 5.39 Gastemperaturen (TC5) im Innern der Krippe in den Versuchen HK21, HK22 und HK26
- 5.40 Temperaturen an der Oberfläche der Krippe (TC2) in den Versuchen HK21, HK22 und HK26
- 5.41 Krippenanordnung in Versuch HK27 bei seitlicher Löschwasserbeaufschlagung
- 5.42 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Wasserbeaufschlagung mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)
- 5.43 Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse A bei 6bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)
- 5.44 Geschwindigkeiten in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)
- 5.45 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)
- 5.46 Vergleich der HRR für Versuche mit Löschdüse A und 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7, HK23)
- 5.47 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Wasserbeaufschlagung mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)
- 5.48 Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)
- 5.49 Geschwindigkeiten in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)
- 5.50 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)

- 5.51 Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)
- 5.52 Vergleich der HRR für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18, HK25)
- 5.53 Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Wasserbeaufschlagung mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)
- 5.54 Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)
- 5.55 Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)
- 5.56 Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)
- 5.57 Vergleich der HRR für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11, HK24)

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- 4.1 Betriebsparameter der verwendeten Düsen
- 4.2 Ergebnisse der Wasserverteilungsversuche für die Düsen A bis C
- 4.3 Zusammenstellung der Berechnungsmethoden und Einsatzgebiete
- 5.1 Versuche* mit Normholzstapel 8A und Löschung von oben und seitlich
- 5.2 Versuche mit Normholzstapel 8A und Löschdüse A
- 5.3 Versuche mit Normholzstapel 8A und Löschdüse B
- 5.4 Versuche mit Normholzstapel 8A und Löschdüse C
- 5.5 Versuche mit größeren Krippen
- 5.6 Versuche mit Normholzkrippe 8A und Löschwasseraufbringung von der Seite
- 6.1 Volumenströme und -intensitäten für die Brandversuche, in denen eine Brandlöschung erfolgte

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

Abkürzung **Bedeutung**

AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren
AÜG	Ausbildungs- und Übungsgelände
FTIR	Fourier Transform Infrarot
HK	Holzkippe
HRR	Heat Release Rate
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz
PDA	Phasen-Doppler-Anemometer

1 EINLEITUNG

Brandbekämpfung muss heute in moderner Betrachtungsweise als Überführung einer ungesteuerten Verbrennung in eine gesteuerte¹ Verbrennung aufgefasst werden. Zukünftig werden immer mehr ingenieurtechnische Methoden das gedankliche Vorausbestimmen der Handlungen der Feuerwehr ermöglichen und so eine solide naturwissenschaftlich-technische Grundlage für die Brandbekämpfung bilden.

So wie für die Beurteilung eines Brandes als wichtigste grundlegende physikalisch-chemische Größe die Energiefreisetzungsrate (Heat Release Rate, HRR) erkannt wurde [Babrauskas and Peacock 92], so wurde für das Wasserlöschverfahren die Energieabsorptionsgeschwindigkeit als eine entscheidende Größe zur Ermittlung der Brandbekämpfungsleistung definiert [Särdqvist 96]. Sie dient der Ermittlung des zum Löschen benötigten Wasservolumenstroms bzw. der Löschintensität (Volumenstromdichte des Löschwassers, die zur Löschung auf die Brandfläche aufgebracht werden muss) und bildet eine Entscheidungsgröße für taktische Maßnahmen der Feuerwehr. Günstiger Weise geschieht dieser Schritt in der Vorplanung des Einsatzes. Auch unter Einsatzbedingungen wird empfohlen [Klaene and Sanders 01], Abschätzungen des Wasservolumenstroms über einfache Formeln vorzunehmen, um taktische Entscheidungen zu treffen.

Prinzipiell führt nach [Hadjisophocleous and J.K. Richardson 05] die Bestimmung der Löschwasserversorgung auf 2 Problemkreise:

1. die Gesamtmenge an Wasser, die benötigt wird und
2. den Wasservolumenstrom, der geliefert werden kann.

Ein Überblick der Methoden zur Bestimmung des zur Löschung notwendigen Wasservolumenstroms bzw. der Löschintensität wurde in Teil I [Kohl et al. 07] und Teil II [Kutz und Kohl 12] des vorliegenden Forschungsvorhabens gegeben. Eine neuere Bewertung ist in [Benfer and Scheffey 14] zu finden.

2 STAND DER TECHNIK

Seit den 50ziger Jahren des letzten Jahrhunderts wird versucht, die von der Feuerwehr zur Brandbekämpfung benötigten Wasservolumenströme sowohl theoretisch, experimentell als auch über die Auswertung von Statistiken zu bestimmen. International werden neuerdings in Großbritannien und den USA Forderungen nach Berechnungsmethoden für den Wasserbedarf erhoben [Grimwood and Sanderson 15b].

Diese sollen einerseits Grundlagen für die Bereitstellung des Löschwassers liefern und andererseits den Feuerwehren ermöglichen ihre Leistungsfähigkeit zu bestimmen.

[Grimwood and Sanderson 15a] stellten für Großbritannien eine Tendenz fest, dass bei den von ihnen untersuchten Fällen die in Großbritannien im Tanklöschfahrzeug mitgeführte Wassermenge von 1800 l vor 50 Jahren für ca. 86 % der Brände zur Löschung ausreichend war und heute ca. 64 % der Brände damit bekämpft werden können. Dies deutet auf einen

1 Gesteuert bedeutet dabei, vom Menschen bewusst beeinflusst, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen.

Anstieg der Größe der Brände hin. Leider konnten für die Bundesrepublik keine äquivalenten Aussagen ermittelt werden.

Darüber hinaus ist bekannt, dass eine kritische Löschintensität existiert, unter der keine Löschung möglich ist [Tamanini 76, Hirst 89].

Brandentwicklungszeit, Ventilationsverhältnisse und die Art und Weise, wie das Wasser angewandt wird, sind z.B. Größen, die die kritische Löschintensität variieren lassen [Grant et al. 00]. Sie stellt eine untere Grenze für die Löschbarkeit dar, wie es in ingenieurtechnischen Betrachtungsweisen üblich ist. Für Holz stellte [Abduragimov et al. 79] eine kritische Löschintensität von ca. 2 l/min m² experimentell fest. Ebenso ermittelten [Grimwood and Sanderson 15b] aus statistischen Erhebungen folgende Werte:

- kritische Intensität (Volumenstromdichte, bei der die Brandausbreitung nicht kontrolliert werden kann) : 2 l / min m² ,
- minimale Intensität (Volumenstromdichte, bei der die Brandausbreitung unterdrückt werden kann) : 3,7 l/min m² ,
- optimale Intensität (Volumenstromdichte, bei der die Brandausbreitung kontrolliert werden kann, ohne unzumutbare Belastungen für den Feuerwehrmann):
 - 6,0 l/min m² für ein 32 m² großes Zweiraum-Appartement,
 - 6,5 l/min m² für einen 50 m² -100 m² großen kommerziell genutzten Bereich.

Die Angaben beziehen sich auf die Bodenfläche.

Ziel dieses Vorhabens war es, die kritische Löschintensität für verschiedene Brände in Räumen über die Heat Release Rate experimentell zu bestimmen.

Die Versuche wurden in der im Teil II entwickelten Messkammer durchgeführt.

Die Versuche wurden durch das Einschalten der Absaugvorrichtung zwangsbelüftet.

Als Brandobjekt wurden Holzkrippen der Größe 8A verwendet sowie Krippen größerer Brandlast bei gleicher Krippengeometrie.

In den Löschversuchen wurden Vollkegeldüsen verschiedener Größe verwendet. Da bekannt ist, dass die kritische Löschintensität u. a. mit der Art der Aufbringung/Anwendung des Wassers variiert, wurden für die Löschdüsen die seitliche und die Aufbringung von oben gewählt. Die Anwendung herkömmlicher mobiler Technik wurde als seitliche Aufbringung des Löschwassers angedacht.

In Wasserversuchen wurden für die verwendeten Löschdüsen Verteilungsdichten des Löschwassers sowie Tropfengrößenverteilungen und Geschwindigkeitsverteilungen gemessen, um deren Einfluss auf die Löschintensität zu ermitteln.

Die Messapparatur kommt somit der von [de Vries 97] geforderten Praxisvergleichbarkeit entgegen, wobei eine zukünftige Anpassung an das von der AGBF vorgegebene Szenarium eines kritischen Wohnungsbrandes denkbar ist.

3 VERSUCHSAPPARATUR

Grundlage für den Versuchsaufbau bildete die in [Kutz und Kohl 12] entwickelte und getestete Versuchsanlage. Die Versuchsanlage wurde im Brandraum 2 des Brandhauses auf dem AÜG des IBK aufgebaut. Sie besteht aus einer Rauchabsaugungseinheit und einem Container, in dem sich auch der Brandversuchsraum (Brennkammer) befindet. Bild 3.1 zeigt die im Brandhaus aufgebaute Versuchsanlage. Für detailliertere Angaben sei auf [Kutz und Kohl 12] verwiesen.



Bild 3.1: Versuchsanlage im Brandraum 2

Der Brandversuchsraum (Brennkammer) befindet sich im Inneren des Containers, hat eine Abmessung von 2,35 m Breite, 4,13 m Länge und 2,4 m Höhe, wurde mit Edelstahlblech ausgekleidet und dann mit einer Dämmstoffschicht aus Promaglaf-Matten von den Containerwänden isoliert.

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau in der Brennkammer wurde um eine 2 m x 2 m große Wanne zur Aufnahme des Löschwassers und eine Abbrandwaage zur Wägung des Brandmaterials mittels Drei-Punkt-Auflage erweitert. Bild 3.2 zeigt die Brennkammer mit neu aufgebauter Wägeeinrichtung, Löschwasserwanne und Löschwasserzuführung vor dem ersten Versuch.



Bild 3.2: Brennkammer der Versuchsapparatur nach Neuaufbau

Die nachfolgende Prinzipskizze der Versuchsapparatur mit den Versuchsaufbauten in Bild 3.3 veranschaulicht die Versuchsdurchführung.

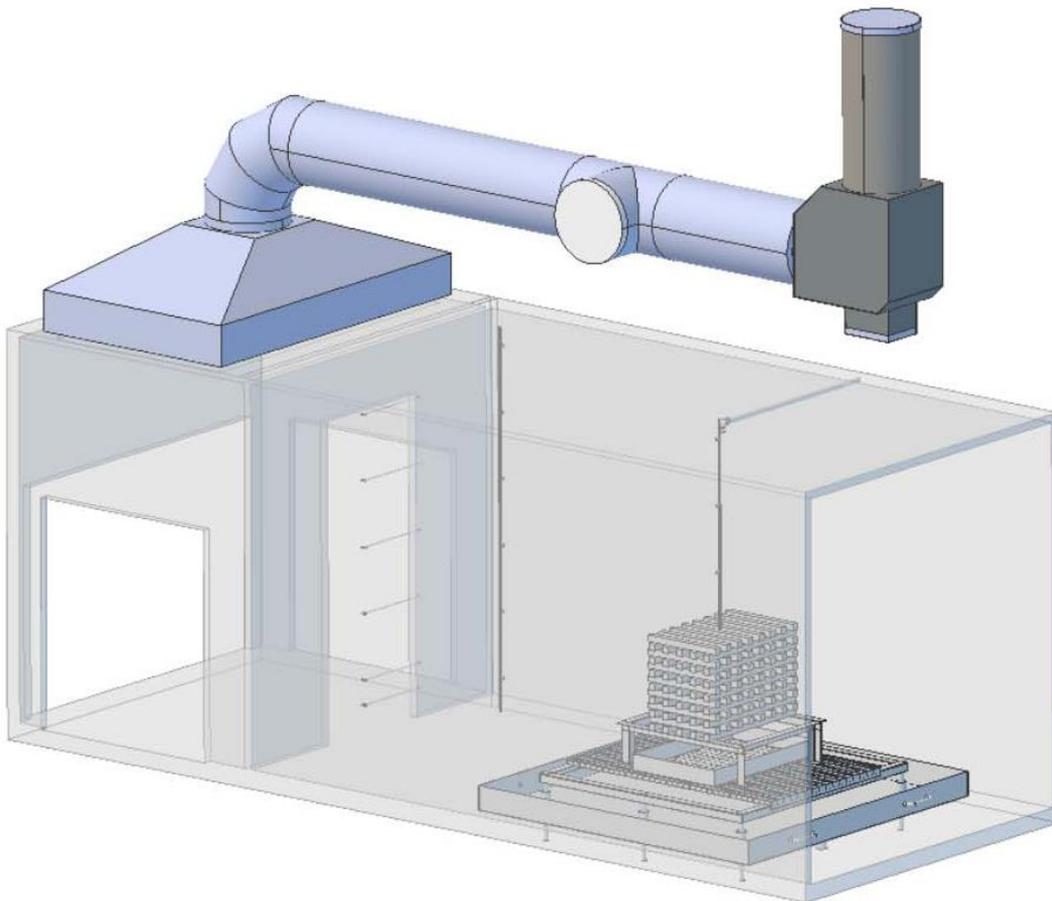


Bild 3.3: Versuchsanordnung im Brandcontainer

Die Brennkammer ist über eine 0,8 m breite und 2 m hohe Öffnung mit einem nach 3 Seiten geöffneten Abgasraum verbunden, so dass die Brandgase aus dem Brandversuch frei ausströmen können und erst aus diesem Vorraum vom Lüfter der Rauchgasabsaugung abgeführt werden. Gleichzeitig ist über die Öffnungen des Vorraumes eine Ansaugung von Frischluft möglich. Die Türen des Containers sind während des Versuchs geschlossen.

Auf dem Gitterrost der Wägeeinrichtung wird die Holzkrippenbrandlast einschließlich Gestell und Zündwanne positioniert. An der Decke und mittig über der Holzkrippe ist die Düse für die Löschwasserbeaufschlagung installiert. Die Löschwasserwanne wird am Boden der Brandkammer arretiert. Die Massenwägung des Brandgutes erfolgt über Kraftaufnehmer, die sich unter dem Brandcontainer befinden, wobei die Halterungen der Wägeeinrichtung durch den Containerboden und die Löschwasserwanne geführt werden

Zur Aufzeichnung von physikalischen Größen wie Temperaturen und Geschwindigkeiten sind im Brandraum Thermoelemente und bidirektionale Sonden installiert. In Bild 3.3 sind die Messorte in der Durchgangstür, einer Ecke der Brandkammer und über der Holzkrippe angedeutet. Die Instrumentierung und Messwerterfassung erfolgte wie im Vorgängerprojekt und ist in [Kutz und Kohl 12] beschrieben. Angaben zu Messgrößen und -orten werden in Abschnitt 3.2 nochmals gezeigt.

3.2 Messanordnung

Zur Ermittlung der Temperaturen wurden in einer Raumecke, jeweils 30 cm von der Wand entfernt, insgesamt 6 Thermoelemente über die Raumhöhe verteilt angeordnet. Über der Holzkrippe wurden 4 Thermoelemente und mittig in der Durchgangstür 5 Thermoelemente über die Höhe verteilt angebracht. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurden in der Durchgangstür neben den 5 Thermoelementen 5 bidirektionale Sonden installiert. In den Zeichnungen der Messanordnung in Bild 3.4 und 3.5 sind die Maße der Messstellen im Brandraum angegeben.

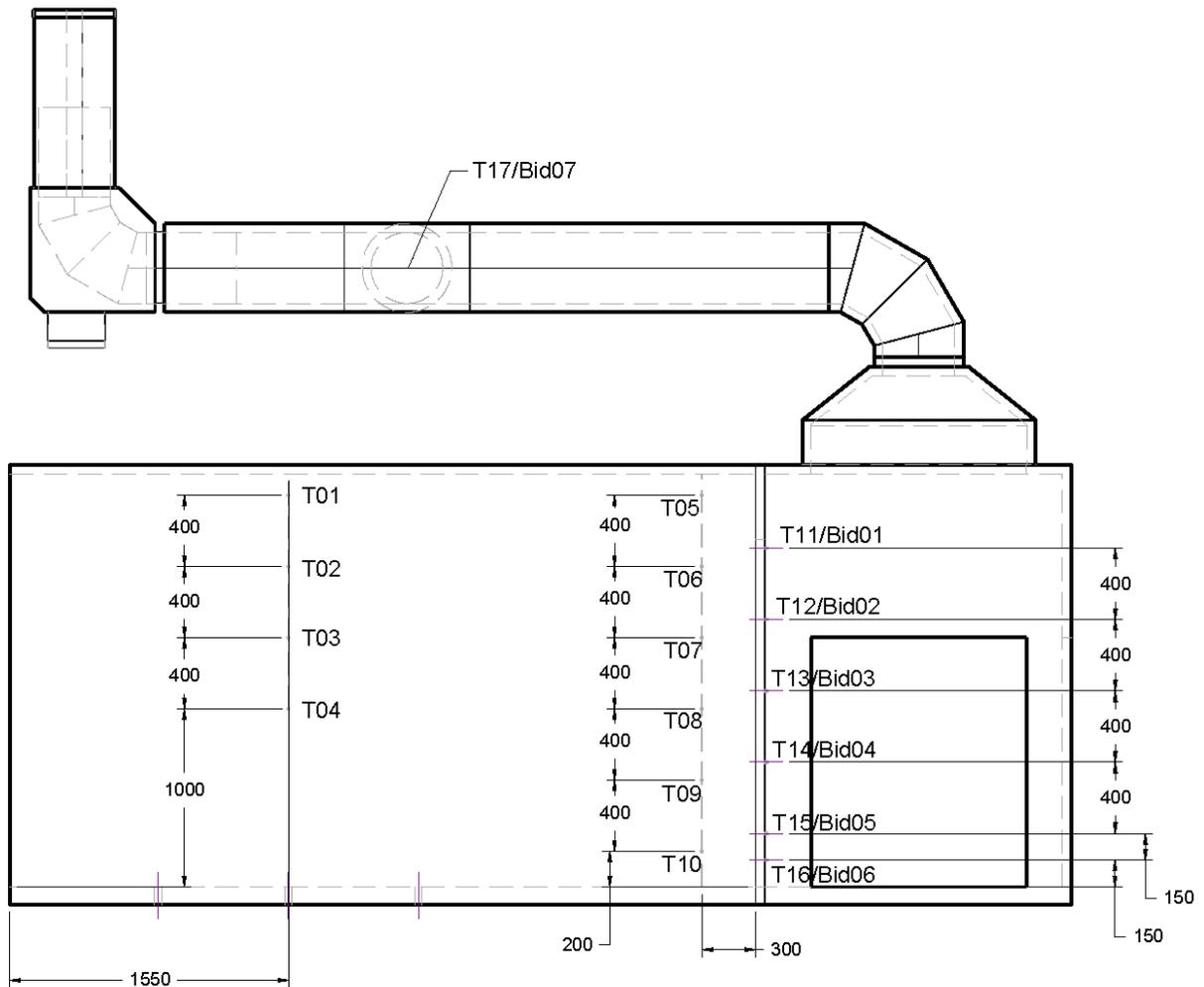


Bild 3.4: Seitenansicht des Brandcontainers mit Anordnung der Temperatur- und Geschwindigkeitsmessstellen

Die Geschwindigkeitsmessstellen sind mit Bid bezeichnet, die Temperaturmessstellen mit T. Die Messanordnung wurde wie in [Kutz und Kohl 12] gewählt, so dass Vergleichswerte zu früheren Experimenten vorliegen.

Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des Rauchgases werden im Messstutzen der Rauchgasabsaugung gemessen, die Messstellen sind mit T17 und Bid07 bezeichnet.

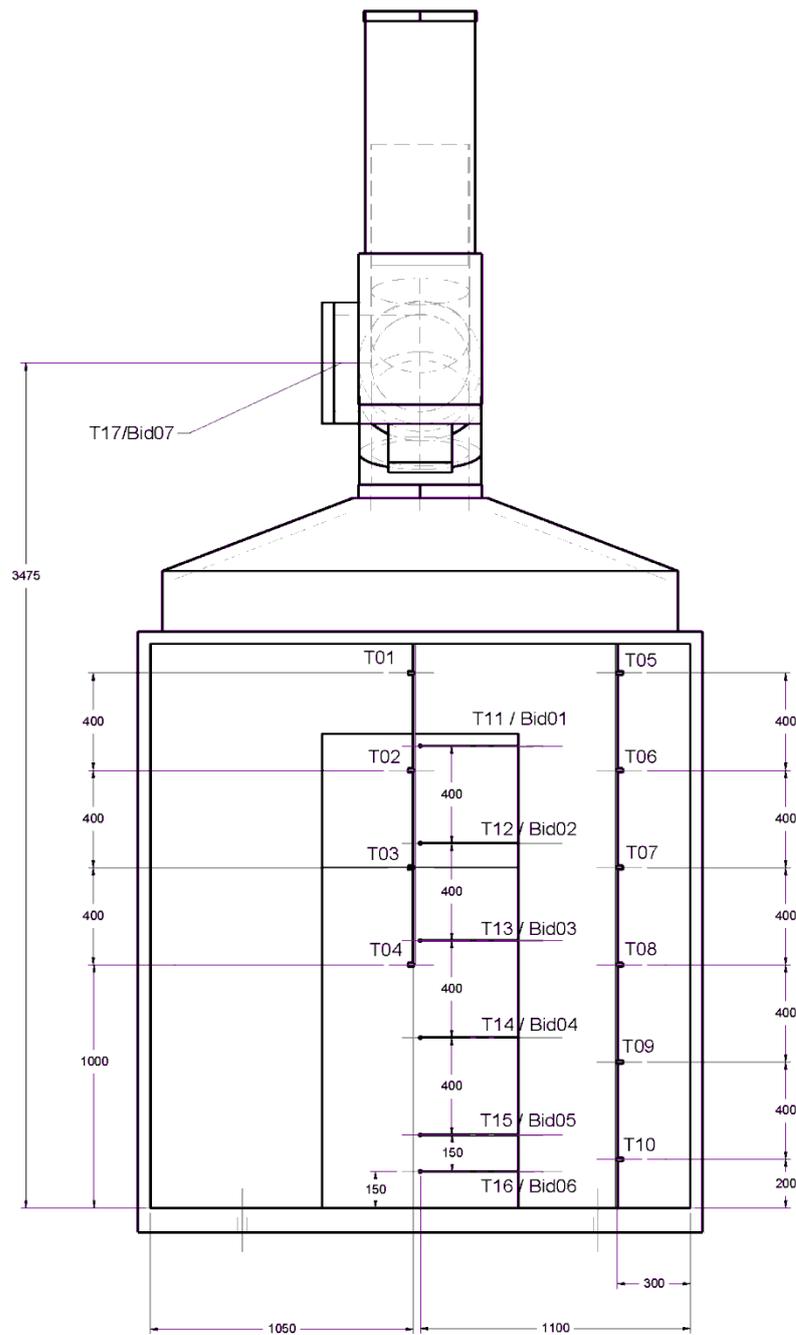


Bild 3.5: Vorderansicht des Brandcontainers mit Anordnung der Temperatur- und Geschwindigkeitsmessstellen

Die Ermittlung der Gaskonzentrationen des Abgases, aus denen die Wärmefreisetzungsrates des Brandes ermittelt werden soll, erfolgte mittels FTIR-Spektroskopie. Dazu wurde kontinuierlich eine Gasprobe aus dem Abgasrohr in direkter Nähe der Messstellen T17 und Bid07 (mittig im Abgasrohr) entnommen und analysiert. In Bild 3.6 ist die am Messstutzen montierte beheizte Probenahmesonde zu sehen. Zur Erfassung und Auswertung der Messspektren wurde der FTIR Gasanalysator DX 4000 verwendet, der auch im Vorhaben [Kutz und Kohl 12] verwendet und beschrieben wurde. Dieses Gasanalyse-System wurde durch einen paramagnetischen O₂-Sensor ergänzt, mit dem die O₂-Konzentration in dem von

der Probenahmesonde abgesaugten Gasstrom gemessen wurde, und diese der Ergebnisdatei der FTIR-Gasanalyse hinzufügt.



Bild 3.6: Beheizte Probenahmesonde für die FTIR-Messung am Messstutzen des Abgasrohres

Zur Beurteilung des Abbrandverhaltens der Krippe und der Löschwirkung wurden Oberflächentemperaturen und Gastemperaturen im Inneren und an der Außenseite der Holzkippe messtechnisch erfasst. Mittig in der Krippe wurden die Gastemperatur (Messstelle TC5) sowie die Oberflächentemperaturen an den zwei benachbarten Stäben, bezeichnet mit TC3 an der vertikalen und TC4 an der horizontalen Oberfläche des jeweiligen Stabes, mit Thermoelementen gemessen [Santangelo 2014]. Bild 3.7 zeigt links ein Foto der bis zur Hälfte aufgestapelten Krippe sowie auf der rechten Seite eine Vergrößerung des Kreisausschnittes, in dem die Lage der Thermoelemente TC3 und TC4 an den Stabflächen sowie die Lage des Thermoelements TC5 für die Gastemperatur erkennbar ist.

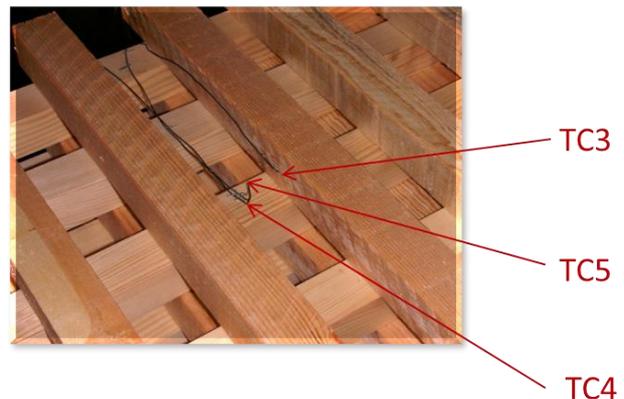
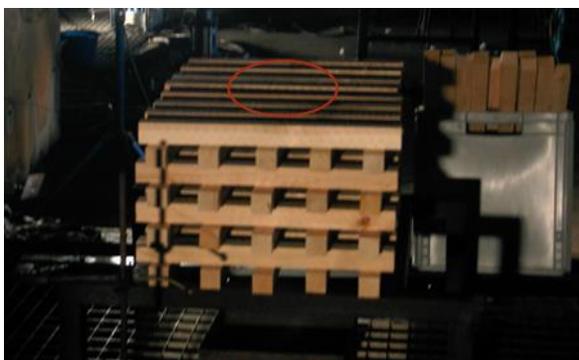


Bild 3.7: Anordnung der Thermoelemente TC3, TC4, TC5 im Innern der Krippe - links: Holzkippe mit 8 Lagen; rechts: Position der Thermoelemente in der Krippe

Zwei weitere Messstellen für die Oberflächentemperatur des Brandmaterials befinden sich mit TC1 mittig auf der Oberseite der Krippe sowie mit TC2 mittig an der zur Durchgangstür gerichteten Seite der Krippe. Bild 3.8 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus mit komplett aufgebautem Normholzstapel, auf dem das Thermoelement TC2 sowie die bidirektionale Sonde Bid08 und das zugehörige Thermoelement TC6 zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit zu sehen sind.

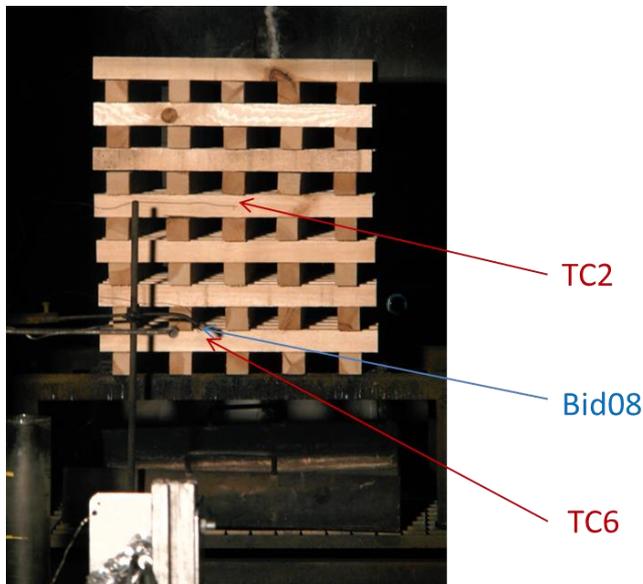


Bild 3.8: Lage der Messstelle TC2 für die Oberflächentemperatur sowie Messstellen TC6 und Bid08 für die Gasgeschwindigkeit

Zur Erfassung der Strahlungswärme des Brandes wurde ein Wärmestrahlungssensor in der Höhe von 0,5 m über dem Boden und in einer Entfernung von 3 m von der Mitte der Holzkippe positioniert. Daneben ist ein Thermoelement zur Erfassung der Temperatur angebracht. Den Aufstellort des wassergekühlten Sensors im Versuch zeigt Bild 3.9.

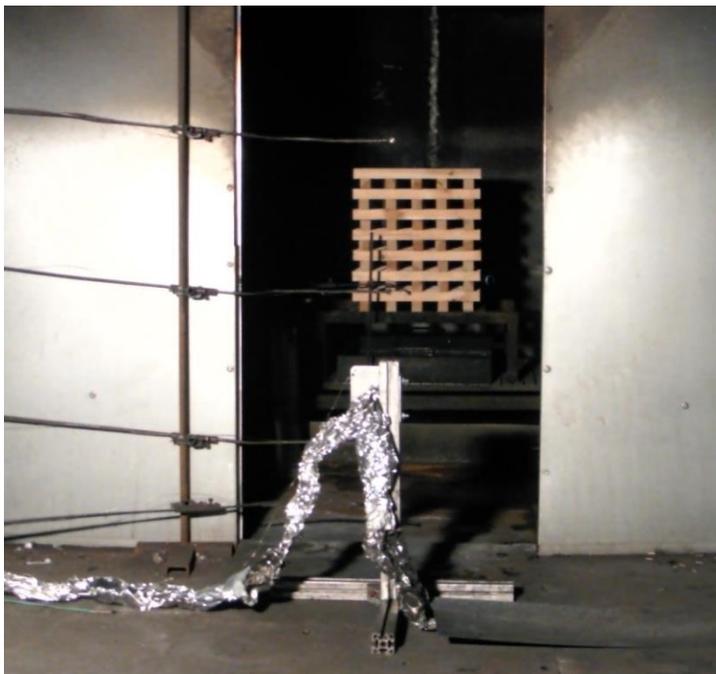


Bild 3.9: Position des wassergekühlten Wärmestromsensors

4 SPRÜHBILDUNTERSUCHUNGEN

Für die in den Löschversuchen zum Einsatz kommenden Düsen wurden Untersuchungen des Sprühbildes, der Volumenstromdichten, von Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten vorgenommen. Dazu wurden Versuche zur Ermittlung der Verteilungsdichte durch Auslitern sowie PDA-Messungen zur Ermittlung von Tropfengrößen- und Tropfengeschwindigkeitsverteilungen durchgeführt.

Für Versuche mit Anwendung des Löschwassers von oben mittels Düse wurden Vollkegeldüsen eingesetzt, um eine möglichst gleichmäßige Wasserbeaufschlagung auf der Fläche zu erzielen.

Ausgehend von den ersten Ergebnissen aus [Kutz und Kohl 12], bei denen mit Vollkegeldüsen mit dem Sprühwinkel von 60° für die kritische Löschwasserrate nur grob ein Wert zwischen 11 l/min und 20 l/min ermittelt wurde und dabei von einer gleichmäßigen Wasserverteilung über der Sprühkegelgrundfläche ausgegangen wurde, sollen weitere Vollkegeldüsen zum Einsatz kommen, um in Brandlöschversuchen die Löschintensitäten weiter eingrenzen zu können. Notwendig ist dafür auch, das Sprühbild zu analysieren.

Die Auswahl der Löschdüsen für die Brand- und Löschversuche erfolgte in Auswertung von Wasserverteilungsversuchen, die für 8 verschiedene Vollkegeldüsen durchgeführt wurden und deren Messergebnisse in [Otte 15] zusammengefasst sind.

Es erschienen dabei 3 verschiedene Vollkegeldüsen als geeignet für den Einsatz im Brandversuch zur Konkretisierung der kritischen Löschwasserrate, da sie den Bereich von 11-20 l/min bzw. 8,2-14,9 l/min m^2 bei vorausgesetzter gleichmäßiger Verteilung, erfassen. Die Ergebnisse der Messungen der Wasserverteilungen für diese drei dann in den Brandversuchen verwendeten Düsen sind mit den von [Otte 15] ermittelten Daten im folgenden Abschnitt beschrieben.

4.1 Verteilungsdichte des Wassers

Die Experimente zur Untersuchung der Volumenstromverteilung von verschiedenen Düsen wurden im Nasslabor des IBK auf dem PDA-Versuchsstand durchgeführt. Auf diesem ist die erforderliche Anlagentechnik zum Betreiben der Düsen bei unterschiedlichen Drücken sowie der exakten Positionierung der Düsen vorhanden.

Für die Messungen der Wasserverteilung wurden auf einer Fläche von 1 m^2 100 Messgefäße angeordnet und mit Wasser aus der Vollkegeldüse bei konstantem Betriebsdruck über eine vorgegebene Dauer beaufschlagt sowie nachfolgend die Masse des Wassers für jedes der Messgefäße erfasst. Der vertikale Abstand von der Düsenöffnung bis zur Messfläche (in Höhe der Oberkante der Messgefäße) wurde in der Größe des Abstandes von Düsenöffnung zur Oberkante der Krippe in den Brandversuchen gewählt. Dieser beträgt 113 cm.

