

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



Bewertung und Mindestanforderungen
mobiler Hochdrucklöschverfahren

188

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. 188

**Bewertung und Mindestanforderungen mobiler
Hochdrucklöschverfahren**

von

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

Dipl.-Ing. Monika Kutz

Dr.-Ing. Michael Neske

Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke

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

Heyrothsberge

November 2017

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: <p style="text-align: center;">188</p>	Titel des Berichtes <p style="text-align: center;">Bewertung und Mindestanforderungen mobiler Hochdrucklöschverfahren</p>	ISSN: <p style="text-align: center;">0170-0060</p>	
Autoren: Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl, Dipl.-Ing. Monika Kutz, Dr.-Ing. Michael Neske, Dipl.-Phys. Friedrich Wienecke	durchführende Institution: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: BD Frank Mehr		
Nummer des Auftrages: <p style="text-align: center;">88 (2/2015)</p>	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Datum des Berichtes: <p style="text-align: center;">November 2017</p>			
Seitenzahl: <p style="text-align: center;">47</p>	Bilder: <p style="text-align: center;">46</p>	Tabellen: <p style="text-align: center;">6</p>	Literaturverweise: <p style="text-align: center;">36</p>
Kurzfassung: Es wurde eine Methode zur Bewertung mobiler Hochdrucklöschtechnik skizziert. Das Verfahren basiert auf der experimentellen Bestimmung der HRR und des benötigten Löschwasservolumenstroms. Es war nicht möglich, die HRR über die Sauerstoffverbrauchsmethode zu bestimmen. Deshalb wurde auf einen international üblichen theoretischen Ansatz zurückgegriffen. Es wurde ein Ratingverfahren genutzt, das auf der DIN EN 3 und der alten schwedischen Handfeuerlöschnorm [SS 1192] basiert. Die Methode wurde für Freibrände der Klasse A, die ein wesentliches Einsatzgebiet der mobilen Hochdrucktechnik darstellen, in einer Messapparatur getestet. Neben der Bestimmung HRR und des Löschwasservolumenstroms war es erforderlich, die Wärmestrahlungsstromdichte zu messen sowie Videoauswertungen und Infrarotaufnahmen zur Beurteilung des Löschprozesses vorzunehmen. Es wurden Empfehlungen zur Durchführung eines Ratingverfahrens zur Bewertung von Hochdrucklöschtechnik gegeben.			
Schlagwörter: Hochdrucklöschtechnik, Heat Release Rate, Rating-Verfahren, Wärmestrahlung			

INHALTSVERZEICHNIS

	VERZEICHNIS DER BILDER	
	VERZEICHNIS DER TABELLEN	
	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	
1	EINLEITUNG	1
2	KURZÜBERBLICK WASSERNEBELLÖSCHTECHNOLOGIE UND - VERFAHREN	1
3	ENTWICKLUNG VON TESTSZENARIEN	8
3.1	Raumbrandversuche im Container	8
3.2	Testversuche im Brandraum 3	5
4	VERSUCHSAUFBAU	23
4.1	Messanordnung und Messgrößen	23
4.2	Versuchsdurchführung	25
5	BRAND- UND LÖSCHTESTS	25
5.1	Versuchsergebnisse	25
5.1.1	Versuche mit Krippen 2 x 8A	27
5.1.2	Versuche mit Krippen 8A	29
5.1.3	Rating-Verfahren	33
5.1.3.1	Rating für Hochdrucklöschdüse A	33
5.1.3.2	Rating für Hochdrucklöschdüse B	34
5.1.3.3	Rating für Hochdrucklöschdüse C	37
5.2	Schlussfolgerungen aus den Ratingversuchen	40
5.3	Zusammenfassung	43
	LITERATUR	44
	ANHANG	

VERZEICHNIS DER BILDER

- 2.1 Löschprozess bei einem Raumbrand nach **[Klaus et al. 95]**
- 2.2 Löschprozess bei einem Freibrand
- 3.1 Brandcontainer **[IMK 186]**
- 3.2 Anordnung der Thermoelemente und bidirektionalen Sonden im Brandcontainer
- 3.3 Versuchsaufbau: Holzkrippe 8A und Hochdruck-Löschdüse vor Versuchsbeginn(links), Holzkrippe in der Vollbrandphase (rechts)
- 3.4 Blick in den Brandraum während der Löschphase: zu Beginn der Löschwasserzufuhr (links), nach ca. 1 Minute Löschdauer (rechts)
- 3.5 Blick in den Brandraum nach Beenden der Wasserzufuhr
- 3.6 Raumtemperaturen in der Ecke der Brennkammer (T05-T10)
- 3.7 Temperaturen über der Holzkrippe (T01-T04)
- 3.8 Anordnung der Thermoelemente in der mittleren Lage der Holzkrippe (Draufsicht)
- 3.9 Temperaturen in der Holzkrippe (TC7-TC10)
- 3.10 Temperaturen in der Mitte der Holzkrippe (TC3, TC4, TC5)
- 3.11 Wärmefreisetzungsrates (HRR) in den Testversuchen
- 3.12 Versuchsaufbau eines Testversuchs in Brandraum 3
- 3.13 Draufsicht der Versuchsanordnung für Versuch 7 mit Krippe 2 x 8A
- 3.14 Seitenansicht der Versuchsanordnung für Versuch 7 mit Krippe 2 x 8A
- 3.15 Temperaturen in der Krippe (Messstellen TC1, TC2) für Versuch 7
- 3.16 Gastemperaturen über der Krippe (Messstellen TC11 bis TC14) für Versuch 7
- 3.17 Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 7
- 3.18 Anordnung der Krippe 8A (links) und der Temperaturmessstellen in der Krippe in Versuch 10, Messstellen in der Mitte der Holzkrippe (rechts)
- 3.19 Temperaturen in der Krippe in Versuch 10
- 3.20 Temperaturen über der Krippe in Versuch 10
- 3.21 Videoaufnahme 1 Minute nach Beendigung der Löschwasserbeaufschlagung von Versuch 10
- 3.22 Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 10
- 4.1 Seitenansicht der Versuchsanordnung und der Temperaturmessstellenanordnung im Brandraum 3
- 4.2 Draufsicht der Versuchsanordnung und Anordnung der Radiometer in Bezug zum Brandobjekt in Brandraum 3
- 4.3 Anordnung von Radiometer 1 in einem Versuch mit einer Krippe 13A
- 5.1 Abbrandrate für die Krippen 8A, 13A und 2 x 8A (Lineare Regression im Bereich von 120 s bis 480 s Branddauer)
- 5.2 Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte am Radiometer 1 (links) und Aufnahmen direkt nach Ende des Löschintervalls (rechts) für Versuche 7, 13a und 15

- 5.3 Wärmestrahlungsstromdichte in den Versuchen 20 und 21 (Löschdauer 5 min) am Radiometer 1 sowie in Versuch 12 (Löschdauer 2min)
- 5.4 Normholzkrippe 8A nach Löschwasseraufbringung über die Dauer von 5 min in Versuch 20 (links) und in Versuch 21 (rechts)
- 5.6 Normholzkrippe 8A während Löschwasseraufbringung nach 2 min in Versuch 12 (links) und in Versuch 16 (rechts)
- 5.7 Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 12 (links) an Radiometer 2 und Versuch 16 (rechts) an Radiometer 1 gemessen
- 5.8 Infrarotaufnahme der Normholzkrippe 8A nach 2 min Löschdauer für Versuch 12 (links) und Versuch 16 (rechts)
- 5.9 Videoschnappschuss aus Versuch 12 (links) und Versuch 14 (rechts) nach Ende der Löschwasserzufuhr
- 5.10 Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 2 in den Versuchen 12 und 14
- 5.11 Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 in den Versuchen 21, 22, 23
- 5.12 Krippe 21A in Versuch 23 (links) und Krippe 21A+ in Versuch 24 (rechts)
- 5.13 Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 in den Versuchen 21, 22, 23 und 24
- 5.14 Krippe 21A+ nach 4 min Löschdauer (links) und 1 min nach Beendigung der Löschung (rechts)
- 5.15 Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 und 2 im Versuch 24
- 5.16 Krippe 21A (Versuch 23) ca. 40 s nach Beendigung der Löschung mit Düse B
- 5.17 Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 in den Versuchen 20, 17 und 19
- 5.18 Krippe 13A (links) und Krippe 21A (rechts) nach Beendigung der Löschwasseraufbringung mit Düse C
- 5.19 Krippe 21A (Versuch 19) unmittelbar nach Beendigung der erfolgreichen Löschung mit Düse C

VERZEICHNIS DER TABELLEN

- 2.1 Auszug von Normen und Richtlinien für mobile Löschsysteme, entnommen **[Otte 16]**
- 3.1 Testversuche im Brandraum 3
- 5.1 Daten zur Reihe der Normholzkrippen nach DIN EN 3
- 5.2 Kenngrößen aus den Ratingversuchen für Düse A
- 5.3 Kenngrößen aus den Ratingversuchen für Düse B
- 5.4 Kenngrößen aus den Ratingversuchen für Düse C

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Abkürzung	Bedeutung
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren
AÜG	Ausbildungs- und Übungsgelände
FTIR	Fourier Transform Infrarot
HK	Holzkrippe

HRR	Heat Release Rate
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz
IR	Infrarot
PDA	Phasen-Doppler-Anemometer

Formelzeichen Bedeutung

c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
Δh_V	Spezifische Verdampfungsenthalpie
ΔH_C	Verbrennungswärme, Heizwert
\dot{H}_W	Enthalpieaufnahmegeschwindigkeit, Energieabsorptionsrate
\dot{m}_{Wab}	Abfließender Massenstrom an Wasser
\dot{m}_{Wzu}	Zugeführter Massenstrom an Wasser
\dot{m}_D	Verdampfender Massenstrom an Wasser (Übergang Flüssigphase in Gasphase)
\dot{m}_G	Massenstrom der Gasphase
\dot{m}_L	Massenstrom zugeführter Frischluft
\dot{m}_B	Massenstrom freigesetzten Brennstoffs (Abbrandrate)
$\dot{m}_{G,F}$	Massenstrom der Gasphase, die durch Fensteröffnungen abgeführt wird
Q	Wärmeenergie
Q_W	Vom Wasser aufgenommenen Wärmeenergie
\dot{Q}_B	Wärmestrom von der Gasphase auf den Brennstoff
\dot{Q}_G	Wärmestrom von Gasphase auf Wasser
\dot{Q}_H	Wärmestrom aus der Gasphase auf bauliche Hülle
\dot{Q}_W	Wärmestrom aus der Flüssigphase (Wasser) auf bauliche Hülle
$\dot{Q}_{Lösch}$	Wärmestrom des Wassers auf Brennstoff
$\dot{Q}_{Str,F}$	Strahlungswärmestrom der Gasphase aus Fensteröffnungen
\dot{Q}_U	Wärmestrom aus der Umgebung
T_W	Temperatur der Flüssigphase (Wasser)
T_G	Temperatur der Gasphase
T_H	Temperatur der baulichen Hülle
V_W	Volumen der Flüssigphase
V_G	Volumen der Gasphase
V_H	Volumen der baulichen Hülle
\dot{V}_W	Wasservolumenstrom, Anwendungsrate
ρ_W	Dichte des Wassers
χ	Verbrennungseffizienz

1 Einleitung

Im Rahmen der Notwendigkeit des Halonersatzes wird Wasserdampf seit den 90er Jahren verstärkt als alternatives Löschmittel bzw. Lösungsverfahren eingesetzt. Insbesondere etablierten sich Hochdruckwasserdampfanlagen **[Gordin 06]**. Auch auf dem Gebiet der mobilen Brandbekämpfung wurden und werden Hochdruckwasserdampfsysteme eingesetzt. Dazu wurde und wird ebenfalls entsprechende Wasserdampftechnik entwickelt und angeboten.

Die Einschätzung des taktischen Einsatzwertes mobiler Hochdruckwasserdampfsysteme ist für die Feuerwehren und die die Technik entwickelnde Industrie von grundlegender Bedeutung.

2 Kurzüberblick Wasserdampflöschtechnologie und -verfahren

Wasserdampflöschverfahren arbeiten mit Löschtechnik, die es erlaubt Wasser als feinverteiltes Tropfenspray bei der Brandbekämpfung zu nutzen. Die Wasserdampfsysteme können allgemein in stationäre Systeme und mobile Systeme eingeteilt werden. Stationäre Systeme sind Gegenstand umfangreicher Forschung, Entwicklung und Anwendung. Für Interessenten sei hier auf die klassischen Arbeiten von **[Liu and Kim 00, 01]**, **[Mawhinney 94]**, **[Whigus 10, 12a, 12b]**, **[Santangelo and Tartarini 10]** und **[Chow and Li 02-03]** verwiesen. Einen Überblick bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten von Wasserdampfanlagen findet man bei **[Kunkelmann 07, 10]** und in **[EUROFEU-POSITIONSPAPIER 04]**. Die prinzipiellen Löschmechanismen von Wasserdampf sind z. B. bei **[Grant et al. 00]** oder **[Husted 04]** zu finden.

Es ist allgemeiner Stand der Technik, dass stationäre Wasserdampfsysteme speziell für bestimmte Brandszenarien ausgelegt werden. Durch entsprechende Versuche im Originalmaßstab muss die Funktionsfähigkeit dann gegebenenfalls nachgewiesen und durch die Versicherungsgesellschaften anerkannt werden. Dies ist vor allen Dingen der Tatsache geschuldet, dass die Wirksamkeit eines Wasserdampfsystems von vielen Einflussparametern abhängig ist.

Dies können u. a. sein:

- das Brandobjekt,
- die Düsenanordnung,
- Tropfengrößen- und Geschwindigkeitsverteilung,
- die (kritische) Massenstromdichte, die Impulsstromdichte,
- die Strömungsverhältnisse wie Strömungswiderstände für die Wasserdampfausbreitung,
- Öffnungen des Raums und Luftströmungen im Raum, siehe auch **[EUROFEU-POSITIONSPAPIER 04]**.

Eine Übersicht bezüglich der Anforderungen, die an Wasserlöschsysteme in Standards gestellt werden, ist bei **[Otte 16]** zu finden.

Mobile Systeme werden z. B. als tragbare und fahrbare Feuerlöscher, als schlauchgebundene Systeme und als Löschfahrzeuge wie z. B. der Turbolöcher angeboten. Abgesehen von Systemen wie dem Turbolöcher, die zur Großbrandbekämpfung eingesetzt werden, können diese Systeme z. B. zur Bekämpfung von Entstehungsbränden und Kleinbränden durch die Feuerwehr eingesetzt werden. Die mobile Wassernebelhochdrucktechnik stellt dabei eine spezielle Technikvariante dar.

Neben diesen "klassischen" Einsatzszenarien, bei denen die mobile Wassernebeltechnik so eingesetzt wird, dass der Wassernebel auf einer Fläche wirkt (2D-Brandbekämpfung), wird Wassernebel bei der Brandbekämpfung auch mit der Hauptwirkung im Volumen zur Kühlung der Rauchgase eingesetzt (3D-Brandbekämpfung). Dies wird insbesondere in Schweden durch eine moderne Einsatzvariante für die Innenraumbrandbekämpfung optimiert. Hier wird Wassernebelhochdrucktechnik eingesetzt, die gleichzeitig zum Wasserstrahlschneiden geeignet ist. Damit soll erreicht werden, dass der Angriffstrupp den Brandraum sicher betreten kann. Um den einsatztaktischen Wert dieser Wassernebelhochdrucktechnik und des Löschverfahrens einschätzen zu können, ist es deshalb notwendig, entsprechende Methoden zu entwickeln. Dies trifft natürlich ebenfalls auf die anderen mobilen Löschverfahren im Bereich der Feuerwehr zu.

Einige Standards mit Anforderungen für mobile Wasserlöschsysteme sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Auszug von Normen und Richtlinien für mobile Löschsysteme, entnommen **[Otte 16]**

Kurzbezeichnung	Titel
DIN EN 3-7	Tragbare Feuerlöscher - Eigenschaften, Leistungsanforderungen und Prüfungen
NFPA 10	Standard for Portable Fire Extinguishers
DIN EN 1866-1	Fahrbare Feuerlöscher – Eigenschaften, Löschleistung und Prüfungen
DIN 15182-2	DIN 15182-2 Strahlrohre für die Brandbekämpfung - Hohlstrahlrohre PN 16
NFPA 1964	NFPA 1964 Standard for Spray Nozzles

Die in diesen Normen für Feuerlöscher und für die Strahlrohre der Feuerwehr gestellten Anforderungen sind nicht einheitlich. Sie unterscheiden sich insbesondere in den geforderten Parametern. Es werden z. B. für Feuerlöscher mit der DIN EN 3-7 **[DIN 07]** Leistungsanforderungen definiert, die eine Einschätzung über die Größe der löschbaren Feststoffbrände und Brände der Klasse B ermöglichen. Dies wird durch entsprechende Löschversuche an definierten Brandobjekten nachgewiesen. Damit existiert ein Zusammenhang zwischen dem Löschmittel, dem Löschverfahren, der eingesetzten Löschtechnik und dem Brandobjekt. Anforderungen an Wurfweite und andere charakteristische strömungsmechanische Parameter werden nicht gestellt **[Otte 16]**.

Die Anforderungen für Feuerwehrstrahlrohre in den Normen beziehen sich insbesondere auf Mehrzweckstrahlrohre und Hohlstrahlrohre. Für diese Strahlrohre der Feuerwehr werden in der Regel Parameter wie die Wurfweite und der Löschmitteldurchsatz erfasst. Eine Bewertung anderer Leistungsparameter erfolgt i. A. nicht. Hier besteht kein direkter Zusammenhang zwischen gestellten Anforderungen und dem Brandobjekt¹. In diesen Normen wird außer der Wurfweite ebenfalls nichts über die strömungsmechanische Charakterisierung der erzeugten Wasserstrahlen ausgesagt **[Otte 16]**. Die Einordnung der Hochdruckstrahlrohre, die in der Feuerwehr eingesetzt werden, ist zurzeit nicht möglich, da auch hierfür unzureichende Daten vorliegen. Ein extra Standard für diese Technik existiert nicht.

Wie schon in **[Kohl und Pleß 07]** dargestellt, ist die von **[Särdqvist 96]** definierte physikalische Größe der Energieabsorptionsgeschwindigkeit die wesentlichste Größe, die die Leistungsfähigkeit eines Löschverfahrens und damit in der Endkonsequenz die Brandbekämpfungsleistung einer Feuerwehr bestimmt, d. h. den taktischen Einsatzwert definiert. Neben den eigentlichen technischen Parametern und physikalischen Prozessgrößen spielt die gewählte Anwendungstechnologie eine wichtige Rolle. Um dieses näher zu erläutern, ist es sinnvoll, die Einsatzszenarien näher zu betrachten.

Der Löschprozess kann wie folgt eingeteilt werden:

- Löschen von Freibränden. Hier ist die Beeinflussung durch Eingrenzungen vernachlässigbar.

Hierunter fallen z. B. Brände ohne bauliche Hülle aber auch Brände in Räumen, bei denen das Volumen des Brandes in Bezug zum Volumen der baulichen Hülle gering sind, so dass kaum oder keine Rückwirkung durch die Begrenzung der Hülle entsteht.

- Löschen von Bränden, die durch Eingrenzungen beeinflusst werden, wie sie z. B. bei Raumbränden auftreten.

Weiterhin ist zu beachten, wo die Hauptwirkung des Löschmittels im Löschprozess stattfindet.

Wird der Prozess so geführt, dass die Hauptwirkung des Löschmittels im Volumen stattfindet, dann ist es sinnvoll vom Volumenslöschen zu sprechen. Beispiele dafür sind das

1 Interessanterweise besteht durch die Definition von Kleinbrand, Mittelbrand und Großbrand ein indirekter Zusammenhang, da diese z. B. über die Anzahl der von der Feuerwehr eingesetzten Strahlrohre definiert werden.

Löschen einer Flamme mit Gasen oder die Flutung eines Raums mit Löschgasen wie z. B. mit Inergen.

Es hat sich dafür auch der Begriff 3D-Löschen(-prozess) eingebürgert (s. o.).

Wird die Hauptlöschwirkung auf die Wechselwirkung mit Oberflächen ausgelegt, so wird dieser Prozess als Oberflächenlöschen bezeichnet. Hierunter fallen z. B. die Beaufschlagung von Brandstoffoberflächen mit Löschmitteln wie sie bei der Beschäumung von Flüssigkeitsbränden auftreten. Hierfür findet auch der Begriff 2D-Löschen Verwendung.

Bei Löschvorgängen können diese Prozesse gekoppelt sein. Ebenso ist die unterschiedliche Kombination im Verlauf des Löschangriffs möglich. Um dies zu verdeutlichen, sind diese Prozesse in Bild 2.1 und Bild 2.2 grafisch dargestellt.