Im Ergebnis dieser Messungen ergibt sich die Verteilung des Wassers auf der Fläche von 1 m^2 , die als Volumenstromdichte bzw. spezifischer Volumenstrom bezeichnet wird. Es ist eine Intensitätsgröße und wird in l/min m^2 angegeben.

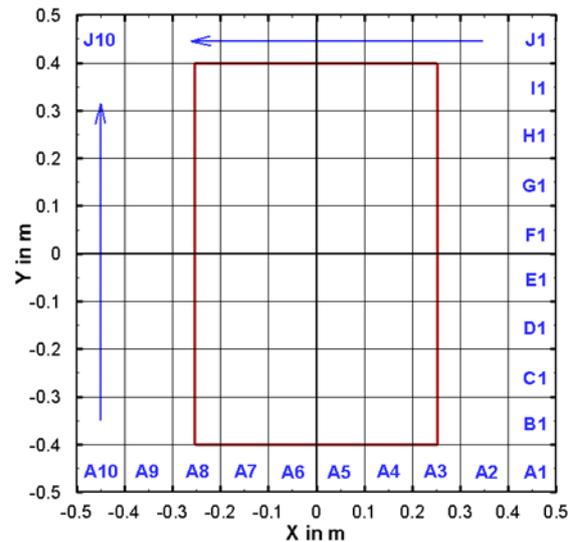


Bild 4.1: Anordnung der Messgefäße auf der Messfläche von 1 m² Größe auf dem PDA-Messplatz

Tabelle 4.1 zeigt eine Auflistung der Wasserverteilungsversuche mit den in den Brandversuchen verwendeten Löschdüsen bei unterschiedlichem Betriebsdruck.

Tabelle 4.1: Betriebsparameter der verwendeten Düsen

Düse: Bezeichnung	Betriebsdruck bar	Gesamtvolumenstrom l/min	Volumenstromdichte (Mittelwert) l/min m ²
A: 3000-3-16,7	3	16,7	6,4 (38 %)
	4	19,3	8,5 (44 %)
	5	21,6	11,2 (52 %)
	6	23,7	15,4 (65 %)
B: 460.804	1	7,6	7,2
	2	10	9,3
	3	11,8	10,9
C: 490.684	4	6,6	6,2
	5	7,2	7
	6	7,8	7,4

Verwendet wurden 3 verschiedene Düsen. In der Tabelle ist neben den Gesamtvolumenströmen, die diese Düsen liefern, die in den Versuchen ermittelte mittlere Volumenstromdichte für die gesamte Messfläche von 1 m² angegeben. Dabei wurden für

jeden Versuch zwei Wiederholungsversuche durchgeführt und der arithmetische Mittelwert aus 3 Versuchen in die Tabelle aufgenommen.

Bereits die Mittelwerte der Volumenstromdichte lassen ein völlig unterschiedliches Sprühbild von Düse A und den Düsen B und C erkennen. Düse A weist einen sehr hohen Gesamtvolumenstrom auf, von dem im ungünstigsten Fall bei 3 bar nur 38 % die Fläche von 1 m² beaufschlagt, bei 6 bar sind es dann 65 %. Im Gegensatz dazu treffen bei Düse B und auch C über 90 % des Gesamtvolumenstromes auf der Fläche von 1 m² auf.

Die grafische Darstellung der Wasserverteilung für die 100 Messpunkte, basierend auf der in den Messgefäßen gesammelten Wassermenge verdeutlicht diesen Unterschied und zeigt, dass keine gleichmäßige Verteilung des Wassers auf der Fläche von 1 m² vorliegt. Bild 4.2 zeigt einen Plot der Volumenstromdichte (arithmetischer Mittelwert aus drei Versuchen) im Bereich von 5 bis 15 l/min m² für die Düse A bei 4 bar. In dieser und den folgenden grafischen Darstellungen ist die Position der rechteckigen Grundfläche der Holzkrippe von 50 cm x 80 cm in den Brandversuchen gekennzeichnet.

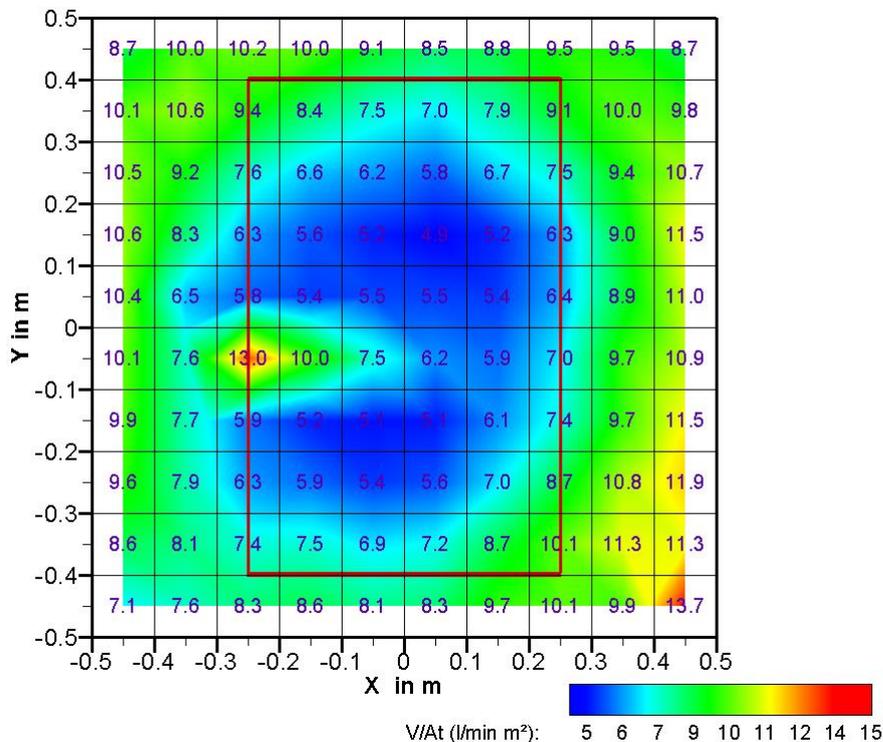


Bild 4.2: Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse A bei 4 bar

Diese ungleichmäßige Verteilung ist nicht nur bei dem für diese Düse kleinen Betriebsdruck von 4 bar vorhanden, vielmehr ist mit zunehmendem Druck eine Vergrößerung der Unterschiede in der Beaufschlagung des Zentrums und der äußeren Bereiche der Messfläche zu erkennen, wie in Bild 4.3 und 4.4 deutlich wird. Bei den Düsen B und C, deren Volumenstromdichte an diskreten Punkten in den Bildern 4.4 und 4.5 bei jeweils 2 verschiedenen Drücken dargestellt ist, werden maximale Werte im Zentrum der Messfläche erzielt. Die Verteilung ist ebenfalls sehr ungleichmäßig und verdeutlicht, dass eine mittlere

Volumenstromdichte für die gesamte Messfläche nicht die tatsächlich an einem Ort vorliegende Intensität widerspiegelt.

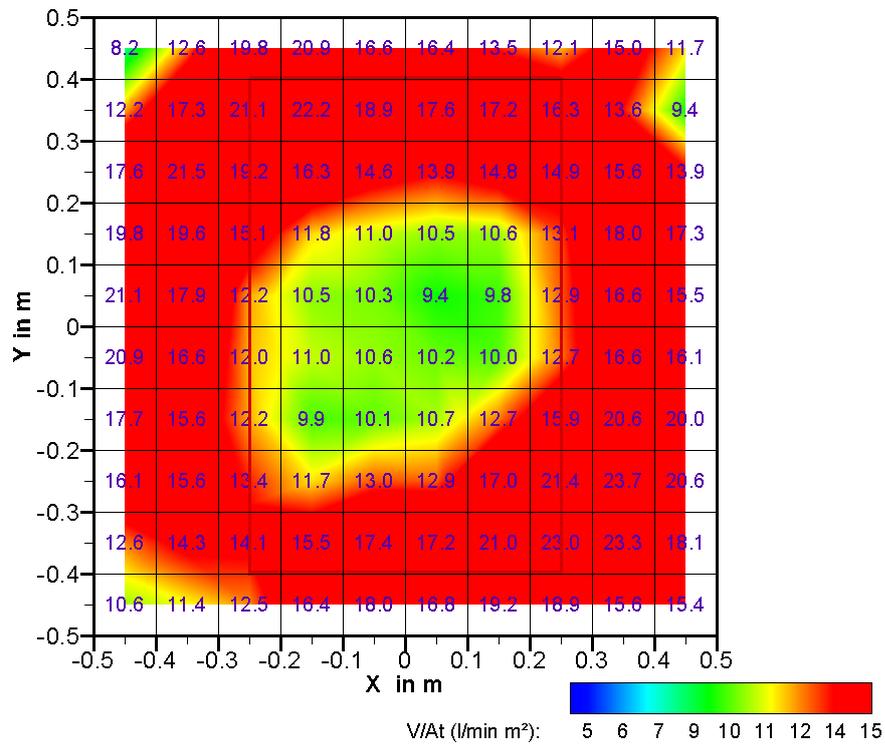
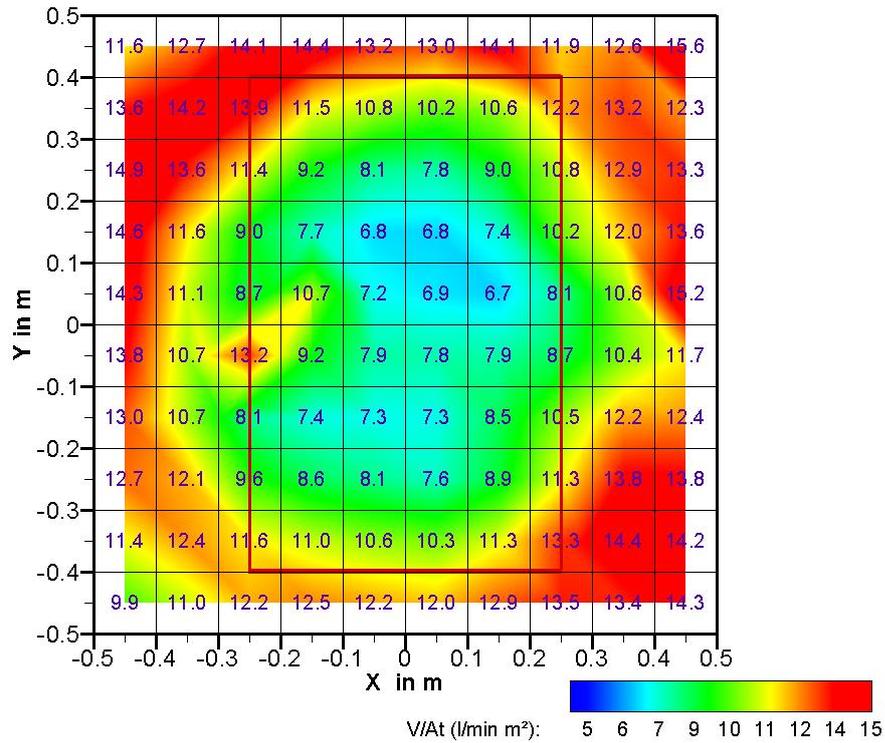


Bild 4.3: Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse A bei 5 bar (oben) und 6 bar (unten)

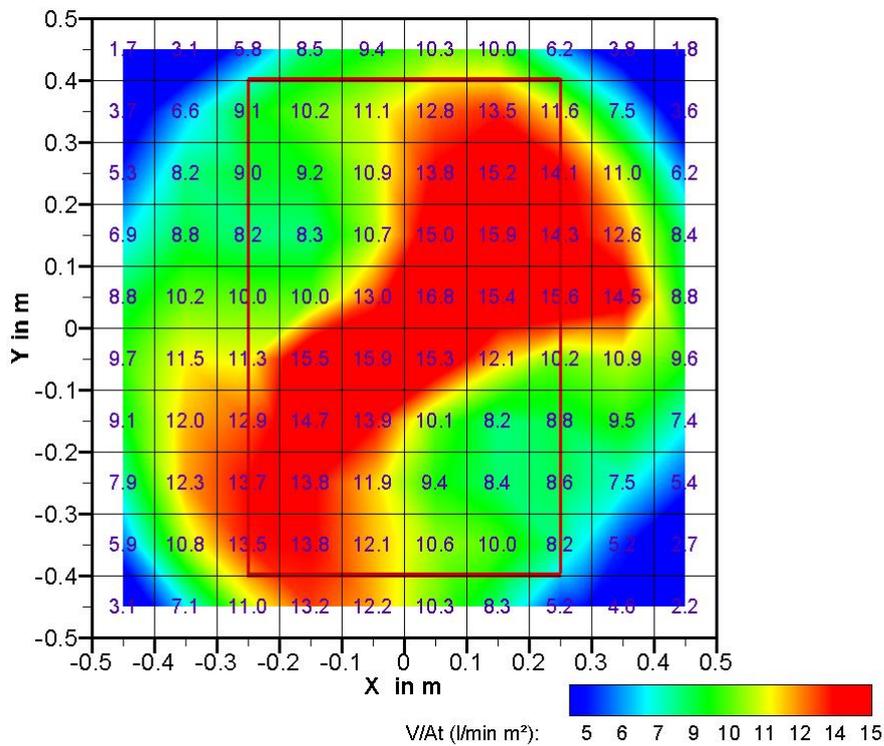
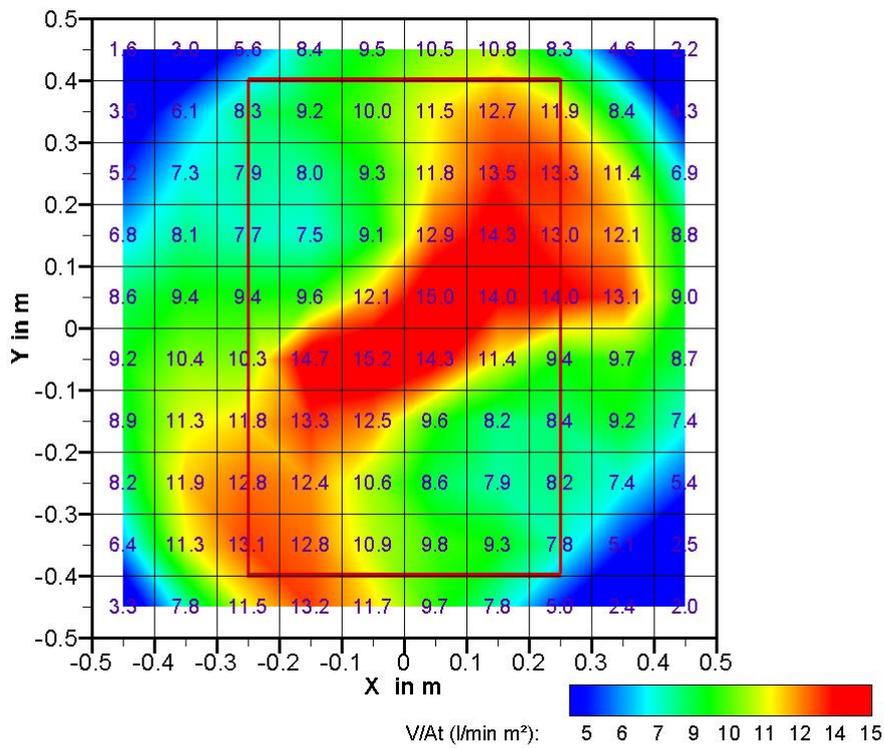


Bild 4.4: Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse B bei 2 bar (oben) und 3 bar (unten)

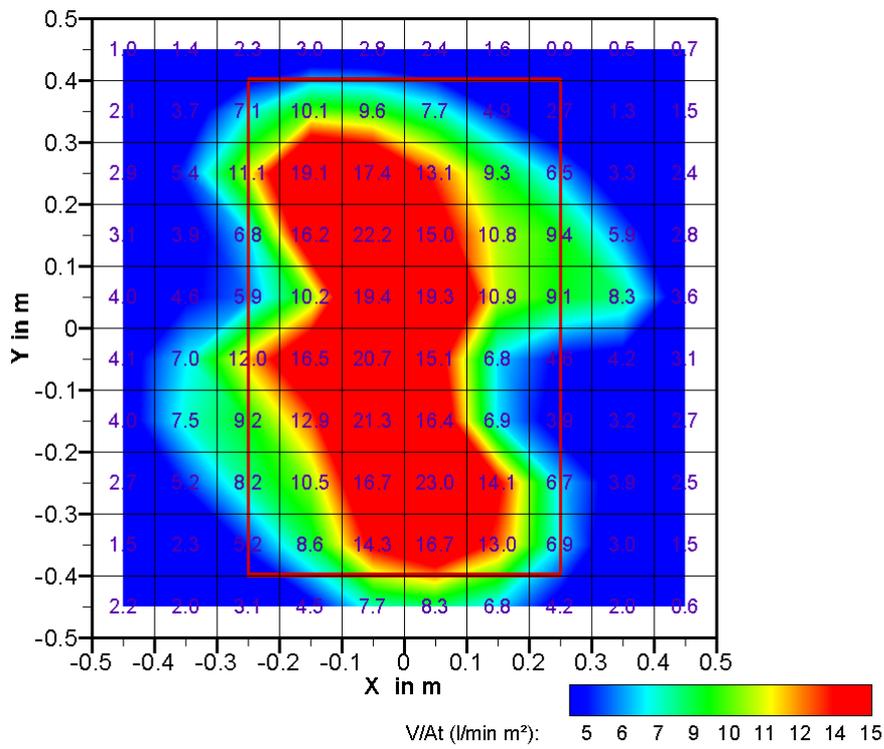
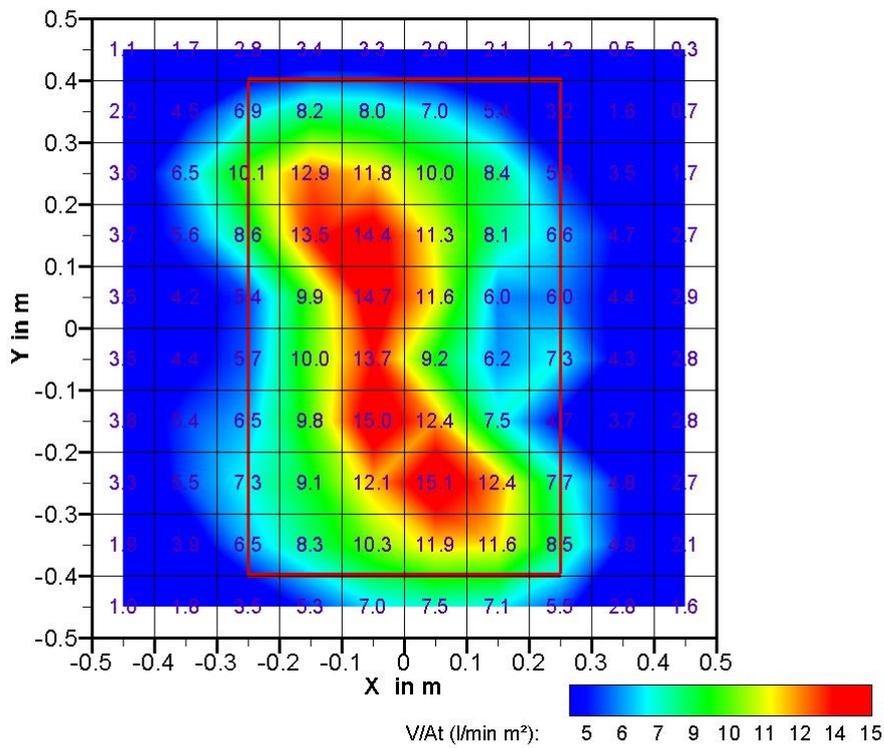


Bild 4.5: Grafische Darstellung der ermittelten Volumenstromdichte für Düse C bei 4 bar (oben) und 6 bar (unten)

Zusätzlich zu der mittleren Volumenstromdichte für die gesamte Messfläche (in Tabelle 4.1) wurde die auf die Holzkrippengrundfläche bezogene mittlere Volumenstromdichte ermittelt. In Tabelle 4.2 sind diese Werte für die verschiedenen Düsen und Drücke gegenübergestellt.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Wasserverteilungsversuche für die Düsen A bis C

Düse: Bezeichnung	Betriebsdruck bar	Volumenstromdichte auf 1 m ² Messfläche (Mittelwert) in l/min m ²	Volumenstromdichte auf Holzkrippengrundfläche (Mittelwert) in l/min m ²
A: 3000-3-16,7	3	6,4	5
	4	8,5	6,7
	5	11,1	9,1
	6	15,4	13,9
B: 460.804	1	7,2	8,3
	2	9,3	11,1
	3	10,9	14
C: 490.684	4	6,2	9,7
	5	7	11,2
	6	7,4	12,7

Aufgrund der Ungleichmäßigkeit des Sprühbildes ist eine rechnerische Ermittlung der Volumenstromdichte für eine Beaufschlagungsfläche anhand des Gesamtvolumenstroms u. U. sehr ungenau. Mit den Wasserverteilungsversuchen wurden die Volumenstromdichten für die Messfläche von 1 m² sowie für die Grundfläche der Normholzkrippe an 100 Messpunkten ermittelt, jedoch ohne den Brand zu berücksichtigen.

Die Volumenstromdichte ist nur eine der Größen, die eine detaillierte Charakterisierung des Sprühbildes ermöglichen. Weitere Größen sind der Tropfendurchmesser und die Tropfengeschwindigkeit. Sie wurden für das gleiche Messgitter mittels PDA bestimmt.

4.2 Untersuchung der Tropfenspektren mittels PDA-Messungen

Das PDA-Messverfahren stellt eine einzigartige Möglichkeit dar, die wichtigen Parameter Tropfengeschwindigkeit und Tropfengröße im freien Tropfenstrom zu bestimmen und statistisch zu erfassen. Sie stellen wesentliche Basisdaten zur Beurteilung der Löschwirksamkeit diverser Brandunterdrückungs- und Löschverfahren dar.

4.2.1 Messprinzip

Ein Laserstrahl wird in zwei kohärente und somit interferenzfähige Teilstrahlen geteilt. Sie werden mittels einer Optik in einem definierten Abstand zur Deckung gebracht. Im Deckungsbereich beider Strahlen entsteht ein endliches Ellipsoid, das das eigentliche Messvolumen darstellt. Durchlaufende Wassertropfen führen hier über Brechungseffekte an den Wassertröpfchen zur Entstehung von Interferenzen. Sie enthalten Informationen zur Geschwindigkeit sowie der Tröpfchengröße. Eine Empfangsoptik erfasst die optischen Signale und bildet sie auf drei optische Signalwandler (Photo Multiplier) ab. Aus den Phasenunterschieden der Signale separiert ein Signalprozessor die notwendigen Basisdaten, die zur Berechnung von Durchmesser und Geschwindigkeit benötigt werden. Die Anordnung der optischen Komponenten ist im Bild 4.6 dargestellt. Die Steuerung des Messprozesses sowie die Messdatenerfassung erfolgen am Bedienstand in der Messkabine, wie Bild 4.7.



Bild 4.6: Messanordnung (optische Bank)



Bild 4.7: Bedienstand in der Messkabine

4.2.2 Beschränkungen

- Ein-Komponenten-Messung

Gegenüber komplett ausgestatteter 3D-PDA-Messanlagen ist der Messplatz des IBK nur auf die Messung einer Geschwindigkeitskomponente ausgerichtet. Für die Beurteilung der Löschwasserauswurfeinrichtungen der Feuerwehr stellt dies im Allgemeinen aber keine entscheidende Einschränkung dar. Streng genommen kommt es aber durch die Ballistik der Tropfenbahnen zu Messfehlern, da jeweils nur eine ausgewiesene Komponente der dreidimensionalen Tropfenbahnen erfasst werden kann. Eine Korrekturmöglichkeit ist durch das Erfassungssystem selbst nicht gegeben, sie ist aber mit geometrischen Methoden ausführbar.

- Messbereichsanpassung

Das Messsystem muss stets den Größenordnungen der zu erwartenden Tropfengrößen angepasst werden. Dabei ist systembedingt ein sogenannter „Dynamikbereich“ von 1:50 zu beachten. Dieser stellt eine gewisse Einflussnahme auf die Ergebnisse der Messungen im Spektrum dar. Bei polydispersen Sprays kann es vorkommen, dass nicht alle Tropfengrößen mit einer Systemeinstellung gleichzeitig erfasst werden können, sondern nur Tröpfchen in bestimmten, auszuwählenden Fenster-Bereichen, wie beispielsweise 1 μm bis 50 μm , 2 μm bis 100 μm , usw. Folglich sind die Parameter des Erfassungssystems stets auf das zu untersuchende Spray und den speziellen Erfordernissen der Aufgabenstellung auszurichten. Das Messsystem bietet hierfür eine Reihe von Möglichkeiten an, den richtigen Messbereich zu finden. Für die vorliegenden Untersuchungen ist ein Erfassungsfenster von 10 μm – 500 μm gewählt worden. Somit war der maßgebliche Teil der Tropfenschwärme erfassbar.

- Volumenfluss nicht exakt messbar

Der Signalprozessor hat im Messvolumen in kürzester Zeit eine hohe Anzahl von Teilchen zu analysieren. Sie müssen aber hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit bestimmte Kriterien erfüllen. So müssen eine Vielzahl von Teilchen verworfen werden, die der Auswertung verloren gehen. Dabei handelt es sich um Tröpfchen die entweder zu groß oder zu klein sind, mehrere Teilchen gleichzeitig das Messvolumen passieren oder Teilchen, deren Flugbahn das Messvolumen nur streifen. Aus diesen Gründen ist mit diesem Verfahren der absolute Volumenstrom nicht exakt bestimmbar und muss mit den klassischen Verfahren der Probennahme erfolgen.

4.2.3 Gemittelte Tropfengrößenparameter

Zur Beurteilung von Sprays werden verschiedene Mittelwertdefinitionen genutzt. Je nach Anwendungsbereich sind eine Reihe verschiedener Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Mittelwertes entwickelt worden [Lefebvre 89, Starke 95]. Sie sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Die hieraus resultierenden Mittelwerte können je nach Tropfenspektrum zum Teil erhebliche Abweichungen untereinander aufweisen. Für Vergleichsmessungen sind diese jedoch kaum relevant. Für die Betrachtung von Löschprozessen wird im Allgemeinen der sogenannte „Sauter“-Durchmesser (D32) herangezogen. Dieser ist auch dieser Untersuchung zugrunde gelegt worden.

Tabelle 4.3: Zusammenstellung der Berechnungsmethoden und Einsatzgebiete

a	b	a+b Ordnung	Symbol	Name des Durchmessermittels	Formel	Anwendungsgebiet
1	0	1	D_{10}	Längen- Durchmesser	\hat{m}_1	Vergleich
2	0	2	D_{20}	Oberflächen- Durchmesser	$\sqrt[2]{\hat{m}_2}$	Oberflächen- steuerung
3	0	3	D_{30}	Volumen- Durchmesser	$\sqrt[3]{\hat{m}_3}$	Volumensteuerung, z. B. Hydrologie
2	1	3	D_{21}	Oberflächen-Längen- Durchmesser	$\frac{\hat{m}_2}{\hat{m}_1}$	Absorption
3	1	4	D_{31}	Volumen-Längen- Durchmesser	$\sqrt[2]{\frac{\hat{m}_3}{\hat{m}_1}}$	Verdampfung, molekulare Diffusion
3	2	5	D_{32}	Sauter-Durchmesser (SMD)	$\frac{\hat{m}_3}{\hat{m}_2}$	Massentransfer, Reaktion
4	3	7	D_{43}	De Brouckere- oder Herdan- Durchmesser	$\frac{\hat{m}_4}{\hat{m}_3}$	Verbrennungs- gleichgewicht

4.2.4 Möglichkeiten der statistischen Analyse

Mit einer statistischen Auswertung und Darstellung der Einzeltropfenmessungen können weitere wichtige Analysen der Tropfenströme erfolgen. Die Ergebnisse sind hier aussagekräftiger, da keine Mittelwertbildung erfolgt und prinzipiell jedes erfasste Tröpfchen dargestellt wird. Das Messverfahren bietet hier eine Vielzahl von statistischen Auswertmöglichkeiten, Grafen und Messwerttabellen, die entsprechend den Messanforderungen ausgewählt werden können und sich auf dem Bildschirm online im Erfassungszeitraum darstellen (Bild 4.8). Der Operator hat so zu jedem Zeitpunkt die Übersicht über den Zustand des Sprays und die Effizienz der Erfassung.

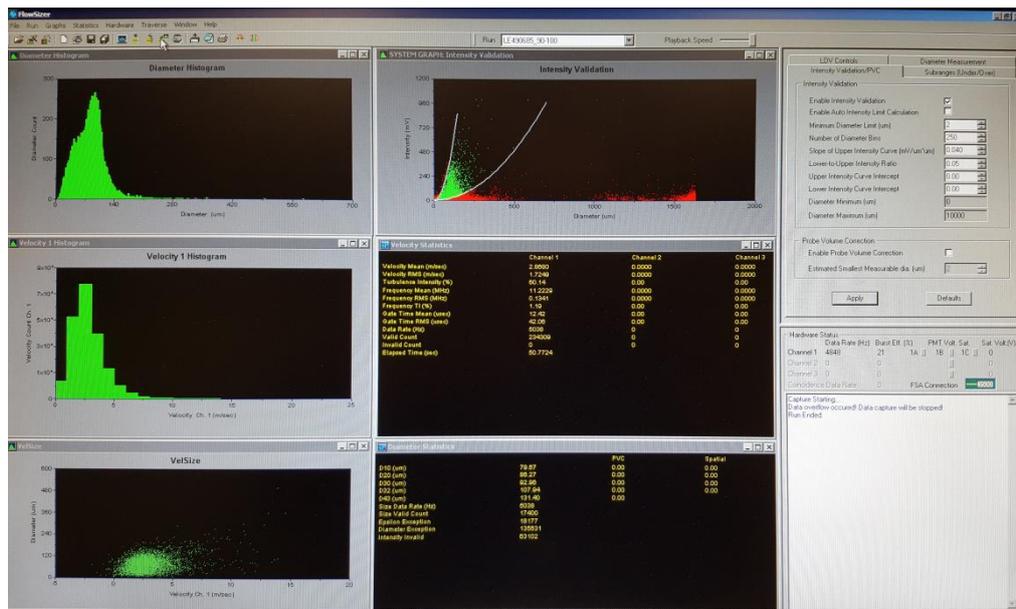


Bild 4.8: Erfassungsbildschirm

In den Abbildungen 4.9 bis 4.12 sollen beispielhaft einige grafische Darstellungsmöglichkeiten mit Messergebnissen nahe der Sprayachse vorgestellt werden.

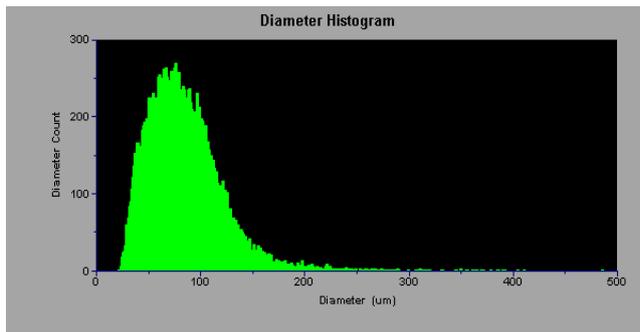


Bild 4.9: Verteilung der Durchmesser (D32)

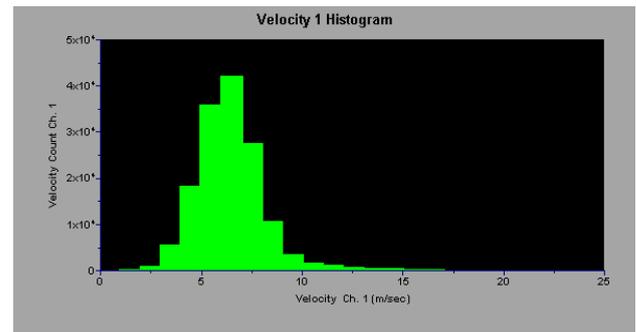


Bild 4.10: Verteilung der Geschwindigkeiten

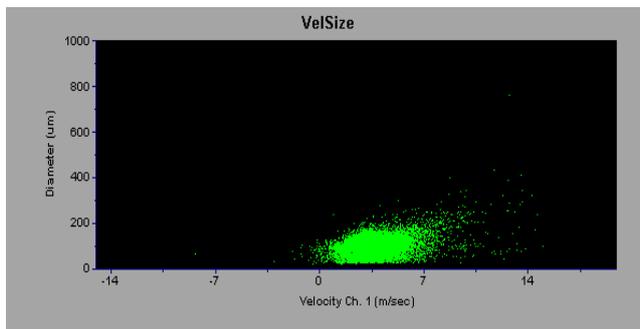


Bild 4.11: „Punktwolken“-Darstellung

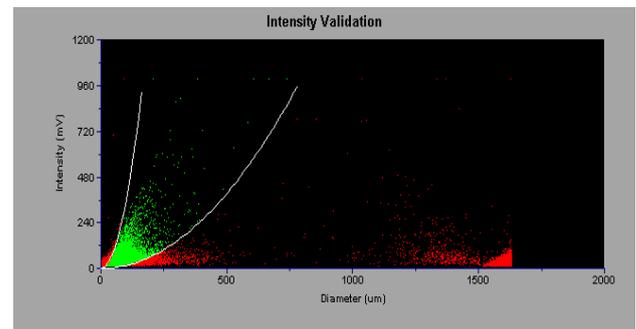


Bild 4.12: Auswahlverfahren nach Intensitätsprinzip

Die Statistiken zur Durchmesserverteilung und der Geschwindigkeitsverteilung stellen die wesentlichen Darstellungen dar. Im Bild 4.9 ist erkennbar, dass das Spray im Zentrum aus Tropfen mit Durchmessern von 20 µm bis ca. 300 µm besteht, wobei der Schwerpunkt im Bereich von 50 µm bis 120 µm liegt. Die Tropfengeschwindigkeit liegt im Bereich von 2 m/s bis 15 m/s. Das Gros der Tropfengeschwindigkeit liegt jedoch zwischen 4 m/s bis 6 m/s. Eine weit bessere Darstellung der Verhältnisse ist durch die sogenannte „Punktwolkendarstellung“ gegeben (Bild 4.11). Hier ist die Eigenschaft des Sprühstrahls hinsichtlich Größe und Geschwindigkeit auf eine andere Weise dargestellt und es ist erkennbar, mit welchen Geschwindigkeiten sich große und kleine Tropfen bewegen. Auf diese Weise können genauere Aussagen zum realen Spektrum getroffen werden, die durch landläufige Angaben der mittleren Tropfendurchmesser nicht wiedergegeben werden können. Auch hier kommen wieder nur die Vertikalkomponenten zur Abbildung. Die Darstellungsform im Bild 4.12 ist im Wesentlichen für den Operator von Bedeutung und zeigt an, wie gut das Messsystem auf das Spray abgestimmt ist. Alle hier grün abgebildeten Messpunkte werden berücksichtigt, während die anderen Fehlmessungen darstellen.