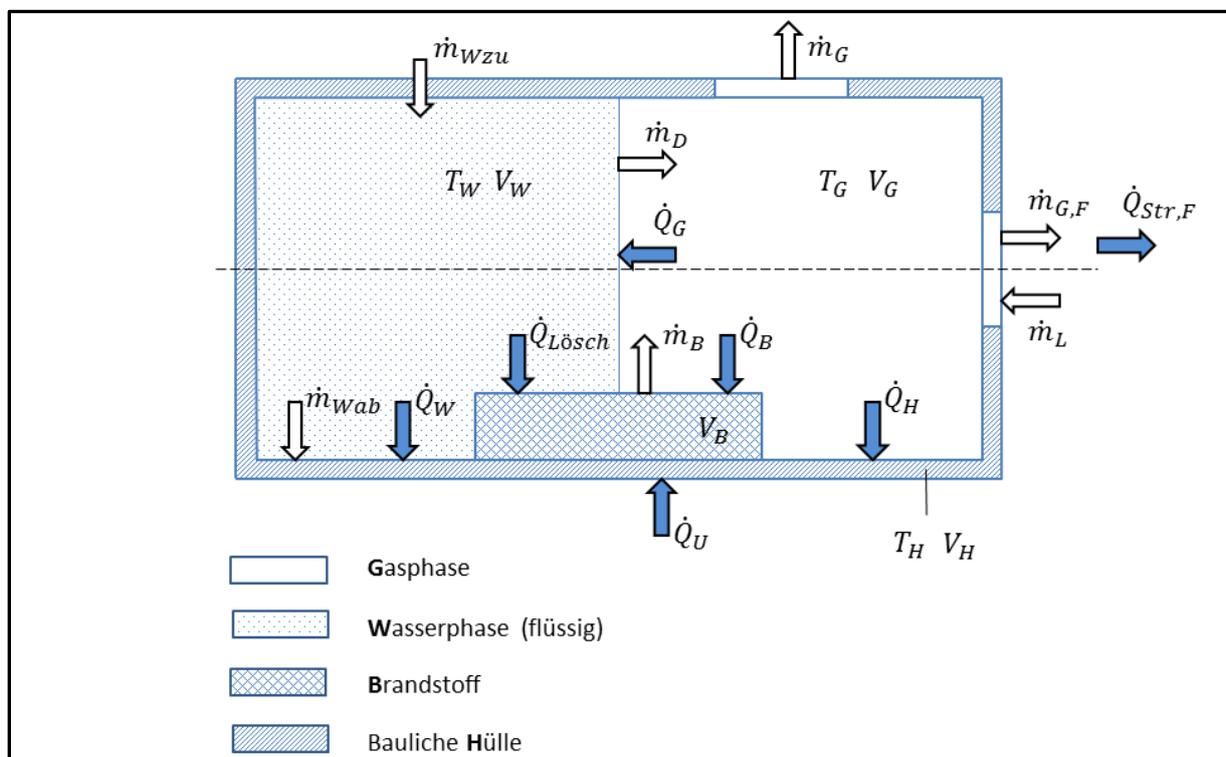


Bild 2.1: Löschprozess bei einem Raumbrand nach [Klaus et al. 95]

Bild 2.1 stellt die Wechselwirkung der beteiligten Phasen für den Löschprozess bei Raumbränden dar. Es zeigt die Energie- und Massenaustauschprozesse zwischen dem Löschmittel W, hier für Wasser stehend, der Gasphase G, dem Brandstoff B, der baulichen Hülle H sowie der Umgebung U.²

² Das Austauschmodell wurde von den Autoren in [Klaus et al. 95] entwickelt. Es wurde auf die üblicherweise vorgenommene Einteilung in Flamme, Plume etc. verzichtet, um die thermodynamischen Austauschprozesse zwischen den Phasen klarer zu erfassen. In der Gasphase finden strömungsmechanische Prozesse und chemische Reaktionen statt, die dann zu Ausbildung einer Flamme und einer Rauchgasströmung führen.

Bild 2.2 zeigt die Energie- und Massenaustauschprozesse für den Löschprozess bei einem Freibrand.

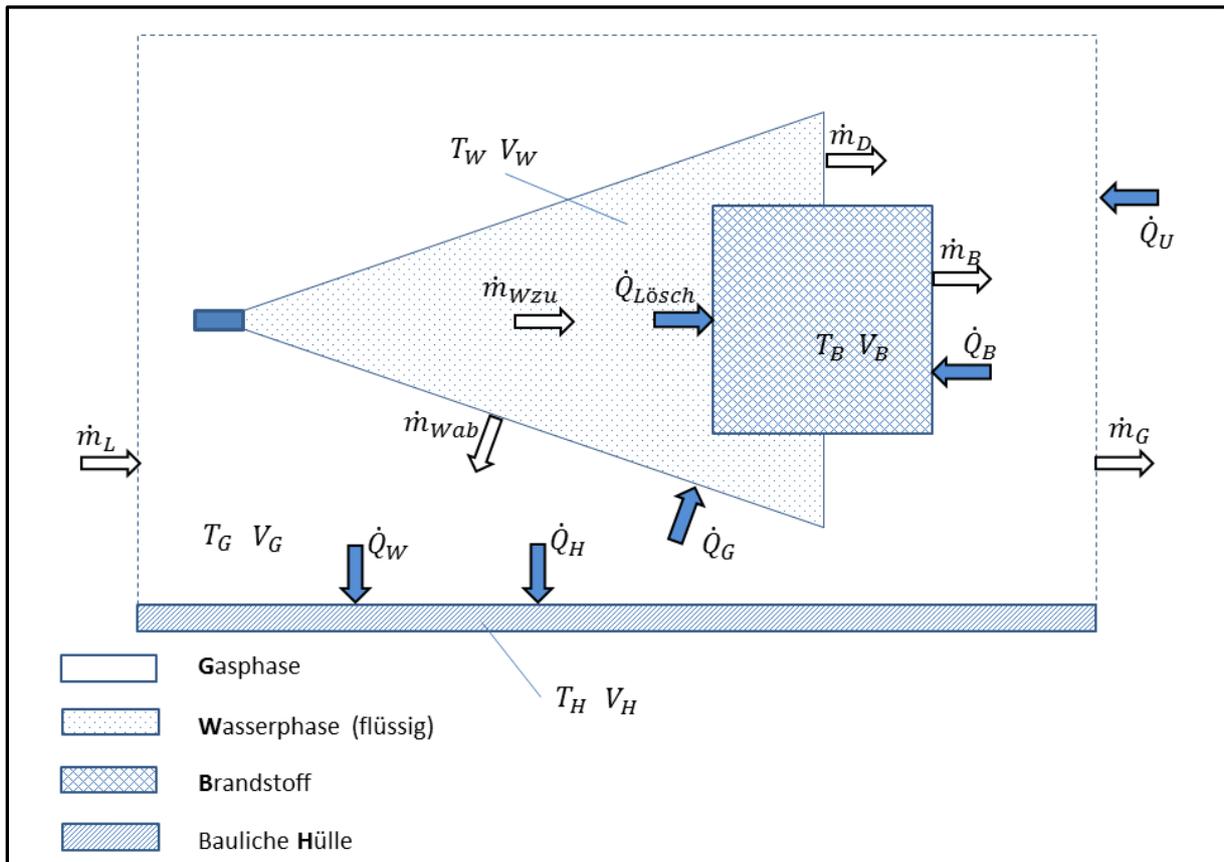


Bild 2.2: Löschprozess bei einem Freibrand

Die Art und Weise sowie die zeitliche Abfolge der Wechselwirkung des Wasserlöschmittels mit der Gasphase und dem Brandstoff bestimmt den Löschprozess und damit die Energieabsorptionsgeschwindigkeit, die ein Löschverfahren und die entsprechende Löschtechnik in der Lage ist zu leisten. Je nach Zielstellung ist der Prozess von der Ausbringung durch die Löschmittelauswurfvorrichtung (Düse) über den Transport des Löschmittels und der Wechselwirkung des Löschmittels mit der Gasphase sowie der Wechselwirkung mit dem Brandstoff zu betrachten. Methoden, die diesen Prozess oder die Teilprozesse einschätzen sollen, müssen dies widerspiegeln können.

Deshalb sollte die Beurteilung folgender Parameter erfolgen:

- Spraybildung,
- Tropfengrößenverteilung, Geschwindigkeitsverteilung und Wurfweite des Sprays,
- Impulstransport,
- Energieabsorption,
- Gas- und /oder Oberflächenkühlung **[Husted 04]**.

Hauptproblem bei jeder Einschätzung von Löschverfahren bzw. -systemen ist die Bestimmung der oben genannten Energieabsorptionsgeschwindigkeit als physikalische

Größe während des Löschprozesses. Darüber hinaus ist zu definieren, wie die Löschung messtechnisch bestimmt werden kann. Dies ist insbesondere bei Bränden der Klasse A eine schwierige Problematik.

Das Problem der Einschätzung des taktischen Einsatzwertes von mobilen Hochdrucklöschsystemen wurde schon mehrfach angegangen. **[Pleß and Seliger 94]** untersuchten die Löschwirksamkeit des HDL 250 an den Brandobjekten 13A und 144B nach DIN EN 3-7 **[DIN 07]** und bewerteten diese im Vergleich zu einem 9 l Handfeuerlöscher.

[Starke 07, 10] führte ebenfalls Untersuchungen durch, die sich am zurückgezogenen schwedischen Standard **[SS 1192]** sowie der DIN EN 3-7 **[DIN 07]** orientierten. Mit der Orientierung an dem schwedischen Standard sollte eine "Unabhängigkeit" der Testprozedur von den Fähigkeiten des Bedienpersonals erreicht werden. Es wurden sowohl Brände der Klasse A nach DIN EN 3 als auch Polypropylenbrände in Wannen durchgeführt. Da beide Arbeiten sich an Feuerlöschnormen orientierten, nutzten sie so das allgemein bekannte Ratingsystem. Dies bedeutet, dass die Größe der eingesetzten Krippe, die gelöscht werden konnte, eine Aussage über die Energiefreisetzungsrate beim Beginn des Löschvorgangs gestattet.³

Die Übernahme des Ratingsystems der DIN EN 3 führt im Wesentlichen zur Einschätzung des Einsatzwertes für die Oberflächenlöschung. Dieses Einsatzszenario tritt z. B. bei Freibränden auf (s. o.).

Muss das Volumenlöschen und/oder das Oberflächenlöschen eingeschätzt werden, ist ein Ratingverfahren, bei dem die Größenordnung des Energieabsorptionsvermögens durch die Brandlast approximiert wird, nicht ausreichend.

Eine einfache Möglichkeit die Energieabsorptionsgeschwindigkeit zu bewerten hat **[Wighus 91]** beschrieben. Es kann das so genannte Spray Wärme Absorptionsverhältnis (Spray Heat Absorption Ratio) gebildet werden:

$$SHAR = \frac{Q_W}{Q} \quad (2.1)$$

mit der vom Löschmittel Wasser aufgenommenen Energie Q_W und der Gesamtwärmefreisetzung Q .

Eine andere Möglichkeit zur Bewertung kann unter Nutzung der Energiefreisetzungsrate (Heat Release Rate) HRR und der Änderung der Enthalpie des Wassers \dot{H}_W wie folgt geschrieben werden:

$$SHAR1 = \frac{\dot{H}_W}{HRR} \quad (2.2).$$

³ Der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrate während des Löschprozesses ist ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung des Löschprozesses. Messtechnisch ist dies z. B. über die Sauerstoffverbrauchsmethode ermittelbar. Um einen Löschprozess im Realmaßstab zu beurteilen, ist ein s. g. Raumkalorimeter einsetzbar. Zurzeit ist es möglich, ein Kalorimeter in Anlehnung an den ISO 9705 Room Corner Test zu nutzen. Es wird eine Sauerstoffverbrauchsmethode von Dlugogorski genutzt, die eine Berücksichtigung des durch den Löschprozess erzeugten Wasserdampfes gestattet.

Messtechnisch ist es deshalb wichtig, möglichst beide Größen, HRR und \dot{H}_W zu messen.

Voraussetzung ist, dass eine entsprechende Apparatur dafür vorhanden ist.

Die Energiefreisetzungsrate (HRR) kann z. B. über die Sauerstoffverbrauchsmethode erfasst werden. Für die Bestimmung der HRR werden die Brandgase über eine Esse in eine Messstrecke geleitet, in der Gesamtmassenstrom der Brandgase sowie die Zusammensetzung der Brandgase gemessen werden. Schwieriger ist es, die einzelnen Anteile von \dot{H}_W zu ermitteln.

Es war deshalb sinnvoll auf den Löschtest nach ISO 9075, der in **[Kutz and Kohl 12]** beschrieben ist, zurückzugreifen. Prinzipiell besteht hier die Möglichkeit die HRR, den Massenstrom des Löschmittels, die Massenabbrandrate des Brandstoffes, die Beeinflussung der Temperatur der Gasschicht etc. zu messen. In den folgenden Kapiteln wird dies weiter erläutert.

3 Entwicklung von Testszenarien

Die prinzipiellen Einsatzgebiete der mobilen Hochdrucklöschsysteme sind, wie oben schon erwähnt, der Raumbrand bzw. der Freibrand. Für beide Brandbekämpfungsszenarien wird die Vorgehensweise beschrieben. Die zur Beurteilung der Hochdrucklöschverfahren durchgeführten Sprühbilduntersuchungen sind im Anhang zu finden.

3.1 Raumbrandversuche im Container

Mit dem Brandcontainer, dargestellt in Bild 3.1, liegt eine Versuchsapparatur vor, die die Ermittlung der HRR, die Messung von Temperaturen und der Abbrandrate für Holzrippenbrände im Raum ermöglicht. Dieser Brandraum hat die gleichen Abmessungen wie der für den Room Corner Test nach ISO 9705 vorgegebene Brandraum.

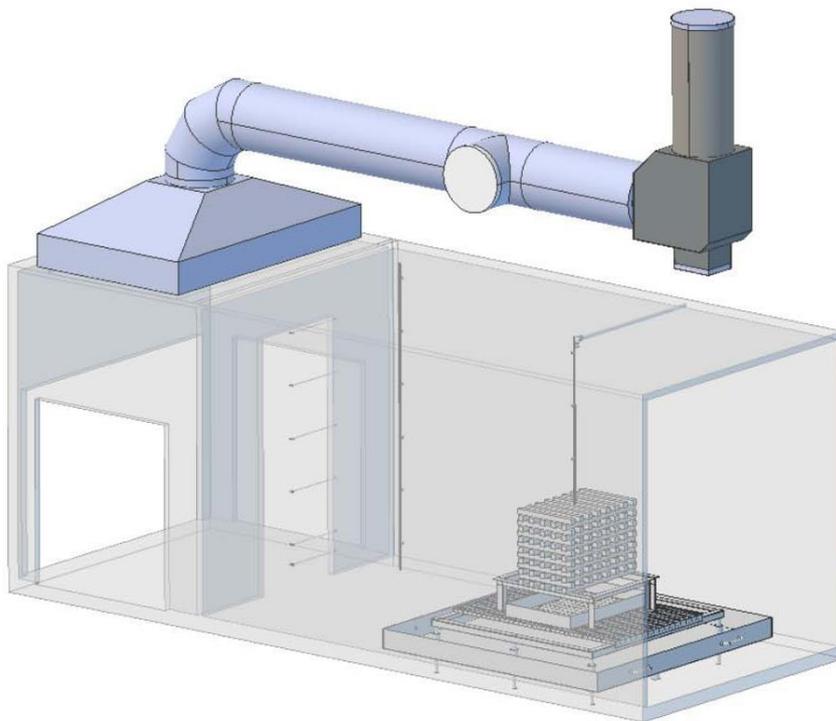


Bild 3.1: Brandcontainer [IMK 186]

Der Container ist mit einer festen Anordnung von Thermoelementen und bidirektionalen Sonden ausgestattet, die eine Aufzeichnung der entsprechenden Messgrößen während des Brand- und Löschprozesses ermöglichen. Eine weitere Beschreibung ist in [IMK 186] zu finden. Die Brandversuche wurden mit Normholzrippen 8A durchgeführt, bei denen nach einer Vorbrennzeit von 8 Minuten mit der Löschung von der Seite unter Verwendung von Hochdrucktechnik begonnen wurde. Die Hochdruck-Sprühdüse wurde außerhalb der Brennkammer und im Abstand von 2,3 m von der Holzrippe und einer Höhe von 0,7 m fest positioniert. Die Beaufschlagung mit Wasser erfolgte von der Seite mit Ausrichtung der Löschdüse mittig auf die Stirnseite der Holzrippe. Das Löschwasser wurde über eine Dauer von 5 Minuten mit einem Volumenstrom von 30 l/min aufgebracht. Es wurden Temperaturen, Gasgeschwindigkeiten, Abgaskonzentrationen und Restmassen aufgezeichnet. Die Gaskonzentrationen und Abgasgeschwindigkeiten, gemessen im Abgasstutzen, werden zur rechnerischen Ermittlung der HRR benötigt. Für die Ermittlung der Größen sowie die

Messstellenanordnung innerhalb des Brandcontainers sei auf [IMK 186] verwiesen. Bild 3.2 zeigt die Positionierung der Messstellen im Container.

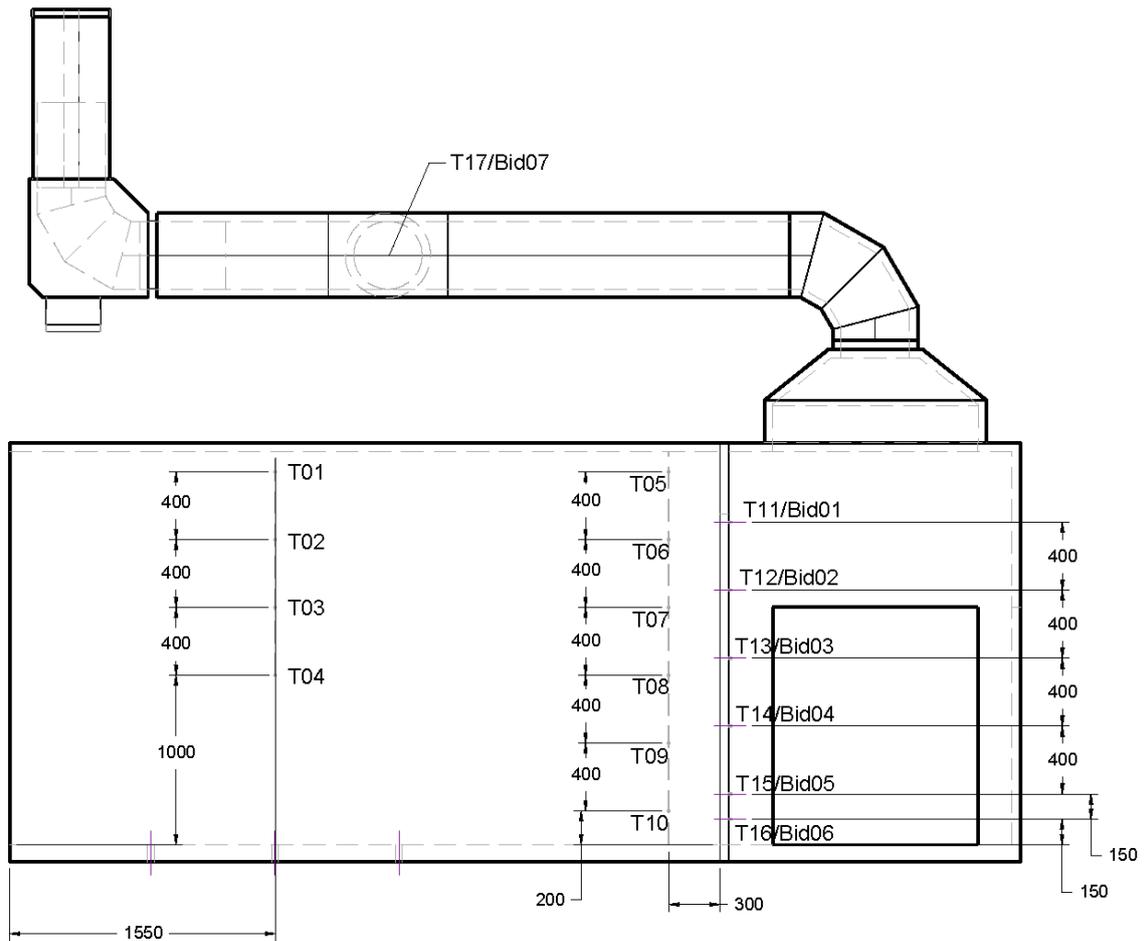


Bild 3.2: Anordnung der Thermoelemente und bidirektionalen Sonden im Brandcontainer

In den nachfolgenden Bildern sind Momentaufnahmen eines der Testversuche dargestellt, die den Brand- und Löschverlauf veranschaulichen.



Bild 3.3: Versuchsaufbau: Holzkrippe 8A und Hochdruck-Löschdüse vor Versuchsbeginn (links), Holzkrippe in der Vollbrandphase (rechts)



Bild 3.4: Blick in den Brandraum während der Löschphase: zu Beginn der Löschwasserzufuhr (links), nach ca. 1 Minute Löschdauer (rechts)



Bild 3.5: Blick in den Brandraum nach Beenden der Wasserzufuhr

Mit Beginn der Löschwasserzufuhr findet eine intensive Wechselwirkung des Brandes mit dem Sprühstrahl statt, die dazu führt dass der Flammenbrand innerhalb der ersten ca. 20s unterdrückt wird und die Rauchproduktion intensiviert wird (vgl. Bild 3.4). Die Rauchgase können nicht mehr vollständig im Abgasraum aufgenommen und der Rauchableitungsstrecke zugeführt werden. Ein erheblicher Anteil der Rauchgase tritt in die Umgebung aus, so dass bei den anhand der gemessenen Rauchgasmassenströme und -konzentrationen ermittelten Wärmefreisetzungsraten nicht quantifizierbare Abweichungen zu erwarten sind.

Die Unterdrückung des Flammenbrandes gelingt nur in der Anfangsphase der Löschwasserbeeinflussung und nur auf der dem Sprühstrahl zugewandten Seite der Holzkrippe. In den Testversuchen wurde keine vollständige Brandlöschung erzielt. Ähnlich wie bei der DIN EN 3 wurde zunächst das Verlöschen aller Flammen als Kriterium für einen gelöschten Brandes gefordert. Der Blick in den Brandraum (Bild 3.5) zeigt noch sichtbare Flammen in der Krippe nach Beendigung der Löschwasserzufuhr, woraus die Beurteilung der nicht erfolgreichen Brandlöschung folgt.

Wie sich das Brandverhalten und die Löschwirkung in den gemessenen physikalischen Größen widerspiegeln, wird nachfolgend zunächst für die Temperatur gezeigt. In Bild 3.6 ist der Verlauf der Raumtemperatur in ca. 2 m Entfernung von der Krippe (Ecke des Brandraumes) abgebildet und in Bild 3.7 die Gastemperaturen über der Holzkrippe als Funktion der Branddauer.