4.2.5 Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen erfolgten im Nasslabor des IBK an einem speziellen Messplatz zur Untersuchung von Wassernebel und Sprühstrahlen, der vornehmlich für vertikal ausbringende Lösch- und Sprinklerdüsen konzipiert ist. Mit einer in der Höhe verfahrbaren Deckenkonstruktion können Spraykegel aus einer Höhe von 5 Metern betrieben und mit einer PC-gesteuerten Positionierungseinrichtung für den Laser am Boden im Raster von

1 cm x 1 cm über einer Fläche von 5 m x 5 m vermessen werden. Im gegebenen Fall wurde das quadratische Rastermaß zur Untersuchung der Berechnungsflächen, bestehend aus 10 x 10 Auffangbehältern mit dem Durchmesser von 10 cm, zugrunde gelegt. Die PDA-Messungen erfolgten somit an 100 Messpunkten jeweils über der Mitte der Auffangbehälter, wie in der Grafik im Bild 4.13 dargestellt. Der vertikale Messabstand Düse – Lasermesspunkt beträgt für alle Versuche 1 m.

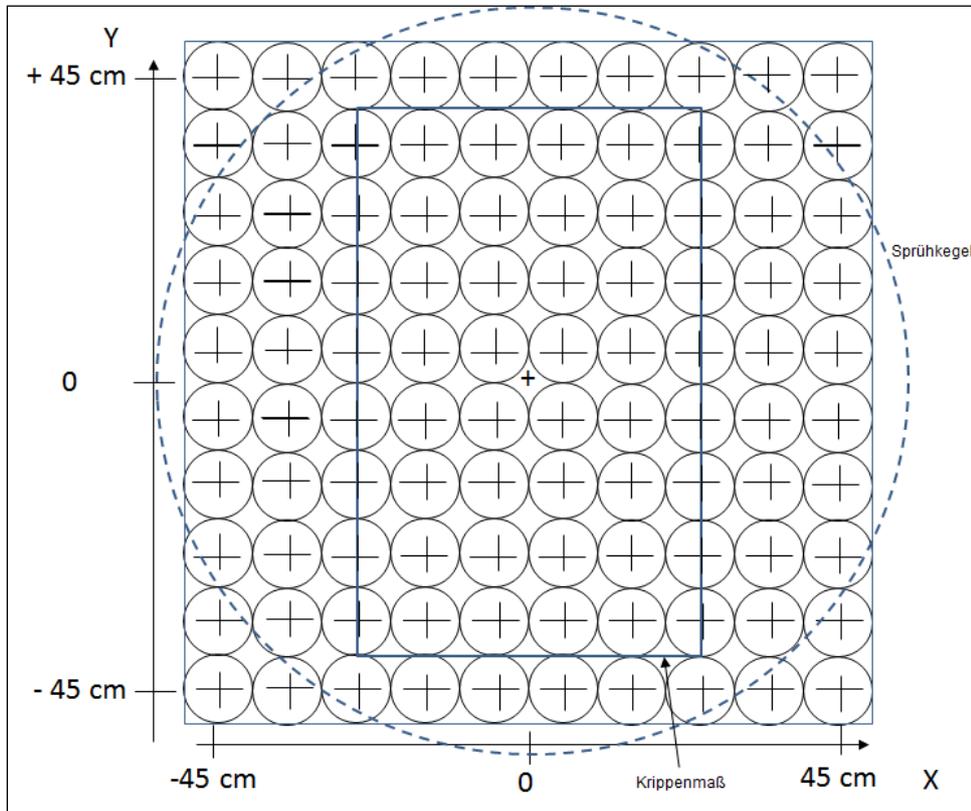


Bild 4.13: Messraster der PDA-Messung (Draufsicht)

4.2.6 Versuchsergebnisse

Die PDA-Messungen wurden für die verwendeten Löschdüsen A bis C bei jeweils 2 verschiedenen Betriebsdrücken durchgeführt. Die Messergebnisse sind in den folgenden Bildern grafisch dargestellt. Es wurden die mittlere Tropfengeschwindigkeit und der Sauterdurchmesser unter den oben beschriebenen Beschränkungen ermittelt.

Die grafischen Darstellungen veranschaulichen, wie Tropfengröße und -geschwindigkeit über den Querschnitt des Sprühkegels in 1 m Entfernung von der Düsenmündung variieren. In Bild 4.14 sind die mit der Düse A bei 4 bar und 6 bar erzielten Tropfengeschwindigkeiten, in Bild 4.15 der Sauterdurchmesser an den verschiedenen Messpunkten dargestellt.

Die Verteilung der Tropfengeschwindigkeit ist bei Düse A sehr ungleichmäßig. Mittig auf die eine Fläche, die der Größe der Krippenoberfläche entspricht, treffen die Wassertropfen mit hoher Geschwindigkeit auf. Bei höherem Druck werden etwas größere Geschwindigkeiten erzeugt. Als arithmetischer Mittelwert für die Geschwindigkeit der auf die Krippengrundfläche auftreffenden Tropfen ergeben sich bei 3 bar 3,4 m/s und bei 1 bar 2,7 m/s. Die ermittelten Sauterdurchmesser sind gleichmäßiger auf der Fläche verteilt. Als Mittelwert ergeben sich

137 μm (4 bar) und 138 μm (6 bar) bei den unterschiedlichen Drücken. Grafische Darstellungen der PDA-Messwerte für die Düsen B und C zeigen die Bilder 4.16 bis 4.19.

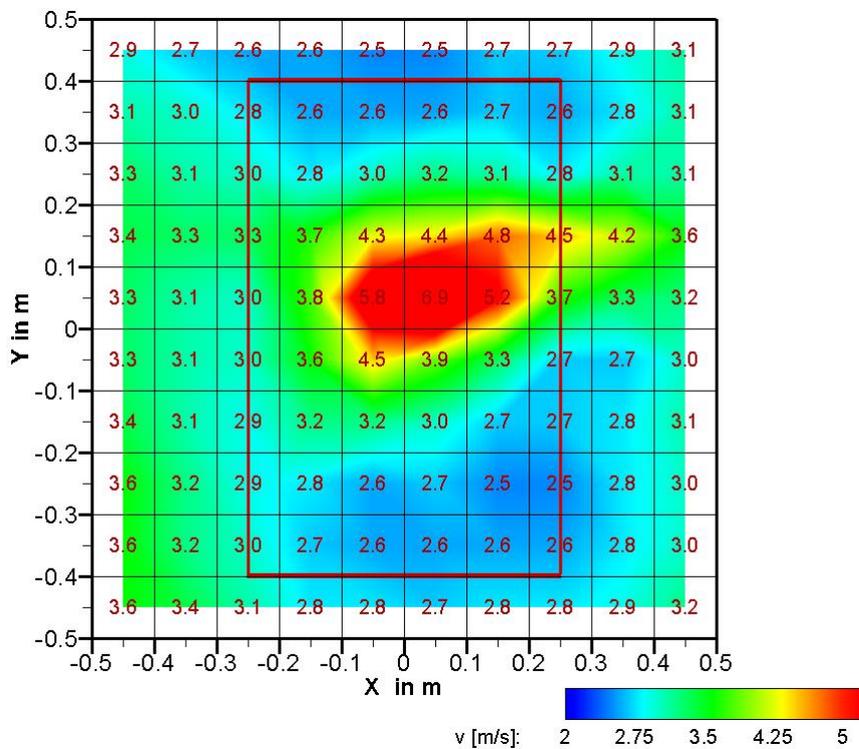
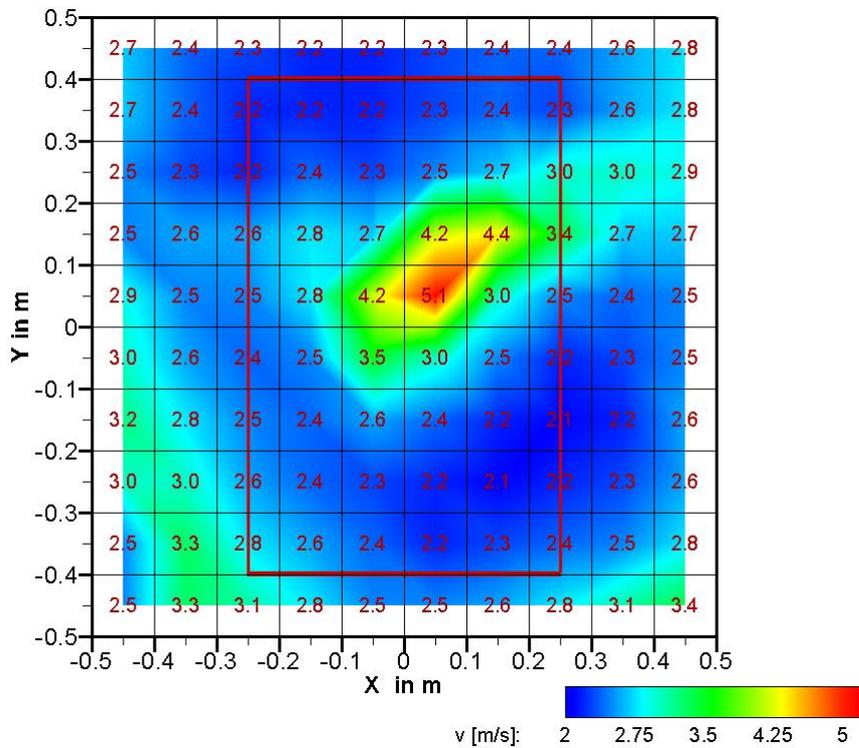


Bild 4.14: Tropfengeschwindigkeitsverteilung auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 6 bar (unten) mit Löschdüse A

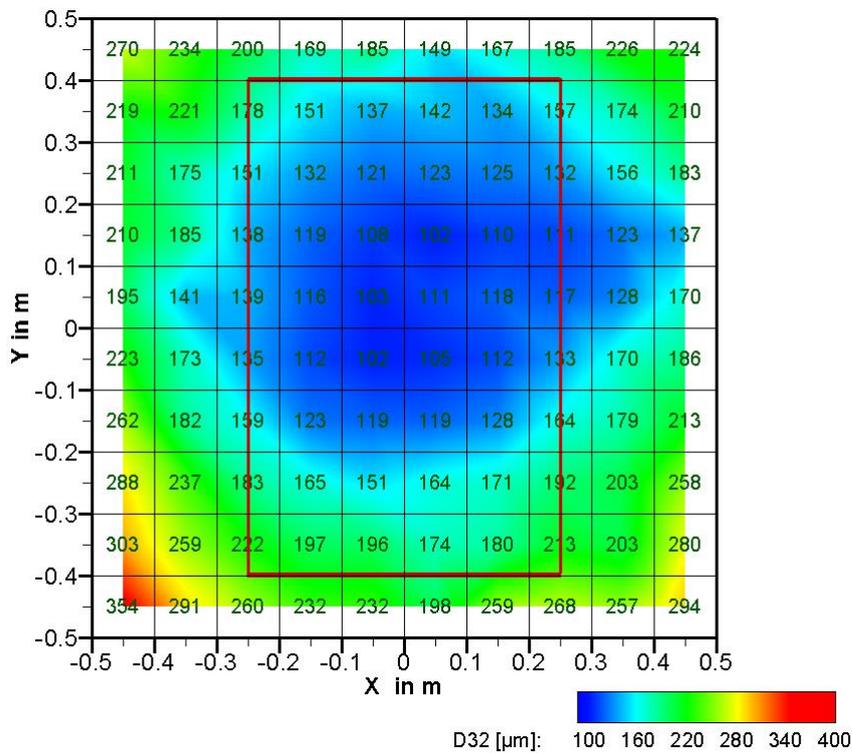
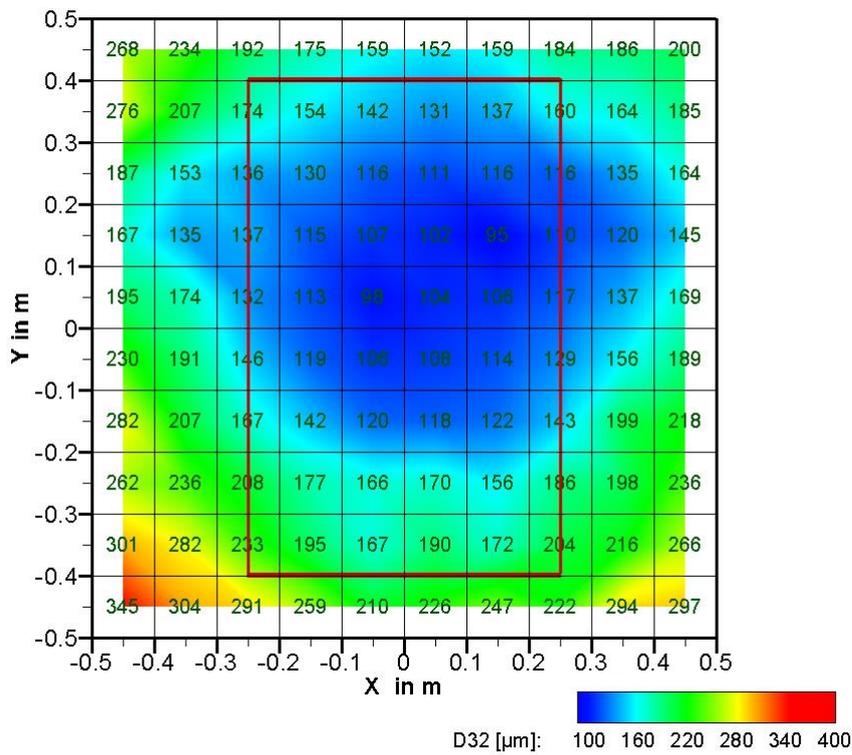


Bild 4.15: Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser) auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 6 bar (unten) mit Löschdüse A

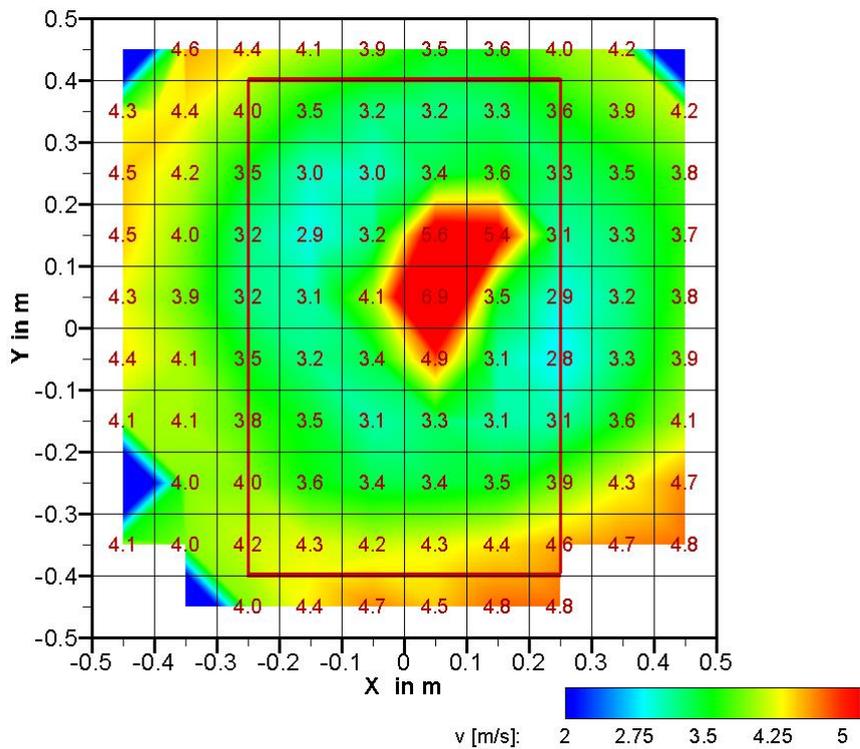
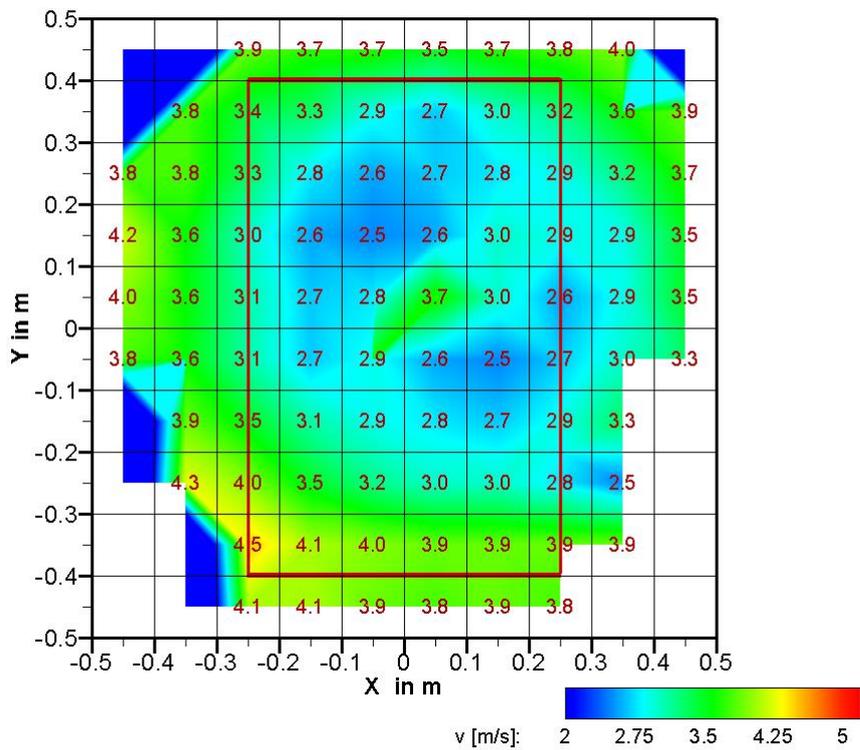


Bild 4.16: Tropfengeschwindigkeitsverteilung auf der Messfläche bei 1 bar (oben) und 3 bar (unten) mit Löschdüse B

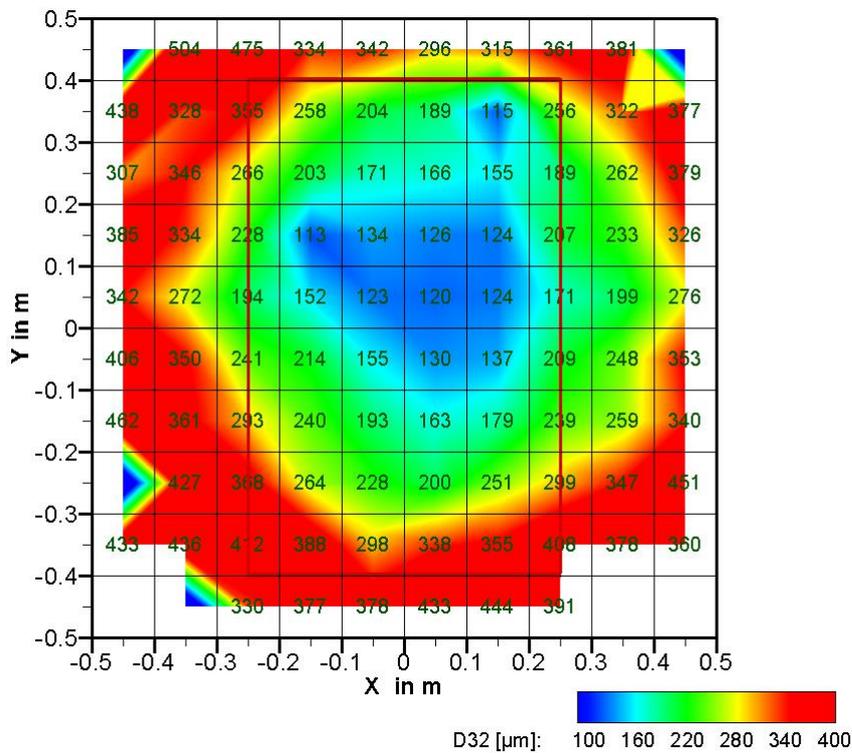
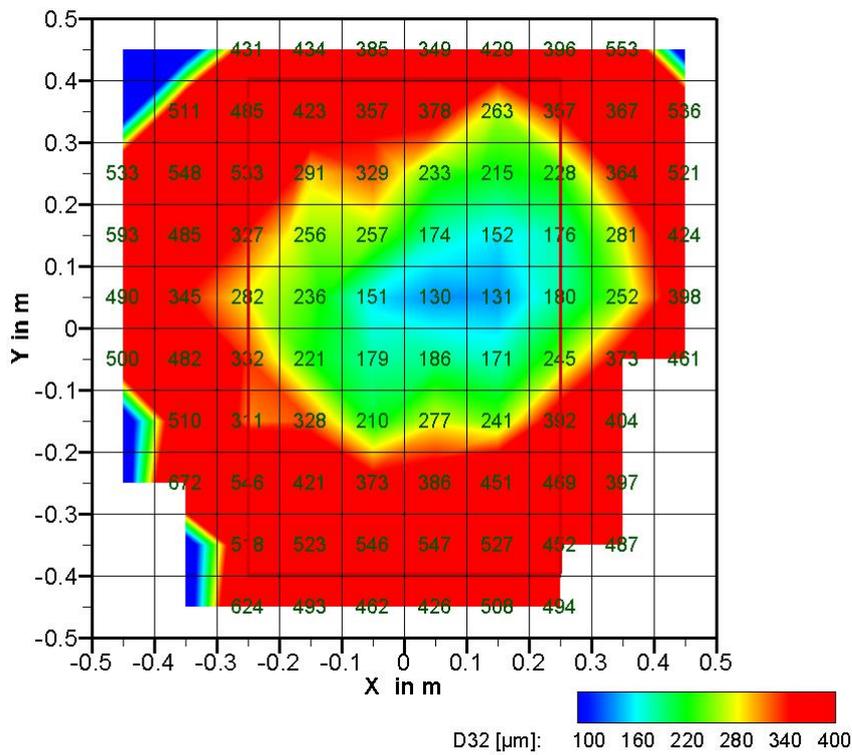


Bild 4.17: Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser) auf der Messfläche bei 1 bar (oben) und 3 bar (unten) mit Löschdüse B

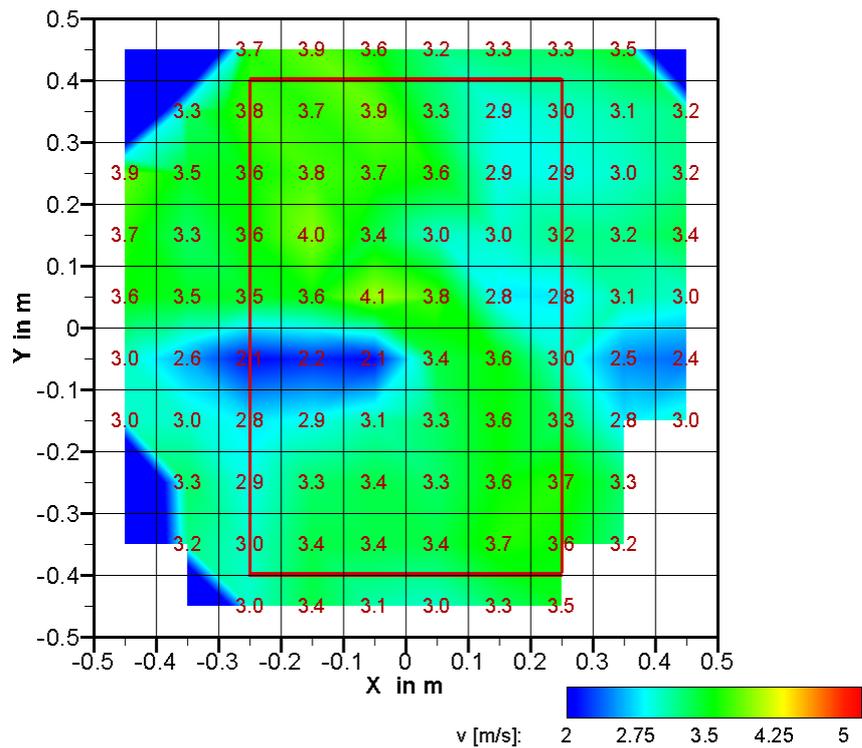
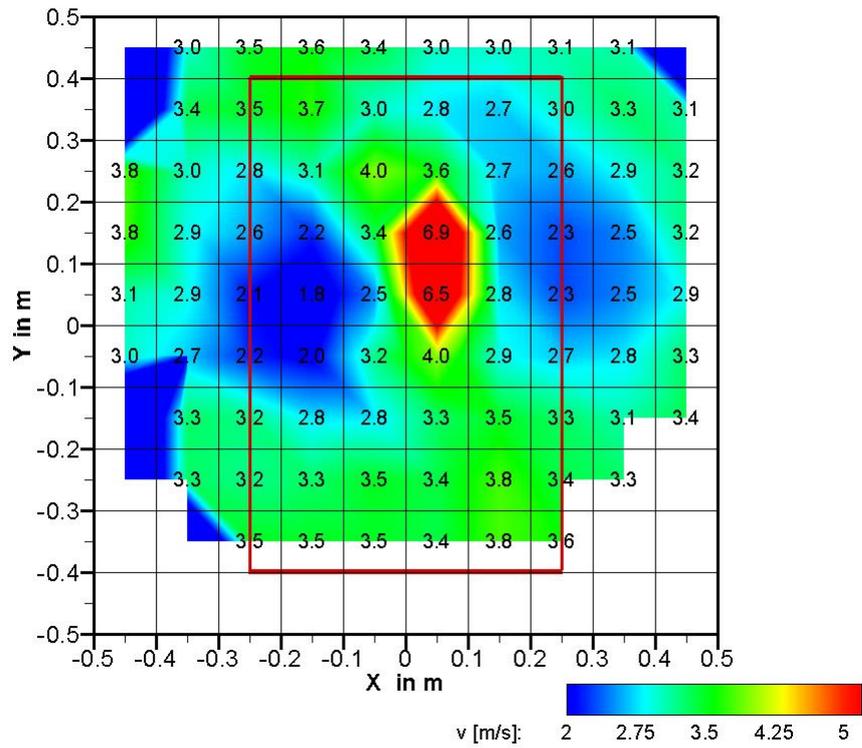


Bild 4.18: Tropfengeschwindigkeitsverteilung auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 5 bar (unten) mit Löschdüse C

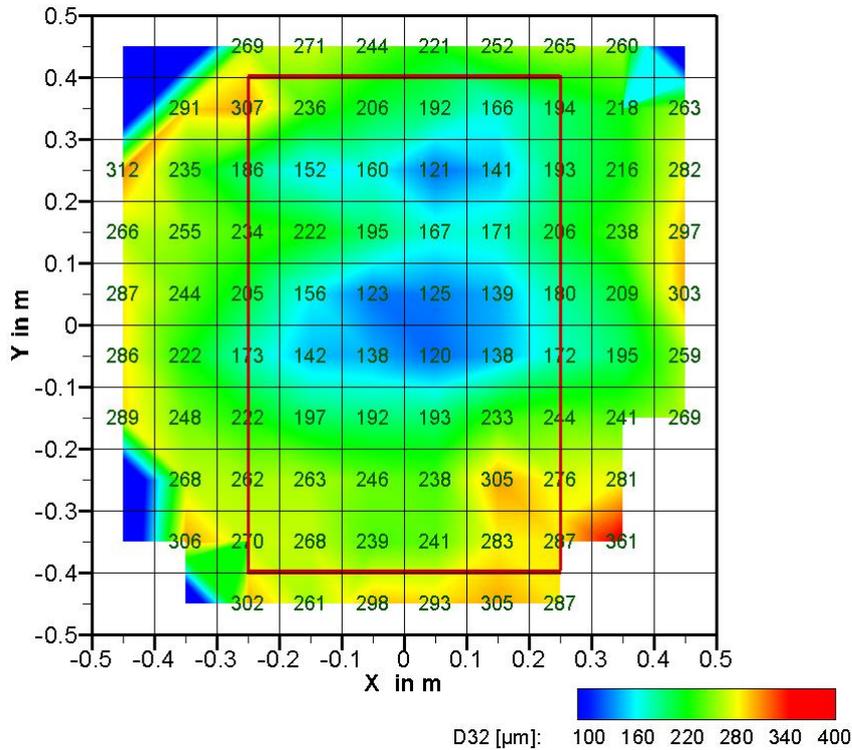
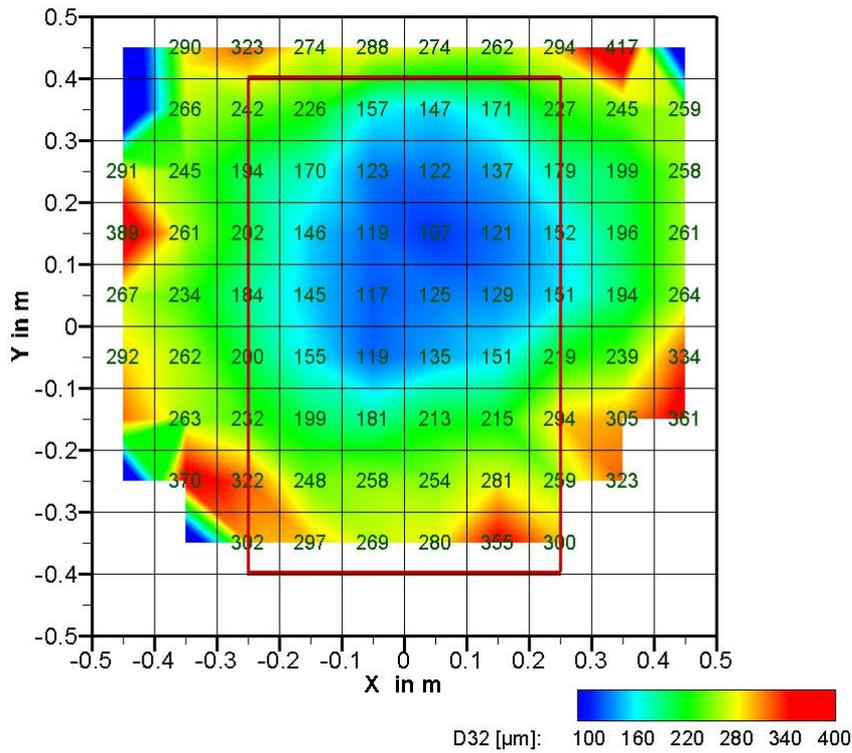


Bild 4.19: Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser) auf der Messfläche bei 4 bar (oben) und 5 bar (unten) mit Löschdüse C

Die Düsen B und C weisen ein anderes Sprühbild auf, was sich bereits bei der Ermittlung der Wasserverteilung (Abschnitt 4.1) zeigte. Der Sprühkegel der Düsen B und C ist schmäler, so dass der größte Anteil des Gesamtvolumenstromes auf die Messfläche trifft. Das spiegelt sich auch in den dargestellten Messergebnissen der PDA-Messungen wider. In den Außenbereichen des Messrasters liegen teilweise keine Werte vor, da der Sprühstrahl an diesen Messpunkten nicht mehr die ausreichende Tropfenanzahl lieferte, die für eine gesicherte statistische Auswertung erforderlich ist.

Bei Düse B differieren die Sauterdurchmesser beim geringen Betriebsdruck von 1 bar sehr stark. Außen werden Durchmesser von ca. 500 μm – 600 μm erreicht, innen sind als kleinste Werte 130 μm bis 150 μm ermittelt worden. Mittlere Tropfengeschwindigkeiten sind gleichmäßiger verteilt und liegen im Bereich von 3 bis 5 m/s, wobei bei höherem Druck die die Tropfengeschwindigkeit größer ist. Ein arithmetischer Mittelwert für die mittlere Tropfengeschwindigkeit auf der Krippengrundfläche beträgt bei 1 bar 3 m/s und bei 3 bar 3,7 m/s.