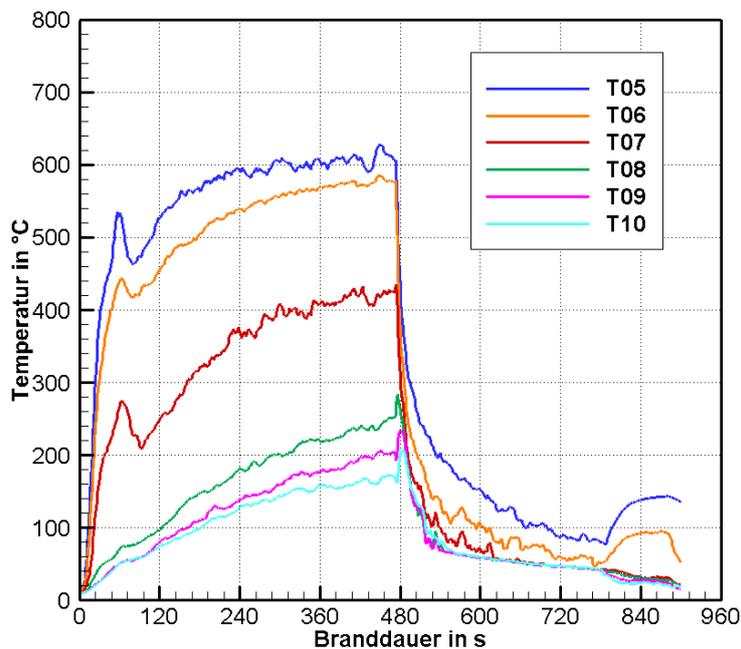


Bild 3.6: Raumtemperaturen in der Ecke der Brennkammer (T05-T10)

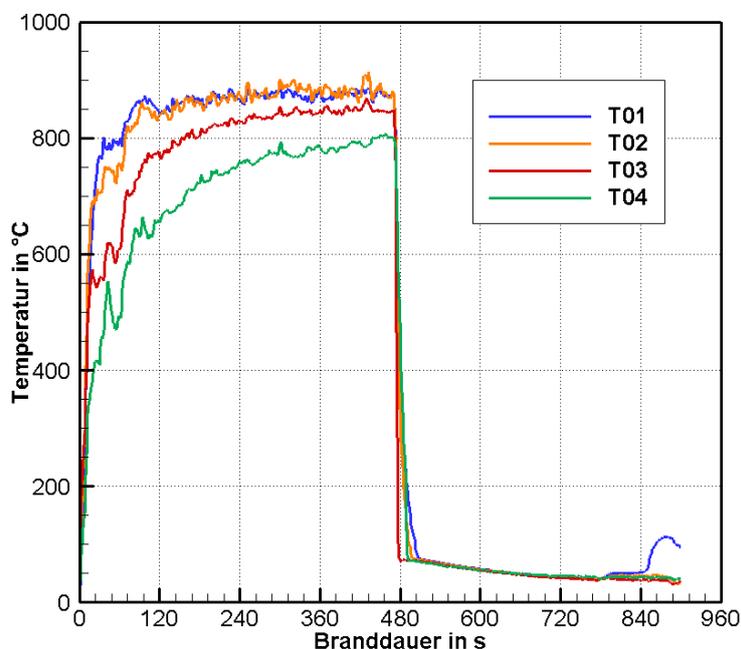


Bild 3.7: Temperaturen über der Holzkrippe (T01-T04)

Der Verlauf der Raumtemperaturen spiegelt eine Brandunterdrückung während der Löschwasseraufbringung wider. Ob der Brand gelöscht wurde, geht daraus nicht eindeutig hervor. Die an einigen Messstellen wieder ansteigende Temperatur nach Beenden der Löschwasserzufuhr spricht dagegen.

Weitere Temperaturmessstellen wurden innerhalb der Normholzkrippe angebracht. Die Lage dieser Messstellen in der Holzkippe ist in Bild 3.8 verdeutlicht.

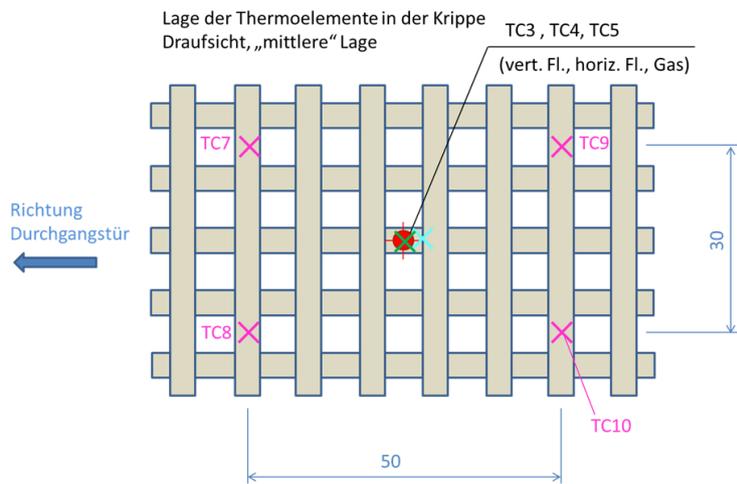


Bild 3.8: Anordnung der Thermoelemente in der mittleren Lage der Holzkippe (Draufsicht)

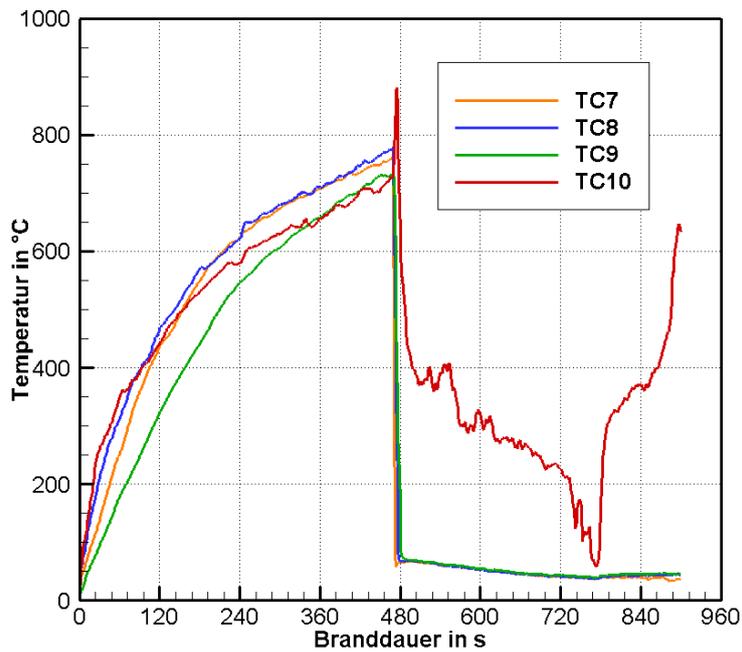


Bild 3.9: Temperaturen in der Holzkippe (TC7-TC10)

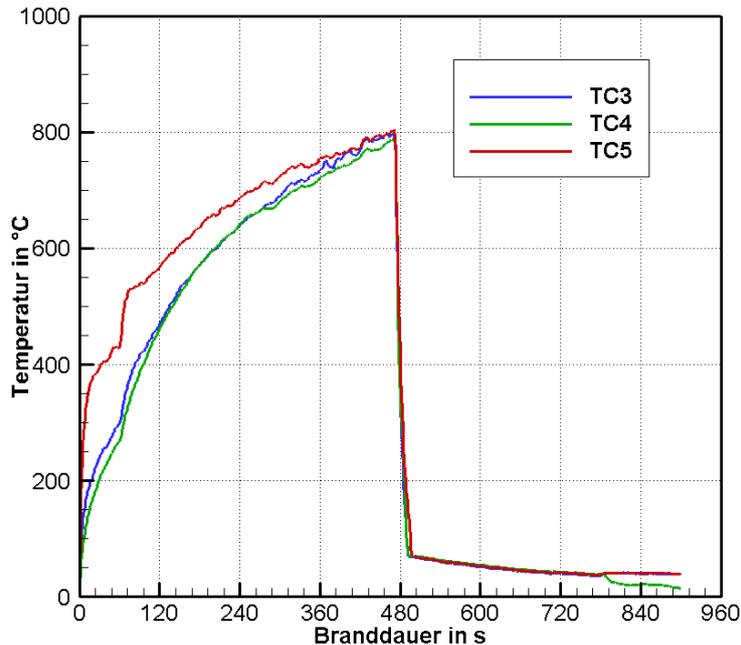


Bild 3.10: Temperaturen in der Mitte der Holzkrippe (TC3, TC4, TC5)

Auch die Temperaturen in der Holzkrippe in Bild 3.9 zeigen mit Ausnahme der Messstelle TC10 einen schlagartigen Rückgang mit Löschbeginn, der auch nach Beenden der Wasserzufuhr anhält. Zumindest an den Messorten kann auf die lokale Brandlöschung geschlossen werden. Der Verlauf der Temperatur an Messstelle TC10 verdeutlicht dagegen das Wiederaufflammen nach Beendigung der Löschwasserzufuhr.

Auch die Gastemperaturen (TC5) und die Oberflächentemperaturen (TC3, TC4) des Brandmaterials in der Mitte der Krippe zeigen den sofortigen Temperaturrückgang mit Löschbeginn. Damit wird zumindest für den Ort der Messung die Löschung des Brandes angezeigt. Auf die Löschung der gesamten Holzkrippe kann daraus nicht geschlossen werden.

Anhand der in den Testversuchen gemessenen Temperaturen erscheint es durchaus möglich, bei geeigneter Anordnung und Verwendung einer ausreichenden Anzahl von Temperaturmessstellen eine Beurteilung des Löscherfolges vorzunehmen. Aufgrund des sehr hohen messtechnischen Aufwandes wurde diese Möglichkeit nicht weiter getestet. Die vorhandene Anordnung der Temperaturmessstellen (mittig in der Krippe) ist nicht ausreichend.

Die geeignetere physikalische Größe zur Beurteilung der Löschwirksamkeit ist die Energiefreisetzungsrate (HRR). In Bild 3.11 sind die in den beiden Testversuchen ermittelten Energiefreisetzungsraten dargestellt.

Die rote Kurve in Bild 3.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der HRR im Testversuch 1, für den auch die Verläufe der Temperaturen im Raum und in der Holzkrippe und die Fotos zum Brandverlauf dargestellt wurden. Die HRR sinkt 2 Minuten nach Beginn der Löschwasserbeaufschlagung auf den Wert von ca. 50 kW ab. Dieser Wert bleibt auch nach Beendigung der Wasserzufuhr erhalten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Brand nicht gelöscht wurde und mit einer sehr kleinen HRR weiter brennt. Im Video ist dies als lokale Flamme sichtbar. Es wird deutlich, dass die visuelle Beobachtung die Beurteilung des Löschergebnisses sinnvoll ergänzen kann, d. h. einfließen sollte.

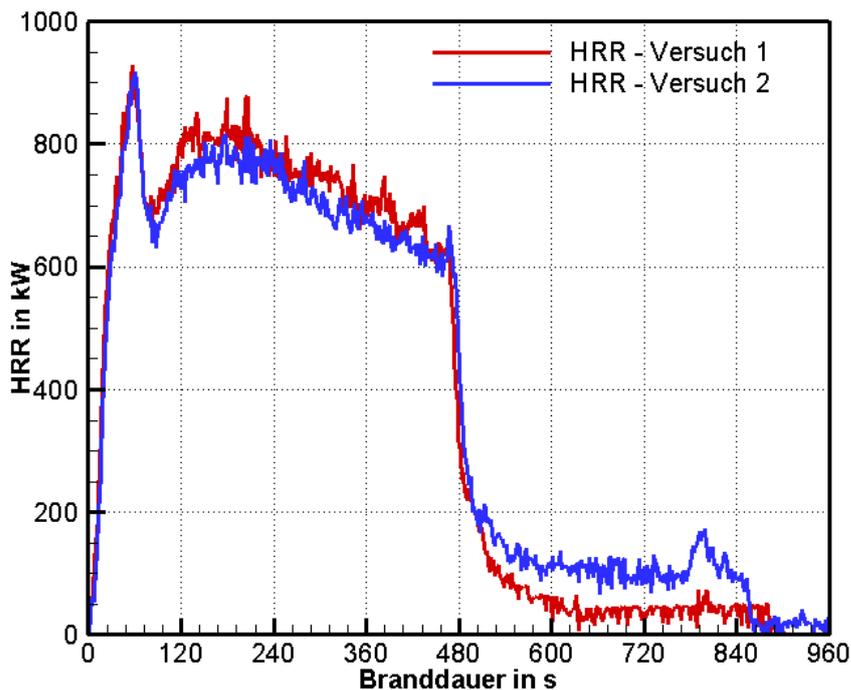


Bild 3.11: Wärmefreisetzungsrate (HRR) in den Testversuchen

Die zum Vergleich im Diagramm enthaltene blaue Kurve stellt die ermittelte HRR für einen zweiten Testversuch dar, in dem die Löschdüse nicht zentral, sondern einseitig auf die Holzkrippe gerichtet war. In der Folge wurde eine geringere Fläche mit Wasser beaufschlagt und die Brandlöschung erfolgte in einem kleineren Bereich der Holzkrippe. Mit Wegnahme der Wasserbeaufschlagung steigt die HRR wieder an, was das Aufflammen nicht gelöschter Bereiche widerspiegelt. Das Absinken der HRR auf null nach ca. 860 s ist auf das manuelle Ablöschen des Restbrandes zurückzuführen.

Beide Testversuche zeigten, dass die Löschung des Holzrippenbrandes nur auf der der Holzkrippe zugewandten Seite erfolgte, die Rückseite des Stapels jedoch weiter brannte. Bei der Aufbringung des Wassers von nur einer Seite wird nicht die gesamte Krippe erreicht. Bei der gewählten Anordnung der Krippe zur Löschdüse, müsste das Löschwasser über die Länge von 80 cm eindringen, um die Rückseite zu erreichen. Dies wurde offensichtlich nicht erreicht.

Als Fazit aus den Testversuchen ist zu ziehen:

1. Es wird eine Versuchsanordnung benötigt, bei der Löschwasser nicht nur von einer Seite der Krippe aufgebracht werden kann.
2. Als physikalische Größe zur Beurteilung der Löschwirkung kann die Temperatur verwendet werden, wenn ein geeignetes Messstellennetz gewählt und ergänzend visuelle Informationen (visuelle Kamera, IR-Kamera) genutzt werden.
3. Die HRR ist besser geeignet zur Feststellung des Löscherfolges als die Temperatur.
4. Die Beurteilung der Löschwirksamkeit anhand der HRR über die Sauerstoffverbrauchsmethode erfordert die Analyse der Brandgaskonzentrationen und -massenströme. Zurzeit ist das nur im ISO-Brandcontainer möglich und nur für Brände bis ca. 1 MW.

Der Brandcontainer als Versuchsraum für die Testung und Bewertung der Hochdrucklöschtechnik an Holzkrippen-Brandobjekten wurde deshalb verworfen. Ausschlaggebend waren dabei die geringe Größe der Brennkammer mit nur begrenzt realisierbarer Brandleistung und die fehlende Möglichkeit, das Wasser von allen Seiten aufzubringen.

3.2 Testversuche im Brandraum 3

Für weitere Tests wurde der Brandraum 3 der Brandhauses auf dem AÜG des IBK genutzt. Dieser weist mit einer Grundfläche von 9,3 m x 5,4 m und einer Höhe von ca. 5,5 m ausreichend Raum für den Aufbau einer Versuchsanordnung für größere Brandobjekte (Normholzstapel) sowie die notwendige Bewegungsfreiheit zum Einsatz der Hochdrucklöschtechnik auf. Um das Brandobjekt von allen Seiten mit Wasser beaufschlagen zu können, wurde eine automatische Drehvorrichtung benutzt, die auch als Automatic Fire Fighter (AFF) bezeichnet wird. Es ist eine modifizierte Ausführung der in einer ehemaligen Schwedischen Norm [SS 1192] zur Prüfung von Feuerlöschern verwendeten Apparatur. Diese Norm ist inzwischen zurückgezogen. Die Apparatur ist mit einem Drehteller von ca. 1 m Durchmesser ausgestattet. Das auf dem Drehteller gelagerte Brandobjekt bzw. der Versuchsaufbau führen damit selbsttätig Drehbewegungen aus, so dass bei fest eingespannter Löschdüse die gleiche Wasserbeaufschlagung realisiert werden kann. In Bild 3.12 ist ein Foto des Versuchsaufbaus im Brandraum 3 zu sehen.

Es wurden einige Testversuche durchgeführt, um Messanordnungen, Messtechnik sowie Versuchsszenarien zu erproben (vgl. Tabelle 3.1). Wie bereits im Brandcontainer wurden Normholzstapel 8A verwendet und nach 8 Minuten Vorbrennzeit mit Wasser aus einer Hochdrucklöschdüse mit dem Volumenstrom von 30 l/min beaufschlagt.

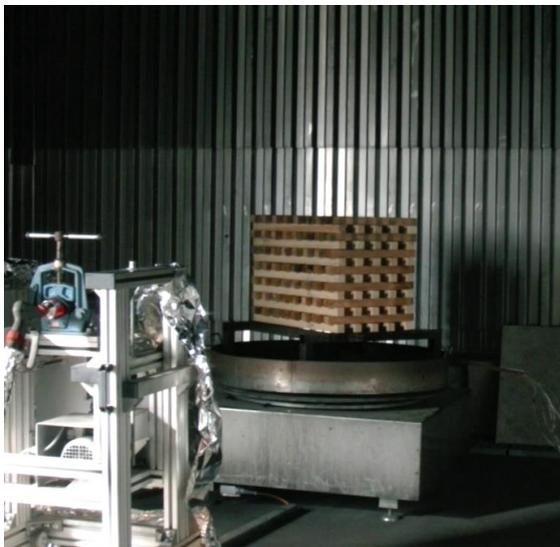


Bild 3.12: Versuchsaufbau eines Testversuchs in Brandraum 3

Vorn links ist die fest eingespannte Löschdüse zu sehen, die auf die Mitte der Holzrippe ausgerichtet ist. In diesem Versuch führt der Drehteller eine Drehbewegung um jeweils 45° nach links und rechts aus. Die Aufnahme zeigt den Drehteller in einer maximalen Stellung (um 45°gedreht). Auf dem Drehteller befindet sich eine runde Stahlwanne, in der Holzrippe, Gestell und Zündwanne angeordnet sind. Die runde Stahlwanne dient dem Schutz der Mechanik des Drehtellers vor Hitze und Nässe und nimmt einen Teil des nicht verdampfenden Löschwassers auf.

In den Testversuchen wurden unterschiedliche Szenarien für die Versuchsdurchführung sowie die Anordnung aussagekräftiger Messgrößen untersucht und erprobt. Änderungen der Versuchsparameter beinhalteten die Variation des Löschregimes und der Größe des Brandobjektes und damit der Brandleistung. Bei der Variation des Löschregimes wurde einerseits die kontinuierliche Löschwasserzufuhr über 5 Minuten und kürzere Löschdauer realisiert und andererseits das Intervalllöschen mit 5 aufeinanderfolgenden Löschintervallen von 1 Minute Dauer und 30 s Pause. Bei der Bewegung des Drehtellers wurden die ruhende, die um 90 Grad drehende und die um 360° drehende untersucht. Es wurden Änderungen der Messanordnung bei den Temperaturmessstellen in der Krippe vorgenommen und mit der Wärmestrahlung eine weitere physikalische Größe zur Beurteilung der Löschwirkung einbezogen. Weiterhin wurden die Versuche mit visueller und IR-Kamera aufgezeichnet.

Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht dieser unterschiedlichen Testversuche, anhand derer die endgültige Versuchsanordnung und -durchführung für die Brand- und Löschttests festgelegt wurde.

Tabelle 3.1: Testversuche im Brandraum 3

Versuch	Brandraum/ Brandobjekt	Messgrößen	Löschdauer, Volumenstrom	Bemerkungen
3	BR3, Krippe 8A, Drehteller 90°	Temperatur (Krippe), Spiegeln das Zeitverhalten des Verlöschens nicht wider	Dauer 5 min, 30 l/min	Testversuch, Krippe nach 5 min „fast“ vollständig gelöscht (visueller Eindruck)
4	BR3, Krippe 8A, Drehteller 90°	Temperatur (10 Mst. in Krippe + 4 Mst. darüber)	Intervalllöschen (5mal 1 min Löschen, 30 s Pause), 30 l/min	Nicht gelöscht!
6	BR3, Krippe 2 x 8A, Drehteller 90°	Temperatur (10 Mst. in Krippe + 4 Mst. darüber) Wärmestromdichte (1 Radiometer)	Intervalllöschen (5mal 1min Löschen, 30 s Pause), 30 l/min,	Nicht gelöscht!
7	BR3, Krippe 2 x 8A, Drehteller 360° Winkel	Temperatur (2 Mst. in Krippe + 4 Mst. darüber) Wärmestromdichte (2 Radiometer)	Dauer 5 min, 30 l/min	Krippe gelöscht!
10	BR3, Krippe 8A, ruhend	Temperatur (8 Mst. in Krippe + 4 Mst. darüber) Wärmestromdichte (2 Radiometer)	Dauer 5 min, 30 l/min	Nicht gelöscht!

Zur Beurteilung des Löscherfolges wurde ähnlich zur DIN EN 3 verfahren, indem der Brand als gelöscht bewertet wird, wenn nach Beendigung der Löschwasserzufuhr keine Flammen mehr sichtbar sind. In den aufeinanderfolgenden Versuchen wurde die Messgrößenwahl verändert, d. h. ungeeignete Anordnungen wurden verworfen bzw. neue Messgrößen erfasst. Die Anordnung von 8 bzw. 10 Temperaturmessstellen in der Holzkrippe erwies sich nur für die Versuche mit ruhender Krippe sinnvoll. Die Installation der Messstellen im Inneren

des Holzstapels ist bei drehender Krippe sehr aufwendig, nicht ausfallsicher und liefert keine eindeutigen Aussagen zum Löscherfolg.