Düse C zeigt eine gleichmäßigere Verteilung des ermittelten Sauterdurchmessers für die Krippengrundfläche. Die Werte liegen zwischen 130 μm und 300 μm bei den Betriebsdrücken von 4 bar und 5 bar. Die Verteilung der Tropfengeschwindigkeiten ist im Fall des höheren Druckes von 5 bar gleichmäßig. Der arithmetische Mittelwert der Tropfengeschwindigkeit bei 5 bar beträgt 3,3 m/s.

Die Messergebnisse stellen die Verteilungen infolge eines vertikal von oben eingebrachten Sprühstrahles dar, der nicht durch einen Brand beeinflusst wird. Die Messergebnisse können Hinweise zum Löschverhalten im Brandfall liefern. Die ermittelten Verteilungen sind nicht mit denen identisch, die im Brandfall an der Krippe vorliegen.

5 BRAND- UND LÖSCHVERSUCHE

In Brandversuchen mit Normholzkrippen wurde die Brandlöschung mit Vollkegeldüsen bei unterschiedlichem Betriebsdruck und damit mit verschiedenen Volumenstromdichten an Wasser vorgenommen. Durch schrittweise Vergrößerung des Wasservolumenstromes von Versuch zu Versuch sollte die kritische Löschwasserintensität ermittelt werden. Sie ergibt sich als kleinste Volumenstromdichte, bei der ein Löscherfolg eintritt. Die für die jeweilige Düse verwendete Volumenstromdichte ist dabei die auf die Grundfläche des Brandobjektes entfallende in den Nassversuchen ermittelte Volumenstromdichte.

Die Problematik den Wert der Volumenstromdichte für eine Löschdüse zu ermitteln, wurde im vorangegangenen Abschnitt erläutert. Ähnlich ist es mit dem Sprühstrahl bei herkömmlicher Feuerwehrentechnik. Auch dort wird keine Gleichverteilung des Wassers über die Brandfläche vorhanden sein.

Zur Bewertung der Löschwirksamkeit in den Brand- und Löschversuchen werden dabei der Verlauf der HRR, die Temperaturverläufe im Innern der Holzkrippe sowie IR-Aufnahmen des Brandverlaufes analysiert. Unterstützend sind die gemessenen Produktkonzentrationen und Brandraumtemperaturen als Funktion der Zeit nutzbar.

Weiterhin sollte in den Brandversuchen die unterschiedliche Aufbringungsart des Wassers berücksichtigt werden. Neben der herkömmlichen Beaufschlagung mit dem Sprühstrahl der Löschdüse von oben, sollte die Aufbringung des Wassers mit ortsfestem seitlichem Sprühstrahl erfolgen.

5.1 Versuchsablauf

Die Brandversuche wurden mit einer Normholzkrippe 8A nach DIN EN 3 als Brandobjekt durchgeführt. Bereits vor Zündung des Brandes wurde die Rauchgasabsaugung angeschaltet, so dass bei Zündung eine stationäre Geschwindigkeit im Abgasrohr vorliegt. Die Zündung der Holzkrippe erfolgte mit 1 l Heptan, das wie in der DIN in einer Brandwanne von 60 cm x 90 cm Grundfläche auf Wasser aufgebracht wurde. Nach ca. 1,5 Minuten ist das Heptan verbrannt und die Holzkrippe befindet sich ca. 4 Minuten nach der Zündung in der Vollbrandphase.

Zunächst wurden 2 Heißversuche ohne Wasserbeaufschlagung als Vergleichsversuche zu den Brandversuchen mit Löschwassereinsatz durchgeführt. Bei diesen Brand- und Löschversuchen wurde in einer ersten Versuchsreihe die Löschung nach 8 Minuten initiiert und in ergänzenden Versuchen die Löschung nach 12 Minuten durchgeführt. Dabei wurde die Löschwasseraufbringung von oben mittels Sprühdüse vorgenommen. Weiterhin wurden Versuche mit veränderter Krippengröße bei gleicher Bauart durchgeführt, um die HRR des Brandes zu erhöhen. In allen Versuchen wurden die Löschdüsen mit konstantem Betriebsdruck gefahren. Dazu wurde das Löschwasser bereits in der Vorbrandphase im kontinuierlichen Kreislauf gefördert und mit Beginn der Löschung durch Schwenken der Löschwasserdüse mit konstantem Volumenstrom auf das Brandobjekt aufgebracht. Weitere Versuche wurden mit der Normholzkrippe 8A und der Löschwasseraufbringung von der Seite durchgeführt. Tabelle 5.1 zeigt den Versuchsplan in einer Übersicht. Die Ergebnisse der Versuche sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Tabelle 5.1: Versuche* mit Normholzstapel 8A und Löschung von oben und seitlich

Versuch	Datum	Löschdüse/ Löschbeginn	Druck/Volumen- strom auf 1 m ² in l/min	Anfangs- masse in kg	Bemerkungen
HK1	29.04.2015	Heissversuch		47	Zündung mit 1,75 l Heptan
HK2	05.05.2015	Heissversuch		49,6	Zündung mit 1 l Heptan
HK5	01.06.2015	A / 8 min	3 bar / 6,4	44,7	
HK6	09.06.2015	A / 8 min	4 bar/ 8,5	keine	
HK7	16.06.2015	A / 8 min	6 bar/ 15,4	47,85	Krippe bleibt stehen
HK8	18.06.2015	A / 8 min	5 bar/ 11,1	48,15	
HK19	24.09.2015	A / 8 min	6 bar/ 15,4	51,85	
HK9	04.08.2015	C / 8min	4 bar/ 6,2	47,3	
HK10	06.08.2015	C / 8min	5 bar/ 7	45,15	Krippe bleibt stehen
HK11	18.08.2015	C / 8min	6 bar/ 7,4	43,5	Krippe bleibt stehen
HK12	20.08.2015	C / 8min	6 bar/ 7,4	46,3	Krippe bleibt stehen
HK13	25.08.2015	C / 10min	5 bar/ 7	45,85	
HK14	27.08.2015	C / 8min	5 bar/ 7	46,65	Krippe bleibt stehen
HK15	03.09.2015	C / 8min	4 bar/ 6,2	44,6	
HK16	08.09.2015	B / 8min	1 bar/ 7,2	45,7	
HK17	10.09.2015	B / 8min	2 bar/ 9,3	50,5	
HK18	22.09.2015	B / 8min	3 bar/ 10,9	50,05	
HK21	06.10.2015	B / 12min	3 bar/ 10,9	76,85	Krippe 80x80
HK22	08.10.2015	B / 10min	3 bar/ 10,9	75,5	Krippe 80x80
HK26	03.12.2015	B / 8min	3 bar/ 10,9	73,95	Krippe 80x80
HK23	24.11.2015	A / 12min	6 bar/ 15,4	45,75	
HK24	26.11.2015	C / 12min	5 bar/ 7	44,7	
HK25	01.12.2015	B / 12min	3 bar/ 10,9	45,75	
HK27	09.12.2015	B / 8min	3 bar seitlich	43,2	Krippe längs gestellt
HK28	11.12.2015	B / 8min	3 bar seitlich	46,2	Krippe quer gestellt
HK29	14.12.2015	C / 8min	6 bar seitlich	45,5	Krippe quer gestellt
HK30	16.12.2015	A / 8min	6 bar/ seitlich	47,5	Krippe quer gestellt

* es wurden die im Bericht diskutierten Versuche aufgeführt, fehlende Versuchsnummern sind Test- bzw. Fehlversuche

5.1 Brandversuche mit Normholzkrippe 8A und Löschwasseraufbringung von oben

5.1.1 Brand- und Löschversuche mit Löschdüse A

Nachfolgend werden die in den Brand- und Löschversuchen mit der Löschdüse A erzielten Messwerte gezeigt, die für die Einschätzung der Löschwirksamkeit verwendet werden. Als wesentliche Größe dient dazu die HRR, die basierend auf den Messungen der Gaskonzentrationen nach der Methode von [Dlugogorski et al. 94] bestimmt wurde und in [Kutz und Kohl 12] beschrieben ist. In Tabelle 5.2 sind die mit der Düse A durchgeführten Versuche, bei denen die Wasseraufbringung von oben erfolgt, nochmals aufgelistet.

Tabelle 5.2: Versuche mit Normholzstapel 8A und Löschdüse A

Druck/ Lösch- beginn	Eingesetzt in Versuchen	Volumenstrom nach Herstellerangabe in l/min	Volumenstrom pro 1 m ² Grundfläche (aus Messung im Nasslabor) in l/min	Volumenstrom auf Grundfläche der HK (0,8 m x 0,5 m) (Mittelwert aus Messung im Nasslabor) in l/min
3 bar/8 min	HK5, HK3	16,7	6,4	2,0
4 bar/8 min	HK6	19,3	8,5	2,7
5 bar/8 min	HK8, HK4	21,6	11,2	3,6
6 bar/8 min	HK7, HK19	23,7	15,4	5,6
6 bar/12 min	HK23	23,7	15,4	5,6

Ergebnisse blau gekennzeichnete Versuche sind nur teilweise nutzbar, da Messstellen ausgefallen sind; grün gekennzeichnete Zeilen markieren Versuche mit Lösch Erfolg

Physikalische Größen im Brandraum und der Krippe bei Löschung nach 8 min

Die nachfolgenden Grafiken in den Bildern 5.1 und 5.2 zeigen die charakteristische Temperaturentwicklung bei einem Raumbrand und dessen Beeinflussung durch Löschwasser. Das Szenarium des Normkrippenbrandes nach DIN EN 3, bei dem eine Vorbrennzeit von 2 Minuten mit Heptan in einer Zündwanne von 0,54 m² Grundfläche vorgegeben werden, weist eine sehr schnelle Brandentwicklung auf. Die DIN definiert einheitliche Bedingungen zur Prüfung von Feuerlöschern. Für die hier durchgeführten Brand- und Löschversuche wurde eine einheitliche geringere Dauer des Zündbrandes von 90 s gewählt, die sich mit 1 l Heptan einstellt. Auch diese geringere Dauer des Zündbrandes hat eine schnelle Brandentwicklung in der Krippe zur Folge. Die Temperaturen über der Brandquelle steigen daher sehr schnell auf maximale Werte von 900 °C unter der Decke an. Der maximale Temperaturanstieg im Raum in ca. 2,5 m Entfernung von der Brandquelle beträgt 600 °C. Nach Beginn der Löschwasserzufuhr erfolgt ein sehr schneller Temperaturrückgang. Dieser Temperaturrückgang zeigt eine Abhängigkeit von der Löschwasserrate. Deutlich ist das anhand der Temperatur an Messstelle T01 (unter der

Decke, in unmittelbarer Nähe der Löschdüse) erkennbar. Im Versuch HK7 wurde der größte Volumenstrom bei 6 bar erzielt und die Temperatur sinkt in diesem Versuch erwartungsgemäß am weitesten. In den Versuchen HK8 (5 bar), HK6 (4 bar) und HK5 (3 bar) werden nacheinander geringere Volumenströme eingesetzt. Das wird durch die nacheinander geringer ausfallenden Temperaturabsenkungen deutlich.

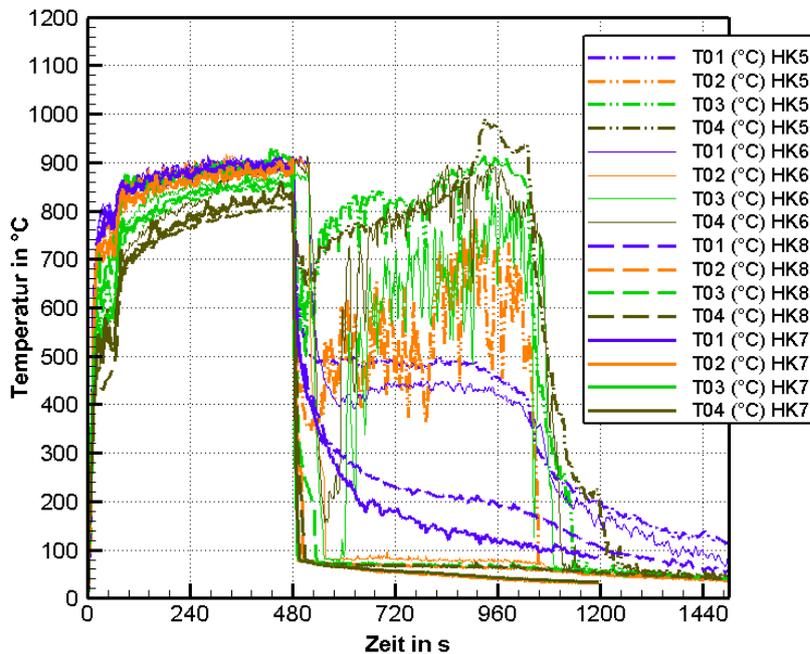


Bild 5.1: Temperaturen über der Brandquelle für Versuche mit Löschdüse A

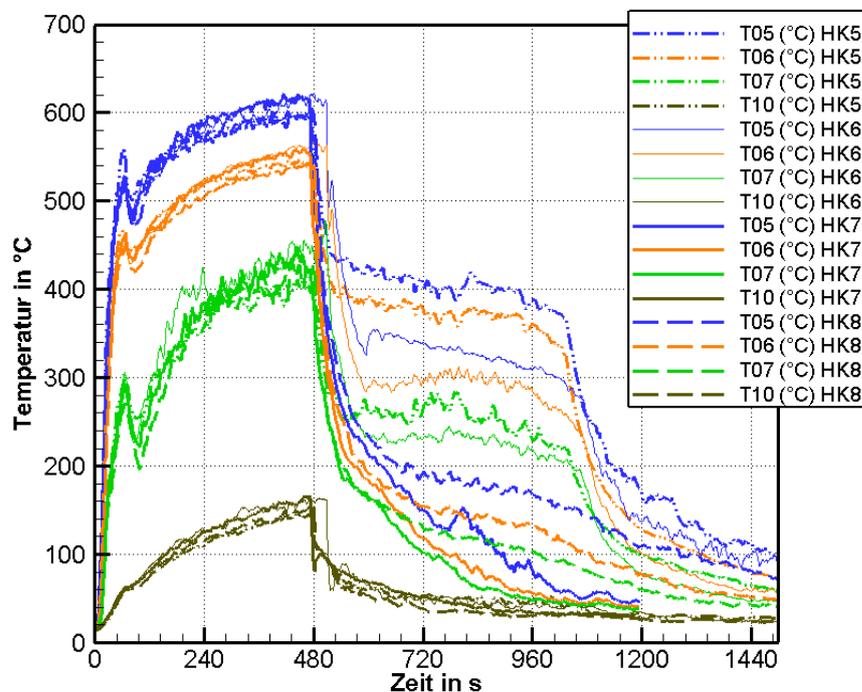


Bild 5.2: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse A

Auch die Verläufe der Raumtemperatur in der Ecke (Bild 5.2) und in der Durchgangstür (Bild 5.3) zeigen diese Abhängigkeit der Temperatursenkung vom Wasservolumenstrom.

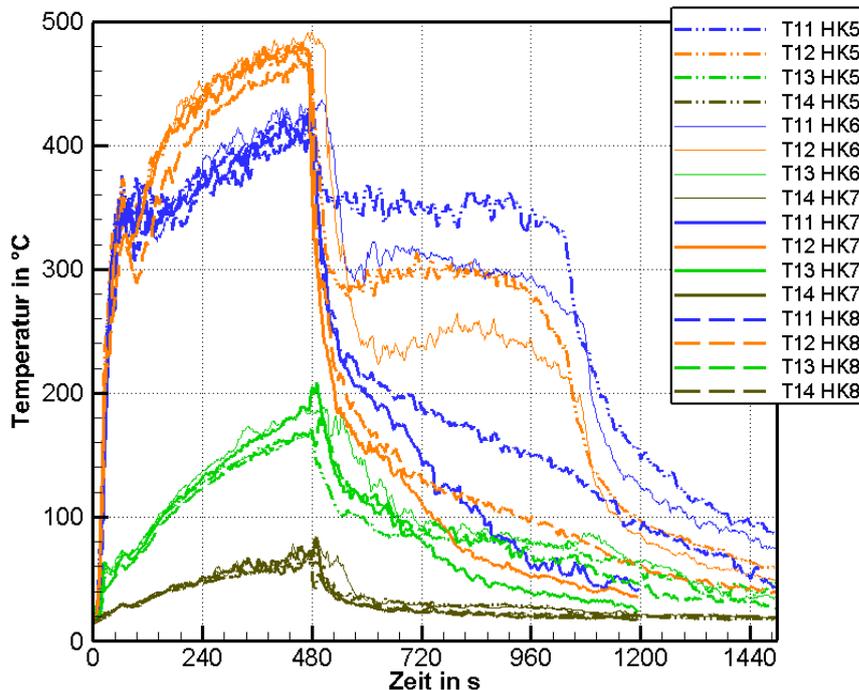


Bild 5.3: Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse A

Um zu entscheiden, bei welchem Wasservolumenstrom gerade noch eine Brandlöschung erfolgt, müssen Kriterien definiert werden, für die ein Brandversuch als gelöscht betrachtet werden soll. Möglichkeiten dafür sind:

- Temperatur im Raum (über der Brandquelle),
- Temperatur in der Krippe,
- HRR nach Löschbeginn,
- Zustand der Normholzkrippe,
- Masseverlust nach Löschbeginn.

Allein anhand der Temperaturentwicklung an der Brandquelle (Bild 5.1) könnten die Versuche HK7 und HK8 als gelöscht angesehen werden, da die Temperaturen T02 bis T04 schlagartig um ca. 800 K absinken und nicht wieder ansteigen wie das in den Versuchen HK5 und HK6 der Fall ist.

Dem stehen Beobachtungen beider Brandverläufe, die in Videoaufnahmen festgehalten wurden, entgegen. In Versuch HK7 war nach 10 Minuten andauernder Löschung lediglich ein Glutnest im Innern der Krippe vorhanden und die Krippe nach 25 Minuten Versuchsdauer gelöscht. Im Brandversuch HK8 waren nach 10 Minuten Löschwassereinsatz noch 3 brennende Lagen zu beobachten. Es fand eine starke Brandbeeinflussung aber keine Löschung statt. 27 Minuten nach Zündung fiel der Stapel in sich zusammen und es wurde eine Restablöschung vorgenommen. Diese Unterschiede spiegeln sich in den Krippentemperaturen besser wider.

In den Bildern 5.4 bis 5.6 werden die Temperaturen des Brandobjektes näher betrachtet. Dazu dienen die Oberflächentemperaturen an und im Innern der Krippe sowie der Gastemperatur im Innern der Krippe.

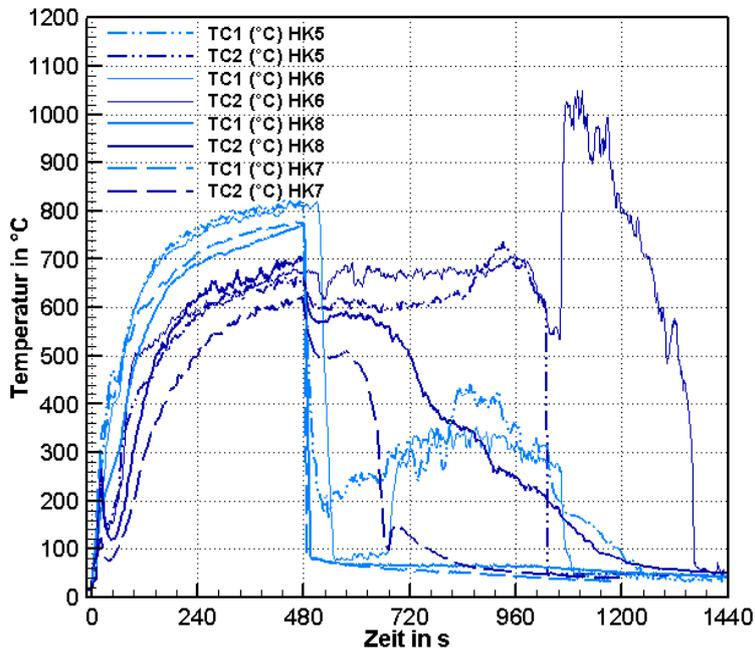


Bild 5.4: Temperaturen an der Oberfläche der Krippe (TC1, TC2) für Versuche mit Löschdüse A

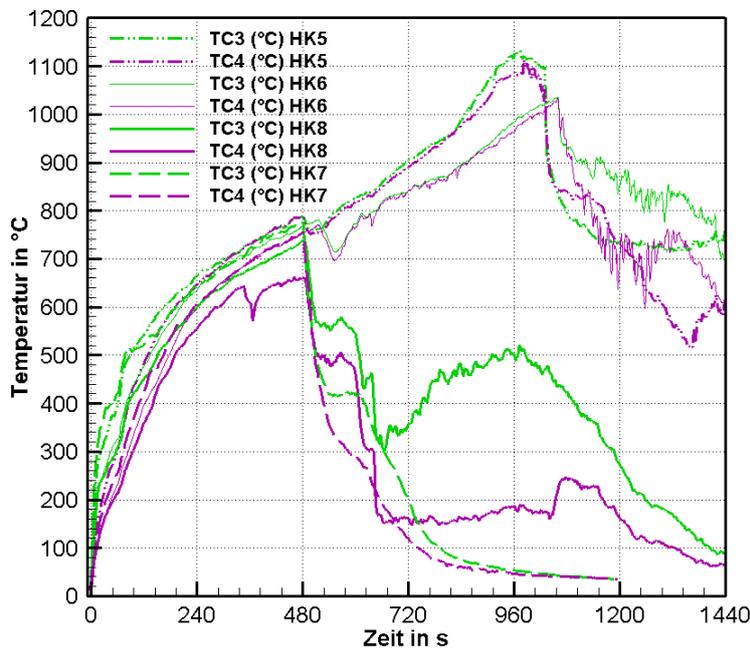


Bild 5.5: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse A

In den Versuchen HK5 und HK6, bei denen ein geringerer Wasservolumenstrom als in den Versuchen HK7 und HK8 zum Einsatz kam, ist mit Beginn der Wasserbeaufschlagung keine bzw. nur eine geringe Beeinflussung der Temperatur zu erkennen. Dagegen wird der

Unterschied der Löschwirkung in Versuch HK7 und HK8 an den Verläufen der äußeren Krippentemperatur TC1 und TC2 deutlich. In Versuch HK7 sinkt die Temperatur innerhalb von 5 Minuten auf unter 100 °C ab. In Versuch HK8 dauert das länger (ca. 11 Minuten).

Bei den Oberflächentemperaturen im Innern der Krippe ist für Versuch HK8 sogar ein Wiederaansteigen der Temperatur (TC3) zu beobachten. Das bedeutet, dass der Brand nicht gelöscht wurde. Das belegt auch der Verlauf der Gastemperatur (TC5) im Innern der Krippe in Bild 5.6. In Versuch HK7 sinkt die Gastemperatur nach kurzzeitigem Anstieg kontinuierlich ab, was auf den stark abklingenden und dann zum Erliegen kommenden Verbrennungsprozess, der Löschung, zurückzuführen ist. In Versuch HK8 setzt sich der Verbrennungsprozess fort.

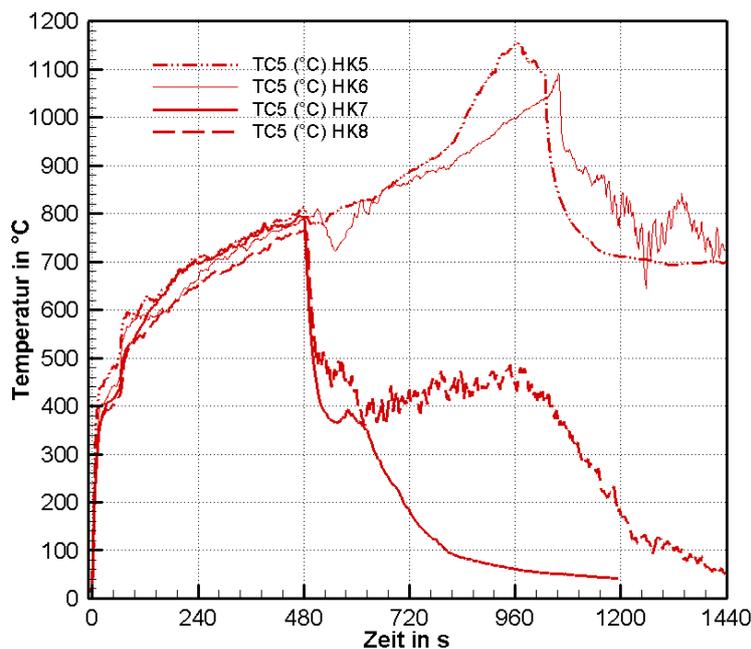


Bild 5.6: Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse A

In der Versuchsreihe mit der Löschdüse A, in der in Stufen die Löschwasserrate erhöht wurde, ist der Versuch HK7 der erste, bei dem die Löschung des Holzkrippenbrandes gelingt. Daraus ergibt sich die minimale Löschwasserrate mit 15,4 l/min m², wenn man das ungleichmäßige Sprühbild der Löschdüse vernachlässigt.

Als Kriterien, die eine erfolgreiche Löschung anzeigen, erwiesen sich dabei zunächst die Holzkrippentemperatur, die Brandraumtemperatur über der Brandquelle und die HRR nach Beginn der Löschung. Dabei ist die Nutzung des Temperaturkriteriums am wenigsten aufwendig, da es direkt aus den Messwerten ablesbar ist, während die Verwendung der HRR erst deren Berechnung unter Einbeziehung von Konzentrationen, Temperatur und Geschwindigkeit des Verbrennungsgasstromes erfordert.

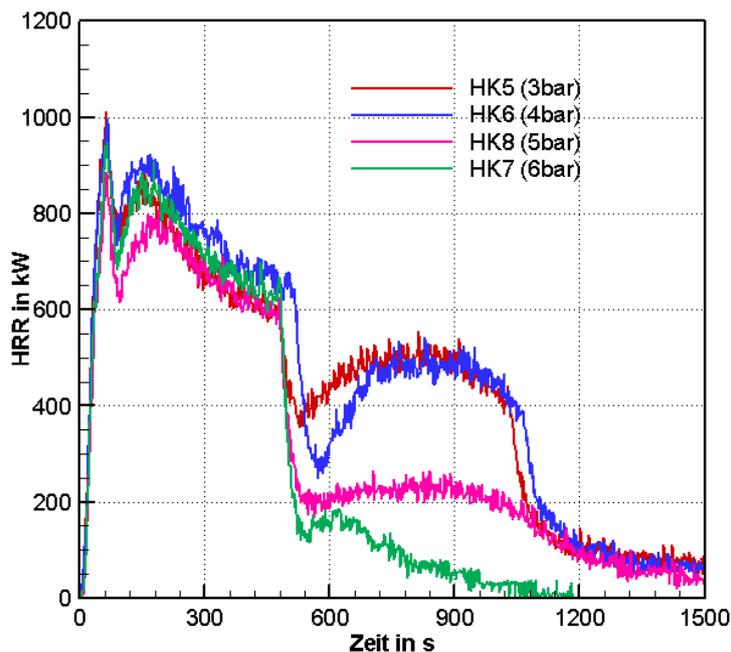


Bild 5.7: Vergleich der HRR für Versuche HK5 (3 bar), HK6 (4 bar), HK7 (6 bar) und HK8 (5 bar) mit Löschdüse A

In Bild 5.7 sind die Kurven für die HRR für die vier unterschiedlichen Versuche in einem Diagramm gegenübergestellt. Auch der Verlauf der HRR zeigt deren Abhängigkeit von der angewendeten Löschwasserrate. In den Versuchen mit 3 bar und 4 bar Betriebsdruck steigt die HRR nach kurzzeitigem rapiden Abfall der Kurve wieder auf den Wert von ca. 500 kW an. D. h. die Verbrennung wird mit verringerter Wärmefreisetzungsrate fortgesetzt. Das erneute Abfallen der Kurve ist auf das Zusammenfallen der Holzkrippe infolge des fortgeschrittenen Verbrauchs des Brandmaterials zurückzuführen. Dass die Verbrennung auch nach 1200 s noch stattfindet, ist daran zu erkennen, dass die HRR noch nicht auf null abgesunken ist. Dies ist lediglich bei Versuch HK7 der Fall. Die Beurteilung der Löschwirksamkeit anhand der HRR erscheint damit als ein sicheres Kriterium.

Vergleich bei Löschung nach 8 min und 12 min für Löschdüse A

Mit Versuch HK23 wurde experimentell untersucht, ob mit der gleichen Wasserrate auch dann eine Brandlöschung erfolgreich durchgeführt werden kann, wenn mit der Aufbringung des Löschwassers erst nach 12 Minuten begonnen wird. Als Vergleichsversuch dient Brandversuch HK7, bei dem nach 8 min die Löschwasserzufuhr mit Düse A und 6 bar erfolgte und der als gelöscht gilt.

Die Heißversuche zeigten, dass nach 12 Minuten Brandentwicklung der Brennstoff so weit verbrannt ist, dass kein voll entwickelter Brand mehr vorliegt. Im Versuch HK1 waren nach 12 Minuten Brandentwicklung 80 % des Materials verbrannt, im zweiten Heißversuch (HK2) 71 %. Bei Absinken der Restmasse des Brandmaterials auf 70 % der Anfangsmasse geht man davon aus, dass der Brand in die abklingende Phase übergeht [Leitfaden 13], in der die HRR aufgrund Mangels an Brandmaterial sinkt. Damit bei unterschiedlichem Löschbeginn gleiche Bedingungen hinsichtlich der Intensität des Brandes vorliegen, wurde für die Versuche mit späterem Löschbeginn eine kleinere Zündquelle verwendet. Es wurde eine 0,3 m x 0,3 m große Zündwanne mit 0,5 l Heptan befüllt und mittig unter der Krippe

gezündet. Damit konnte eine etwas langsamere Brandentwicklung erzielt werden. Zur Zündung aller Normholzkrippenversuche mit Löschbeginn nach 8 Minuten wurden jeweils 1 l Heptan in der Zündwanne von 0,9 m x 0,6 m Größe verwendet.

Der Vergleich der Temperaturentwicklungen beider Versuche über der Brandquelle und im Raum in den Bildern 5.8 und 5.9 zeigt, dass zum Zeitpunkt des jeweiligen Löschbeginns ein Temperaturanstieg auf nahezu gleichen Maximalwert erzielt wurde. Unterschiede im Temperaturverlauf beider Versuche innerhalb der Vorbrennzeit zeigen sich in den ersten 4 Minuten der Brandentwicklung anhand der Raumtemperatur in der Ecke (Bild 5.9). Im Versuch HK23, bei dem ein geringeres Zündinitial verwendet wurde, erfolgt der Temperaturanstieg langsamer, was aus o.g. Gründen beabsichtigt ist. Zum Zeitpunkt der Zündung sind im Versuch HK7 50 % des Brennstoffes verbrannt, im Versuch HK23 bereits 64 %. Der Löschbeginn liegt somit in der Vollbrandphase.

Der Vergleich zeigt bei Löschbeginn nach 12 min eine ebenso wirksame Reduzierung der Raumtemperaturen wie bei Löschbeginn nach 8 min. Neben der sofortigen Reduzierung der Temperaturen über der Brandquelle (T02, T03, T03) und dem kontinuierlichen Absinken der Temperatur an Messstelle T04, wird auch in größerem Abstand von der Löschdüse eine Verringerung der Temperatur erzielt. So wird in der Ecke des Brandraumes die Temperatur in Deckennähe (T05) innerhalb von 8min nach beginnender Löschwasserbeaufschlagung auf 100 °C abgesenkt. Die Geschwindigkeit der Temperaturänderungen ist für beide Versuche gleich.

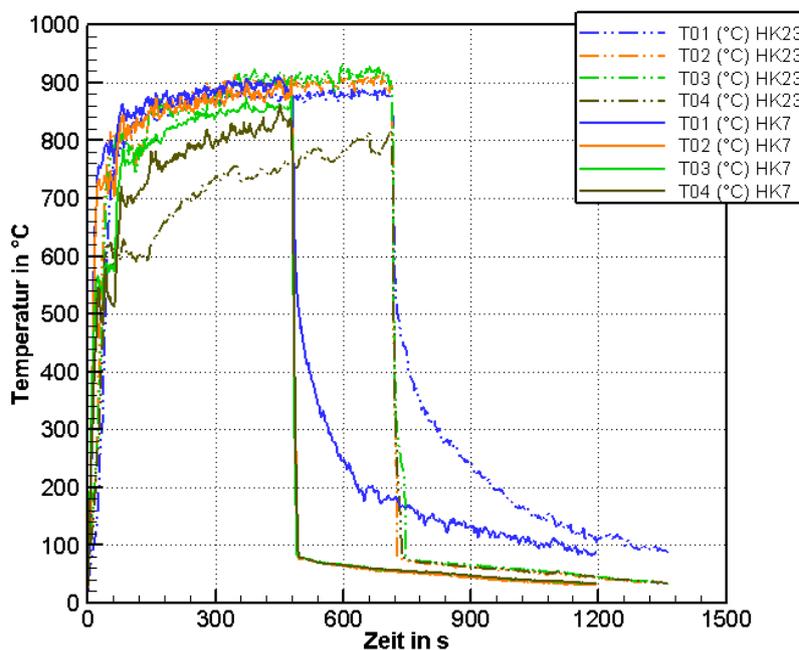


Bild 5.8: Vergleich der Raumtemperaturen (über der Quelle) für die Lösversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)

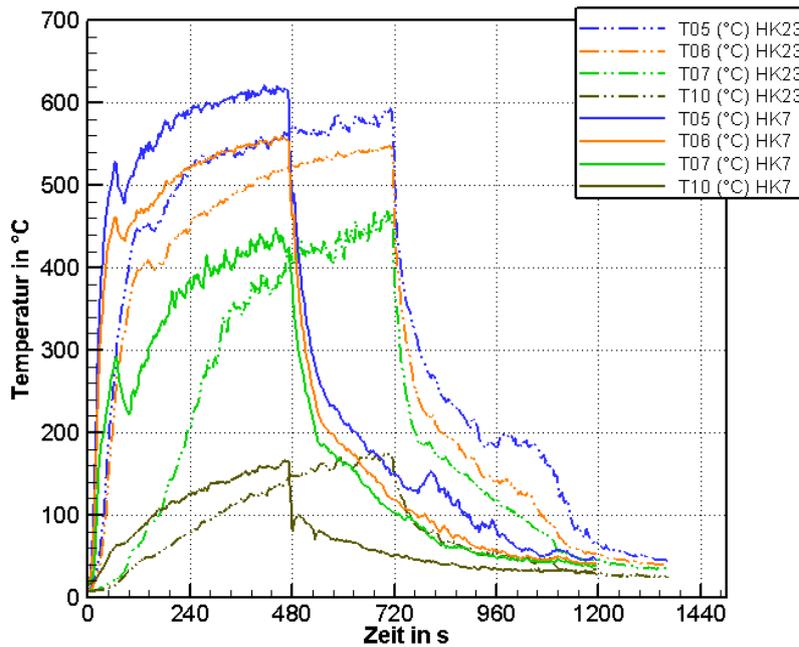


Bild 5.9: Vergleich der Raumtemperaturen (in der Ecke) für die Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)

Der Verlauf der Krippentemperatur zeigt ein anderes Bild. Zwar werden die Krippentemperaturen auch bei Löschbeginn nach 12 min gemindert, jedoch im Fall der Krippentemperatur TC2 (vgl. Bild 5.10) erst nach 17 min. Zu diesem Zeitpunkt ist der Krippenabbrand so weit fortgeschritten, dass einzelne Holzstäbe zerfallen und die Messstellen der Oberflächentemperaturen aus der Befestigung fallen. Nach ca. 18 Minuten fällt der Stapel völlig zusammen.

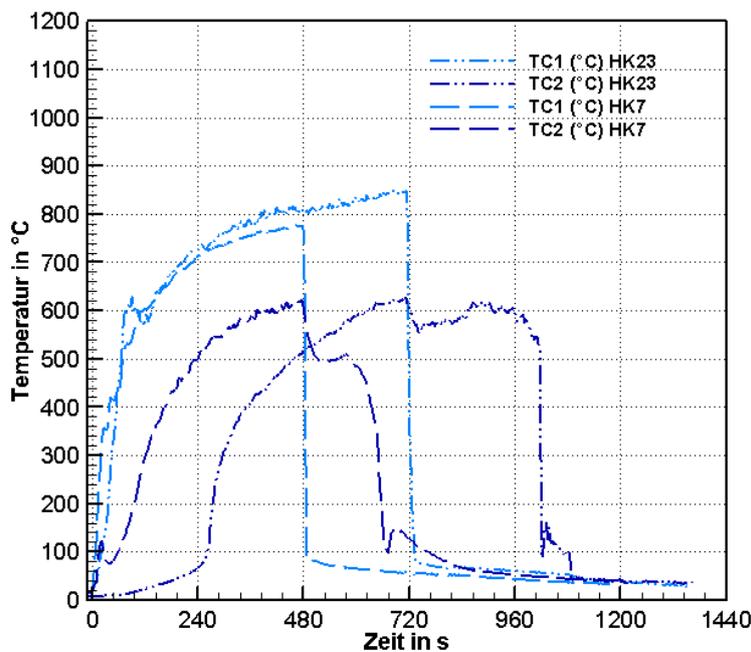


Bild 5.10: Krippentemperatur (TC1 und TC2) für die Löschversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)

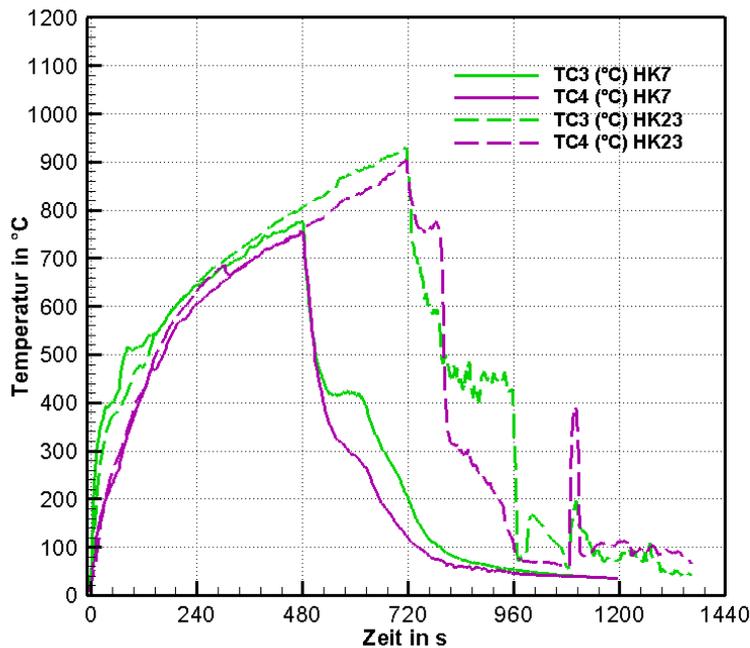


Bild 5.11: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Löscheversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)

Der Verlauf der Gastemperatur zeigt ein kontinuierliches Absinken, was am Messort eine abklingende Verbrennung anzeigt.

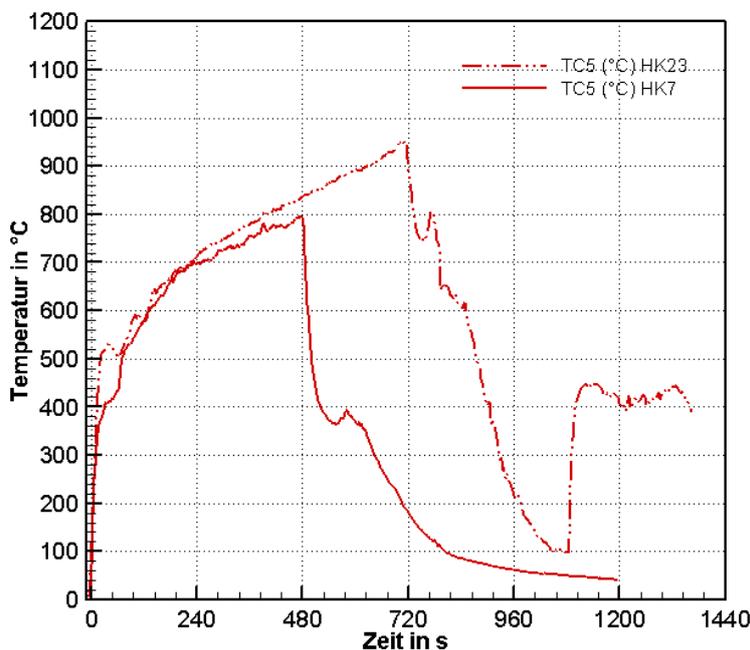


Bild 5.12: Gastemperatur in der Krippe (TC5) für die Löscheversuche mit Düse A bei 6 bar nach 8 min (HK7) und 12 min (HK23)

Eine Gegenüberstellung der HRR-Kurven für den Löschebeginn nach 8 min und nach 12 min mit Löschdüse A und 6 bar Betriebsdruck ist in Bild 5.12 zu sehen.

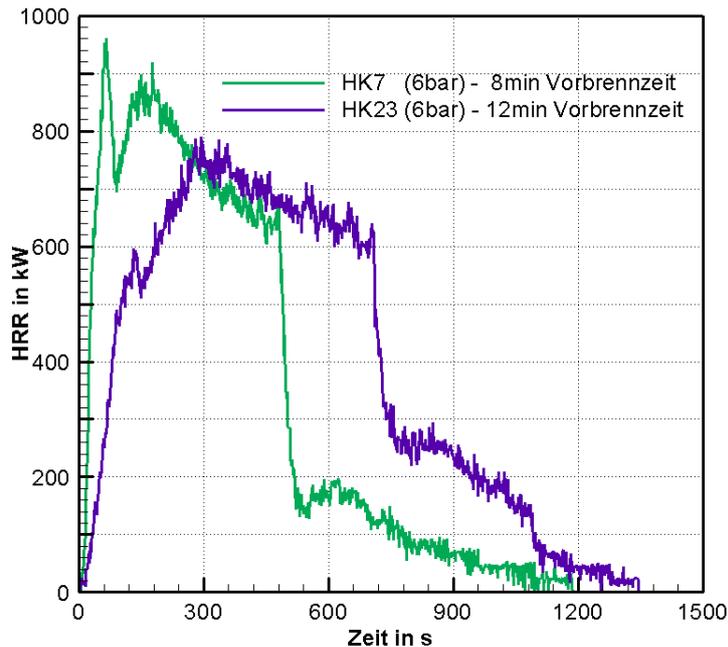


Bild 5.13: Vergleich der HRR für Versuche HK7 und HK23 mit Löschdüse A und 6 bar

In Versuch HK23 (nach 12 min) wird zu Löschanfang eine geringere Reduzierung der HRR erzielt. Bei gleichem Abklingverhalten der HRR für die beiden Versuche, sinkt die HRR in Versuch HK23 nicht auf null ab. Dies geschieht erst zum späteren Zeitpunkt, nachdem die Holzkrippe zusammengefallen ist und der verbleibende Glutbrand während der Versuchsdauer von 25 min, in denen die Löschwasserzufuhr aufrechterhalten wurde, gelöscht wird.

In den Versuchen mit Löschanfang nach 8 min erfolgt die Löschung des Holzrippenbrandes im Stadium des Flammenbrandes, wobei nach Löschung die Krippenkontur erhalten bleibt.

Bei Löschanfang nach 12 min bleibt die Struktur des Brandobjektes nicht erhalten und es erfolgt eine Restablöschung zu einem späteren Zeitpunkt. Ein Vergleich der Brandverläufe anhand von Videosequenzen zu gleichen Zeitpunkten ist im Anhang A beigefügt.

5.1.2 Brand- und Löschanversuche mit Löschdüse B

Eine weitere Versuchsreihe zur Ermittlung der minimalen Löschwasserrate wurde mit der Löschdüse B durchgeführt. Diese Düse weist ein anderes Sprühbild auf als Düse A. Die auf die Grundfläche der Holzkrippe bezogene Wasserrate liegt dabei in gleicher Größenordnung. In Tabelle 5.3 sind die mit der Löschdüse B und dem Normholzstapel 8A durchgeführten Versuche aufgelistet.

Tabelle 5.3: Versuche mit Normholzstapel 8A und Löschdüse B

Druck/ Lösch- beginn	Eingesetzt in Versuchen	Volumenstrom nach Herstellerangabe in l/min	Volumenstrom pro 1 m ² Grundfläche (aus Messung im Nasslabor) in l/min	Volumenstrom auf Grundfläche der HK (0,8 m x 0,5 m) (Mittelwert aus Messung im Nasslabor) in l/min
1 bar/8 min	HK16	7,6	7,2	3,3
2 bar/8 min	HK17	10	9,3	4,45
3 bar/8 min	HK18	11,8	10,9	5,6
3 bar/12 min	HK25	11,8	10,9	5,6

Physikalische Größen im Brandraum und der Krippe bei Löschung mit Löschdüse B nach 8 min

Es wurden 3 verschiedene Versuche mit jeweils unterschiedlichem Betriebsdruck durchgeführt. Am Beispiel des zeitlichen Verlaufs der Temperatur über der Brandquelle und der Raumtemperatur in der Ecke in Bild 5.14 und 5.15 werden die Wirkungen der unterschiedlichen Löschwasserraten gezeigt. Nur im Versuch HK18 kann die Temperatur über der Brandquelle dauerhaft gesenkt werden. Die Raumtemperatur in der Ecke sinkt in Abhängigkeit von der Löschwasserrate ab. Die geringste Absenkung der Temperatur ist bei der kleinsten Löschwasserrate vorhanden, die größte im Versuch HK18 mit der größten Löschwasserrate.

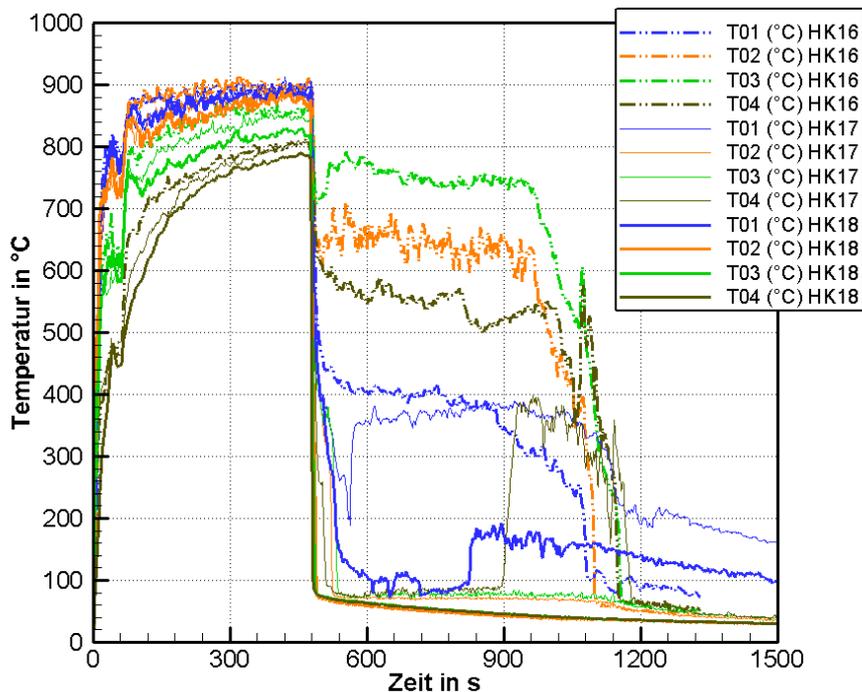


Bild 5.14: Temperaturen über der Brandquelle für Versuche mit Löschdüse B

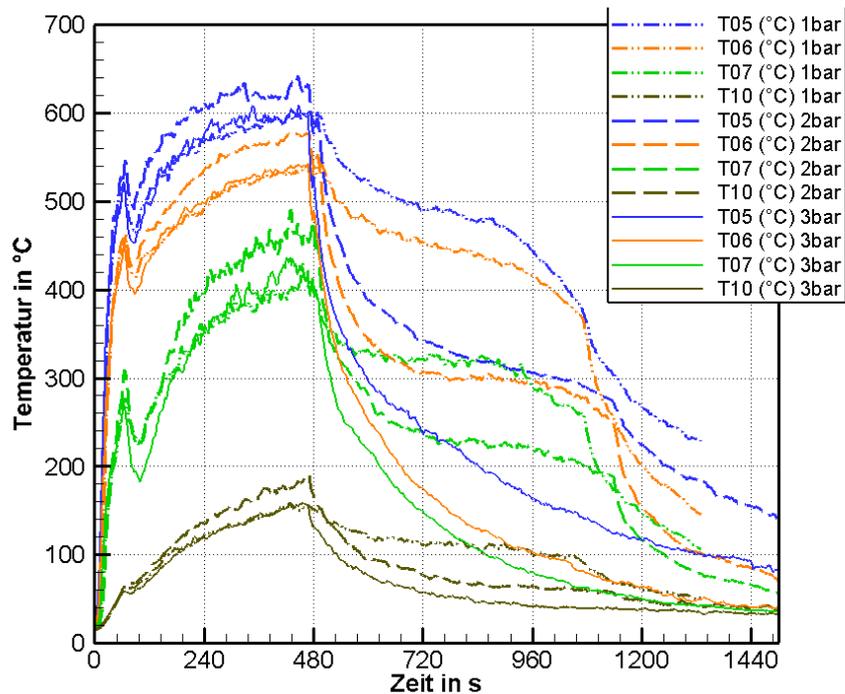


Bild 5.15: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse B

Betrachtet man die Krippentemperaturen, so erkennt man anhand der Oberflächentemperatur TC2 in Bild 5.16, dass lediglich in Versuch HK18, d.h. bei 3 bar ein Absinken der Temperatur nach ca. 700 s Branddauer stattfindet. In den beiden anderen Versuchen sinkt die Temperatur erst nachdem die Holzkrippe infolge des weiter fortschreitenden Abbrandes zusammengefallen ist. Die Messstelle TC1, die sich an der Oberseite des Stapels befindet, liefert keine Information zum Abbrand. Sie wird offensichtlich von Wassertropfen getroffen.

Die Oberflächentemperatur im Innern der Krippe (Messstellen TC3 und TC4) in Bild 5.17 zeigt, dass nur bei Versuch HK18 ein dauerhaftes Absinken der Temperatur stattfindet. Gleiches gilt für die Gastemperatur im Innern der Krippe, dargestellt in Bild 5.18.

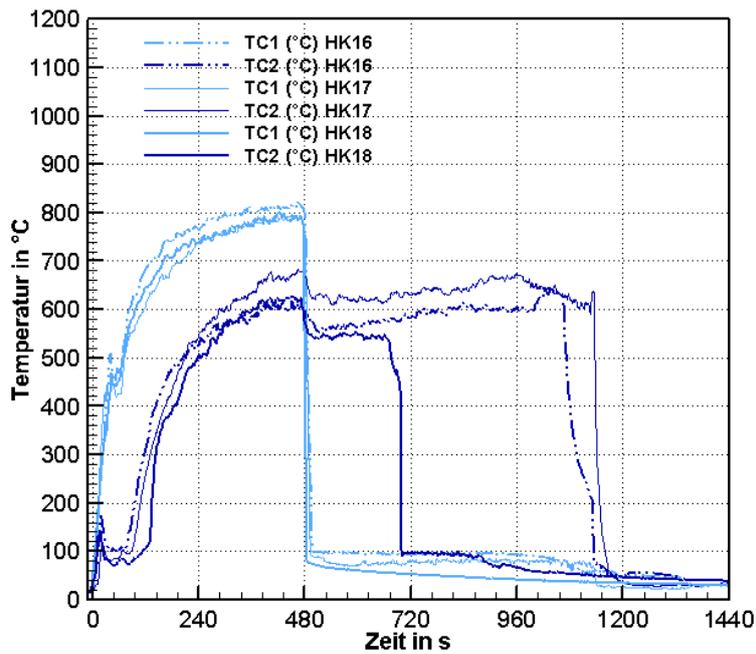


Bild 5.16: Temperaturen an der Krippenoberfläche (TC1, TC2) für Versuche mit Löschdüse B

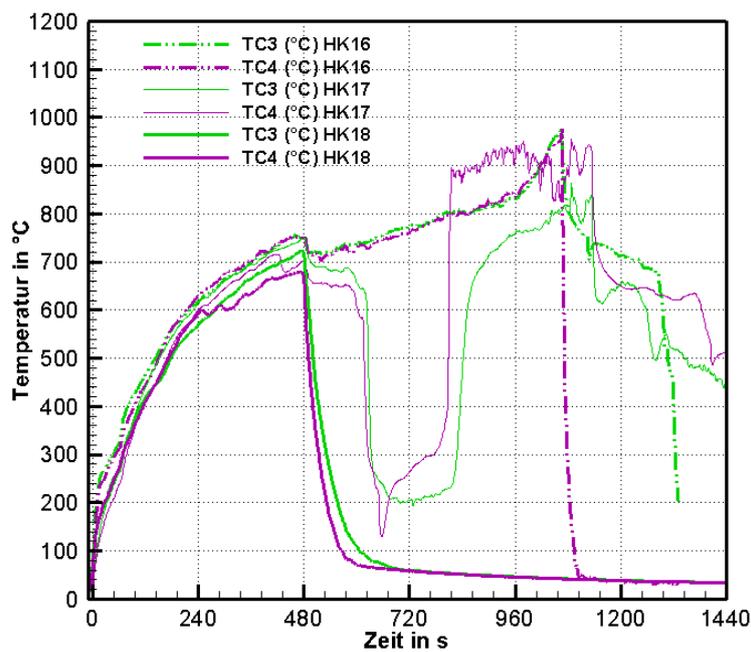


Bild 5.17: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse B

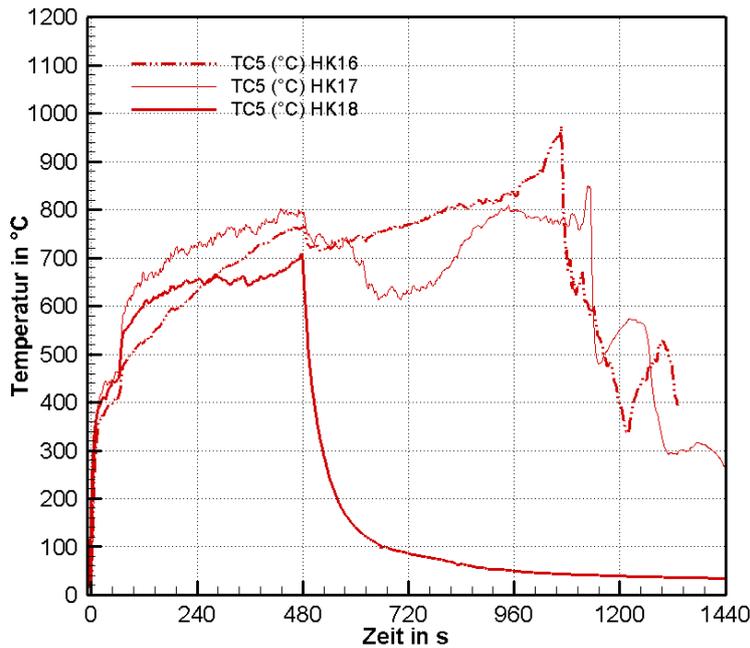


Bild 5.18: Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse B

Was bereits anhand der Krippentemperatur festgestellt wurde, dass der Brand in Versuch HK18 gelöscht wurde, bestätigt der Verlauf der HRR der verschiedenen Versuche in Bild 5.19. In Versuch HK18 (von oben nach 8 min) sinkt die HRR kontinuierlich auf null. In den beiden anderen Versuchen findet nach Beginn der Löschwasserzufuhr eine Reduzierung der HRR statt, mit der sich der Brandverlauf fortsetzt. Das Absinken der HRR findet dann nach Zusammenfallen des Holzstapels statt.

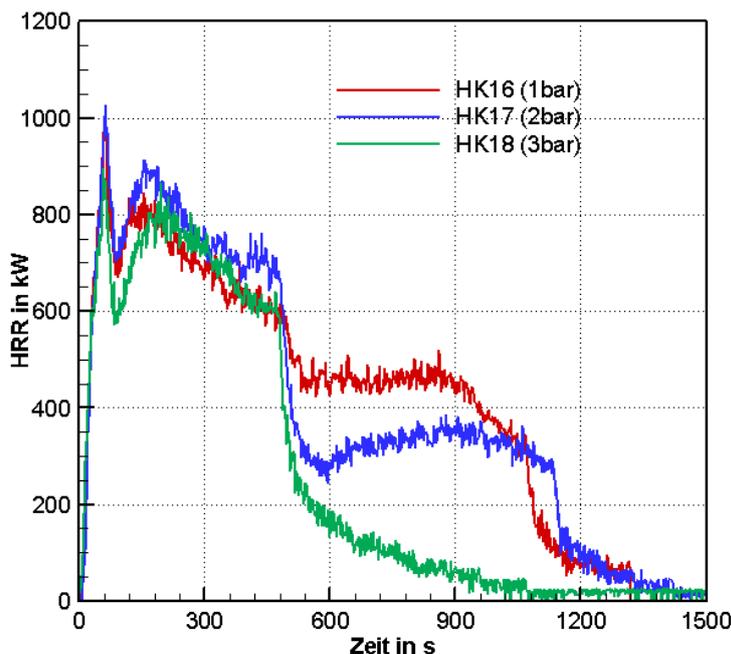


Bild 5.19: Vergleich der HRR für Versuche HK16 (1 bar), HK17 (2 bar), HK18 (3 bar) mit Löschdüse B

Vergleich bei Löschung nach 8 min und 12 min für Löschdüse B

Aus den Verläufen der Raumtemperatur in der Ecke des Brandraumes in Bild 5.20 ist erkennbar, dass sowohl bei Löschbeginn nach 8 min als auch nach 12 min eine deutliche und nahezu gleiche Temperaturabsenkung erzielt wird.

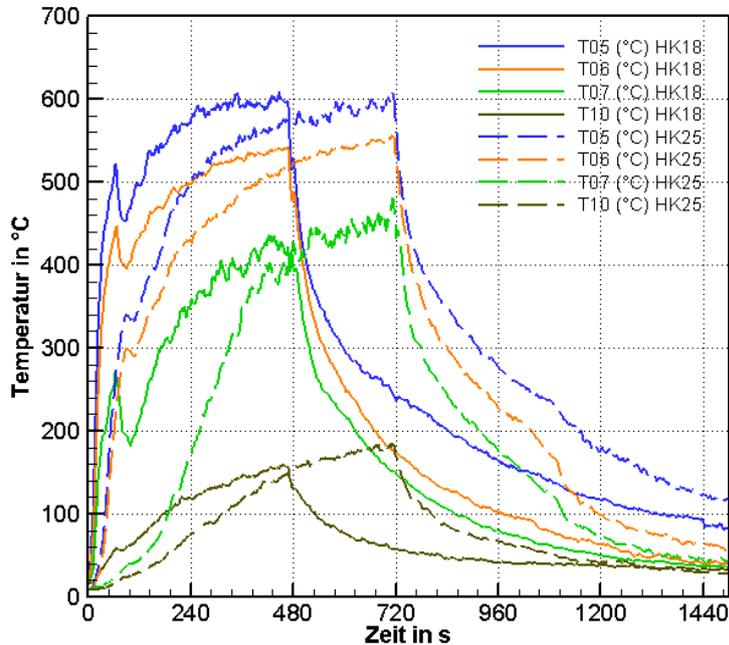


Bild 5.20: Vergleich der Raumtemperaturen (in der Ecke) für die Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)

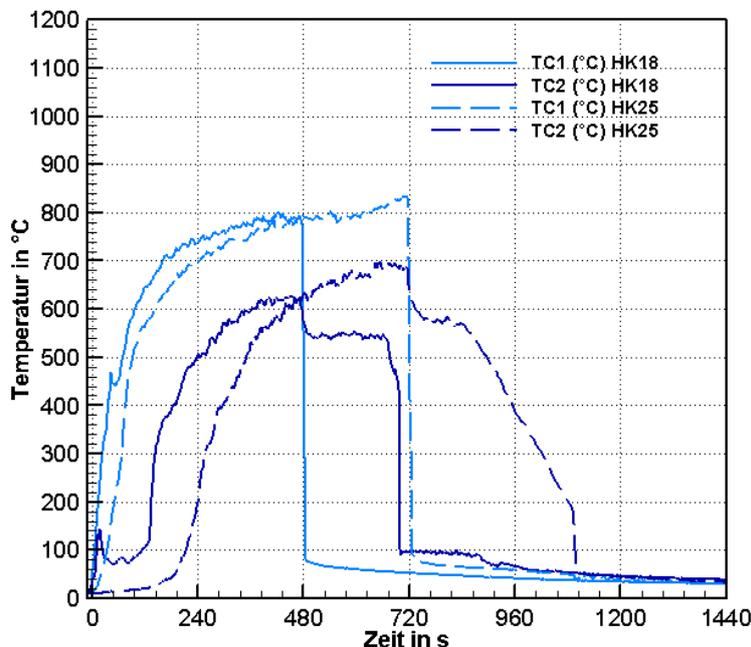


Bild 5.21: Krippentemperatur (TC1 und TC2) für die Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)

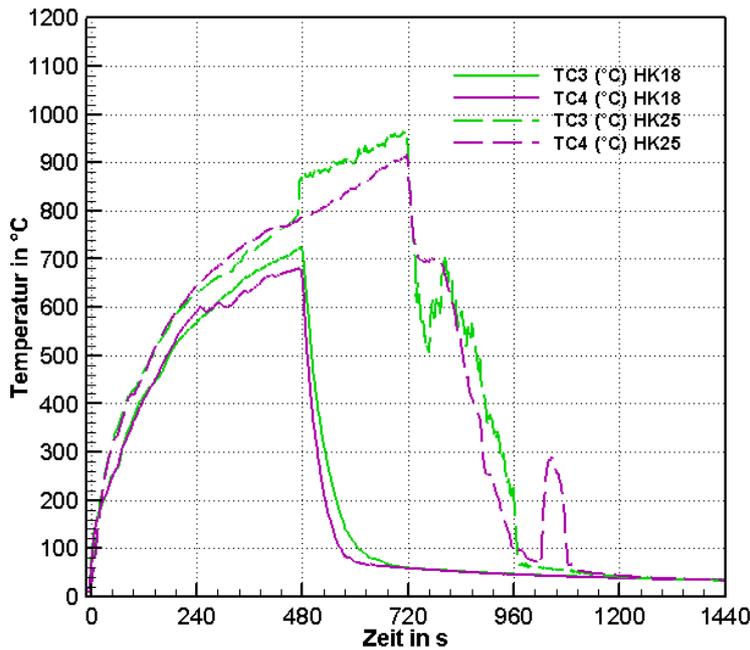


Bild 5.22: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)

Die Oberflächentemperaturen außen sowie im Innern der Krippe, dargestellt in den Bildern 5.21 und 5.22, zeigen auch nach 12 min ein Absinken der Temperatur, das sich allerdings langsamer vollzieht als bei Löschbeginn nach 8 min. Auch die Gastemperatur im Innern (vgl. Bild 5.23) sinkt deutlich und in Versuch HK25 (Löschbeginn nach 12 min) langsamer als in Versuch HK18. Ebenso wie bei den Versuchen mit der Löschdüse A, fällt die Holzkrippe bei späterem Löschbeginn infolge fortgeschrittenen Massenabbrandes nach ca. 18 min Branddauer zusammen.

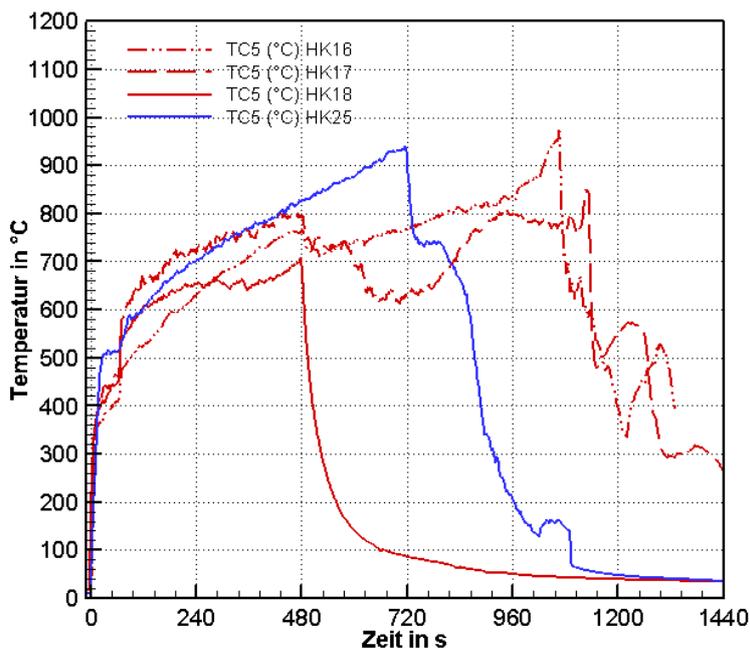


Bild 5.23: Gastemperatur in der Krippe (TC5) für die Löschversuche mit Düse B bei 3 bar nach 8 min (HK18) und 12 min (HK25)

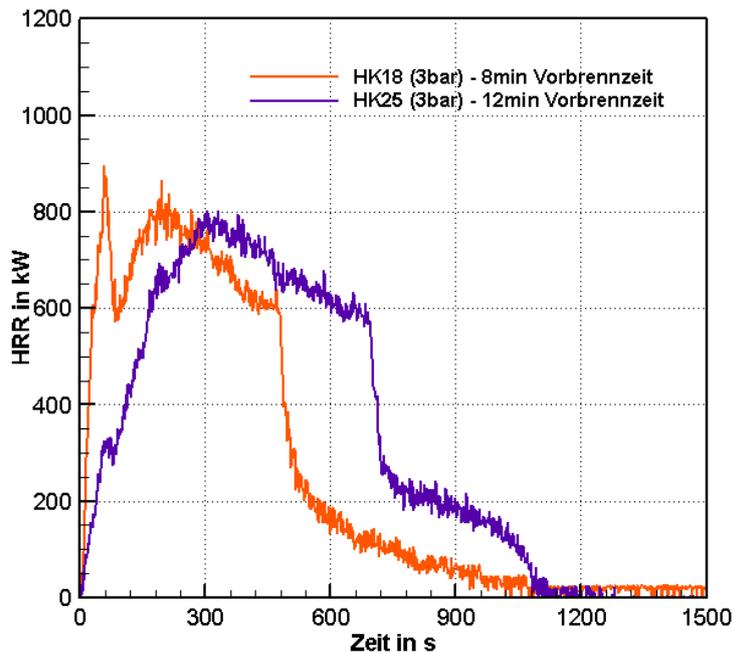


Bild 5.24: Vergleich der HRR für Versuche HK18 und HK25 mit Löschdüse B und 3 bar

5.1.3 Brand- und Löschversuche mit Löschdüse C

Brand- und Löschversuche, die mit einer weiteren Vollkegeldüse durchgeführt wurden, sind in Tabelle 5.4 aufgelistet. Dabei wurden die Versuche mit Löschbeginn nach 8 min zur Testung der Reproduzierbarkeit wiederholt. Ziel der Versuche war es, die bisher sehr grob ermittelte Löschintensität, weiter eingrenzen zu können. Mit Düse A wurde bei 3,6 l/min nicht gelöscht und bei 5,6 l/min gelöscht und mit Düse B wurde bei 4,45 l/min kein Löscherfolg erzielt, jedoch übereinstimmend mit Düse A bei 5,6 l/min gelöscht. Mit der Düse C wurden die Zwischenwerte des auf die Holzkrippengrundfläche auftreffenden Volumenstromes realisiert.