Als geeignete physikalische Größe zur Beurteilung des Löscherfolges erwies sich die Wärmestromdichte, die in 2 m Entfernung von der Oberfläche des Brandobjektes gemessen wurde.

In Bild 3.13 ist die Anordnung der Sensoren (Radiometer) in einer Draufsicht skizziert. Die Messorte befinden sich außerhalb des Bereiches der ausgeprägten Konvektionsströmung infolge des Brandprozesses und der Rauchgasabsaugung. Die vom Sensor erfasste Wärmestromdichte ist, da neben der Wärmeübertragung durch Konvektion auch die Wärmeleitung vernachlässigt werden kann, auf die vom Brandobjekt emittierte Strahlung zurückzuführen. Infolge der starken Auftriebsströmung werden die Rauchgase nach oben abgeführt und die erfasste Strahlung bleibt relativ unbeeinflusst von der Entwicklung und Zusammensetzung der Brandgase und der damit verbundenen Absorption. Lediglich zu Beginn der Löschwasseraufbringung sind starke Verwirbelungen der Strömung zu beobachten, die kurzzeitig Rauchgase in die Messstrecke transportieren können, bevor sich erneut die Auftriebsströmung etabliert.

Die so gemessene Wärmestrahlungsstromdichte ist genau dann eine geeignete Bewertungsgröße ähnlich der HRR, wenn das Verhältnis der Wärmefreisetzung durch Strahlung zur Gesamtwärmefreisetzung (HRR) über die Branddauer konstant bleibt. Dies sei nachfolgend vorausgesetzt. Damit kann die Wärmestrahlungsstromdichte das Verlöschen des Brandes widerspiegeln.

Der Verlauf der Temperaturen über und in der Krippe ist kein sicherer Indikator eines Löscherfolges.

Um das zu verdeutlichen sind als Beispiel die Messgrößen eines gelöschten (Versuch 7) und eines ungelöschten Versuchs (Versuch 10) dargestellt.

In Versuch 7 besteht das Brandobjekt aus 2 nebeneinander aufgestapelten Krippen 8A. Die Löschung wird bei vollständiger Drehung des Brandobjektes um 360° vorgenommen. In der Mitte der Holzkrippe ist nur 1 Temperaturmessstelle (TC2) an der Oberfläche eines Holzstabes installiert (vgl. Bild 3.13), eine weitere oben auf der Krippe (TC1). Bild 3.14 zeigt eine Seitenansicht des Versuchsaufbaus mit den Temperaturmessstellen über und in der Holzkrippe.

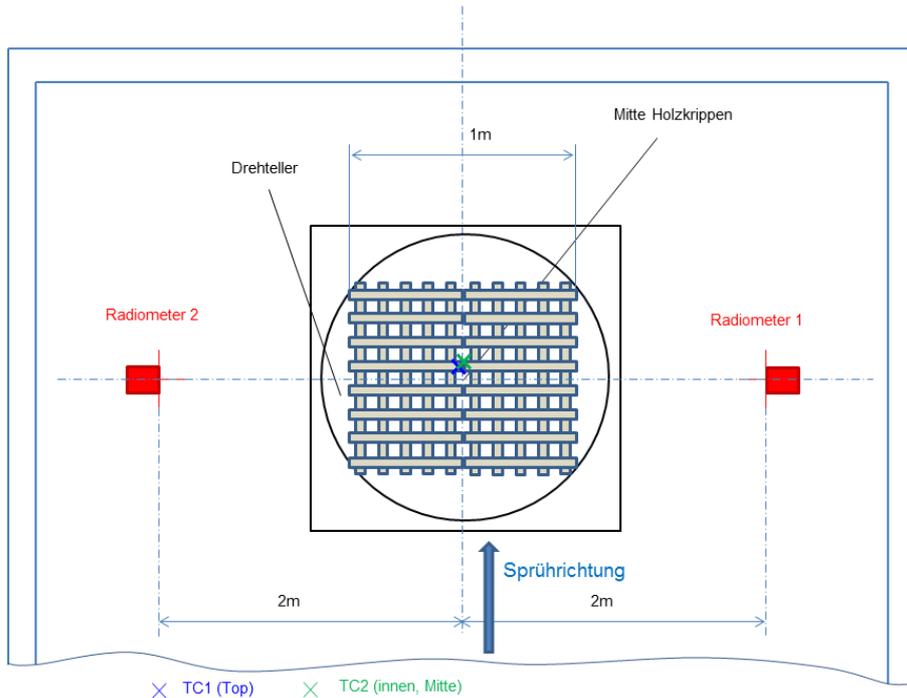


Bild 3.13: Draufsicht der Versuchsanordnung für Versuch 7 mit Krippe 2 x 8A

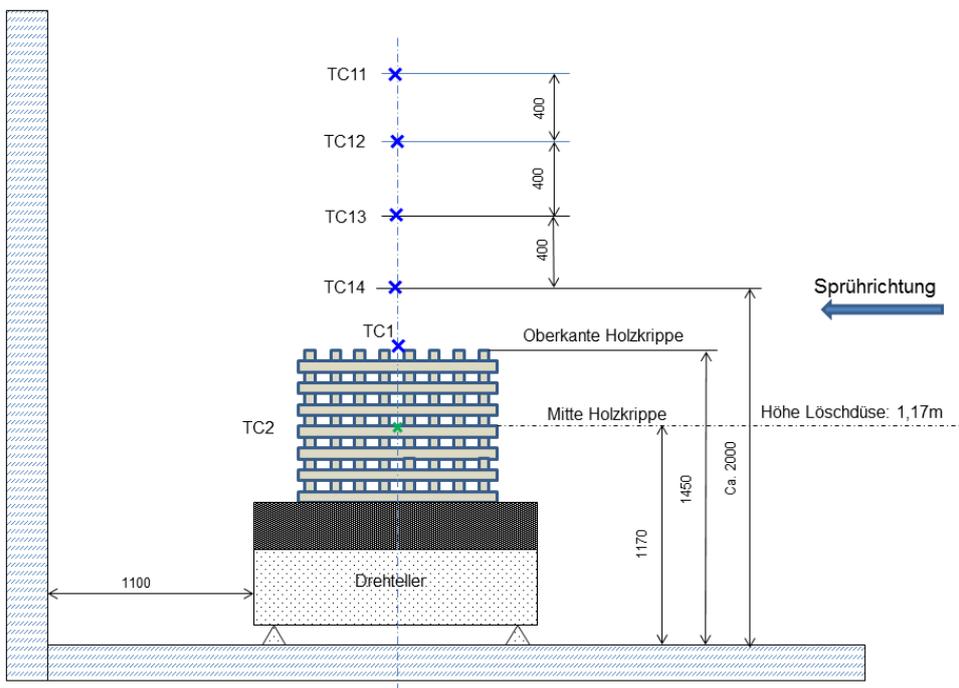


Bild 3.14: Seitenansicht der Versuchsanordnung für Versuch 7 mit Krippe 2 x 8A

Der Temperaturverlauf an den Messstellen in der Krippe ist in Bild 3.15 dargestellt und zeigt mit Löschbeginn einen Temperaturrückgang auf ca. 50°C innerhalb von 2 Minuten. Diese Temperatur bleibt auch nach Beendigung der Löschwasserzufuhr erhalten. Dies ist aber nur ein Indiz für die Löschung an den jeweiligen Punkten. Die Gastemperaturen über der Krippe, dargestellt in Bild 3.16 sinken nach Beginn der Löschmaßnahme sehr schnell unter 200°C ab und dann weiter kontinuierlich auf Raumtemperatur. Auch nach Beendigung der

Löschwasserbeaufschlagung ist kein Temperaturanstieg über dem Brandobjekt zu verzeichnen, so dass aus dem fehlenden Energieeintrag auf die Löschung des Brandes geschlossen werden kann.

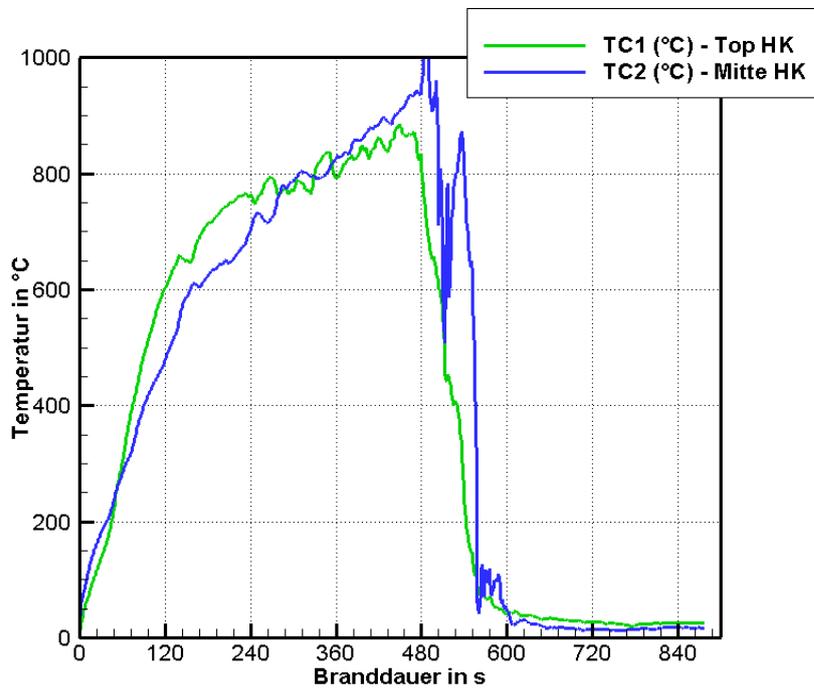


Bild 3.15: Temperaturen in der Krippe (Messstellen TC1, TC2) für Versuch 7

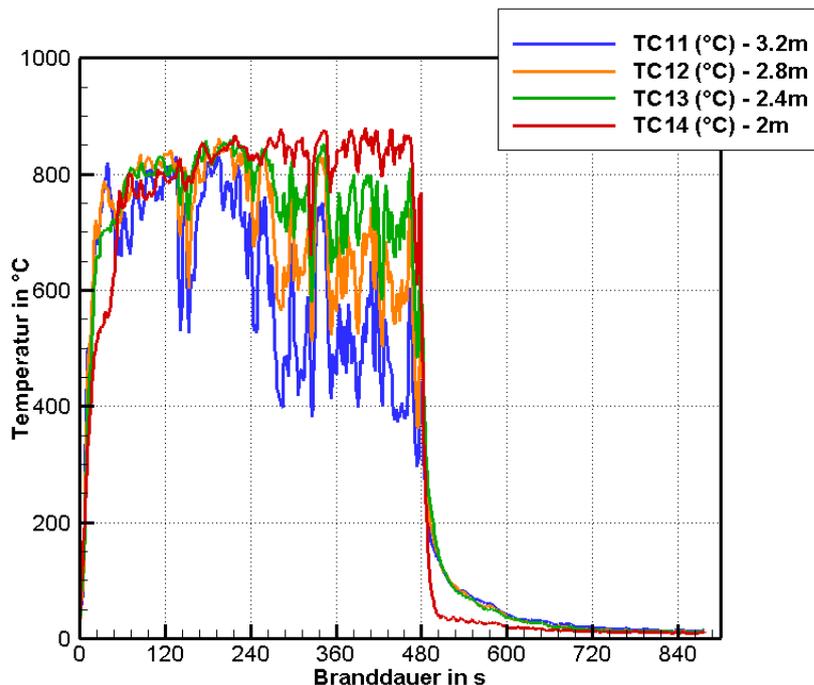


Bild 3.16: Gastemperaturen über der Krippe (Messstellen TC11 bis TC14) für Versuch 7

Der Verlauf der Wärmestromdichte in Bild 3.17 zeigt mit Beginn der Löschwasseraufbringung einen rapiden Abfall des Wärmestromes und ist nach der Löschdauer von 5 Minuten auf den Wert null gesunken, was einer Löschung des Brandes gleich kommt.

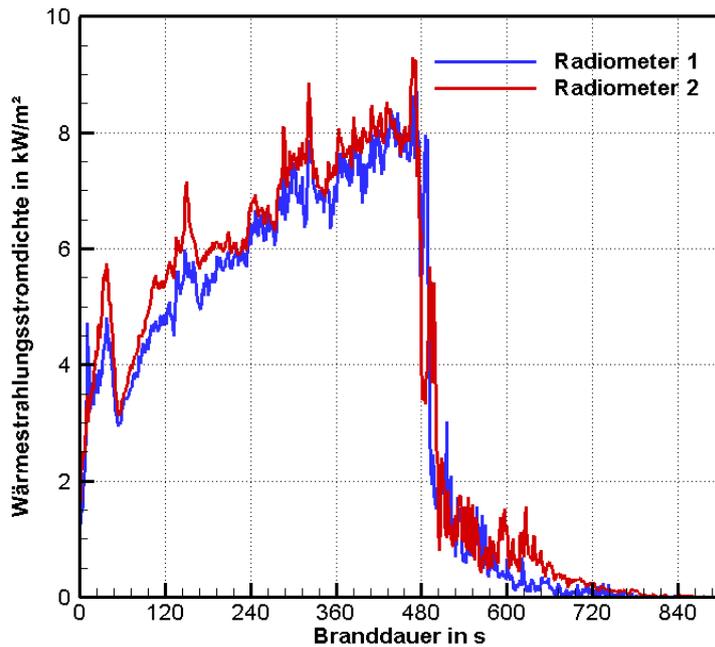


Bild 3.17: Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 7

Im Versuch 7 könnte die Beurteilung des Löscherfolges ohne visuelle Informationen objektiv anhand der Temperaturen über der Krippe sowie der Wärmestrahlung in der Entfernung von 2 Metern vorgenommen werden.

Den Verlauf der Wärmestromdichten und Temperaturen für einen nicht gelöschten Versuch zeigen die Messwerte im Versuch 10, in dem eine ruhende Normholzkrippe 8A mit Löschwasser beaufschlagt wurde.

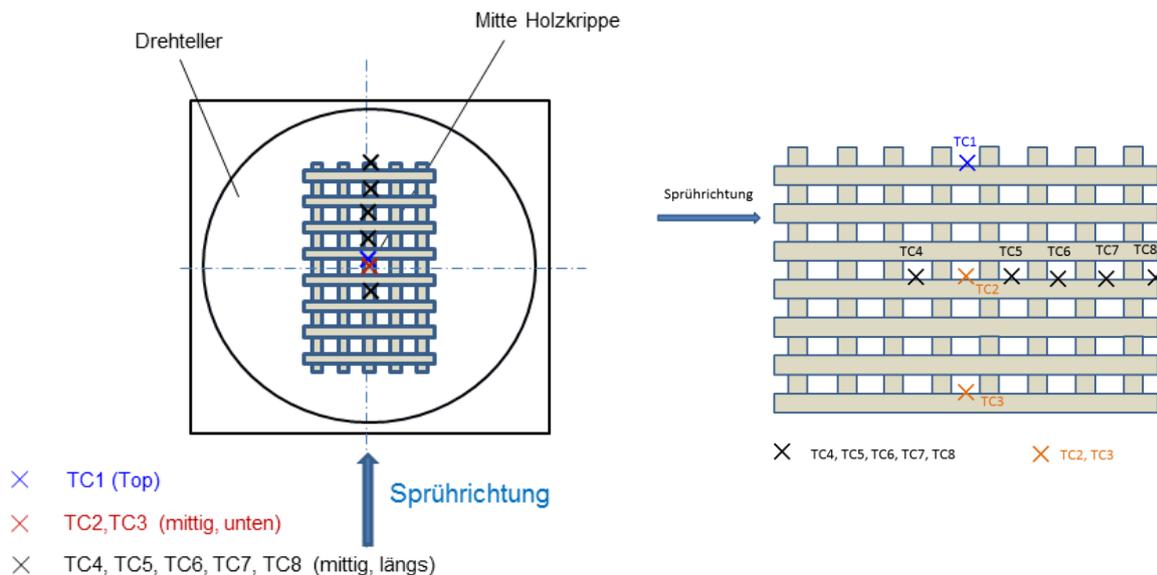


Bild 3.18: Anordnung der Krippe 8A (links) und der Temperaturmessstellen in der Krippe in Versuch 10, Messstellen in der Mitte der Holzkippe (rechts)

In Bild 3.18 sind die Anordnung der Krippe in Bezug zur Löschdüse sowie die Anordnung der Thermoelemente in der Krippe für den Versuch 10 abgebildet. In der ruhenden Krippe wurden insgesamt 8 Messstellen angeordnet, um Informationen zum Fortschritt des

Löschvorganges und zur Eindringtiefe des Sprühstrahls zu gewinnen. Die Anordnung der Temperaturmessstellen über der Krippe sowie der Radiometer wurden wie in Versuch 7 beibehalten(vgl. Bild 3.13 und 3.14).

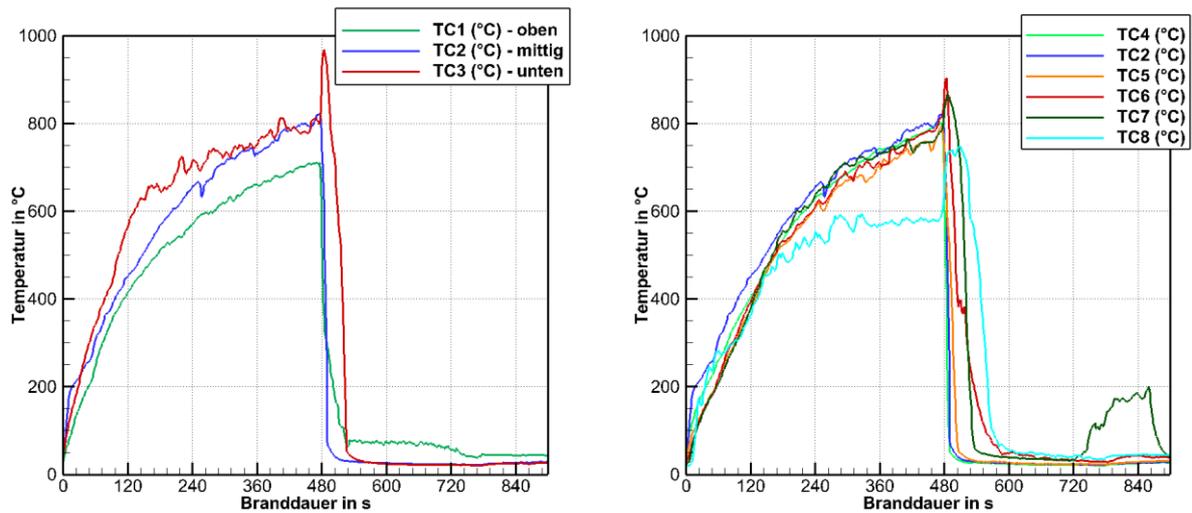


Bild 3.19: Temperaturen in der Krippe in Versuch 10

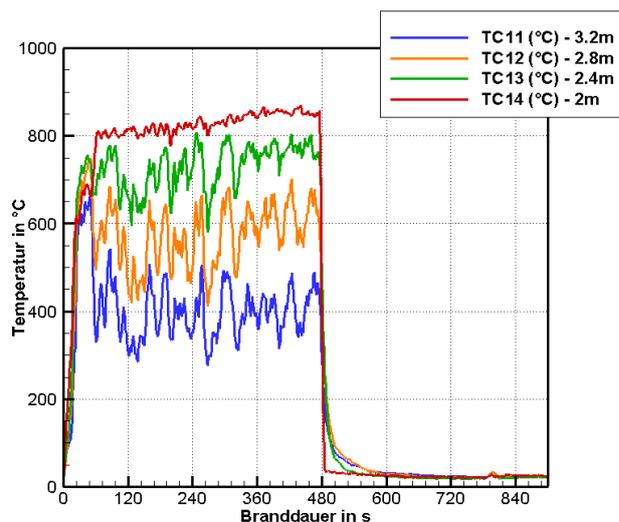


Bild 3.20: Temperaturen über der Krippe in Versuch 10

Dass der Brand im Versuch 10 nicht gelöscht wurde, lässt sich aus den Temperaturen nur anhand einer Messstelle in der Krippe (TC7) erkennen. Nach Beenden der Löschwasseraufbringung steigt der Messwert TC7 wieder an. Alle anderen Temperaturen spiegeln nicht wider, dass der Brand nicht gelöscht wurde. Ein Schnappschuss des Videos eine Minute nach Beendigung der Löschwasserzufuhr in Bild 3.21 zeigt die noch lokal brennende Holzkrippe.



Bild 3.21: Videoaufnahme 1 Minute nach Beendigung der Löschwasserbeaufschlagung von Versuch 10

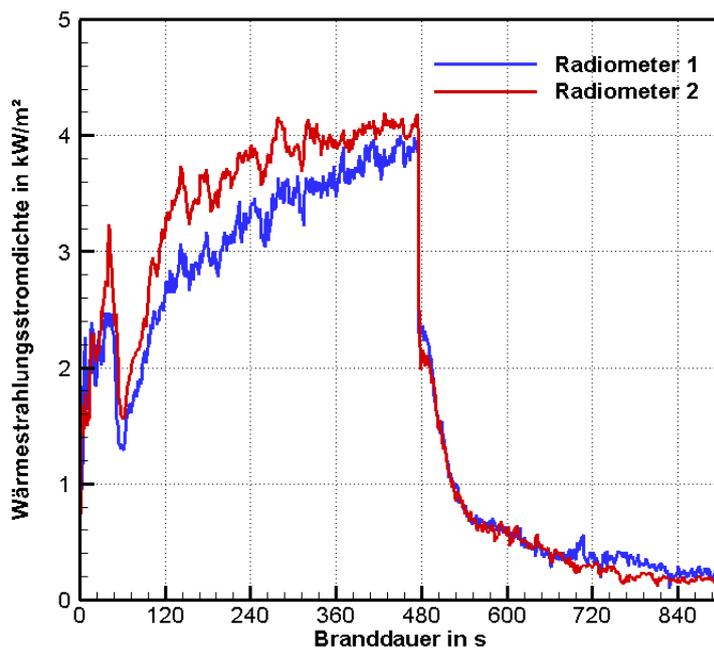


Bild 3.22: Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 10

Der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte in Bild 3.22 spiegelt eindeutig wider, dass der Brand nicht vollständig erloschen ist.