Tabelle 5.4: Versuche mit Normholzstapel 8A und Löschdüse C

Druck/ Lösch- beginn	Eingesetzt in Versuchen	Volumenstrom nach Angabe des Herstellers in l/min	Volumenstrom pro 1 m ² Grundfläche (aus Messung im Nasslabor) in l/min	Volumenstrom auf Grundfläche der HK (0,8 m x 0,5 m) (Mittelwert aus Messung im Nasslabor) in l/min
4 bar/ 8 min	HK9, HK15	6,6	6,2	3,9
5 bar/ 8 min	HK10, HK13	7,2	7	4,5
6 bar/ 8 min	HK11, HK12	7,8	7,4	5,1
5 bar/ 12min	HK24	7,2	7	4,5

Physikalische Größen im Brandraum und der Krippe bei Löschung mit Löschdüse C nach 8 min

Analog zu den vorangegangenen Abschnitten (Löschdüse A und B) werden die Verläufe der wesentlichen physikalischen Größen gezeigt, die für die Einschätzung der Löschwirkung verwendet werden. In Bild 5.25 ist die Raumtemperatur in der Ecke für die drei unterschiedlichen Versuche dargestellt. Die erwartete Reduzierung der Brandraumtemperatur ist erkennbar. Dabei werden bei 5 bar und 6 bar nahezu gleiche Wirkungen erzielt. Diese gleiche Wirkung spiegelt sich auch im Verlauf der Oberflächentemperaturen außerhalb und innerhalb der Holzkrippe in den Bildern 5.26 und 5.27 wider sowie in den Gastemperaturen im Innern der Krippe in Bild 5.28. Sowohl bei 5 bar als auch 6 bar Betriebsdruck findet eine rasche Absenkung der Temperatur statt.

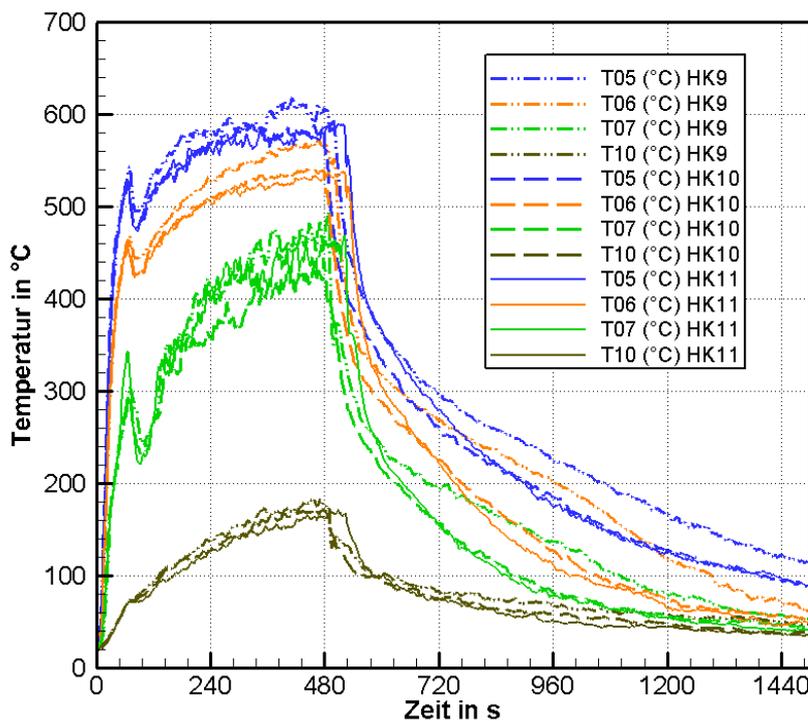


Bild 5.25: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse C

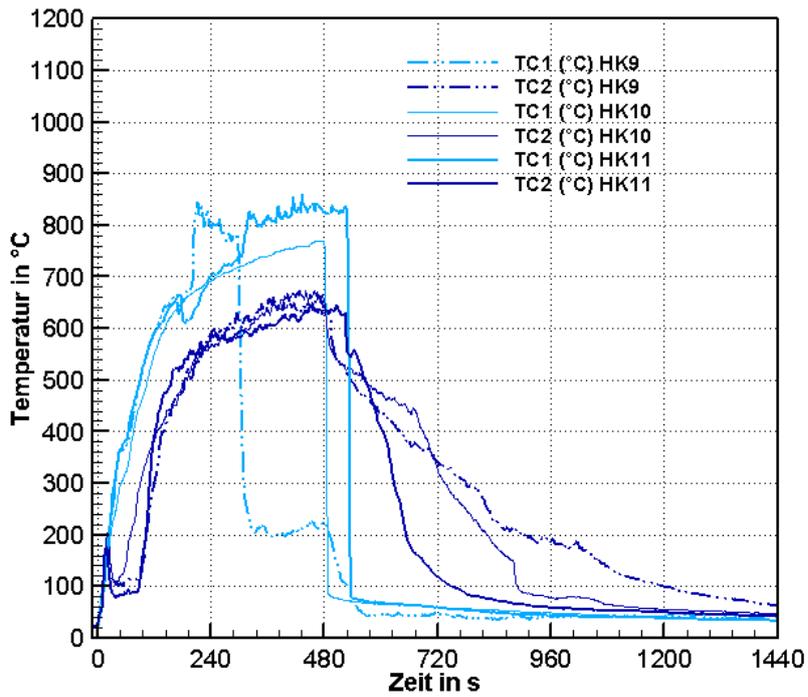


Bild 5.26: Temperaturen an der Krippenoberfläche (TC1, TC2) für Versuche mit Löschdüse C

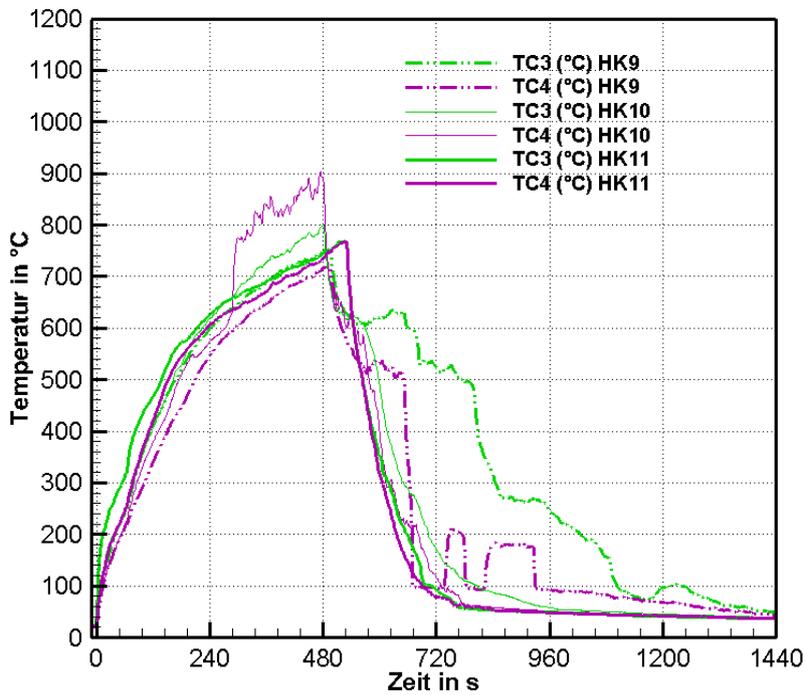


Bild 5.27: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse C

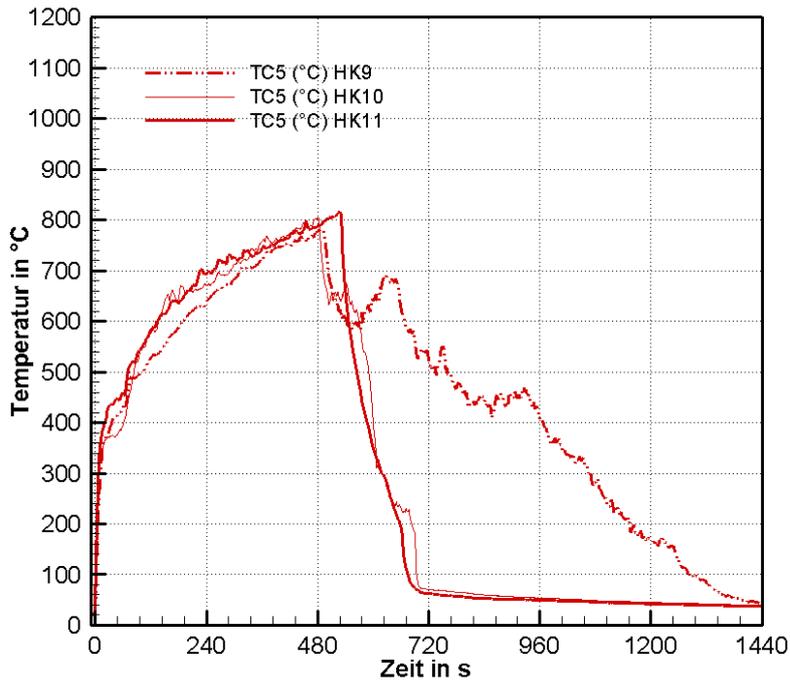


Bild 5.28: Gastemperatur in der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse C nach 8 min

Der Verlauf der HRR für die drei verschiedenen Versuche in Bild 5.29, zeigt eine kontinuierliche Verringerung der HRR auf den Wert null bei den Versuchen mit 5 bar und 6 bar Betriebsdruck. Im Versuch HK9 findet die Verringerung der HRR erst nach einer Brandphase von 5 min mit gleichbleibender HRR von 200 kW statt, wobei der Stapel nach 24 min zusammenfällt.

Der Versuch mit 5 bar Betriebsdruck stellt damit den Versuch dar, bei dem die Brandlöschung mit geringstem Volumenstrom erreicht wird.

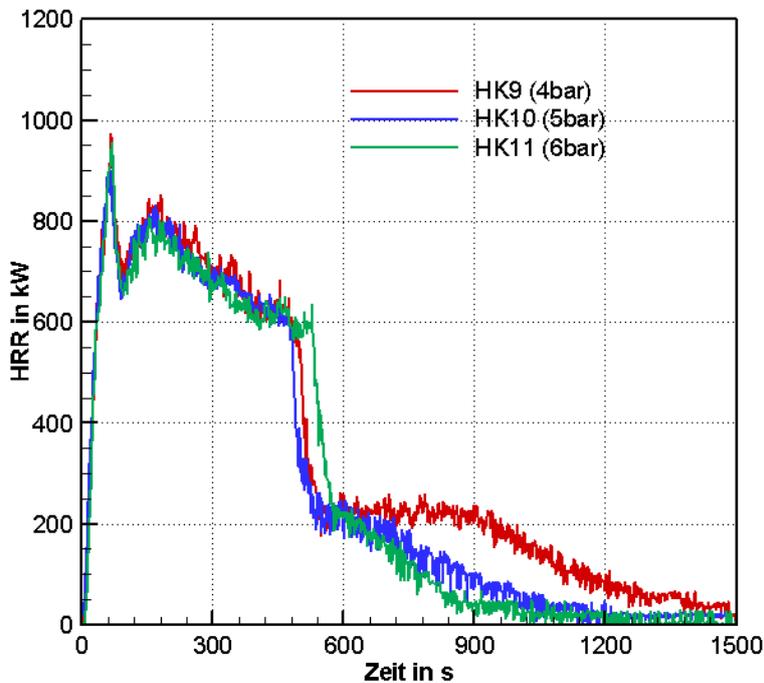


Bild 5.29: Vergleich der HRR für Versuche HK9 (4 bar), HK10 (5 bar), HK12 (6 bar) mit Löschdüse C

Vergleich der Versuche mit Düse C bei 5 bar und unterschiedlichem Löschbeginn

Auch für die Löschdüse C wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem mit dem kleinsten löschwirksamen Volumenstrom nach 12 min gelöscht werden sollte. Die Gegenüberstellung der Versuche mit Löschbeginn nach 8 Minuten (HK10) und nach 12 Minuten (HK24) erfolgt anhand der Verläufe der Raumtemperatur sowie der Krippentemperaturen und der HRR in den Bildern 5.30 bis 5.32.

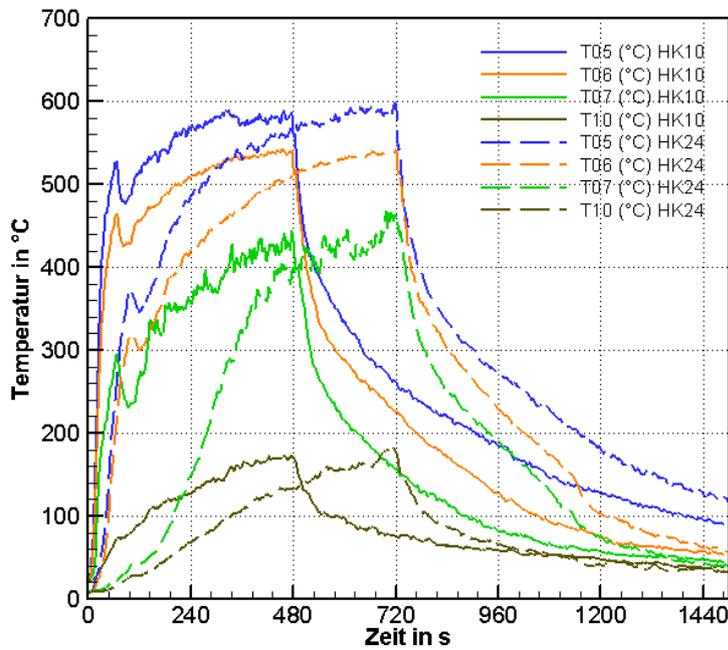


Bild 5.30: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Löschdüse C

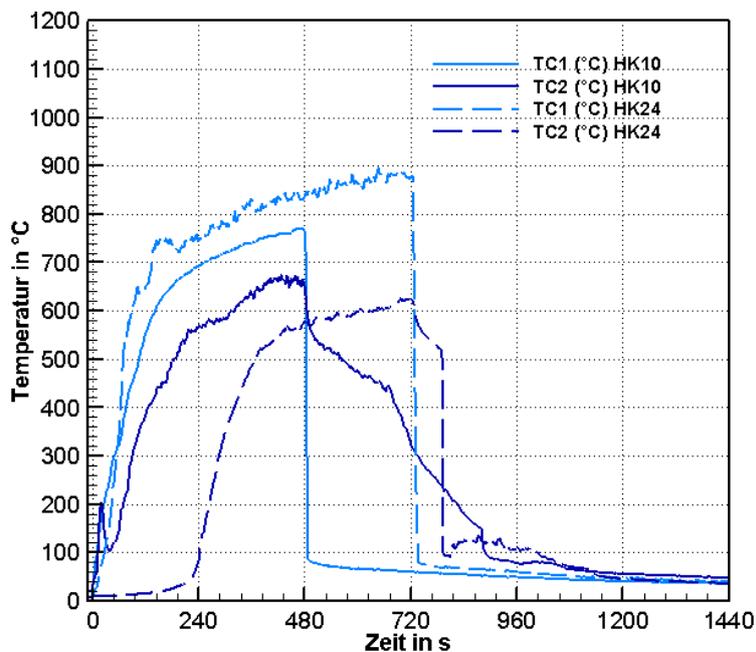


Bild 5.31: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Löschversuche mit Düse C bei 5 bar nach 8 min (HK10) und 12 min (HK24)

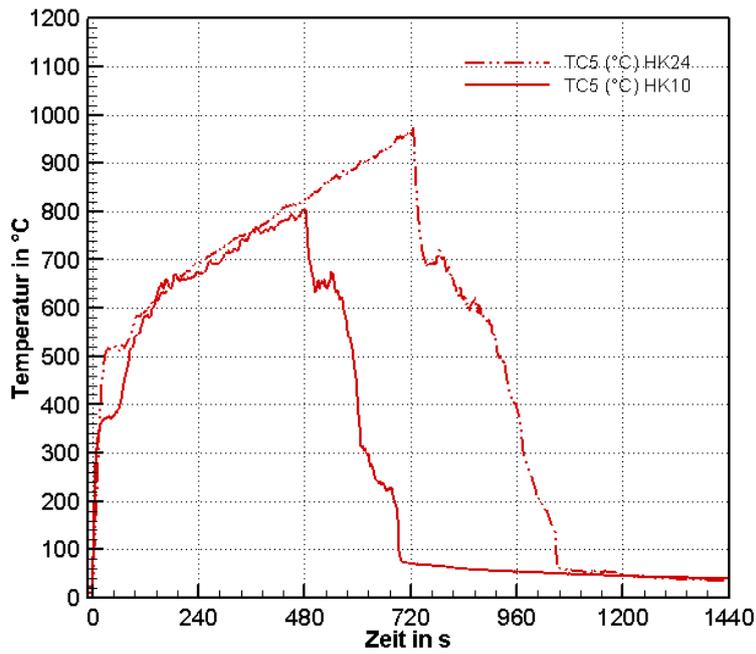


Bild 5.32: Gastemperatur in der Krippe (TC5) für die Löschversuche mit Düse C bei 5 bar nach 8 min (HK10) und 12 min (HK24)

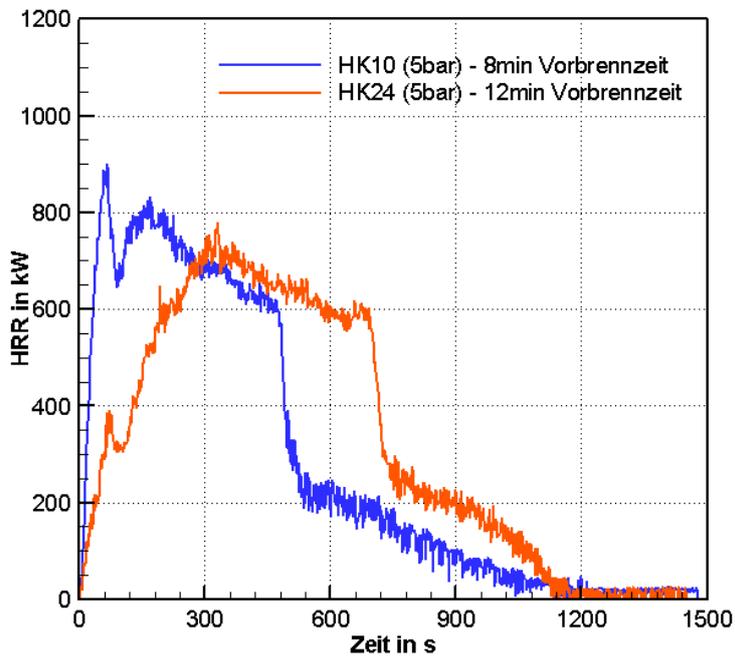


Bild 5.33: Vergleich der HRR für Versuche HK10 und HK25 mit Löschdüse B und 3 bar

5.2 Brand- und Löschversuche mit größeren Holzkrippen

Ergänzend zu den Versuchen mit Normholzkrippen der Größe 8A, bei denen ca. 48 kg Kiefernholz als Brandlast zur Verfügung stehen, wurden Krippen gleicher Bauart mit jeweils 8 Stäben von 80 cm Länge in jeder der 14 Lagen als Brandobjekt verwendet. Damit wurde eine Brandlast von ca. 75 kg Kiefernholz realisiert, bei der ein Ansteigen der HRR auf 1 MW zu erwarten ist. Als Löschdüse wurde Düse B verwendet und dabei als Versuchsparameter der Betriebsdruck gewählt, bei dem die Normholzkrippe 8A gelöscht wurde. In den drei Versuchen wurde zu verschiedenen Zeiten (vgl. Tabelle 5.5) mit der Löschwasserbeaufschlagung begonnen.

Tabelle 5.5: Versuche mit größeren Krippen

Versuch	Löschdüse/ Löschbeginn	Druck	Anfangsmasse in kg	Bemerkungen
HK21	B / 12 min	3 bar	76,85	Krippe 0,8 m x 0,8 m, 0,6 l Heptan Zündwanne 0,9 m x 0,6 m
HK22	B / 10 min	3 bar	75,8	Krippe 0,8 m x 0,8 m, 0,5 l Heptan Zündwanne 0,9 m x 0,6 m
HK26	B / 8 min	3 bar	73,95	Krippe 0,8 m x 0,8 m, 0,5 l Heptan Zündwanne 0,3 m x 0,3 m

Die Messergebnisse und Auswertungen analog zu den Versuchen mit Normholzstapel 8A sind nachfolgend dargestellt. Die Raumtemperatur in der Ecke ist für die Versuche, in denen nach 10 und nach 12 min mit der Löschung begonnen wurde, in Bild 5.34 dargestellt. Nach ca. 5 Minuten Brandentwicklung werden gleiche Temperaturentwicklungen erzielt.

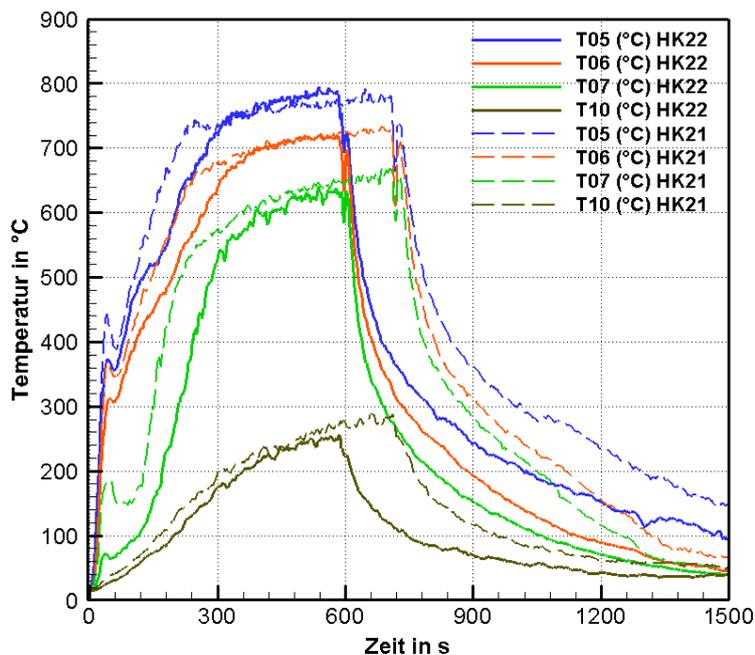


Bild 5.34: Gemessene Raumtemperaturen in der Ecke in den Versuchen HK21 und HK22

Die maximalen Temperaturen steigen auf ca. 800 Grad unter der Decke (T05) an. Im Vergleich dazu wurden bei den Bränden mit den Normholzkrippen 8A nur 600 °C erreicht.

Die unterschiedliche Temperaturentwicklung in den Versuchen HK21 und HK22 in den ersten 5 Minuten ist u. U. mit der unterschiedlichen Menge des Zündbrennstoffes zu erklären. Trotz geringerer Menge an Zündbrennstoff ist eine sehr schnelle Brandentwicklung des Holzkrippenbrandes zu beobachten.

Die Versuche mit den größeren Holzkrippen sind ein Schritt, um die geplante Peakbrandleistung von 1,5 MW für einen Brand im Container zu realisieren, wobei ein Beginn der Löschwasserbeaufschlagung nach 12 Minuten untersucht werden sollte. Im Versuch HK21 wurde dieser Löschbeginn realisiert. In Bild 5.36 ist die Abbrandrate der drei Versuche mit größeren Holzkrippen gegenübergestellt. Es zeigt für Versuch HK21 den intensivsten Brandverlauf.

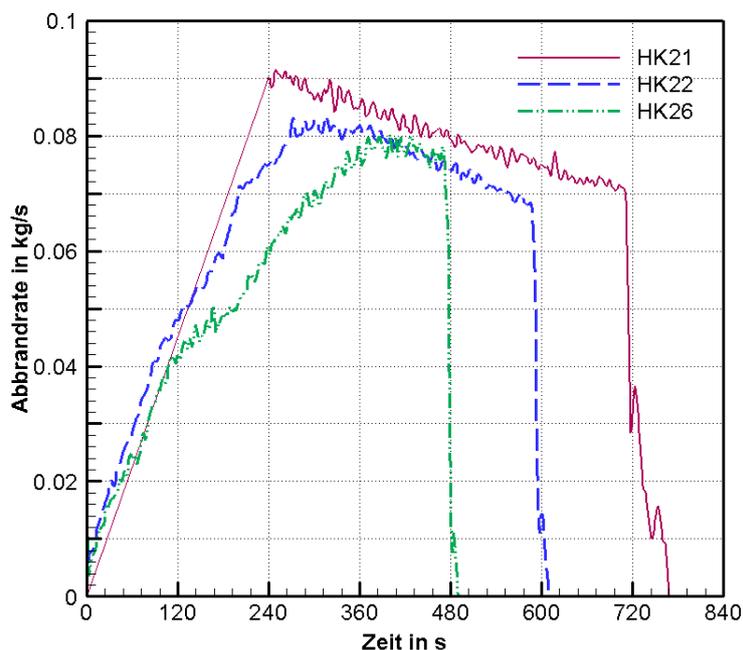


Bild 5.35: Abbrandrate der Versuche mit Holzkrippen von 0,8 m x 0,8 m Grundfläche

Es wurde festgestellt, dass in diesem Versuch (HK21) die Grenzen der Rauchgasabsaugung des Containers erreicht werden. Die Abgastemperaturen in der Rauchgasstrecke überschritten bereits kurzzeitig die zulässigen Werte, so dass eine weitere Erhöhung der Brandleistung der Versuche im gegenwärtigen Stand der Versuchsanlage nicht möglich ist.

In Bild 5.36 sind die ermittelten Wärmefreisetzungsraten für die Versuche HK22 und HK26 gegenübergestellt. Für den Versuch HK21 konnte die HRR nicht ermittelt werden, da die Messwerterfassung für die Abgasgeschwindigkeit ausfiel. Gemessen an der Größe der Abbrandrate, ist eine höhere HRR als in den Versuchen HK22 und HK26 zu vermuten. Die Maximalwerte der Abbrandrate als auch die HRR sind im Versuch HK26 geringfügig kleiner als in HK22. Ursache ist das geringere Zündinitial im Versuch HK26. Es wurde eine Zündwanne von 0,3 m x 0,3 m Größe mit 0,5 l Heptan verwendet, um die Brandentwicklung langsamer zu gestalten. Im Versuch HK26 wurde die maximale Abbrandrate erst nach 6 Minuten erzielt, im Versuch HK21 dagegen bereits nach 4 Minuten. Die Löschung sollte in

der Phase des voll entwickelten Brandes stattfinden. Die Analyse der zu Beginn der Löschwasserbeaufschlagung vorhandenen Restmassen zeigte, dass im Versuch HK21 zu Löschbeginn bereits 68 % der Krippe verbrannt waren. Aufgrund kürzerer Vorbrennzeit sowie kleineren Zündinitials waren in den Versuchen HK22 und HK26 zu Löschbeginn 50 % (HK22) und 36 % (HK26) des Materials verbrannt. In beiden Versuchen wurde die Vollbrandphase erreicht, bevor die Löschwasserbeaufschlagung begann.

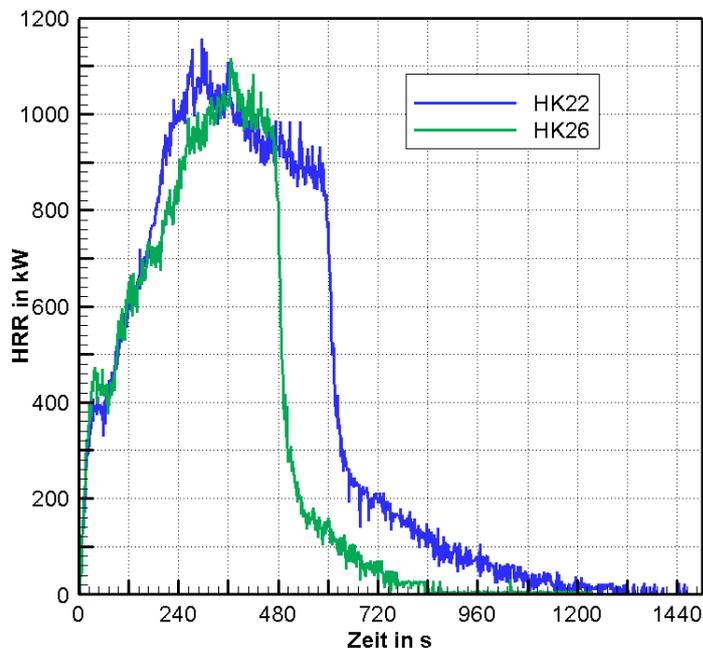


Bild 5.36: Ermittelte HRR für Versuche mit größeren Holzkippen (HK22 und HK26)

Auswirkungen der langsameren Brandentwicklung sind geringere Raumtemperaturen im Brandraum, wie sie Bild 5.37 in der Gegenüberstellung der Versuche HK22 und HK26 zeigt.

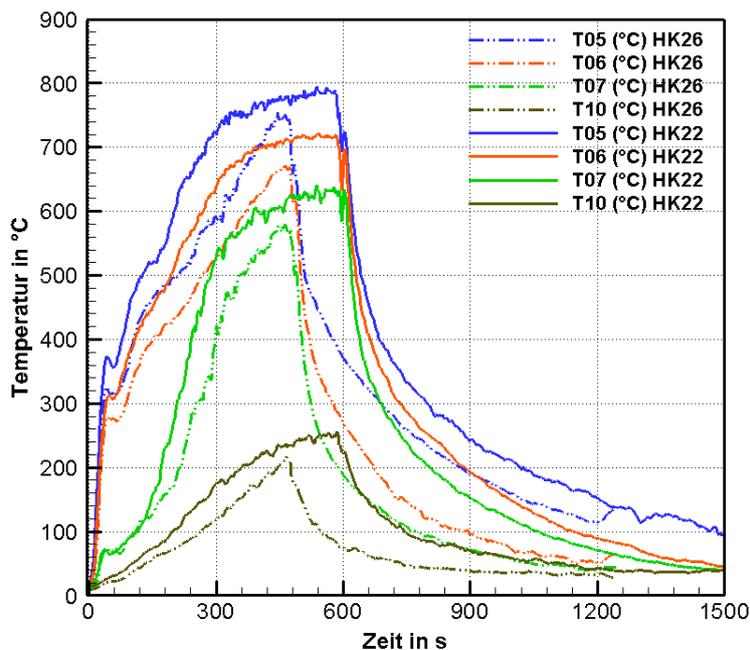


Bild 5.37: Gemessene Raumtemperaturen in der Ecke in den Versuchen HK22 und HK26

Zur Beurteilung der Löschwirksamkeit, die in den drei Versuchen mit Düse B bei 3 bar erzielt wird, werden die Temperaturen in der Krippe verwendet. Diese zeigen für alle drei Versuche einen sofortigen Temperaturrückgang sowohl in der Oberflächentemperatur (Bild 5.38) als auch der Gastemperatur (Bild 5.39) mit Beginn der Löschwasserbeaufschlagung.

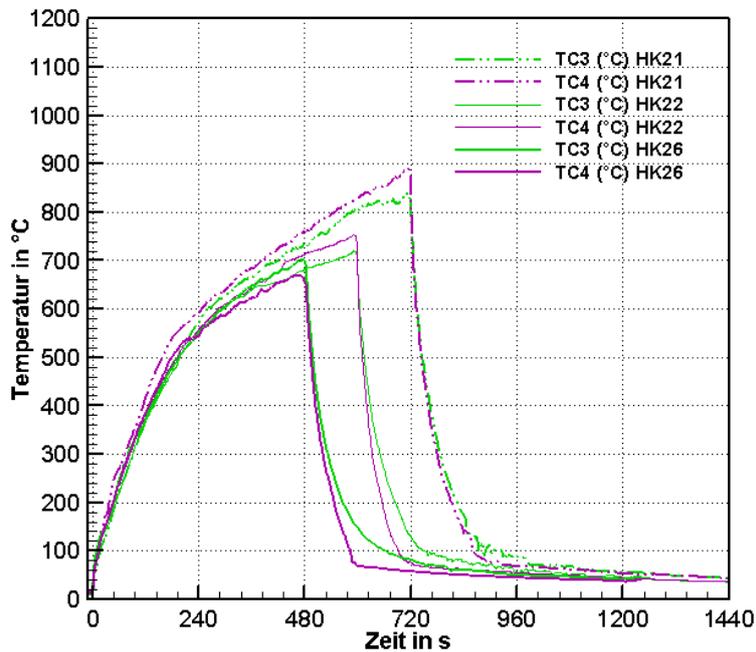


Bild 5.38: Oberflächentemperaturen (TC3, TC4) im Innern der Krippe in den Versuchen HK21, HK22 und HK26

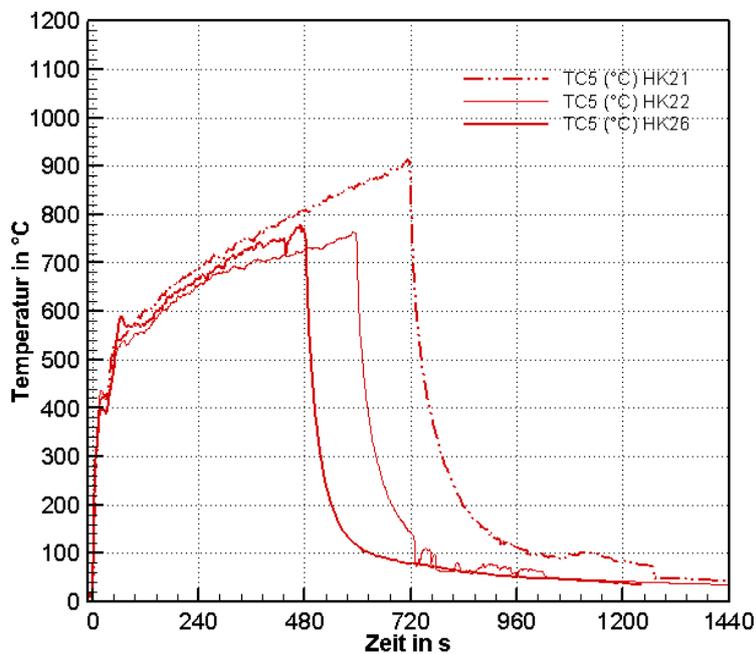


Bild 5.39: Gastemperaturen (TC5) im Innern der Krippe in den Versuchen HK21, HK22 und HK26

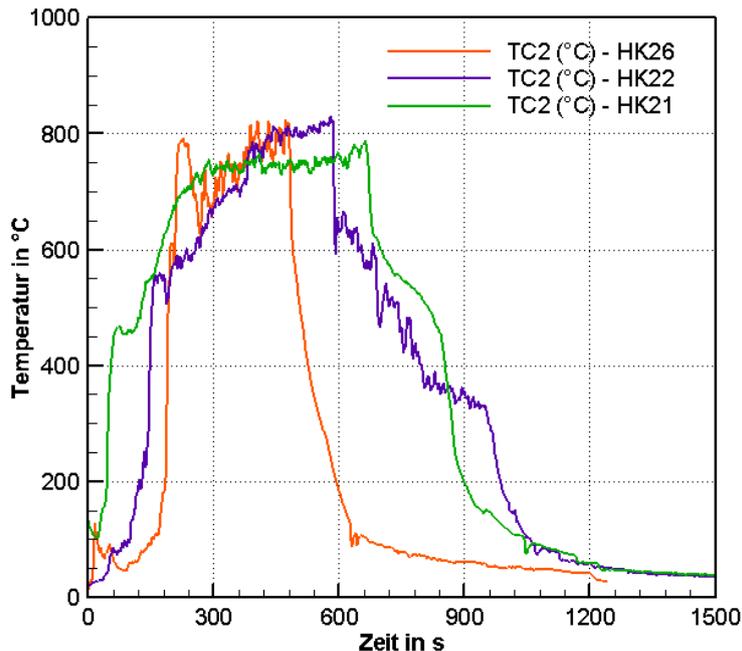


Bild 5.40: Temperaturen an der Oberfläche der Krippe (TC2) in den Versuchen HK21, HK22 und HK26

Nach Auswertung der Krippentemperaturen sowie der HRR sind die Versuche HK21 und HK26 als gelöscht anzusehen. Dabei erfolgt die Löschung bei früherem Löschbeginn innerhalb kürzerer Zeit. Dies wird in der Darstellung der HRR (Bild 5.36) deutlich. Im Versuch HK26 dauert es ca. 6 Minuten bis die HRR vom Wert zu Löschbeginn auf null absinkt, im Versuch HK22, bei dem erst nach 10 Minuten mit der Löschwasserbeaufschlagung begonnen wird, dauert es ca. 12 Minuten bis zur Löschung, d. h. doppelt so lange. Auch die Verringerung der Krippentemperatur an Messstelle TC2 verdeutlicht die schnellere Brandlöschung in Versuch HK26, in dem bereits nach 8 Minuten mit der Löschung begonnen wurde.

Aussagen zur Brandlöschung im Versuch HK21 sind aufgrund der fehlenden HRR nicht eindeutig. Die Temperaturverläufe der Holzkrippe deuten darauf hin, aber wie auch bei den Versuchen mit Normholzkruppen 8A ist der Abbrand nach 12 Minuten so weit fortgeschritten, dass die Krippe nach ca. 21,5 Minuten in sich zusammenfällt.

Aus den Verteilungsversuchen (Abschnitt 4.1) lässt sich für die verwendete Düse B bei dem Betriebsdruck von 3 bar der Volumenstrom, der im Nicht-Brandfall auf die Holzkrrippengrundfläche von 80 cm x 80 cm auftrifft, mit 7,3 l/min ermitteln. Mit diesem Volumenstrom wurden die Holzkruppen in den Versuchen HK22 und HK26 gelöscht.

5.3 Brandversuche mit Normholzkrippe 8A und Löschwasseraufbringung von der Seite

Zur Untersuchung der Löschwirkung bei Aufbringung des Löschwassers von der Seite wurde mit jeder Düse ein Versuch durchgeführt, bei dem als Betriebsparameter der jeweilige minimale löschwirksame Volumenstrom gewählt wurde, bei dem die Krippe nach 8 min von oben gelöscht werden konnte. Die Versuchsparameter sind in der Tabelle 5.6 genannt.

Tabelle 5.6: Versuche mit Normholzkrippe 8A und Löschwasseraufbringung von der Seite

Versuch	Löschdüse/ Löschbeginn	Druck	Bemerkungen
HK27	B / 8 min	3 bar	Krippe 8A längs Zündung mit 1 l Heptan
HK28	B / 8 min	3 bar	Krippe 8A quer Zündung mit 1 l Heptan
HK29	C / 8 min	6 bar	Krippe 8A quer Zündung mit 1 l Heptan
HK30	A / 8 min	6 bar	Krippe 8A quer Zündung mit 1 l Heptan

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse im Vergleich mit denen bei Löschwasseraufbringung von oben dargestellt. Bild 5.41 zeigt den Versuchsaufbau von Seiten der geöffneten Containertür. Im Hintergrund ist die Wasserzuleitung (1" Rohr) mit der Löschdüse zu sehen, die in der Höhe von 80 cm waagrecht und mittig zur Holzkippe die Ausbildung eines Sprühkegels in Richtung der Krippe ermöglicht. Die Entfernung von der Sprühdüse bis zur Außenseite der Holzkippe beträgt ca. 1,13 m und ist damit genauso groß wie bei den Versuchen mit der Beaufschlagung von oben.



Bild 5.41: Krippenanordnung in Versuch HK27 bei seitlicher Löschwasserbeaufschlagung

5.3.1 Seitliche Löschwasseraufbringung mit Düse A

Im Versuch HK30 wurde Normholzkrippe 8A nach 8 min mit Löschdüse A unter dem Betriebsdruck von 6 bar mit Wasser von der Seite beaufschlagt.

In Bild 5.42 ist die Raumtemperaturentwicklung in Versuch HK30 an den Messstellen T05, T06, T07 und T10 jeweils als durchgezogene Linie dargestellt. Im Vergleich zum Versuch HK7, bei dem das Löschwasser von oben aufgebracht wurde, wird an den Messstellen T05-T07 (in der Heißgasschicht) eine deutlich geringere Temperaturabsenkung erzielt. Die Messstelle T07 befindet sich in Höhe von 1,4 m vom Boden des Containers, die Messstelle T10 20 cm über dem Boden.

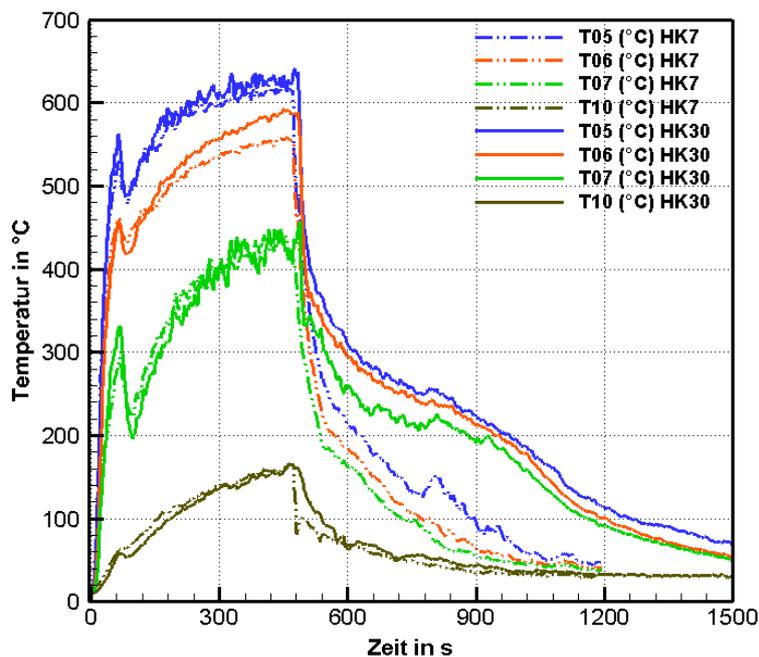


Bild 5.42: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Wasserbeaufschlagung mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)

Auch der Vergleich der Temperaturen, die in der Durchgangstür und über der Brandquelle zu verzeichnen sind, zeigt bei der Löschwasserbeaufschlagung von der Seite eine wesentlich geringere Beeinträchtigung des Brandes. Anhand der Temperaturen und der Geschwindigkeiten in der Durchgangstür in Bildern 5.43 und 5.44 ist ein unterschiedliches Strömungsverhalten der Versuche HK7 und HK30 zu erkennen. Im Versuch mit seitlicher Löschwasserbeaufschlagung ist eine stärkere Ventilation des Brandes vorhanden. Die Ausströmung in der Durchgangstür beträgt ca. 4 m/s an der Messstelle in 1,75 m Höhe und ist damit deutlich größer als im Versuch HK7. Auch die Zuströmung im Bereich des Bodens bis zur Höhe von 30 cm (Messstellen Bid05 und Bid06) erreicht in Versuch HK30 höhere Werte.

Visuelle Beobachtungen des Brandverlaufes zeigen im Versuch HK30 in der Phase der Löschwasserbeaufschlagung eher einen intensivierten Brandverlauf als eine Löschung. Zwar kommt die Verbrennung an der Vorderseite des Normholzstapels, an der das Wasser auftrifft, zum Erliegen, die Mitte sowie die Rückseite brennen gut ventiliert weiter. Die Temperaturentwicklung in der Krippe in Bild 5.45 belegt das.

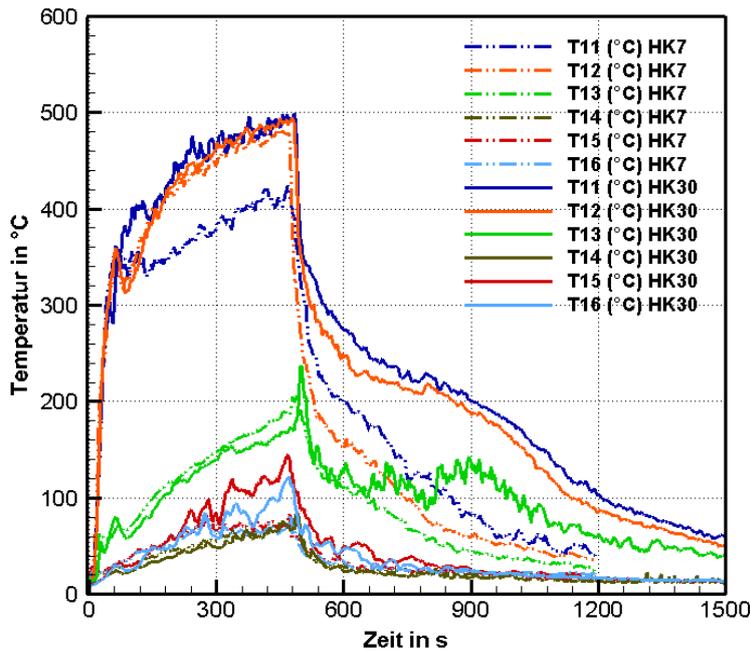


Bild 5.43: Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)

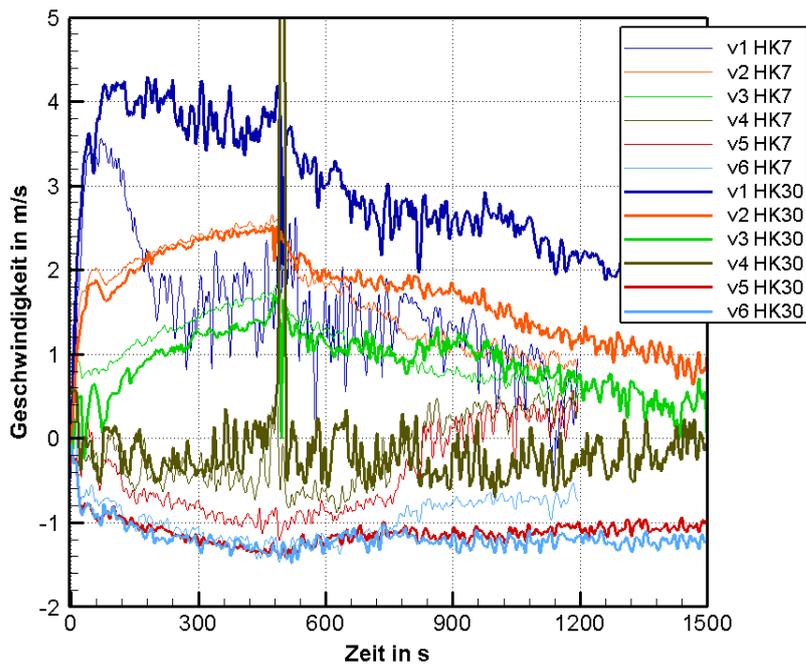


Bild 5.44: Geschwindigkeiten in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)

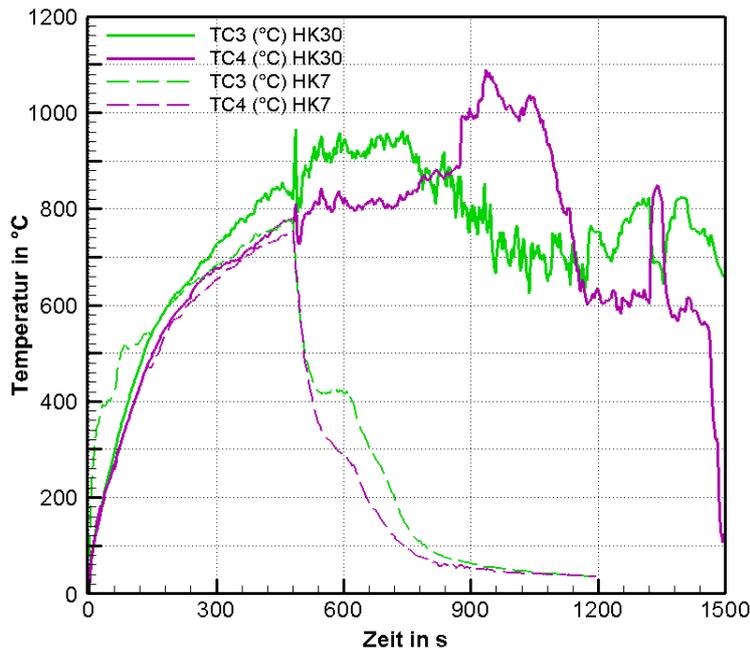


Bild 5.45: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7)

Ein Vergleich der HRR von Versuch HK7 und HK30, zeigt, dass bei seitlicher Löschwasseraufbringung mit Beginn der Löschmaßnahme eine Reduzierung der HRR des Brandes eintritt, die kleiner als bei Aufbringung von oben ist, bei der jedoch keine Löschung erfolgt.

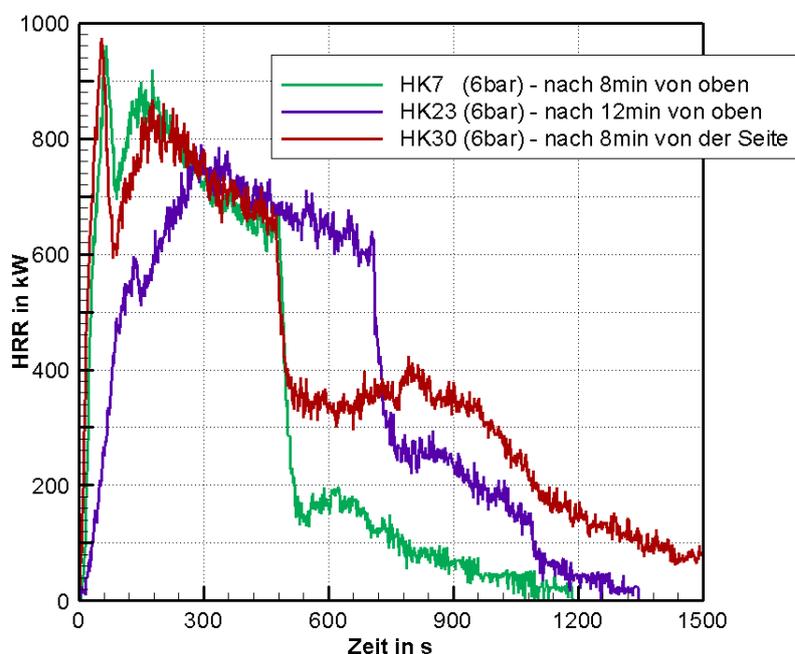


Bild 5.46: Vergleich der HRR für Versuche mit Löschdüse A und 6 bar von der Seite (HK30) und von oben (HK7, HK23)

5.3.2 Seitliche Löschwasseraufbringung mit Düse B

Im Versuch HK28 wurde Normholzkrippe 8A nach 8 min mit Löschdüse B unter dem Betriebsdruck von 3 bar mit Wasser von der Seite beaufschlagt. Der korrespondierende Brandversuch mit Löschwasseraufbringung von oben ist Versuch HK18 und soll für den Vergleich verwendet werden.

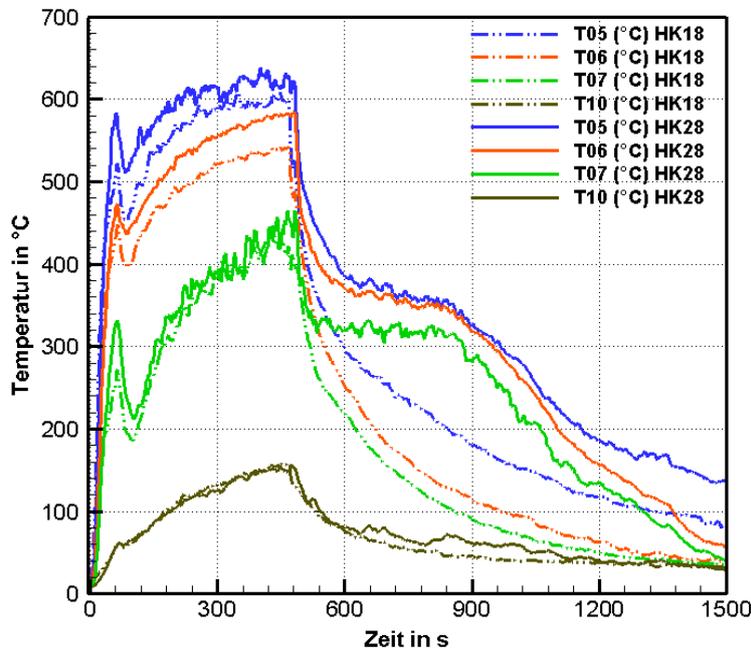


Bild 5.47: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Wasserbeaufschlagung mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)

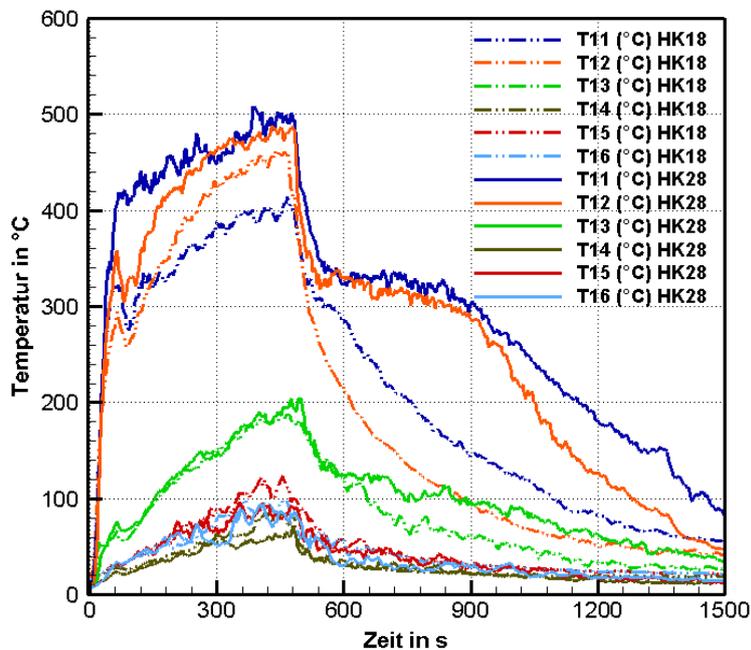


Bild 5.48: Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)

Auch bei Verwendung von Löschdüse B wird bei der Wasserbeaufschlagung von der Seite (HK28) mit Beginn der Löschwasserzufuhr eine geringere Raumtemperatursenkung erzielt als bei Aufbringung von oben (HK18). Das zeigen die drei oberen Messstellen in der Ecke des Raumes und in der Tür in den Bildern 5.47 und 5.48. Im Vergleich zu Düse A fällt diese Temperatursenkung geringer aus.

Nach Beginn der Löschwasserbeeinflussung sind bei Versuch HK28, d. h. bei seitlicher Wassereinbringung höhere Aus- und Einstromgeschwindigkeiten in der Tür zu verzeichnen als bei Beaufschlagung von oben, dargestellt in Bild 5.49.

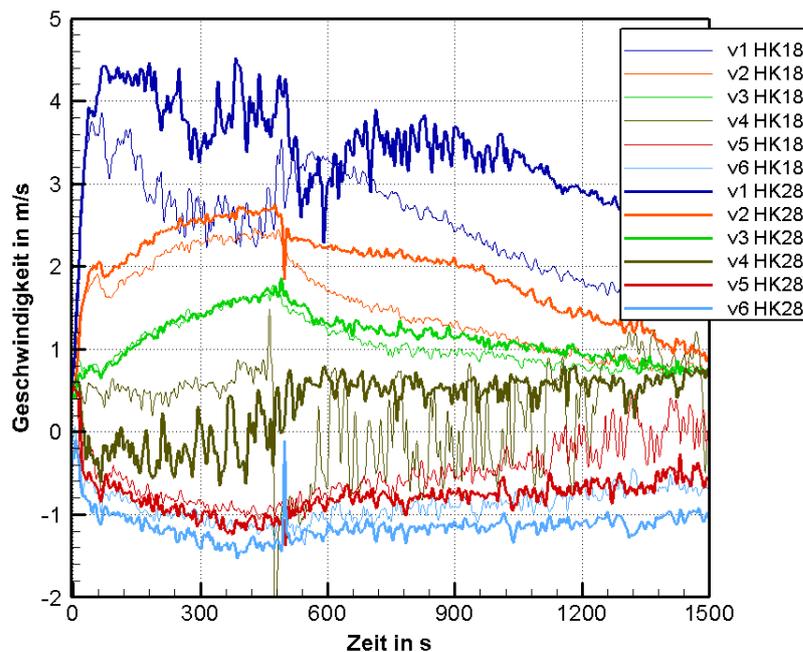


Bild 5.49: Geschwindigkeiten in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)

Die Einströmung, erkennbar am negativen Vorzeichen der Geschwindigkeit, erfolgt an den Messstellen v5(Bid05) und v6(Bid06), die sich 15 cm und 30 cm über dem Boden befinden. An den übrigen Messstellen ist die Ausströmung der Brandgase zu verzeichnen. Das bedeutet, dass bei Löschwasserzufuhr von der Seite bis zu einer Raumhöhe von 70 cm (Höhe der Messstelle v4(Bid04) über dem Boden) Brandgase ausströmen. Verglichen mit der seitlichen Beaufschlagung bei Verwendung von Düse A (Bild 5.44) ist eine mächtigere Rauchgasströmung vorhanden. Diese ist Zeichen einer nur geringen Beeinträchtigung des Brandes, wie bereits aus den Temperaturkurven ersichtlich war. Mit Düse B wird eine geringere Brandbeeinflussung erreicht als mit Düse A. Das bedeutet, dass auch Düse B bei Anwendung von der Seite nicht löscht. Anhand der Krippentemperaturen in den Bildern 5.50 und 5.51 und der HRR in Bild 5.52 wird das sehr deutlich gezeigt.

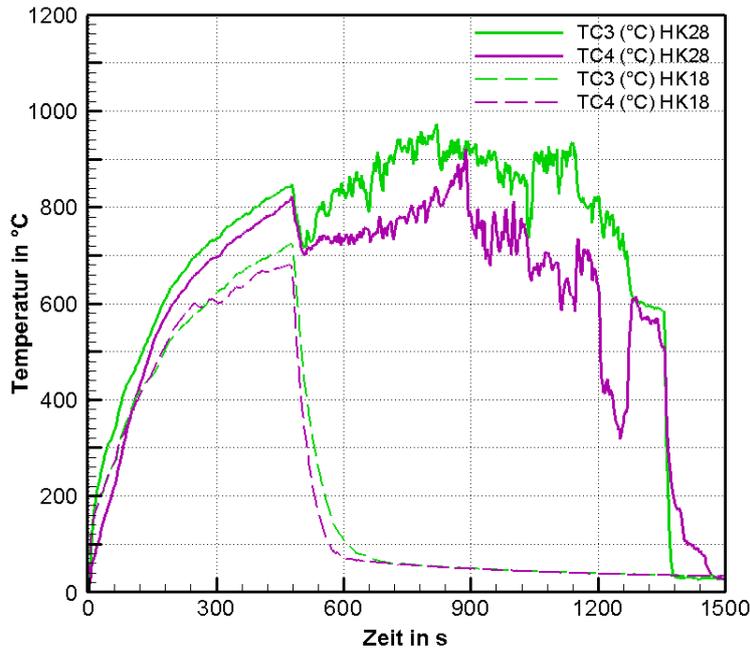


Bild 5.50: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse A bei 6 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)

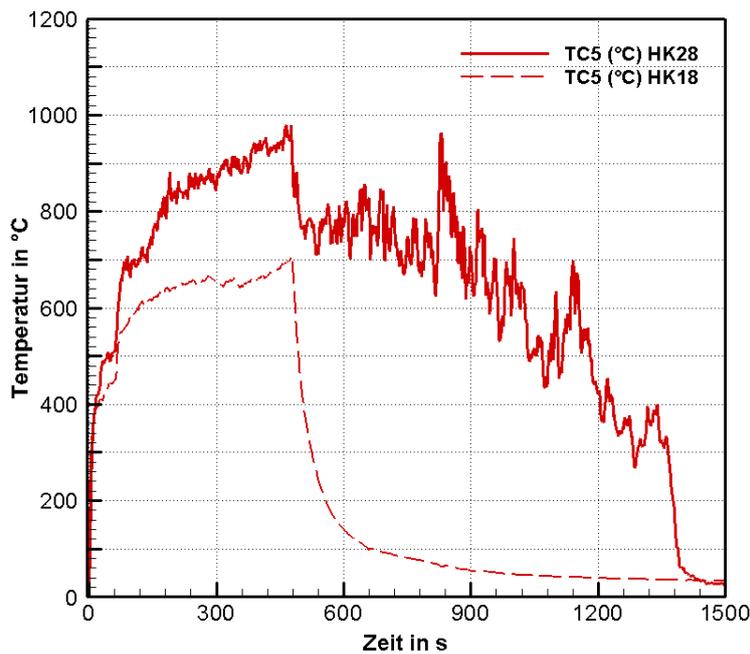


Bild 5.51: Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18)

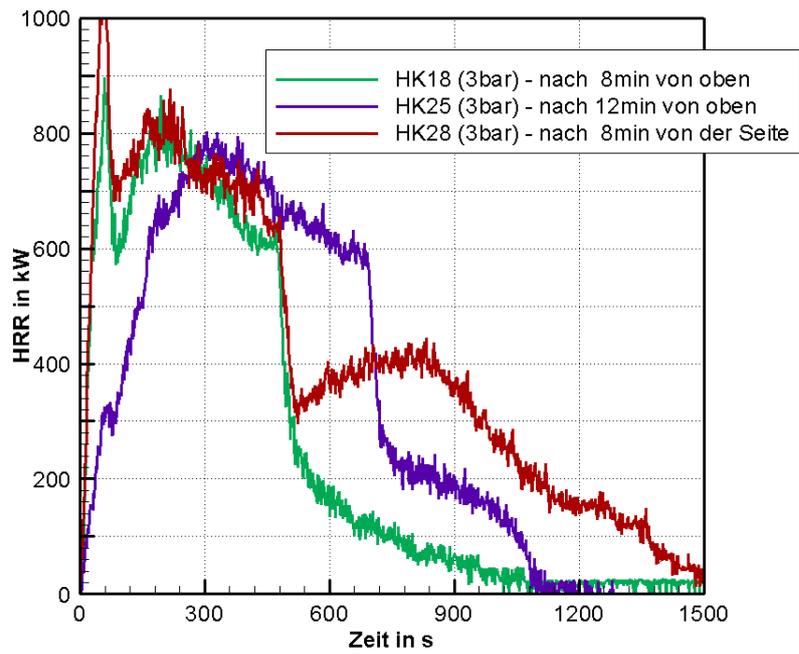


Bild 5.52: Vergleich der HRR für Versuche mit Löschdüse B bei 3 bar von der Seite (HK28) und von oben (HK18, HK25)

5.3.3 Seitliche Löschwasseraufbringung mit Düse C

Im Versuch HK29 wurde Normholzkrippe 8A nach 8 min mit Löschdüse C unter dem Betriebsdruck von 6 bar mit Wasser von der Seite beaufschlagt. Der für den Vergleich herangezogene Versuch mit erfolgreicher Löschung von oben ist Versuch HK11. Bei der Löschung von oben ist bereits bei 5 bar der für eine Löschung erforderliche Volumenstrom vorhanden. Bei der Beaufschlagung von der Seite wurde im Hinblick auf die sich herausgestellte geringe Löschwirkung von Düse A und B der nächsthöhere Betriebsdruck von 6 bar verwendet.

Die Temperaturverläufe im Brandraum und in der Tür sind in den Bildern 5.53 und 5.54 gegenübergestellt. Auf die Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten wurde verzichtet.