Gegenüber der Temperaturmessung, die bei wenigen Messstellen keine sichere Beurteilung erlaubt und bei vielen Messstellen einen sehr hohen Aufwand für eine aussagekräftige Messanordnung erfordert, stellt die Messung der Wärmestrahlungsstromdichte eine geeignetere Methode dar.

4 Versuchsaufbau

Basierend auf den Erkenntnissen der Testversuche wurden der Versuchsaufbau und die Messanordnung für weitere Praxistests zur Beurteilung der Löschwirkung verschiedener Hochdrucklöschdüsen festgelegt. Dazu wurde der Versuchsaufbau unter Nutzung des AFF im Brandraum 3 errichtet. Im Anhang ist die Geometrie dieses Brandraumes beschrieben.

4.1 Messanordnung und Messgrößen

Messgrößen, die den Brandverlauf beschreiben, sind die Temperatur, die HRR, die Wärmestrahlungsstromdichte und die Abbrandrate.

Die Abbrandrate wurde in der Vorbrennzeit über den Massenverlust des Brandstoffes ermittelt. Eine Ermittlung der Abbrandrate während der Drehung des AFF war gerätetechnisch nicht realisierbar, so dass keine Daten zum Verlauf der Abbrandrate während des Löschprozesses zur Verfügung stehen, die zur Bewertung der Löschwirkung geeignet sind.

Als Alternative zur Ermittlung der HRR, die im Brandraum 3 nicht gemessen werden kann, wird die Wärmestrahlungsstromdichte des Brandes als Messgröße zur Beurteilung des Löscherfolges gewählt.

Es wurde die Temperatur in der Gasphase über dem Brandobjekt sowie in der Mitte der Holzkrippe als Funktion der Zeit erfasst. Die Temperaturen in der Gasphase über dem Brandobjekt werden mit 4 Thermoelementen (TC11, TC12, TC13, TC14) gemessen und ergänzend an drei Messstellen die Temperaturen innerhalb der Krippe (TC1, TC2, TC3), dargestellt in Bild 4.1.

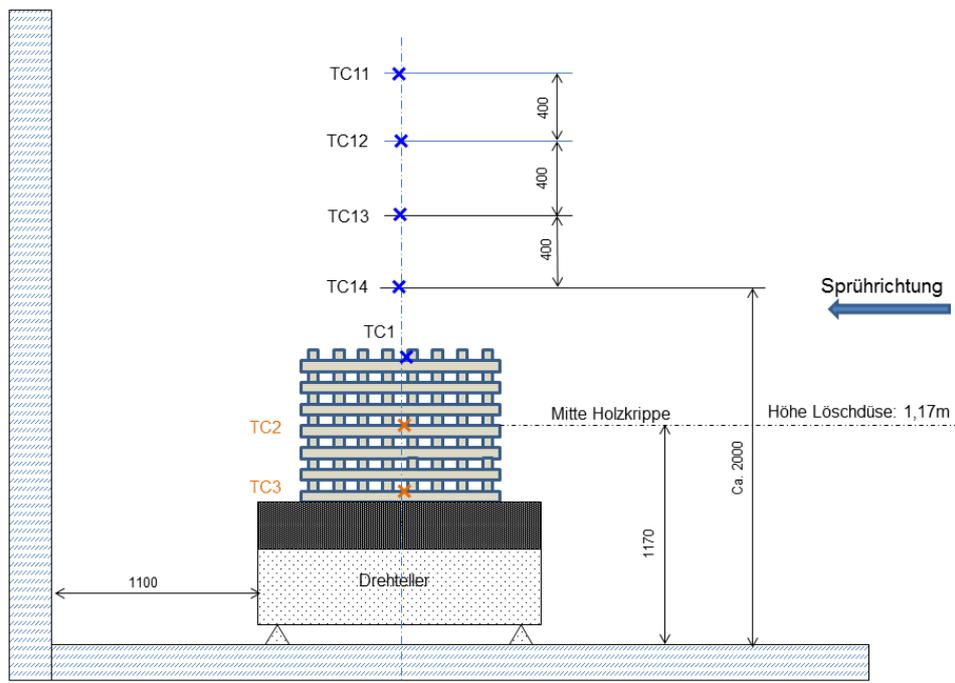


Bild 4.1: Seitenansicht der Versuchsanordnung und der Temperaturmessstellenanordnung im Brandraum 3

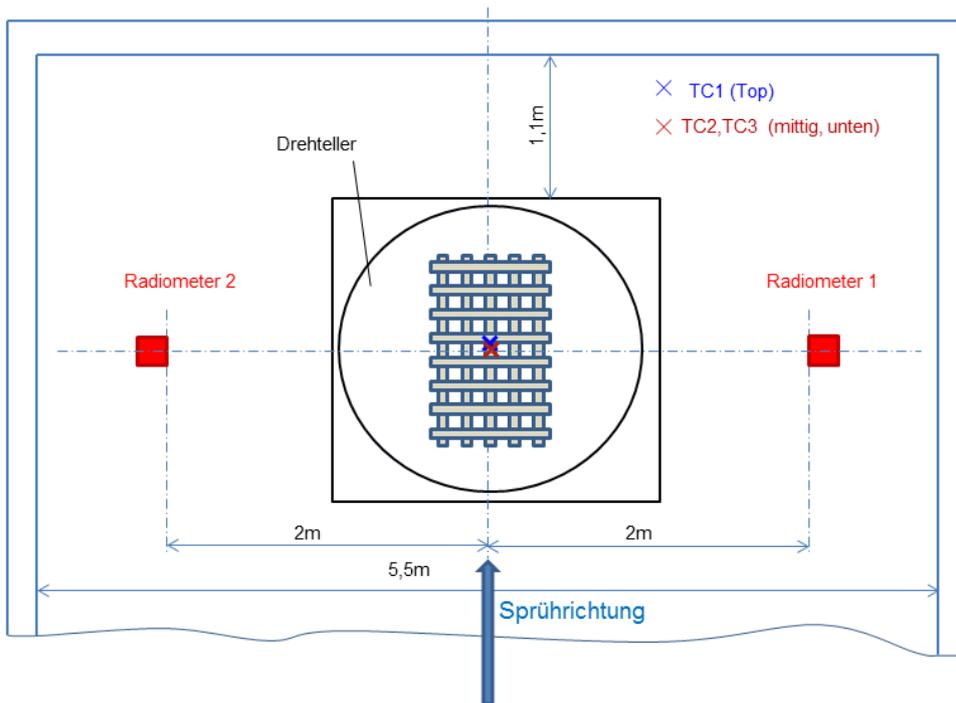


Bild 4.2: Draufsicht der Versuchsanordnung und Anordnung der Radiometer in Bezug zum Brandobjekt in Brandraum 3

Zur Messung der Stromdichte der Wärmestrahlung wurden Radiometer in 2 m Entfernung von der Mitte des Brandobjektes (darüber befinden sich die Messstellen TC11 bis TC14) in der Höhe von 1,17 m vom Boden (Mitte Holzkippe) installiert. Bild 4.3 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus mit dem Radiometer 1 für einen Versuch mit einer Krippe13A.



Bild 4.3: Anordnung von Radiometer 1 in einem Versuch mit einer Krippe 13A

4.2 Versuchsdurchführung

In den Versuchen werden wie in der DIN EN 3 Holzkippen als Brandobjekte verwendet, die nach 8 Minuten Vorbrennzeit mit Löschwasser aus einer fest installierten Hochdrucklöschdüse über eine vorgegebene Dauer beaufschlagt werden. Die verwendete Holzkippe sowie die Zündwanne, deren Größen wie in DIN EN 3 gewählt wurden, sind auf dem Drehteller positioniert, der während der Löschung um 360° rotiert. Die Drehbewegungen sind kontinuierliche Rechts- und Linksdrehungen um 360° mit einer Frequenz von $1/24 \text{ s}^{-1}$. In den vorangegangenen Testversuchen konnte nur bei vollständiger Drehung des AFF ein Löscherfolg erzielt werden

Zur Bewertung der Löschwirksamkeit eines Hochdrucklöschgerätes ist die Feststellung, ob gelöscht werden kann und bis zu welcher Brandleistung eine Löschung möglich ist, von Interesse. Erst unter Berücksichtigung der mit der Hochdrucklöschereinrichtung maximal löschraren Brandgröße sind verschiedenen Löschgeräte untereinander vergleichbar. Unterschiedliche Brandgrößen wurden durch Normholzkippen der Größen 8A, 13A, 21A sowie Modifikationen dazu realisiert. Der Vergleich der Löschwirkung und Leistungsfähigkeit erfolgt anhand des Verlaufes der Wärmestrahlungsstromdichte in 2 m Entfernung (Position Radiometer 1) für den jeweiligen Versuch.

5 Brand- und Löschttests

Mit der beschriebenen Versuchsanordnung wurden weitere Brand- und Löschrversuche zur Entwicklung der Methodik der Bewertung der Löschwirkung von Hochdrucklöschdüsen durchgeführt.

5.1 Versuchsergebnisse

Für diese Praxistests standen 3 verschiedene Hochdrucklöschsysteme zur Verfügung, die von den jeweiligen Herstellerfirmen bereitgestellt wurden. Die Löschdüsen dieser Systeme werden nachfolgend als Hochdrucklöschdüse A, B und C bezeichnet. Die Düsen unterscheiden sich in Betriebsparameter und Sprühbild, zu dem in Kapitel 6 Ergebnisse von PDA-Messungen dargestellt sind. Düse A liefert einen Volumenstrom von 20 l/min, Düse B 30 l/min und Düse C 39 l/min. Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Praxistests, in denen unterschiedliche Größen von Normholzkippen und die verschiedenen Hochdrucklöschsysteme eingesetzt wurden.

Als gelöscht wird der Holzkippenbrand dann gewertet, wenn mittels visueller Beobachtung nach Beendigung der Löschwasserbeaufschlagung kein Flammenbrand mehr erkennbar ist und der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte auf einen Wert nahe null abklingt.

Die Heat Release Rate (HRR) des Brandes, mit \dot{Q}_{Brand} bezeichnet, kann nach Gleichung

$$HRR = \dot{Q}_{Brand} = \chi \cdot \dot{m}_{Brand} \cdot \Delta H_C \quad (5.1)$$

berechnet werden⁵. Mit der gemessenen Abbrandrate \dot{m}_{Brand} und der Verbrennungswärme $\Delta H_c = 16MJ/kg$ für Kiefernholz ergeben sich bei Voraussetzung einer Verbrennungseffizienz von $\chi = 0,7$ die in der Tabelle angegebenen Werte für die HRR.

Tabelle 5.1: Brand- und Löschversuche mit AFF in Brandraum 3 mit vollständiger Drehung des Brandobjektes

Versuch Nr.	Brandobjekt	Abbrandrate \dot{m}_{Brand} * in kg/s	HRR in MW	Wasservolumenstrom \dot{V}_W in l/min	Bemerkung
7	2 x 8A	0,11	1,2	30	gelöscht
9	8A	0,05	0,6	30	4 min Löschdauer gelöscht
11	8A	0,05	0,6	30	gelöscht
12	8A	0,05	0,6	20	2 min Löschdauer gelöscht
13a	2 x 8A	0,11	1,2	20	nicht gelöscht
14	13A	0,09	1	20	nicht gelöscht
15	2 x 8A	0,11	1,2	39	gelöscht
16	8A	0,05	0,6	39	2 min Löschdauer gelöscht
17	13A	0,09	1	39	gelöscht
18	8A	0,05	0,6	20	Vollkegeldüse nicht gelöscht
19	21A	0,14	1,5	39	gelöscht
20	8A	0,05	0,6	39	gelöscht
21	8A	0,05	0,6	30	gelöscht
22	13A	0,09	1	30	gelöscht
23	21A	0,14	1,5	30	gelöscht
24	21A+	0,22	2,5	30	nicht gelöscht

* Mittlere Abbrandrate in der Vollbrandphase

Die in der Tabelle angegebenen Abbrandraten beruhen auf der Massenwägung des Brandmaterials in der Vorbrandphase nach Erreichen des Vollbrandes. Diese Restmassenwägung wurde für jede Krippengröße einmal durchgeführt. In Bild 5.1 sind die Verläufe der Abbrandraten für die Krippen 8A, 13A und 2 x 8A für die Vollbrandphase, die nach 120 s beginnt, grafisch dargestellt. Für die Krippe 21A wurde die Zusammensetzung aus 8A + 13A angenommen.

⁵ Zur messtechnischen Erfassung der HRR war eine konstruktive Anpassung nötig, die infolge der begrenzten Mittel nicht durchgeführt werden konnte. Deshalb wurde die HRR nach der von **[Drysdale 85]** angegebenen Methode abgeschätzt.

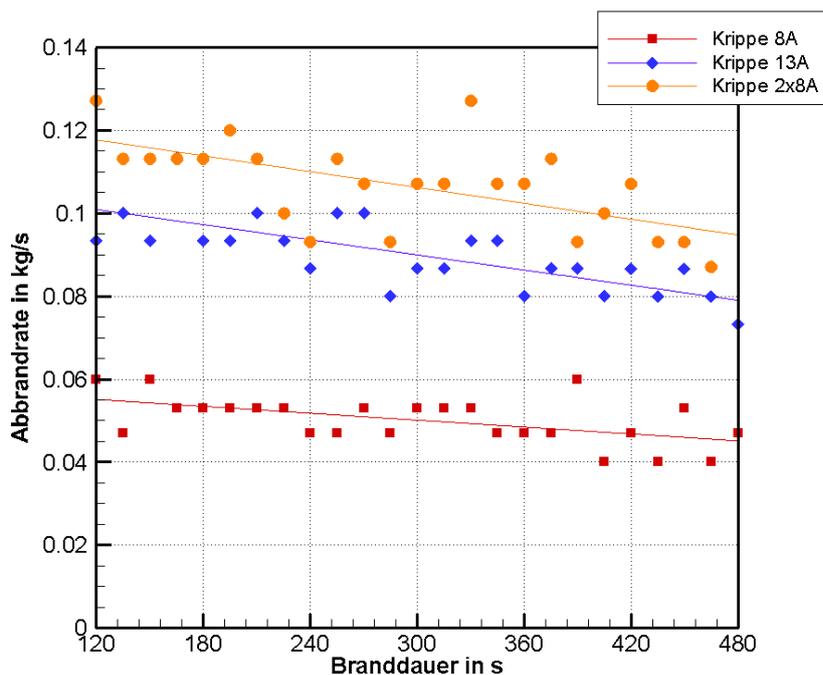


Bild 5.1: Abbrandrate für die Krippen 8A, 13A und 2 x 8A (Lineare Regression im Bereich von 120 s bis 480 s Branddauer)

Versuch 7 ist in der Tabelle 5.1 aus Gründen der Vollständigkeit aufgeführt. Die Versuchsergebnisse wurden bereits in Kapitel 3 dargestellt. Sie zeigten, dass jede Seite des Brandobjektes mit Wasser beaufschlagt werden muss, um eine erfolgreiche Löschung zu verwirklichen und begründete damit die Verwendung des AFF mit vollständiger Drehung um 360°.

5.1.1 Versuche mit Krippen 2 x 8A

In drei Versuchen wurden als Brandobjekt zwei nebeneinander aufgestellte Normholzkrippen 8A, nachfolgend als Krippe 2 x 8A bezeichnet, verwendet. In der Vollbrandphase eines solchen Krippenbrandes wurde eine HRR von ca. 1,2 MW erzielt. In diesen Experimenten wurden die drei verschiedenen Hochdrucklöschdüsen eingesetzt und deren Löschwirkung anhand gemessener Wärmestrahlungsstromdichten in 2 m Entfernung gegenübergestellt. In jedem Versuch wurde nach 8 Minuten Vorbrennzeit eine kontinuierliche Löschwasserbeaufschlagung über 5 Minuten Dauer bei kontinuierlicher Hin- und Herdrehung des AFF um 360° vorgenommen.

Das Bild 5.2 zeigt im Diagramm auf der linken Seite den Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte am Radiometer 1 für die Versuche mit der Krippe 2 x 8A und den verschiedenen Hochdrucklöschdüsen. Mit dem größten Volumenstrom von Düse C wird eine schnelle Brandlöschung erzielt. Die Wärmestrahlung sinkt innerhalb von weniger als 30 s auf null ab. Bei Beaufschlagung mit Düse B wird nach 3 min am Radiometer 1 Wärmestrahlung vernachlässigbarer Größe registriert, so dass der Brand ebenfalls als gelöscht betrachtet werden kann. Bei Einsatz von Düse A wird der geringste Rückgang der Wärmestrahlung beobachtet. Mit Beenden des Löscheinsatzes wird eine Wärmestrahlungsstromdichte von ca. 800 W/m² gemessen. Der Brand wird nicht gelöscht.

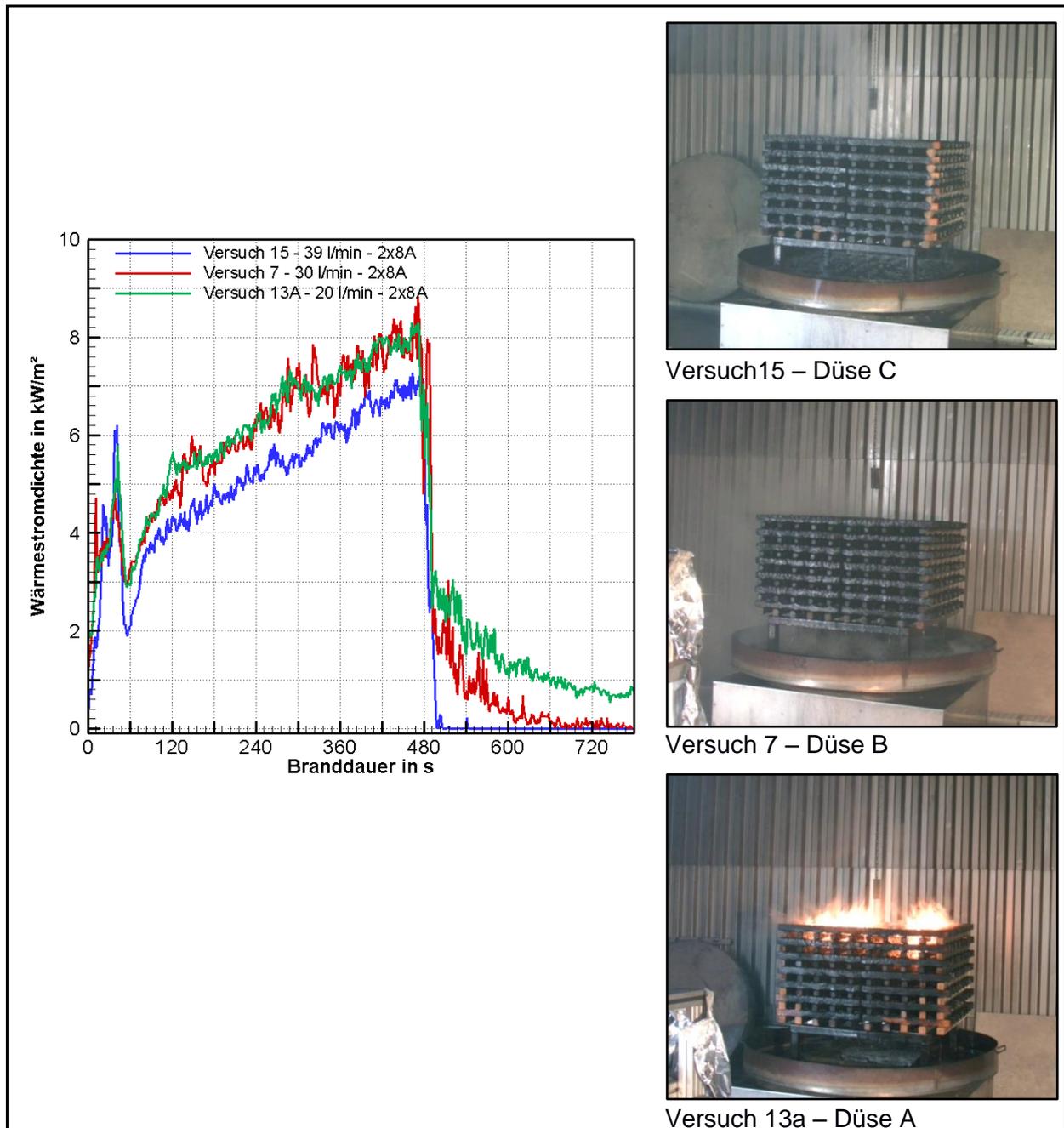


Bild 5.2: Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte am Radiometer 1 (links) und Aufnahmen direkt nach Ende des Löschintervalls (rechts) für Versuche 7, 13a und 15

Die im Bild 5.2 auf der rechten Seite gezeigten Videoschnappschüsse direkt nach Beenden des Löschintervalls zeigen in Versuch 15 und 7 keine Flammen und bestätigen die mittels Wärmestrahlungsstromdichte getroffenen Aussagen. In Versuch 13a ist nach Ende der Wasserzufuhr eine noch brennende Krippe zu erkennen, was der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte widerspiegelt.

In den Versuchen mit einer Krippe 2 x 8A wurde gezeigt, dass der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte die Löschwirkung widerspiegelt und einen Vergleich unterschiedlicher Löscheinrichtungen für konstante Brandlast ermöglicht.

5.1.2 Versuche mit Krippen 8A

In Experimente mit kleineren Brandobjekten spiegelt der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte das Verlöschen des Brandes wider, aber Unterschiede in der Löschleistung sind aus dem Verlauf der physikalischen Größe nicht erkennbar.

Beispiel dafür sind die Versuche 12, 20 und 21, in denen Löschwasservolumenströme von 20 l/min, 30 l/min und 39 l/min zur Löschung einer Normholzkrippe 8A mit einer HRR von ca. 0,6 MW angewendet werden. Die in den Versuchen ermittelten Wärmestrahlungsstromdichten, gemessen im Abstand von 2 m von der Mitte des Brandobjektes, sind in Bild 5.3 dargestellt. In den Versuchen sinkt die Wärmestrahlungsstromdichte zum Zeitpunkt des Löschbeginns sofort ab. Der Unterschied in den gemessenen Kurvenverläufen ist sehr gering. In allen 3 Versuchen, d. h. mit allen drei Düsen, wird die Löschung erzielt, was auch der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte zeigt.

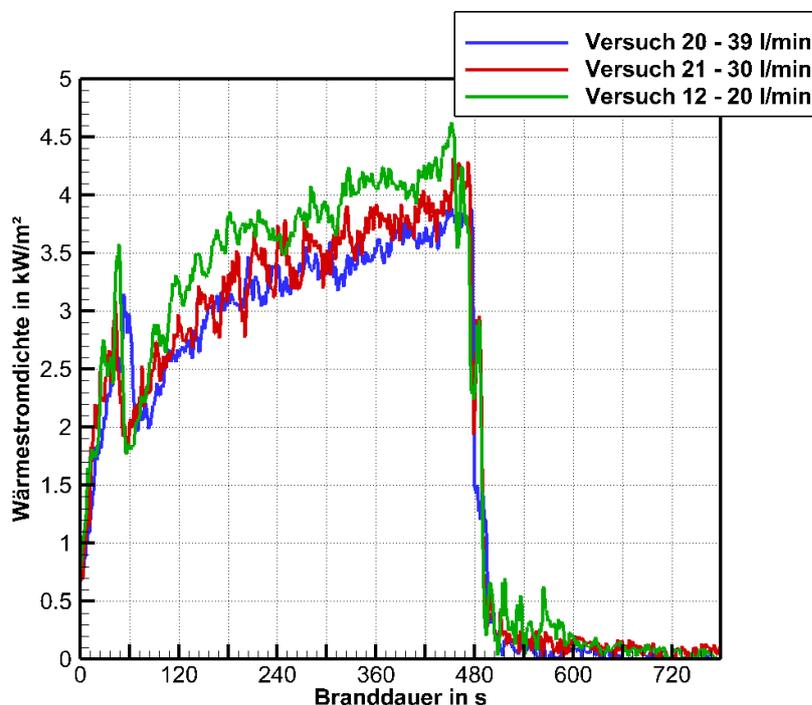


Bild 5.3: Wärmestrahlungsstromdichte in den Versuchen 20 und 21 (Löschdauer 5 min) am Radiometer 1 sowie im Versuch 12⁶ (Löschdauer 2min)

⁶ Aufgrund des Sensorausfalls an Radiometer 1 im Versuch 12 sind die an Radiometer 2 aufgezeichneten Messwerte im Diagramm dargestellt.

Bild 5.4 zeigt die gelöschte Holzkippe nach der Löschwasseraufbringung über die Dauer von 5 min.

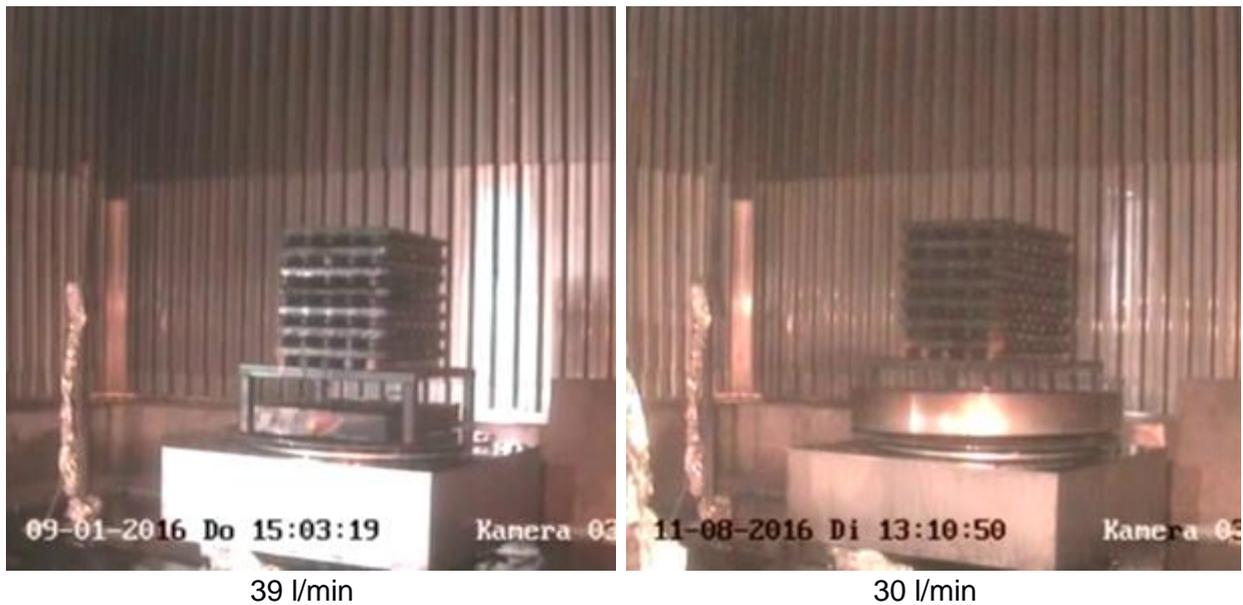


Bild 5.4: Normholzkippe 8A nach Löschwasseraufbringung über die Dauer von 5 min in Versuch 20 (links) und in Versuch 21 (rechts)

Der Verlauf der Wärmestrahlungsdichte (vgl. Bild 5.3) zeigt, dass der Löscherfolg bereits nach 2 min erzielt wird. Dies wird zum Teil durch visuelle Beobachtungen (Videomitschnitt) bestätigt. Bild 5.4 zeigt Videoschnappschüsse nach 2 Minuten Löschwasseraufbringung. Im Versuch 20 ist zu diesem Zeitpunkt noch ein lokaler Glutbrand im Inneren der Krippe zu erkennen, im Versuch 21 nicht mehr. Dass nach Beenden der Wasseraufbringung nach 2 min der lokal begrenzte Glutbrand verlöscht, da mit Abstellen des Sprühstrahles die verbrennungsfördernde Luftzufuhr wegfällt, zeigt ein weiteres Experiment (Versuch 16).

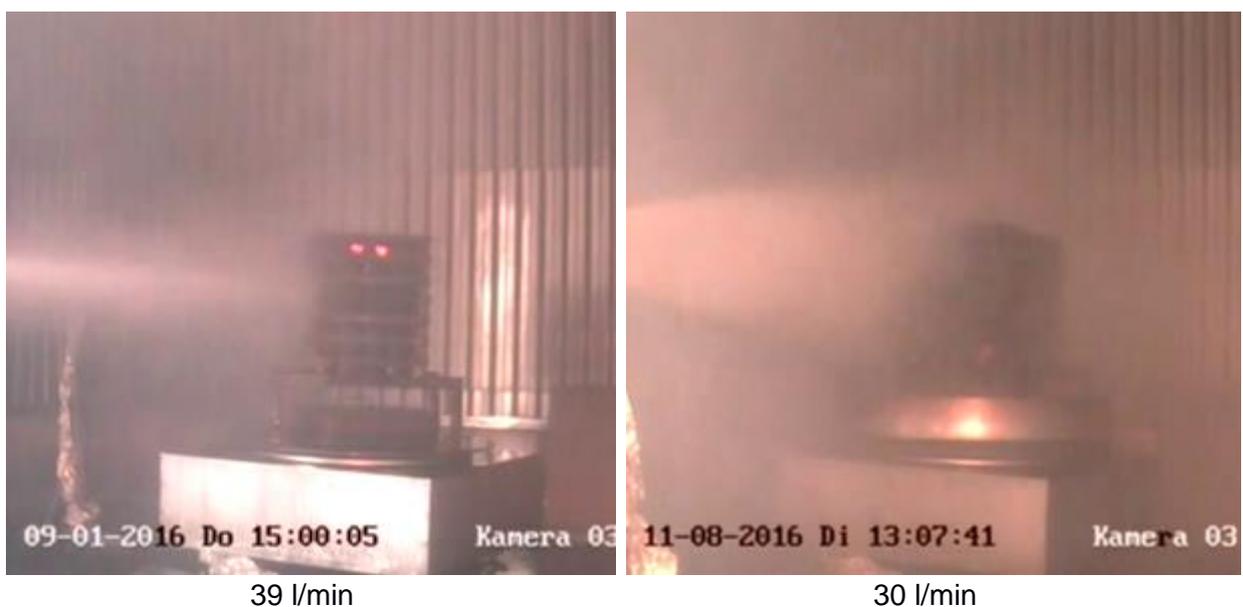


Bild 5.5: Normholzkippe 8A während Löschwasseraufbringung nach 2 min in Versuch 20 (links) und in Versuch 21 (rechts)

Es war Ziel weiterer Experimente mit Krippen 8A, zu überprüfen, ob bei konstanter Vorbrennzeit von 8 min durch eine Verkürzung der Löschdauer Aussagen zur Einschätzung

der Löschdüsen abgeleitet werden können. Dazu wurden die Versuche 12 und 16 durchgeführt.

In beiden Versuchen erfolgte die Löschung bereits nach 2 min wie in Bild 5.6 am Zustand der Holzkippen nach Beenden der Wasserzufuhr zu erkennen ist.



Bild 5.6: Normholzkippe 8A während Löschwasseraufbringung nach 2 min in Versuch 12 (links) und in Versuch 16 (rechts)

Den Verlauf der Wärmestrahlungsdichte in 2 Meter Entfernung vom Zentrum in Bild 5.7 zeigt für beide Versuche den schnellen Rückgang der Kurve auf einen Wert nahe Null, der die Löschung des Brandes anzeigt. Auch hier zeigt sich kein deutlicher Unterschied in den Kurven, der quantifizierbare Aussagen erlaubt.

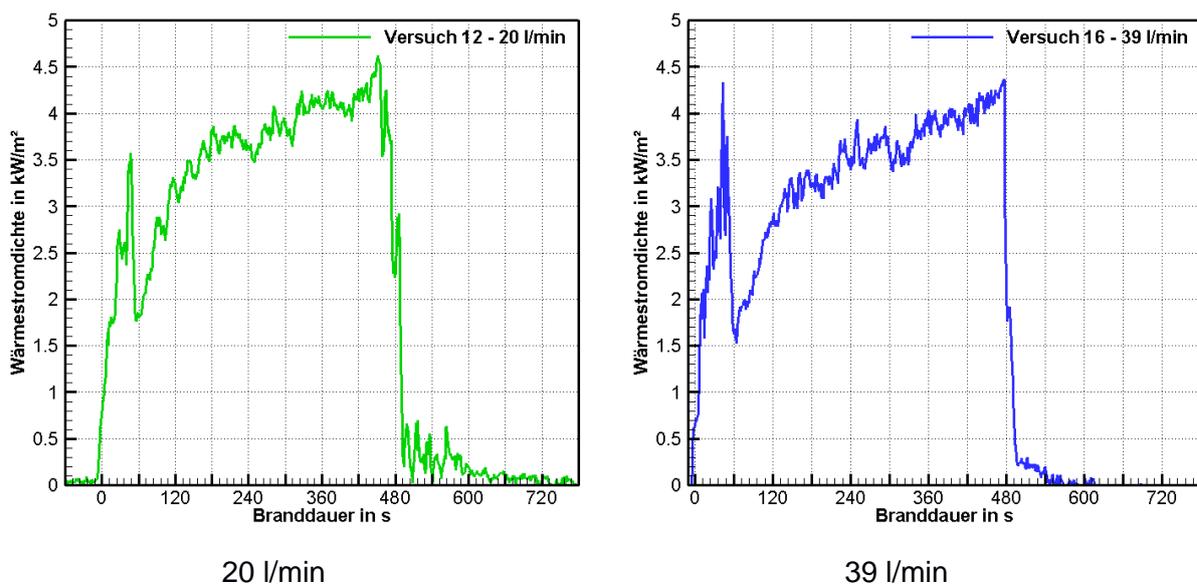


Bild 5.7: Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 12 (links) an Radiometer 2 und Versuch 16 (rechts) an Radiometer 1 gemessen
Entsprechend der genannten Kriterien wurde die Krippe in beiden Versuchen als gelöscht bewertet.

Dass es einen Unterschied in der Löschwirkung gibt, verdeutlichen bereits die Schnappschüsse in Bild 5.6, die für Versuch 12 nach 2 min Löschdauer noch eine starke Wasserdampfbildung erkennen lassen, während in Versuch 16 bereits die Brandgase und damit auch der Wasserdampf über dem Brandobjekt abgezogen sind.

Neben der messtechnischen Erfassung der Wärmestrahlungsstromdichte können neben der visuellen Bewertung Infrarotaufnahmen (IR-Aufnahmen) genutzt werden. Für alle Versuche wurden IR-Videos über den gesamten Brandverlauf aufgezeichnet. Im Bild 5.8 sind die IR-Aufnahmen nach Abschluss des Löschvorgangs für beide Versuche gegenübergestellt, die die nach der Brandlöschung vorhandene Wärmefreisetzung sichtbar machen.

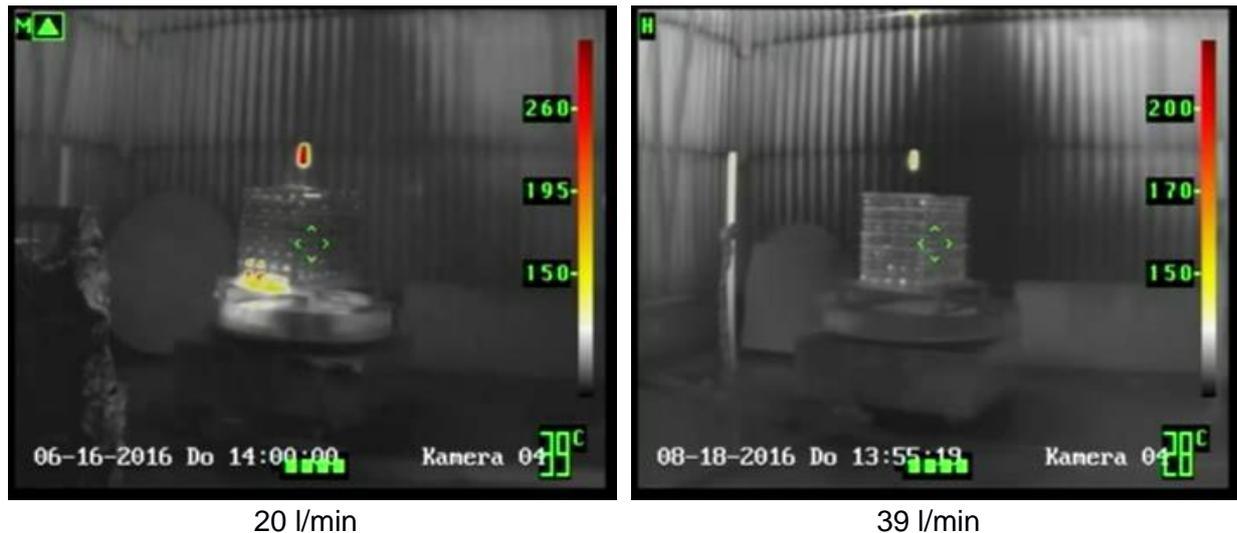


Bild 5.8: Infrarotaufnahme der Normholzkrippe 8A nach 2 min Löschdauer für Versuch 12 (links) und Versuch 16 (rechts)

Im Versuch 12, mit der Anwendungsrate von 20 l/min, werden lokal Maximaltemperaturen von ca. 260°C im Bereich der gelöschten Normholzkrippe angezeigt, im Versuch 16, mit der wesentlich größeren Anwendungsrate von 39 l/min lokal nur ca. 100°C. Aber auch die IR-Strahlung zeigt nur qualitativ die größere Löschwirkung bei der größeren Anwendungsrate in Versuch 16.

Zurzeit kann mit der eingesetzten IR-Aufnahme-Technologie noch kein quantitativer Rückschluss auf die HRR oder Teile davon ermittelt werden. Das muss Gegenstand weiterer Forschungsaufgaben sein.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass:

- der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte das Verlöschen der Krippe anzeigt, aber keine quantitativen Aussagen erlaubt, auch nicht bei kürzerer Anwendungsdauer,
- qualitativ zwischen der Löschwirkung bei Anwendung der unterschiedlichen Löschdüsen für die Normholzkrippe 8A unterschieden werden kann,
- Unterschiede anhand von Infrarot- und visuellen Aufnahmen festgestellt werden können, die aber nicht quantifizierbar sind.

5.1.3 Rating-Verfahren

Um durch eine andere Möglichkeit eine Aussage über den Zusammenhang der beim Brand freigesetzten Energierate, d. h. der HRR, und dem Absorptionsvermögen der eingesetzten Hochdruckstrahlrohre herzustellen, wurde ein Rating-Verfahren analog der DIN EN 3 eingesetzt. Dies führt zu einer Beurteilung des Löschvermögens anhand von Löschversuchen einer Reihe von Normbränden unterschiedlicher Größe. Diese Vorgehensweise nach DIN EN 3 wird zur Prüfung von Feuerlöschern angewandt und das Löschvermögen (Rating) eines Feuerlöschers danach bestimmt, bis zu welcher Normholzkrippengröße eine Brandlöschung erfolgt.

Das Verfahren wurde unter Verwendung von Normholzkrippen in den Größen 8A, 13A und 21A für die drei Düsen angewendet. Es wurde eine Löschdauer von 5 min vorausgesetzt. Als Verlöschen des Brandes wurde das Verlöschen des Flammenbrandes nach Beendigung der Löschwasserzufuhr festgelegt. Die Feststellung wurde durch Auswertung von Video- und IR-Aufnahmen vorgenommen.

Wie unter 3.2 beschrieben, wird eine modifizierte Apparatur gemäß der zurückgezogenen schwedischen **[SS 1192]** im Brandraum 3 benutzt, die eine allseitige Wassernebelbeaufschlagung ohne den Einfluss eines Feuerwehrmannes bei der Brandbekämpfung realisieren sollte.

Die Löschdüse A wird in den Versuchen 12 und 14 getestet. Zur Bewertung der Löschdüse B wurden die Versuche 21 bis 24 durchgeführt. Die Versuche 17, 19 und 20 sind Ratingtests für die Hochdrucklöschdüse C.

Die Messgrößen zu den genannten Vergleichen und die Rating-Tests für die Düsen A bis C werden nachfolgend dargestellt.

5.1.3.1 Rating für Hochdrucklöschdüse A

Die Hochdrucklöschdüse A liefert Wasser mit einem Volumenstrom von 20 l/min. Mit diesem wird in Versuch 12 die Normholzkrippe 8A beaufschlagt und gelöscht. Die nächste größere Normholzkrippe ist die 13A und wird in Versuch 14 nach 5 min Wasserbeaufschlagung nicht vollständig gelöscht. Das zeigt ein Videoschnappschuss der Krippe nach Beenden der Löschwasseraufbringung in Bild 5.9.



Bild 5.9: Videoschnappschuss aus Versuch 12 (links) und Versuch 14 (rechts) nach Ende der Löschwasserzufuhr

Dass in Versuch 14 keine Löschung erzielt wird, spiegelt auch der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte am Radiometer 2 in Bild 5.10 wider.

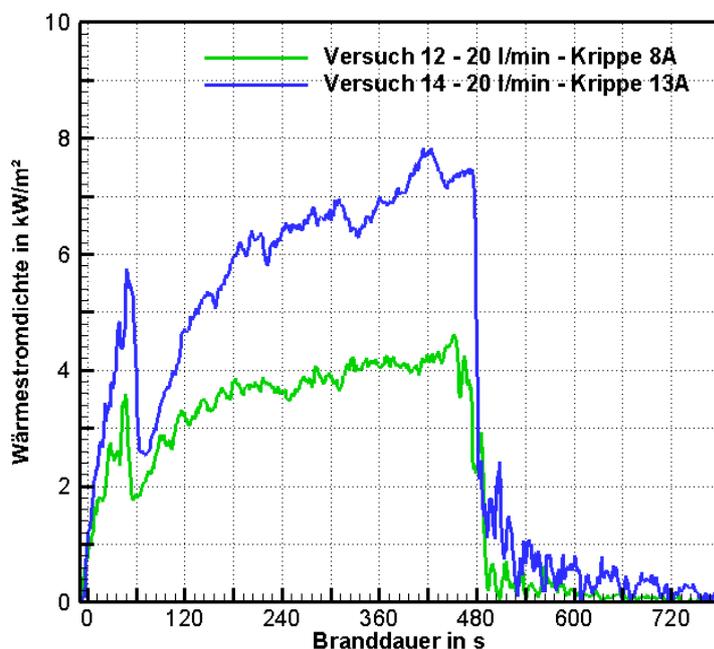


Bild 5.10: Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 2 in den Versuchen 12 und 14

5.1.3.2 Rating für Hochdrucklöschdüse B

Die Hochdrucklöschdüse B liefert 30 l/min an Löschwasser. Zur Ermittlung des Ratings für Düse B wurden die Versuche 21, 22, 23 und 24 durchgeführt.