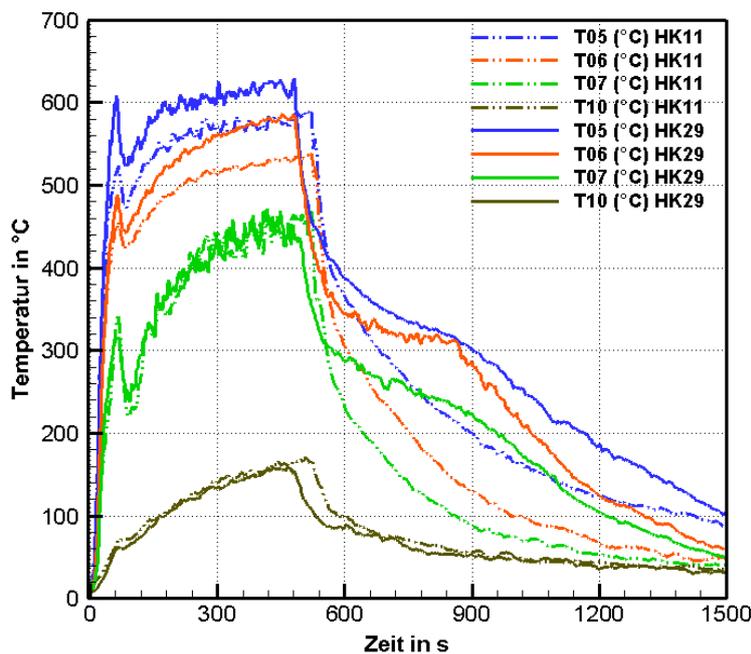


Bild 5.53: Raumtemperaturen in der Ecke für Versuche mit Wasserbeaufschlagung mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)

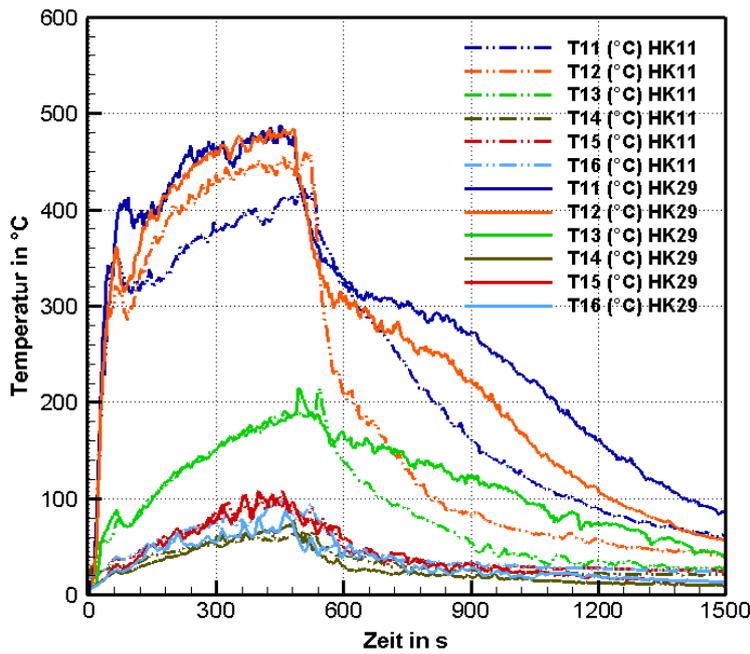


Bild 5.54: Temperaturen in der Durchgangstür für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)

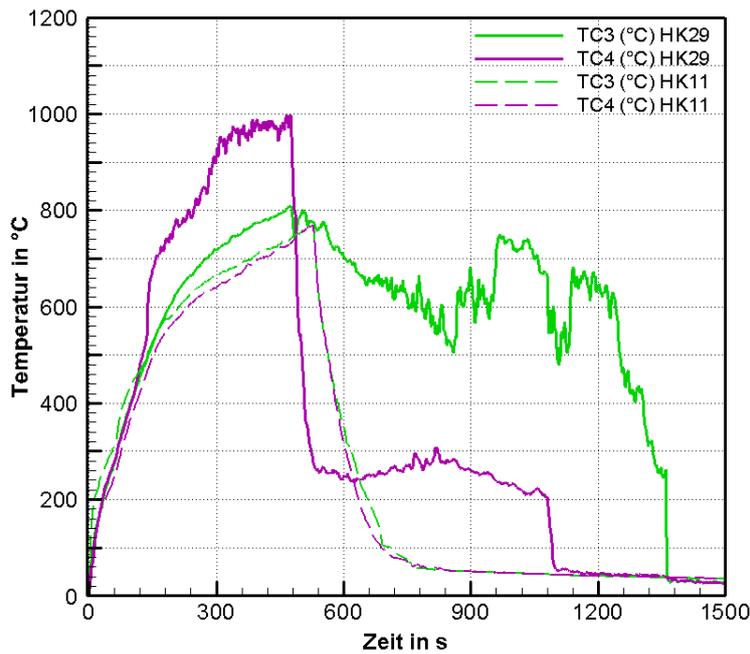


Bild 5.55: Oberflächentemperaturen innerhalb der Krippe (TC3, TC4) für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)

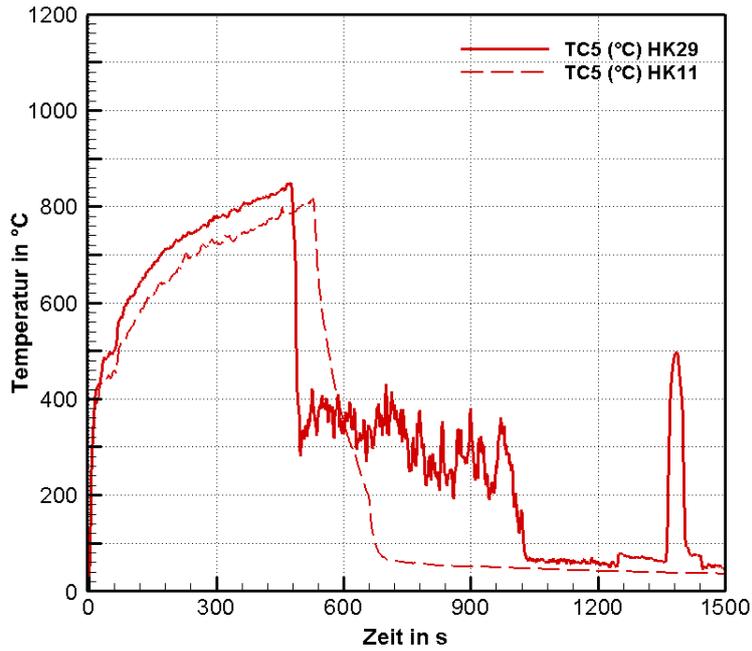


Bild 5.56: Gastemperatur innerhalb der Krippe (TC5) für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11)

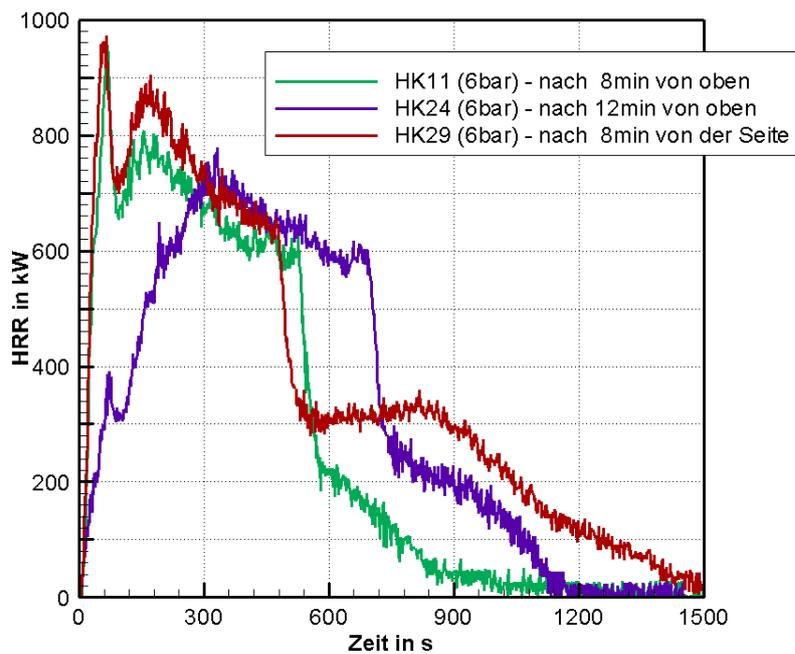


Bild 5.57: Vergleich der HRR für Versuche mit Löschdüse C bei 6 bar von der Seite (HK29) und von oben (HK11, HK24)

5.4 Zusammenfassung der Brandversuche

Löschung des Brandes bei Löschbeginn nach 8 min von oben:

Der Normholzkrippenbrand wurde in einer Brandkammer von 2,3 m Breite, 2,4 m Höhe und 4,1 m Länge durchgeführt und erreichte eine maximale HRR von ca. 900 kW.

Bei der Löschwasserbeaufschlagung eines Normholzkrippenbrandes 8A mittels Vollkegeldüse von oben und bei Löschbeginn nach 8 min wurde ein minimaler löschwirksamer Volumenstrom ermittelt.

Als Kriterien für die Löschwirkung, d.h. wann der Brand als gelöscht angesehen wird, wurden Temperaturen innerhalb der Krippe und die HRR verwendet.

Für zwei verschiedene Löschdüsen (A und B) wurde ein minimaler löschwirksamer Wasservolumenstrom von 5,6 l/min, der auf die Holzkrippengrundfläche trifft, bestimmt. Dieser wurde im Kaltversuch ermittelt.

Einen geringeren Wert ergaben die Versuche mit einer dritten Löschdüse, mit der offene Zwischenwerte der Versuchsreihen mit Düse A und B realisiert wurden. Der für die Löschdüse C ermittelte minimale löschwirksame Volumenstrom beträgt 4,5 l/min.

Löschung des Brandes bei Löschbeginn nach 12 min von oben:

Bei Beaufschlagung des Normholzkrippenbrandes mit der minimalen löschwirksamen Wasserrate nach 12 min wird der Brand **nicht gelöscht**. Die HRR verringert sich, doch aufgrund des fortgeschrittenen Abbrandes fällt der Normholzstapel vor Ende der Versuchsdauer von 25 min zusammen und brennt als Glutbrand weiter.

Löschung des Brandes bei Löschbeginn nach 8 min von der Seite:

Bei seitlicher Beaufschlagung des Holzkrippenbrandes wird eine verstärkte Ventilation des Brandes hervorgerufen. Eine Brandlöschung tritt nur lokal an der der Löschdüse zugewandten Seite auf. Die Holzkrippe brennt mit der HRR von ca. 300-400 kW weiter. Lokal ist eine Intensivierung des Brandverlaufs zu beobachten. Der Brand wird nicht gelöscht.

Mit Löschdüse A wird eine effektivere Raumabkühlung erzielt als mit den Düsen B und C, die einen kleineren Sprühwinkel aufweisen. Die Düse mit dem kleinsten Sprühwinkel, Düse C, erzielt die beste Löschwirkung, d. h. verringert die HRR am deutlichsten.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Vorhaben sollte die minimale kritische Löschintensität (Volumenstromdichte) für charakteristische Feststoff-Raumbrände bestimmt werden. Dieses soll als Ausgangsmodell für die Bewertung feuerwehrtaktischer Löschmaßnahmen dienen. Dazu ist es notwendig sowohl den eingesetzten Wasserstrahl messtechnisch zu charakterisieren als auch Anordnungen der Löschdüsen zu verwenden, die dem praktischen Einsatz nahe kommen. Mittels PDA-Messungen wurden charakteristische Werte wie Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten bestimmt. In Verteilungsversuchen wurden auf die Grundfläche der Normholzkrippe bezogenen Löschwasserraten ermittelt.

Es wurden Brandversuche mit Normholzkrippen in einem Versuchsraum nach ISO 9705 ohne Löschung als Vergleichsmöglichkeit zu Löschversuchen durchgeführt.

Als Brandobjekt diente ein Normholzstapel 8A nach DIN EN 3, der für die Prüfung von Feuerlöschern Verwendung findet. Für gängige Feuerwehrtechnik existieren derartige standardisierte Löschtests zurzeit nicht. Da diese Holzkrippenbrände in der internationalen Forschung oft zum Einsatz kommen, wurde die Vergleichbarkeit der ermittelten Daten ermöglicht.

Abweichend zur Prüfung nach DIN EN 3 wurden die Vorbrennzeiten in Anlehnung an die Hilfsfrist der Feuerwehr z. B. mit 12 Minuten gewählt (Brandschutzgesetz Sachsen-Anhalt). Die ersten Versuche zeigten, dass sich der Holzkrippenbrand nach 12 Minuten bereits in der Abklingphase befindet, so dass eine Bestimmung der kritischen Löschintensität nicht sinnvoll ist. Zusätzlich ist aus Tabelle 6.1 zu erkennen, dass nach 10 Minuten Vorbrennzeit (Versuch HK22) eine längere Löschzeit benötigt wird als nach 8 Minuten (Versuch HK26). Daher wurden die Versuche zur Ermittlung der minimalen Löschintensität mit der Vorbrennzeit von 8 Minuten durchgeführt.

Zur Ermittlung des Löscherfolgs wurde die Kombination von Temperatur im Innern der Holzkrippe und der Verlauf der Heat Release Rate verwendet.

In den Löschversuchen wurden zwei verschiedenen Anordnungen der Löschdüsen gewählt. In der ersten Anordnung wurde die Düse an der Decke angebracht, in der zweiten erfolgte die Löschwassereinbringung von der Seite.

Die Deckenanordnung entspricht der klassischen Sprinkleranordnung und dient gleichzeitig als Modell für den indirekten Innenangriff. Damit ist die Vergleichsmöglichkeit mit Daten anderer Forschungsarbeiten gegeben. Die seitliche Düsenanordnung wurde als Modell für den direkten Angriff durch den Feuerwehrmann von der Tür ausgehend gewählt.

In Experimenten wurden kritische Löschintensitäten bei Verwendung von drei verschiedenen Düsen und Beaufschlagung von oben ermittelt. Mit diesen Düsen konnten drei unterschiedliche Sprühwinkel realisiert werden. In den Versuchen mit der seitlichen Anordnung der Düse wurde keine Löschung erzielt.

Die Daten zu Wasservolumenströmen und Wassermengen für die Brandversuche, in denen die Brandlöschung erfolgte, sind in Tabelle 6.1 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 6.1: Volumenströme und -intensitäten für die Brandversuche, in denen eine Brandlöschung erfolgte

Versuch	Düse / Druck	Zugeführter Volumenstrom in l/min	Zugeführter Volumenstrom pro Raumfläche in l/min m ²	Volumenstromdichte in 1,13 m Höhe auf 1m ² Messfläche in l/min m ²	Volumenstromdichte ³⁾ in 1,8 m Höhe auf 1m ² Messfläche in l/min m ²	Volumenstromdichte ⁴⁾ bezogen auf Brandfläche in l/min m ²	Dauer ¹⁾ in s	Wasserzufuhr für die Löschung in l
HK7	A / 6 bar	23,7	2,4	15,4	6,1	14	710	280
HK19	A / 6 bar	23,7	2,4	15,4	6,1	14	1020	403
HK18	B / 3 bar	11,8	1,2	10,9	4,3	14	600	118
HK10	C / 5 bar	7,2	0,74	7	2,8	11,2	690	83
HK14	C / 5 bar	7,2	0,74	7	2,8	11,2	720	86
HK11	C / 6 bar	7,8	0,8	7,4	2,9	12,8	420	55
HK12	C / 6 bar	7,8	0,8	7,4	2,9	12,8	420	55
HK22 ²⁾	B / 3 bar	11,8	1,2	10,9	4,3	13	570	112
HK26	B / 3 bar	11,8	1,2	10,9	4,3	13	360	71

¹⁾ Dauer der Löschwasserzufuhr von Löschbeginn bis zum Zeitpunkt des Absinkens der HRR auf HRR ≤ 20 kW

²⁾ Löschbeginn nach 10 min

³⁾ Volumenstromdichte, die sich bei Voraussetzung gleichen Sprühwinkels und Gleichverteilung für die Düse in 1,8m ergibt (aus Messwerten der Spalte 5 mittels Ähnlichkeitsbeziehungen/Strahlensatz berechnet)

⁴⁾ Die Volumenstromdichten in Spalte 7 ergeben sich aus den Messwerten des Volumenstromes (vgl. Tabellen 5.2 bis 5.4) über der HK-Grundfläche (Brandfläche) von 0,4 m²

In der Spalte 4 ist der auf die Raumfläche bezogene Volumenstrom (Intensität) angegeben. Für die Düse C werden mit 0,74 und 0,8 die kleinsten Werte ermittelt. Die aus statistischen Einsatzdaten [Grimwood and Sanderson 15b] festgestellten Werte von ca. 2 l/min m² stimmen annähernd mit den größten kritischen Volumenstromdichten (Düse A) überein. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass Düse A einen erheblichen Anteil des Wassers seitlich an der Holzkrippe vorbeiführt. Für die beiden Düsen mit engerem Sprühwinkel ergeben sich geringere Volumenstromdichten.

Der Vergleich der ermittelten kritischen Löschintensitäten (Spalte 6) mit den experimentellen Daten der jüngsten Arbeiten von [Santangelo et al. 14] zu Holzkrippenbränden in Hallen (2,82-2,94 l/min m²) zeigt gute Übereinstimmung für Düse C.

In den Versuchen mit Holzkrippen 8A sind minimale Volumenstromdichten, bei denen eine Brandlöschung stattfindet, von 11,2 bis 14 l/m² min ermittelt worden. Es ist eine Intensitätsgröße, die sich auf die Grundfläche des Brandes bezieht.

In die Größe des Wasserbedarfs fließt die Löschdauer ein. Bei Löschung mit Düse A ist der größte Wasserbedarf zu verzeichnen. Mit dieser Düse wird aber ein großer Anteil des Wassers in den Raum versprüht. Die Zeit bis zur Löschung ist mit ca. 12 min und 17 min groß.

Der geringste Wasserbedarf besteht bei Löschung mit Düse C. Bei dem minimalen Volumenstrom, der für die Löschung mit Düse C ermittelt wurde (Abschnitt 5.1.3) wird aber eine längere Löschzeit erforderlich als mit dem größeren Volumenstrom in den Versuchen HK11 und HK12. Daher ist in den Versuchen HK11 und HK12 der geringste Wasserbedarf vorhanden. Mit einem größeren Wasservolumenstrom als dem minimal erforderlichen für die Löschung wird der Wasserbedarf für die Löschung verringert aufgrund der kleineren Löschzeit.

Versuche HK22 und HK26 sind Brandversuche mit einer größeren Holzkrippe und einer HRR von ca. 1 MW. Bei gleichem zugeführten Löschwasservolumenstrom erfordert die Löschung bei späterem Löschbeginn (HK22 nach 12 min) eine größere Menge Wasser aufgrund der längeren Löschzeit.

Düsen deren Bedeckungsgrad der Grundfläche des Brandobjektes weitestgehend entspricht, ermöglichen die geringsten Löschzeiten.

Schlussfolgerungen aus den Versuchen

Die Löschintensitäten wurden für Feststoffbrände der Klasse A im Raum nach ISO 9705 bis zu einem Maximalwert der Heat Release Rate von ca. 1 MW ermittelt.

Für die Versuchsanordnung wurden kritische Löschintensitäten von 11,2 bis 14 l/min m² für die verschiedenen Düsen ermittelt. Diese Intensität ist auf die Grundfläche des Brandes bezogen. Es ist zu vermuten, dass unter dem Wert von ca. 11,2 l/min m² im ungünstigsten Fall keine Löschung eintritt. Daraus ableitend muss bei einem Löscheinsatz der Feuerwehr über diese Größenordnung Löschwasser eingesetzt werden. Ein Sicherheitsbeiwert ist einzuplanen. Anhaltswerte dazu findet man in den Veröffentlichungen von [Grimwood 05] und [Pleiß et al. 85].

Da eine Heat Release Rate von 1 MW im Vergleich zu den bei üblichen Wohnraumbränden freigesetzten Raten gering ist, müssen die Ergebnisse für größere Freisetzungsraten bestätigt werden. Dabei sollte sich an dem von der AGBF vorgegebenen kritischen Wohnungsbrandszenarium orientiert werden.

Die verwendete Methodik ist auf die in der Feuerwehr eingesetzte Strahlrohrtechnik zu übertragen.

Die Versuchsergebnisse sind ein Hinweis, dass die Hilfsfristen möglichst kurz gehalten werden müssen, um den Wasserbedarf zu minimieren.

Die hier verwendete Methodik zur Ermittlung der kritischen Löschintensität kann so weiterentwickelt werden, dass sie zur Überprüfung von feuerwehrtaktischen und feuerwehrtechnischen Leistungsparametern bei der Brandbekämpfung geeignet ist.

LITERATUR

[Abduragimov et al. 79]

Abduragimov, I., M.; Andronov, A.,S., Rynkov, K., M.: Issledovanie zakonomernostej tušenija tverdyh gorucih materialov (Untersuchung der Gesetzmäßigkeiten beim Löschen fester brennbarer Materialien), Brandschutztechnik und Brandbekämpfung, Sammelband, Moskau: VNIPO, 1979, S. 164-175

[Babrauskas and Peacock 92]

Babrauskas, V., and Peacock, R. D., Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard, *Fire Safety J.* 18, 255-272 (1992).

[Benfer and Scheffey 14]

Matthew E. Benfer and Joseph L. Scheffey: Evaluation of Fire Flow Methodologies, Final Report, Hughes Associates, Inc., Baltimore, MD, January 2014 Fire Protection Research Foundation

[de Vries 97]

Holger de Vries: When did you fight your last crib fire? *FIRE CHIEF* / March 1997, pp. 70-76

[Dlugogorski et al. 94]

Dlugogorski, B.Z.; Mawinney, J.R.; Duc, V.H.: The Measurement of Heat Release Rates by Oxygen Consumption Calorimetry in Fires Under Suppression. Proceedings of the 4th International Symposium Fire Safety Science 1994 pp. 877-898

[Grant et al. 00]

Grant, G.; Brenton, J.; Drysdale, D.: Progress in Energy and Combustion Science, 26(2000) 79-130

[Grimwood 05]

Grimwood, Paul: Critical & Tactical Flow rate, www.fire-flows.com, 3D Fire Fighting Book & CD, FPP/IFSTA Oklahoma State University, USA 2005

[Grimwood and Sanderson 15a]

Paul Grimwood and A. Sanderson: The County/Metro research into fire-fighting suppressive capacity and the impact on building fire damage at 4 5000 UK building fires, 2009–2012, *Fire Safety Journal* 71 (2015) 238–247

[Grimwood and Sanderson 15b]

Paul Grimwood and A. Sanderson: A performance based approach to defining and calculating adequate firefighting water using s.8.5 of the design guide BS PD 7974:5:2014 (fire service intervention), *Fire Safety Journal* 78 (2015) 155–167

[Hirst 89]

Hirst, R.: Underdown's Practical Fire Precautions, 3rd ed., Gower Technical, Aldershot, 1989

[Klaene and Sanders 01]

Ben Klaene and Rus Sanders: Figuring Flow Rates Apply gallons-per-minute formulas when the water supply is limited., NFPA Journal, November/December 2001

[Kohl et al. 07]

Kohl, K.-J.; Georg Pleß, G.; Richter, S.: Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil I – Literaturstudie, Forschungsbericht Nr. 147, Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, ISSN 0170-0060, Heyrothsberge, 2007

[Kutz und Kohl 12]

Kutz, M; Kohl, K.-J.: Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil II - Aufbau und Test einer Löschapparatur, Forschungsbericht Nr. 167, Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, ISSN 0170-0060, Heyrothsberge, 2012

[Hadjisophocleous and J.K. Richardson 05]

G.V. Hadjisophocleous and J.K. Richardson: Water Flow Demands for Firefighting, Fire Technology, 41, 173–191, 2005

[Lefebvre 89]

Lefebvre, Arthur H.: Atomization and Sprays. Hemisphere Publishing Corporation, 1989

[Leitfaden 13]

D. Hosser: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage November 2013, Hrsg.: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, Altenberge ; Braunschweig: vfdb, 2013

[Otte 15]

Otte, Felix: Messung der Wasserverteilung diverser Düsen, Messprotokoll (unveröffentlicht), Heyrothsberge 2015

[Pleß et al. 85]

Pleß, G.; Kretzschmar, A.; Kohl, K.-J.: „Löschintensität, ihre Bedeutung und Berechnung“ und „Neue Berechnungsgrundlagen für das Wasserlöschverfahren“, Unser Brandschutz (1985) 11, S.3-8, Berlin

[Starke 95]

Starke, Horst: Statistische Beschreibung von Sprühstrahlen, Jahresbericht 1995, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, 1995

[Särdqvist 96]

Särdqvist, St.: Report 1014 Universität Lund, Lund, 1996

[Tamanini 76]

Francesco Tamanini: The Application Water Sprays the Extinguishment Crib Fires, Combustion Science & Technology, 14 (1976) pp. 17-21

[Santangelo et al. 14]

Paolo E. Santangelo; Bryson C. Jacobs; Ning Ren; Joshua A. Sheffel; May L. Corn; Andre W. Marshall: Suppression effectiveness of water-mist sprays on accelerated wood-crib fires, Fire Safety Journal 70 (2014) pp 96-111

ANHANG

- A1:** Gegenüberstellung der Videoschnappschüsse zu gleichen Zeiten des Brandverlaufes
HK19 (Düse A von oben nach 8 min) – HK30 (Düse A von der Seite nach 8 min)

- A2:** Gegenüberstellung der Videoschnappschüsse zu gleichen Zeiten des Brandverlaufes
HK18 (Düse B von oben nach 8 min) – HK28 (Düse B von der Seite nach 8 min)

- A3:** Gegenüberstellung der Videoschnappschüsse zu gleichen Zeiten des Brandverlaufes
HK12 (Düse C von oben nach 8 min) – HK29 (Düse C von der Seite nach 8 min)

A1: Gegenüberstellung der Videoschnappschüsse zu gleichen Zeiten des Brandverlaufes
HK19 (Düse A von oben nach 8 min) – HK30 (Düse A von der Seite nach 8 min)



2 min (HK19)



2 min (HK30)



6 min (HK19)



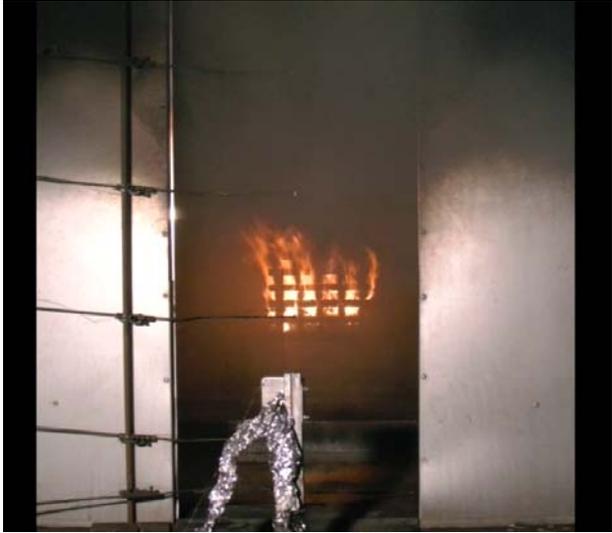
6 min (HK30)



8 min (HK19)



8 min (HK30)



10 min (HK19)



10 min (HK30)



14 min (HK19)



14 min (HK30)



18 min (HK19)



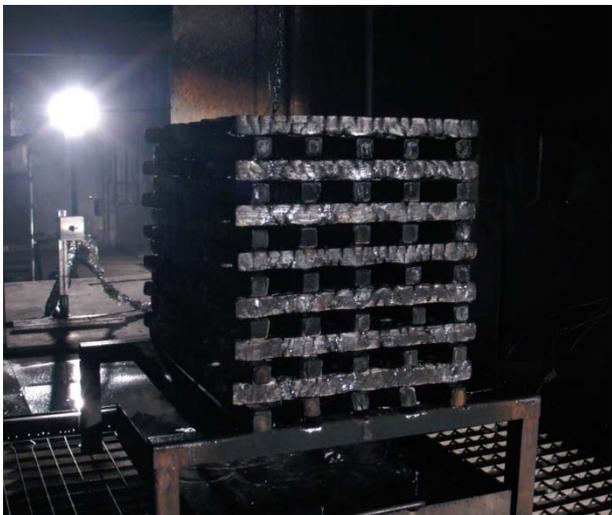
18 min (HK30)



25 min (HK19)



25 min (HK30)



Holzkippe nach dem Versuch HK19



Holzkippe nach dem Versuch HK30

A2: Gegenüberstellung der Videoschnappschüsse zu gleichen Zeiten des Brandverlaufes
HK18 (Düse B von oben nach 8 min) – HK28 (Düse B von der Seite nach 8 min)



2 min (HK18)



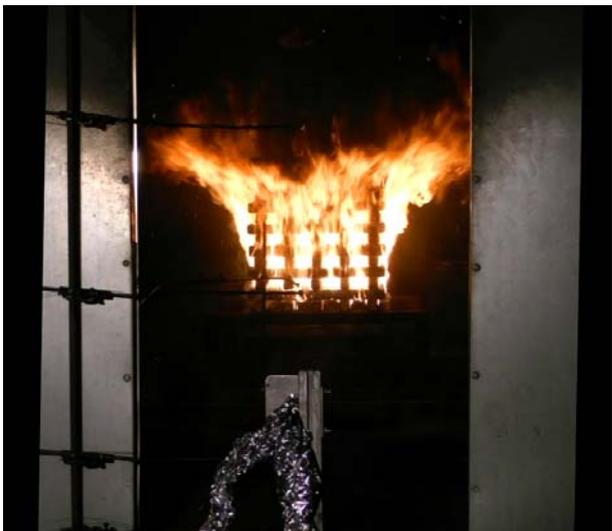
2 min (HK28)



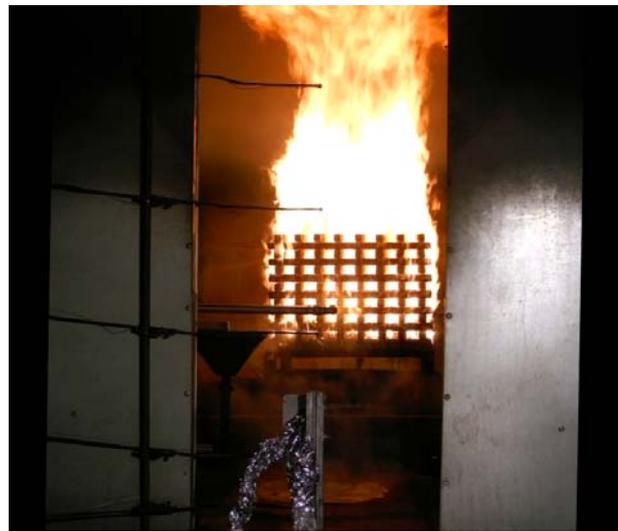
6 min (HK18)



6 min (HK28)



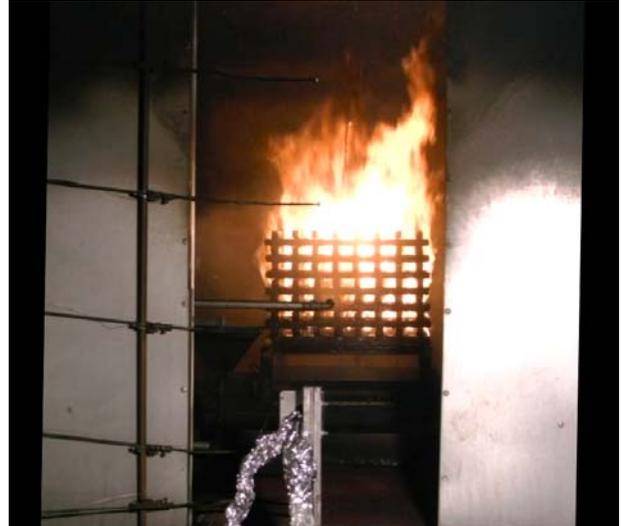
8 min (HK18)



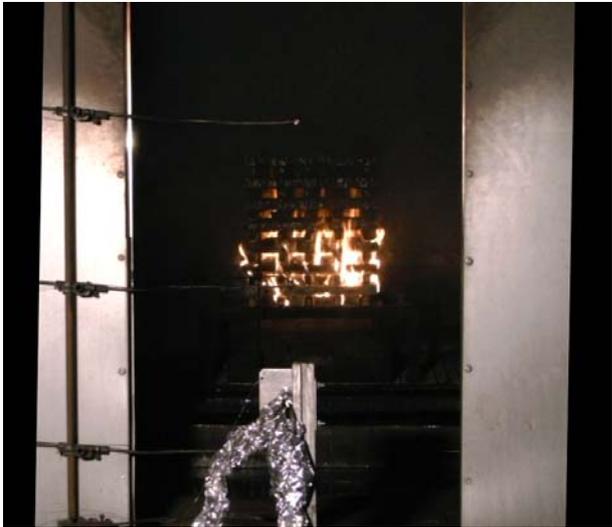
8 min (HK28)



10 min (HK18)



10 min (HK28)



14 min (HK18)



14 min (HK28)



18 min (HK18)



18 min (HK28)



25 min (HK18)



25 min (HK28)



Holzkippe nach dem Versuch HK18



Restmasse-Holzkippe aus Sicht der
Containertür nach dem Versuch HK28

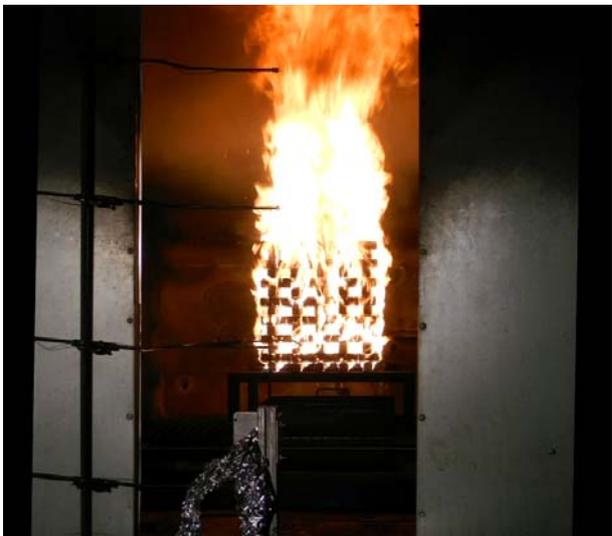
A3: Gegenüberstellung der Videoschnappschüsse zu gleichen Zeiten des Brandverlaufes
HK12 (Düse C von oben nach 8 min) – HK29 (Düse C von der Seite nach 8 min)



2 min (HK12)



2 min (HK29)



6 min (HK12)



6 min (HK29)



8 min (HK12)



8 min (HK29)



10 min (HK12)



10 min (HK29)



14 min (HK12)



14 min (HK29)



18 min (HK12)



18 min (HK29)



25 min (HK12)



25 min (HK29)



Holzkippe nach dem Versuch HK12



Holzkippe nach dem Versuch HK29