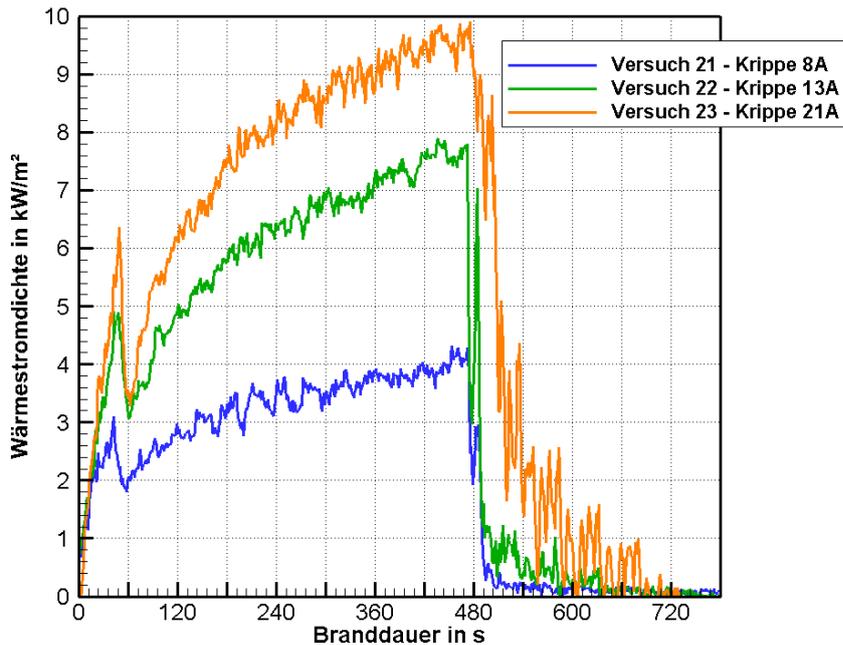


Bild 5.11: Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 in den Versuchen 21, 22, 23

Bild 5.11 zeigt die in den Versuchen mit Normholzkrippen 8A, 13A und 21A gemessenen Wärmestrahlungsstromdichten. Aus dem Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichten, die in allen drei Versuchen innerhalb des Löschintervalls auf null absinken, kann auf den Löscherfolg in allen 3 Versuchen geschlossen werden.

In diesem Fall müsste die nächste größere Normholzkrippe 27A verwendet werden. Der für eine Krippe 27A erforderliche Versuchsaufbau erwies sich als zu schwer und zu sperrig für eine Positionierung und Bewegung auf dem vorhandenen Drehteller.

Als alternative Holzrippe höherer Brandlast wurde eine Krippe 21A+ verwendet. Sie unterscheidet sich von der Normkrippe 21A dadurch, dass an Stelle der Stäbe von 50 cm Länge 80 cm lange Vierkanthölzer verwendet wurden (vgl. Bild 5.12).



Bild 5.12: Krippe 21A in Versuch 23 (links) und Krippe 21A+ in Versuch 24 (rechts)

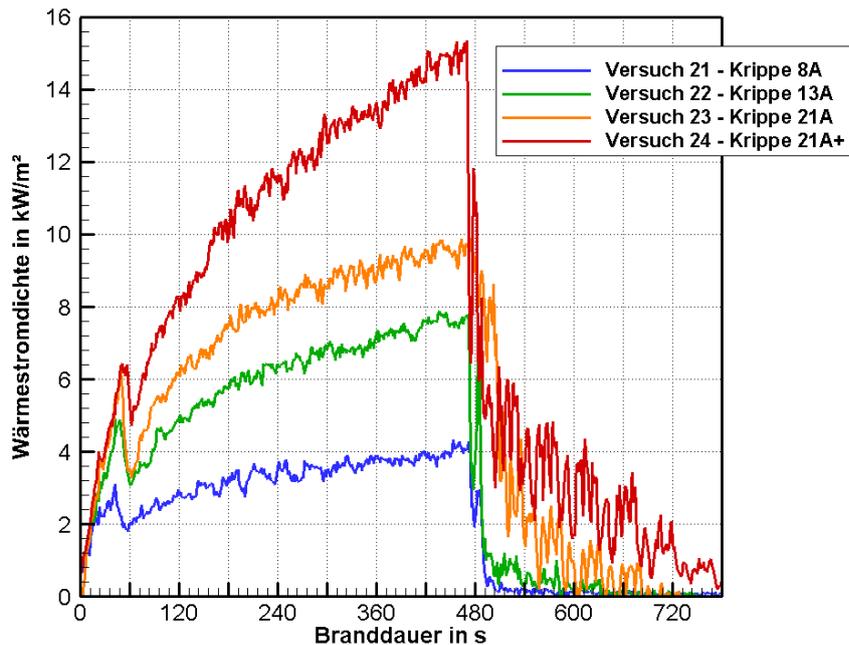


Bild 5.13: Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 in den Versuchen 21, 22, 23 und 24

Der Verlauf der Wärmestrahlungsstromdichte in Versuch 24 in Bild 5.13 zeigt, dass keine Löschung erzielt wird. Die Kurve für Versuch 24 weist im Löschintervall deutlich größere und von null verschiedene Werte für die Wärmestrahlungsstromdichte auf. Die starken Schwankungen der Messwerte in den Versuchen mit Krippen 21A und 21A+ sind zum einen auf die sperrige Geometrie des Stapels zurückzuführen zum anderen auf die nicht gleichmäßige Löschung des Holzstapels. Bei einer Holzrippenlänge von 2,1 m und der Breite von 0,5 m bei Krippe 21A und 0,8 m bei Krippe 21A+ sind bei Drehung des AFF unterschiedliche Entfernungen des Radiometers von der Krippenoberfläche vorhanden. Bild 5.14 verdeutlicht die ungleichmäßige Löschung der Krippe, die im Foto auf der linken Seite nach einer Löschdauer von 4 min sichtbar wird. Ein großer Teil des Brandmaterials ist bereits als brennende Glut in die Zündwanne gefallen. Die Abbildung auf der rechten Seite zeigt den Holzstapel ca. 1 Minute nach Beendigung der Wasserzufuhr. Die Krippe brennt an einer Seite als Glut- und Flammenbrand weiter.



Bild 5.14: Krippe 21A+ nach 4 min Löschdauer (links) und 1 min nach Beendigung der Löschung (rechts)

Auch die am Radiometer 2, das 0,5 m näher am Brandobjekt installiert wurde als das Radiometer 1, gemessenen Wärmestrahlungsstromdichten (vgl. Bild 5.15) bestätigen die nicht erfolgreiche Löschung.

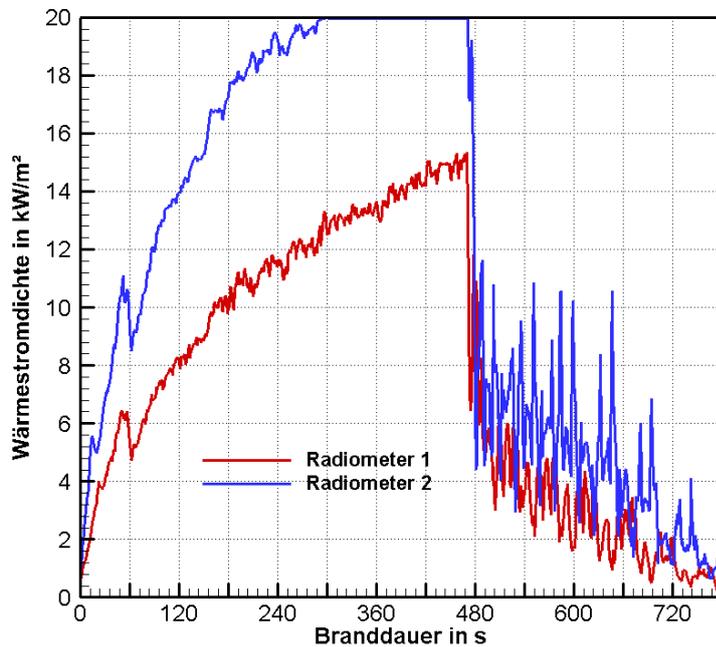


Bild 5.15: Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 und 2 im Versuch 24⁷

Die Krippe 21A in Versuch 23 ist mit Düse B nach 5 Minuten erfolgreich gelöscht, aber die Löschung vollzieht sich langsamer als in den kleineren Krippen. Dies verdeutlicht der Kurvenverlauf der Wärmestrahlungsstromdichte in Bild 5.13. Ein Videoschnappschuss in Bild 5.16, aufgenommen ca. 40 s nach Ende des Löschintervalls, verdeutlicht den teilweise intensiven Abbrand der Krippe.



Bild 5.16: Krippe 21A (Versuch 23) ca. 40 s nach Beendigung der Löschung mit Düse B

5.1.3.3 Rating für Hochdrucklöschdüse C

Die Ermittlung des Ratings für die Hochdrucklöschdüse C, mit der ein Volumenstrom von 39 l/min aufgebracht wird, erfolgt anhand der Versuche 20, 17 und 19. Im Gegensatz zu den Versuchen mit den Löschdüsen A und B, bei denen die Düsenmündung im Abstand von 2,3 m von der Oberfläche (Stirnseite) der Holzkippe positioniert war, wurde für Löschdüse C

⁷ Messbereichsgrenze 20 kW/m²

ein Abstand von 4,3 m gewählt. Erst in dieser Entfernung wurde mit der Düse C ein Sprühbild erzeugt, das größtmäßig eine vergleichbare Benetzung der Stirnseite der Holzkippe ermöglicht, ähnlich wie bei den Düsen A und B. Auf die Sprühbilduntersuchungen wird in Kapitel 6 eingegangen.

In Bild 5.17 sind die am Radiometer 1 gemessenen Wärmestrahlungsstromdichten aus den Versuchen mit den Normholzkippen 8A, 13A und 21A dargestellt.

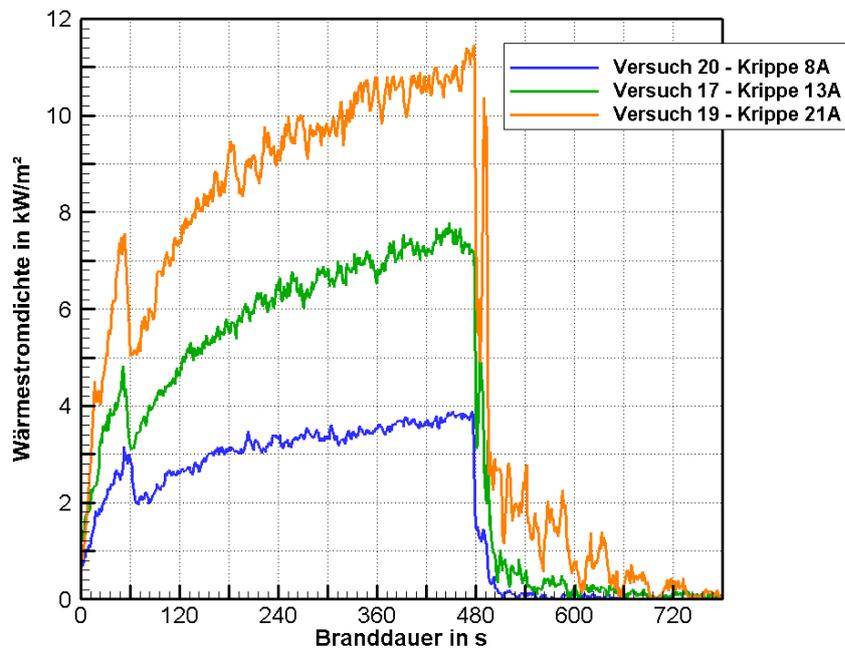


Bild 5.17: Wärmestrahlungsstromdichte an Radiometer 1 in den Versuchen 20, 17 und 19

Erwartungsgemäß sinkt die Wärmestrahlungsstromdichte im Versuch 20 bei Krippe 8A am schnellsten auf null ab. Bei der jeweils nächsten größeren Krippe sinkt der Wärmestrom langsamer auf einen vernachlässigbar kleinen Wert ab. Alle drei Krippengrößen werden gelöscht. Die unterschiedliche Löschwirksamkeit wird durch die unterschiedlichen Kurvenverläufe innerhalb der Löschzeit von 5 Minuten verdeutlicht.

Videoschnappschüsse für Versuch 17 und 19 nach Ablauf des Löschintervalls in Bild 5.18 spiegeln den Löscherfolg anschaulich wider.



Bild 5.18: Krippe 13A (links) und Krippe 21A (rechts) nach Beendigung der Löschwasseraufbringung mit Düse C

Bei den längeren Normholzstapeln 21A ist kein gleichmäßiger Abbrand der Krippe zu beobachten.

Auch bei Verwendung der Düse C ist dieser ungleichmäßige Abbrand der Krippe 21A an der Restkrippe sichtbar (vgl. Bild 5.19).



Bild 5.19: Krippe 21A (Versuch 19) unmittelbar nach Beendigung der erfolgreichen Löschung mit Düse C

5.2 Schlussfolgerungen aus den Ratingversuchen

In den Löschtests konnten unter Nutzung des AFF die Löschleistungen der 3 verschiedenen Hochdrucklöschsysteme bewertet werden. Dabei wurde ein kontinuierliches Hin- und Herdrehen des Brandobjektes bei fest positionierter Düse realisiert.

Die Löschleistung ergibt sich aus der größten Krippe, bei der eine Löschung erzielt wird. Tabelle 5.1 zeigt eine Übersicht der Reihe der Normholzkrippen zur Ermittlung des Ratings mit den Werten zu Abmessung und Masse sowie den zu erwartenden Stoff- und Energiefreisetzung \dot{m}_{Brand} und \dot{Q}_{Brand} (vgl. Abschnitt 5.1), basierend auf den durchgeführten Versuchen.

Tabelle 5.1: Daten zur Reihe der Normholzkrippen nach DIN EN 3

Normholz- krippe	Kombination	Holzstablänge der gesamten Krippe in cm	Masse in kg bei Holzdichte von 510 kg/m ³ (12% rel. Feuchte)	Abbrandrate \dot{m}_{Brand} in kg/s	HRR* \dot{Q}_{Brand} in MW
1	2	3	4	5	6
8A		56	45,7	0,05	0,6
13A		91	74,3	0,09	1
21A		147	120	0,14	1,6
27A		189	154,2	0,18	2
34A	21A+13A	238	194,3	0,23	2,6
43A	8A+27A+8A	301	245,6	0,28	3,1
55A	21A+13A+21A	567	314,3	0,37	4,1

*Werte der HRR in MW auf eine Kommastelle gerundet angegeben

Durch die begrenzte Tragfähigkeit der Testanlage wurden Normholzkrippen bis zur Größe 21A sowie Variationen davon wie 2 x 8A und 21A+ (21A mit 80 cm Breite), verwendet.

In den Versuchen zur Testung der Hochdrucklöschdüsen wurden zur Feststellung, ob das Brandobjekt gelöscht wurde, visuelle Einschätzungen und als physikalische Größe die gemessene Wärmestrahlungsstromdichte benutzt. Allein aus dem Verlauf der physikalischen Größe konnte die Verlöschung des Brandes aber nicht in jedem Versuch zweifelsfrei erkannt werden.

Für die Hochdrucklöschdüse A (20 l/min) wurde bei Anwendung dieser Methodik eine Löschleistung von 8A ermittelt.

Die Messwerte der Wärmestrahlungsstärke zeigten den Löscherfolg nicht eindeutig, so dass Video- und IR-Aufnahmen ergänzend hinzugezogen wurden. Legt man die beim Brand der Normholzkrippen entsprechenden Wärmefreisetzungsraten zugrunde (Tab. 5.1, Spalte 6), so bedeutet ein Rating von 8A, dass mit dem Löschsystem ein Feststoffbrand von ca. 0,6 MW gelöscht werden kann.

Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht der Versuche zur Bestimmung des Ratings von Düse A mit Versuchsparametern zum Brandobjekt und dem zugeführten Wasservolumenstrom (Anwendungsrate). Die farblich unterlegten Zeilen kennzeichnen die Versuche ohne Löscherfolg.

Tabelle 5.2: Kenngrößen aus den Ratingversuchen für Düse A

Versuch	Normholz- krippe	\dot{V}_W in l/min	HRR in kW	\dot{H}_W in kW	$\dot{V}_{W,HRR}$ in l/min
1	2	3	4	5	6
12	8A	20	560	864	12,6
14	13A	20	1008	864	23,4
13a	2 x 8A	20	1232	864	28,5

In Spalte 4 sind die nach Gleichung (5.1) mit den gemessenen Abbrandraten berechneten Wärmefreisetzungsraten der Krippenbrände aufgelistet. Spalte 5 zeigt den Wert der theoretisch absorbierbaren Enthalpieänderungsrate \dot{H}_W aufgrund des zugeführten Wasservolumenstromes (Anwendungsrate) und wurde nach Gleichung

$$\dot{H}_W = \rho_W \cdot \dot{V}_W \cdot (c_p \cdot \Delta T + \Delta h_V) \quad (5.2)$$

ermittelt. Dazu wurde die Erwärmung (von 20°C auf 100°C) und vollständige Verdampfung des Löschwassers (bei 100°C) vorausgesetzt. Dieser Wert von \dot{H}_W stellt den maximal möglichen Wert für die Anwendungsrate dar.

In Spalte 6 ist der für die vorhandene Brandleistung der Krippe erforderliche Wasservolumenstrom ermittelt, der vollständig verdampfen müsste, um die gesamte Energiefreisetzungsrate des Brandes zu absorbieren. Der direkte Vergleich mit der Anwendungsrate, steht in Übereinstimmung mit dem Löscherfolg. Um die HRR einer Krippe 8A zu kompensieren, müssen 12,6 l/min verdampfen. Bei der Anwendungsrate von 20 l/min tritt der Löscherfolg in Versuch 12 auch ein. Für die beiden anderen Krippen 13A und 2 x 8A sind die erforderlichen Wasservolumenströme $\dot{V}_{W,HRR}$ größer als die Anwendungsrate von 20 l/min.

Für die Löschdüse B (30 l/min) wurde eine Löschleistung von 21A ermittelt, die der eines 1,6 MW-Holzrippenbrandes entspricht. In Tabelle 5.3 sind die Versuchsdaten für Düse B mit den Auswertegrößen analog zu Tabelle 5.2 aufgeführt. Die farblich unterlegte Tabellenzeile kennzeichnet den nicht gelöschten Versuch.

Tabelle 5.3: Kenngrößen aus den Ratingversuchen für Düse B

Versuch	Normholz- krippe	\dot{V}_W in l/min	HRR in kW	\dot{H}_W in kW	$\dot{V}_{W,HRR}$ in l/min
1	2	3	4	5	6
11	8A	30	560	1296	12,6
21	8A	30	560	1296	12,6
22	13A	30	1008	1296	23,4
7	2 x 8A	30	1232	1296	28,5
23	21A	30	1568	1296	36,6
24 ^{*)}	21A+	30	2464	1296	57

In der Reihe der größer werdenden Normholzkrippen wurde an Stelle der Krippe 27A eine Krippe 21A+ verwendet, die eine Breite von 80 cm und Länge von 2,1 m aufweist.

Im Versuch 23, in dem die Krippe 21A gelöscht wird, steht der Brandleistung von ca. 1,6 MW ein Verdampfungsenthalpiestrom von 1,3 MW gegenüber. Obwohl die Brandleistung größer ist als die theoretische Energieabsorptionsrate, verlischt der Brand.

Erst im folgenden Versuch 24 wird keine Löschung erzielt, was bereits durch den Vergleich der Volumenströme und Energieströme zu erwarten war.

Für Löschdüse C (39 l/min) konnte das Ratingverfahren nur bis zur Krippe 21A, die problemlos gelöscht wurde, durchgeführt werden. Aufgrund der vergleichsweise hohen Wasserrate von Düse C wird der Löscherfolg erst bei Krippe 27A, 34A oder 43A eintreten. Diese Krippenlängen von 2,7 m, 3,4 m und 4,3 m sind nicht mehr auf dem vorhandenen AFF positionierbar.

In Tabelle 5.4 sind die Versuchsdaten für die Ratingversuche für Düse C mit den Auswertegrößen analog zu Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tabelle 5.4: Kenngrößen aus den Ratingversuchen für Düse C

Versuch	Normholz- krippe	\dot{V}_W in l/min	HRR in kW	\dot{H}_W in kW	$\dot{V}_{W,HRR}$ in l/min
1	2	3	4	5	6
20	8A	39	560	1685	12,6
17	13A	39	1008	1685	23,4
15	2 x 8A	39	1232	1685	28,5
19	21A	39	1568	1685	36,6

In allen Versuchen mit Düse C ist die HRR des Brandes kleiner als der theoretische Verdampfungsenthalpiestrom, der sich aus der Anwendungsrate ergibt (Gl. 5.2). Dies bedeutet eine Brandlöschung, die sich durch die Versuche bis zur Krippengröße 21A bestätigte.

5.3 Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Bewertung mobiler Hochdrucklöschtechnik skizziert. Das Verfahren basiert auf der experimentellen Bestimmung der HRR und des benötigten Löschwasservolumenstroms. Es war nicht möglich, die HRR über die Sauerstoffverbrauchsmethode zu bestimmen. Deshalb wurde auf einen international üblichen theoretischen Ansatz zurückgegriffen. Es wurde ein Ratingverfahren genutzt, das auf der DIN EN 3 und der alten schwedischen Handfeuerlöschnorm **[SS 1192]** basiert.

Die Methode wurde für Freibrände der Klasse A, die ein wesentliches Einsatzgebiet der mobilen Hochdrucktechnik darstellen, in einer Messapparatur getestet. Neben der Bestimmung der HRR und des Löschwasservolumenstroms machte es sich erforderlich, die Wärmestrahlungsstromdichte zu messen sowie Videoauswertungen und Infrarotaufnahmen zur Beurteilung des Löschprozesses vorzunehmen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Das Verfahren ist zur Einschätzung der Löschleistung von mobiler Hochdrucklöschtechnik für Brände der Klasse A im Freien anwendbar.
- Die Messung der Wärmestrahlung außerhalb der Konvektionssäule des Brandes ist eine Alternative zur Ermittlung der HRR über die Sauerstoffverbrauchsmethode. Als physikalische Größe kann die Wärmestrahlungsstromdichte den Löscherfolg widerspiegeln.
- Video- und Infrarotauswertungen sind notwendige Ergänzungen.
- Mit dem AFF kann die Löschwirkung von mobiler Hochdrucklöschtechnik zurzeit bis zu Brandlasten von ca. 1,6 MW ermittelt werden, die der HRR einer Normholzkrippe 21A entsprechen.
- Die verwendete Apparatur muss für die Aufnahme größerer Normholzkrippen erweitert werden, um auch Geräte mit Volumenströmen größer als 30 l/min beurteilen zu können.

Empfehlungen zur Durchführung eines Ratingverfahrens zur Bewertung von Hochdrucklöschtechnik:

1. Wähle aus den Herstellerangaben und dem Sprühbild die Löschentfernung. Die Löschröhrentfernung sollte so gewählt werden, dass die Strahlbreite die Breite der Krippe bedeckt.
2. Die Strahlausrichtung erfolgt mittig auf die Breite der Holzkrippe nach DIN EN 3.
3. Bestimme aus dem gelieferten Löschwasservolumenstrom die Energieaufnahmefähigkeit des Wassers.
4. Bestimme die aufzunehmende Energiefreisetzungsrate der Brandobjekte nach DIN EN 3.
5. Wähle die sich daraus ergebende Normholzkrippe nach DIN EN 3.
6. Führe den Löschtest analog der Ratingversuche, wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben, durch.
Führe die Ratingversuche mit größer werdenden Krippen so lange durch, bis der Löscherfolg ausbleibt.
Wird beim ersten Löschtest nicht gelöscht, werden die Löschtests mit kleineren Krippen nach DIN EN 3 durchgeführt, bis der Löscherfolg eintritt.

Literatur

[Arvidson and Hertzberg 04]

Arvidson, M.; Hertzberg, T.: New Methodology to Evaluate the Performance of Total Compartment Water Mist and Water Spray Systems. SP Swedish National Testing and Research Institute, Boras, Sweden. International Interflam Conference, 10th Proceedings. Volume 2, 847-855 p., July 5-7, 2004.

[Chow and Li 02-03]

W. K. Chow, Y. F. Li: A Review on Studying Extinguishing Room Fires by Water Mist, Journal of Applied Fire Science, 11(4), pp. 367-403, 2002-2003

[DIN 05]

DIN 14010-2005-10 (D): Angaben zur statistischen Erfassung von Bränden

[DIN 07]

DIN EN 3-7, „Tragbare Feuerlöscher – Teil 7: Eigenschaften, Leistungsanforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung“ (2007)

[DIN 10]

DIN EN 15182-2, „Strahlrohre für die Brandbekämpfung: Hohlstrahlrohre PN 16; Deutsche Fassung“ (2010)

[DIN 15]

DIN EN 12845, „Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Automatische Sprinkleranlagen – Planung, Installation und Instandhaltung; Deutsche Fassung“ (2015)

DIN CEN/TS 14972, „Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Feinsprüh-Löschanlagen Planung und Einbau; Deutsche Fassung“ (2011)

[Drysdale 85]

Drysdale, D.: An Introduction to Fire Dynamics, ISBN 0 471 90613 1, Copyright © 1985 by John Wiley&Sons Ltd.

[EUROFEU-POSITIONSPAPIER 04]

EUROFEU – POSITIONSPAPIER ZUM THEMA WASSERNEBEL IN DER BRANDBEKÄMPFUNG, bvfa e.V. , D-97070 Würzburg, Germany, www.bvfa.de, Version 1 29-09-04

[Gordin 06]

Stefan Gordin (V): High Pressure Water Mist - The modern approach in fire fighting [J]. Transactions – Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2006, v113: 182-192

[Grant et al. 00]

Grant, G.; Brenton, J.; Drysdale, D.: Fire suppression by water sprays, Progress in Energy and Combustion Science 26 (2000) 79–130

[Gressmann 05]

Gressmann, H.-J.: Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz für Architekten, Bauingenieure und Feuerwehringenieure, Expert-Verlag, Renningen, 2005

[Herterich 60]

Herterich, O.: „Wasser als Löschmittel“, Dr. A. Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg (1960)

[Husted 04]

Husted, B., P.: The physics behind water mist systems, Proc. IWMA conference 2004, 6-8 October 2004, Rome, Italy

[Klaus et al. 95]

J. Klaus, K.-J. Kohl, M. Kutz: Rechnerisch/experimentelle Untersuchungen zur Erfassung des Einflusses von Maßnahmen zur Verhinderung der Brandausbreitung und zur Brandbekämpfung auf die Brandraumtemperaturentwicklung bei Naturbränden, Projekt 224 Studiengesellschaft für Stahlanwendung e.V., © 1995 Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf

[Kohl and Pleß 07]

Kohl, K.-J.; Pleß, G.: Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil I - Literaturstudie, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Forschungsbericht Nr. 147, Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, FA-Nr. 54 (4/2006) - H, ISSN 0170-0060, Heyrothsberge, 2007

[Kunkelmann 07]

Kunkelmann, J.: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse´. Teil 1: Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im Holztreppenraum (ohne und mit Windeinfluss auf einen natürlichen Rauchabzug). Vergleich mit Niederdruck-Wassernebel und Sprinkler, Forschungsbericht Nr. 143, Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, FA. Nr. 197 (3/2005), ISSN 0170-0060, Karlsruhe, 2007

[Kunkelmann 10]

Kunkelmann, J.: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse´. Teil 2: Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m²- Brandraum, Auslöseverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen, Vergleich der Löschwirkung von Nieder- und Hochdruck-Wassernebel, Forschungsbericht Nr. 144, Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, FA. Nr. 201 (3/2006), ISSN 0170-0060, Karlsruhe, 2010

[Kutz and 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, Heyrothsberge 2012

[Liu and Kim 00]

Liu, Z.; Kim, A. K.: "A Review of Water Mist Fire Suppression Systems –Fundamental Studies," J. of Fire Protection Engineering, 10 (3), 2000, pp 32-50

[Liu and Kim 01]

Liu, Z. G.; Kim, A. K.: A Review of water mist fire suppression technology: Part II - Application studies, NRCC-44209, A version of this paper is published in / Une version de ce document se trouve dans : Journal of Fire Protection Engineering, v. 11, no. 1, Feb. 2001, pp. 16-42, www.nrc.ca/irc/ircpubs

[Liu et al. 07]

Liu, Z.; Kim, A. K., Carpenter, D.: A study of portable water mist fire extinguishers used for extinguishment of multiple fire types, Fire Safety Journal 42 (2007) 25–42

[Mawhinney 94]

Mawhinney, J. R.: Water Mist Suppression Systems May Solve an Array of Fire Protection Problems, NFPA Journal May/June 1994 pp. 46-57

[McCartet and Broido 65]

McCartet, J. R.; Broido, A.: Radiative and Convective Energy from Wood Crib Fires, Pyrodynamics 2(1965) pp 65-80

[Otte 16]

Otte, F.: Entwicklung einer Messmethodik zur Einschätzung von Wasserlöschstrahlen im Feuerwehreinsatz, Bachelorarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Magdeburg 2016

[Pleß and Seliger 94]

Pleß, G.; Seliger, U.: Untersuchung der Löschwirkung des Hochdrucklöschgerätes HDL 250 an Normbrandobjekten 13 A (Hochdrucknebel) und 144 B (Sprühschaum), Institutsbericht Nr. 323, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1994

[Rasbash 86]

Rasbash, D. J., 1986. The Extinction of Fire with Plain Water: A Review. Fire Safety Science 1: 1145-1163. doi: 10.3801/IAFSS.FSS

[Santangelo and Tartarini 10]

Paolo E. Santangelo and Paolo Tartarini: Fire Control and Suppression by Water-Mist Systems, The Open Thermodynamics Journal, 2010, 4, 167-184

[Särdqvist 96]

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

[SS 1192]

SVENSK STANDARD SS 1192, 1985 Svenske Standard Fire Fighting Equipment

[Starke 01]

Starke, H.: Kriterien und deren experimentelle Bereitstellung zur Einschätzung der Eignung von Hochdrucklöschverfahren für den mobilen Feuerwehreinsatz, Forschungsbericht Nr. 128, Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, FA. Nr. 30 (1/2000)H, ISSN 0170-0060, Heyrothsberge, 2001

[Tanner and Knasiak 07]

Geoff Tanner, Keith F. Knasiak : Spray Characterization of Typical Fire Suppression Nozzles As Presented at the Third International Water Mist Conference, Madrid, Spain, September 22-24, 2003

[Wighus 91]

Wighus, R., 1991: Extinguishment of Enclosed Gas Fires with Water Spray. Fire Safety Science 3: 997-1006. doi 10.3801/IAFSS.FSS.3-997

[Wighus 10]

Wighus, R.: Parameters Advances in water mist technology, International Water Mist Conference Prague 2010

[Wighus 12a]

Wighus, R.: Parameters influencing upon the heat load on hydrocarbon fires, Sintef Report No. NBL A12108, ISBN-978-82-14-00098-6

[Wighus 12b]

Wighus, R.: Mathematicla Correlations for Fire Suppression, Sintef Report No. NBL A12111, ISBN-978-82-14-00101-3

Anhang A Sprühbilduntersuchungen

Inhalt

	Verzeichnis der Bilder	A-1
	Verzeichnis der Tabellen	A-2
A1	Sprühbilduntersuchungen mittels PDA	A-3
A1	Messprinzip	A-3
A2	Bedingungen und Einschränkungen	A-3
A3	Gemittelte Tropfengrößenparameter	A-4
A4	Versuchsaufbau	A-4
A5	Messwerte der mittleren Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten	A-7

Verzeichnis der Bilder

A4.1	Versuchsaufbau bei PDA-Messungen des Sprühstrahles im Nasslabor	A-5
A4.2	Sprühstrahl der verschiedenen Löschdüsen im Brandversuch	A-5
A4.3	Lage der Messquerschnitte für die PDA-Messungen	A-6
A4.4	Lage der Messpunkte in den Messquerschnitten für die PDA-Messungen	A-6
A5.1	Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der horizontalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse A (20 l/min)	A-7
A5.2	Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der vertikalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse A (20 l/min)	A-7
A5.3	Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der horizontalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse B (30 l/min)	A-8
A5.4	Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der vertikalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse B (30 l/min)	A-8
A5.5	Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der horizontalen Mittelachse im Messquerschnitt in 4,3 m Entfernung für Düse C (39 l/min)	A-9
A5.6	Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt in 4,3 m Entfernung für Düse C (39 l/min)	A-9

A5.7	Verteilung des Sauterdurchmessers entlang der horizontalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C	A-10
A5.8	Verteilung des Sauterdurchmessers entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C	A-11
A5.9	Verteilung der mittleren Tropfengeschwindigkeit entlang der horizontalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C	A-11
A5.10	Verteilung der mittleren Tropfengeschwindigkeit entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-	A-12
A5.11	Verteilung des Sauterdurchmessers entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt I für die Düsen A und B	A-13
A5.12	Verteilung der mittleren Tropfengeschwindigkeit entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt I für die Düsen A und B	A-13

Verzeichnis der Tabellen

A3.1	Zusammenstellung der Berechnungsmethoden und Einsatzgebiete [Starke 96]	A-4
A5.1	PDPA-Messprotokoll Düse A Messebene I	A-15
A5.2	PDPA-Messprotokoll Düse A Messebene II	A-16
A5.3	PDPA-Messprotokoll Düse B Messebene I	A-17
A5.4	PDPA-Messprotokoll Düse B Messebene II	A-18
A5.5	PDPA-Messprotokoll Düse C Messebene II ($X=0$)	A-19
A5.6	PDPA-Messprotokoll Düse C Messebene II ($Y=0$)	A-20

A Sprühbilduntersuchungen mittels PDA

Die verwendeten Hochdrucklöschsysteme unterscheiden sich nicht nur im Wasservolumenstrom, sondern auch im Sprühbild. Für die Brandlöschung ist letztendlich ausschlaggebend wie viel Wasser löschwirksam aufgebracht wird. Dazu wurden PDA-Messungen zur Ermittlung des Sprühbildes der drei verwendeten Düsen im Nasslabor des IBK vorgenommen. Das PDA-Messverfahren stellt eine Möglichkeit dar, die wichtigen Parameter Tropfengeschwindigkeit und Tropfengröße im freien Tropfenstrom zu bestimmen und statistisch zu erfassen.

A1 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.

A2 Bedingungen und Einschränkungen

Ein-Komponenten-Messung:

Gegenüber komplett ausgestatteter 3D-PDA-Messanlagen ist der Messplatz des IBK nur auf die Messung einer Geschwindigkeitskomponente ausgerichtet.

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. Die Parameter des Erfassungssystems sind 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.

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.

A3 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]. Häufig wird der mittlere Sauterdurchmesser D_{32} zur Beschreibung der Tropfensprays verwendet. Beim Sauterdurchmesser werden Volumen und Oberfläche aller Tropfen des Sprays ins Verhältnis gesetzt, womit er Auskunft über die Stoffaustauschflächen gibt und besonders zur Beschreibung von Stoff- und Wärmeübergangsprozessen geeignet ist. Andere Durchmesser, die zur Beschreibung der Verteilung der Tropfengrößen innerhalb des Sprays dienen, sind der D_{V10} , der D_{V50} oder D_{V90} . Häufig verwendete Durchmesser sind der mittlere Längendurchmesser D_{10} , der mittlere Oberflächendurchmesser D_{20} und der mittlere Volumendurchmesser D_{30} . Für die Betrachtung von Löschprozessen wird im Allgemeinen der sogenannte Sauterdurchmesser (D_{32}) herangezogen.

Tabelle A3.1: Zusammenstellung der Berechnungsmethoden und Einsatzgebiete [Starke 96]

a	b	a+b Ordnung	Symbol	Name des Durchmessermittels	Anwendungsgebiet
1	0	1	D_{10}	Längendurchmesser	Vergleich
2	0	2	D_{20}	Oberflächendurchmesser	Oberflächensteuerung
3	0	3	D_{30}	Volumendurchmesser	Volumensteuerung
2	1	3	D_{21}	Oberflächen-Längen- durchmesser	Absorption
3	1	4	D_{31}	Volumen-Längen- durchmesser	Verdampfung, molekulare Diffusion
3	2	5	D_{32}	Sauterdurchmesser	Massentransfer, Reaktion
4	3	6	D_{43}	De Brouckere- oder Herdandurchmesser	Verbrennungsgleichgewicht

A4 Versuchsaufbau

Es wurden PDA-Messungen bei horizontaler Ausbreitung des Sprühstrahles für die drei getesteten Hochdrucklöschsysteme vorgenommen. In diesen Nassversuchen ohne Brandbeeinflussung wurden dieselben Betriebsparameter der Löschsysteme wie in den Brandversuchen verwendet. Die Messungen wurden in zwei Messebenen durchgeführt, von denen sich eine in 1 m Entfernung von der Düse befand und die andere in genau dem Abstand, der im Brandversuch zwischen Düsenöffnung und Vorderkante der Holzkrippe vorhanden war.

Bild A4.1 zeigt den Versuchsaufbau mit einer fest eingespannten Löschdüse während einer Messung des horizontal strömenden Sprühstrahls. Die optische Bank mit dem Laser und der Empfangsoptik ist vertikal und horizontal verfahrbar. Mit der Verfahreinrichtung wird die Position des Messpunktes radial und axial zur Sprühstrahlachse eingestellt.

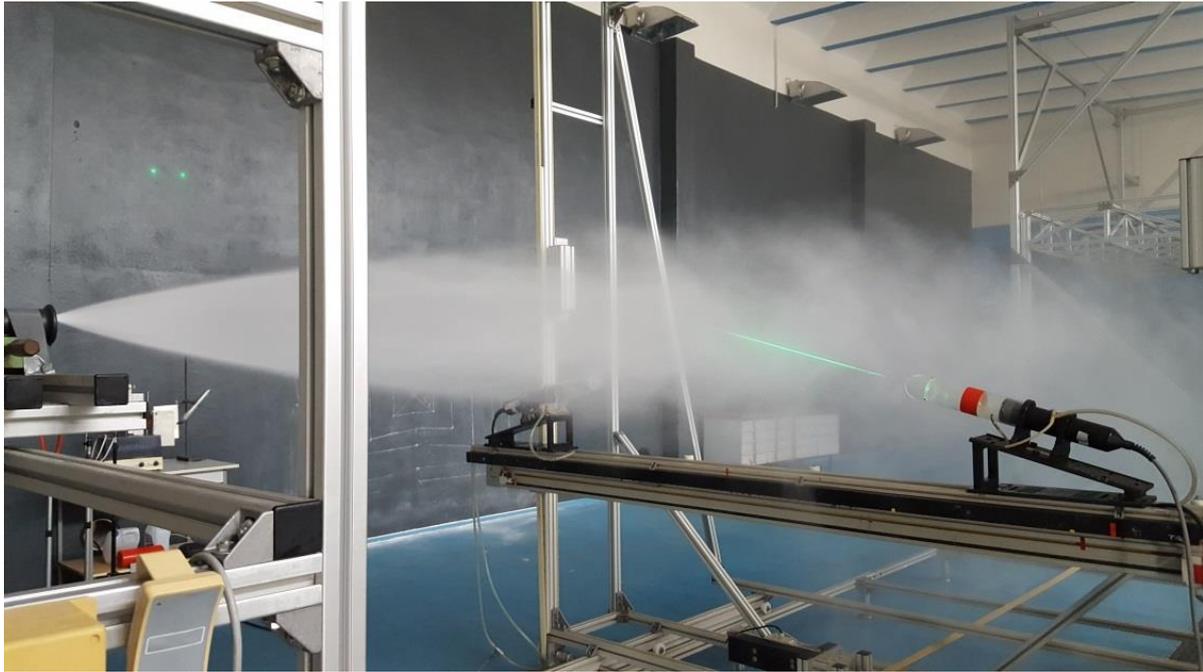


Bild A4.1: Versuchsaufbau bei PDA-Messungen des Sprühstrahles im Nasslabor

Für die Hochdrucklöschdüsen A (20 l/min) und B (30 l/min) wurden PDA-Messungen im Querschnitt in 2,3 m Entfernung von der Düsenmündung durchgeführt. Bei Verwendung der Düse C mit dem Volumenstrom von 39 l/min wurde wie in den Brandversuchen ein Abstand von 4,3 m zwischen Düsenmündung und Messebene gewählt. Die Wahl des größeren Abstandes wurde aufgrund des stark inhomogenen Sprühbildes von Löschdüse C in 2,3 m Entfernung getroffen, das im Vergleich zu den Düsen A und B sehr große Tropfen in Strahlmitte aufweist. Erst bei größerem Abstand der Düse C hat sich im gesamten Querschnitt ein aus Tropfen bestehender polydisperser Sprühstrahl gebildet, so dass anhand der PDA-Messungen statistische Aussagen abgeleitet werden können.



Düse A



Düse B



Düse C

Bild A4.2: Sprühstrahl der verschiedenen Löschdüsen im Brandversuch

Eine Gegenüberstellung der visuellen Aufnahmen der Sprühbilder der verschiedenen Düsen im Brandversuch ist in Bild A4.2 festgehalten. Es zeigt das Sprühbild bis zum Auftreffen auf die Oberfläche der Normholzkrippe 8A. In derselben Entfernung befindet sich der Messquerschnitt II für die PDA-Messungen in den Nassversuchen. Die Lage der Messquerschnitte ist in Bild A4.3 skizziert.

Die Messpunkte in den Messquerschnitten liegen auf der horizontalen und vertikalen Achse durch die Strahlmitte, dargestellt in Bild A4.4. Die Position der Messpunkte wurde in Abhängigkeit vom Strahldurchmesser definiert. Weitere PDA-Messungen erfolgten im Sprühstrahlquerschnitt in 1 Meter Entfernung von der Düsenmündung. Mit den dort gemessenen Werten der Tropfenverteilung kann ein Vergleich mit anderen Wassernebelanlagen hergestellt werden. In der NFPA 750 werden zur Beschreibung der Tropfenverteilungen von Wassernebelunterdrückungsanlagen die Messpunkte für PDA-Messungen im Abstand von 1 Meter verlangt.

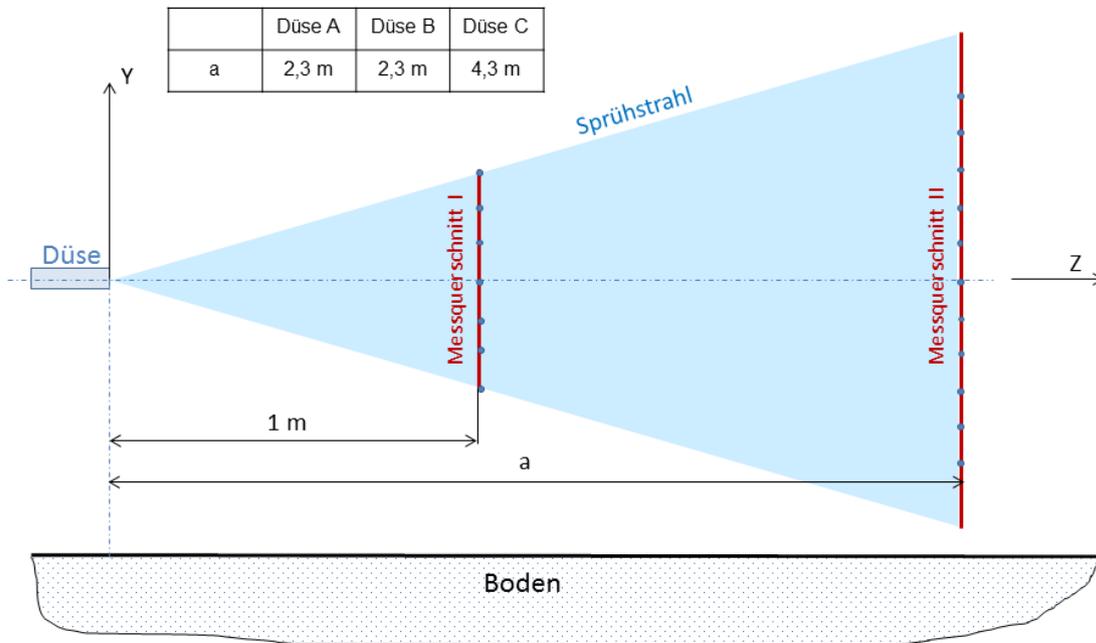


Bild A4.3: Lage der Messquerschnitte für die PDA-Messungen

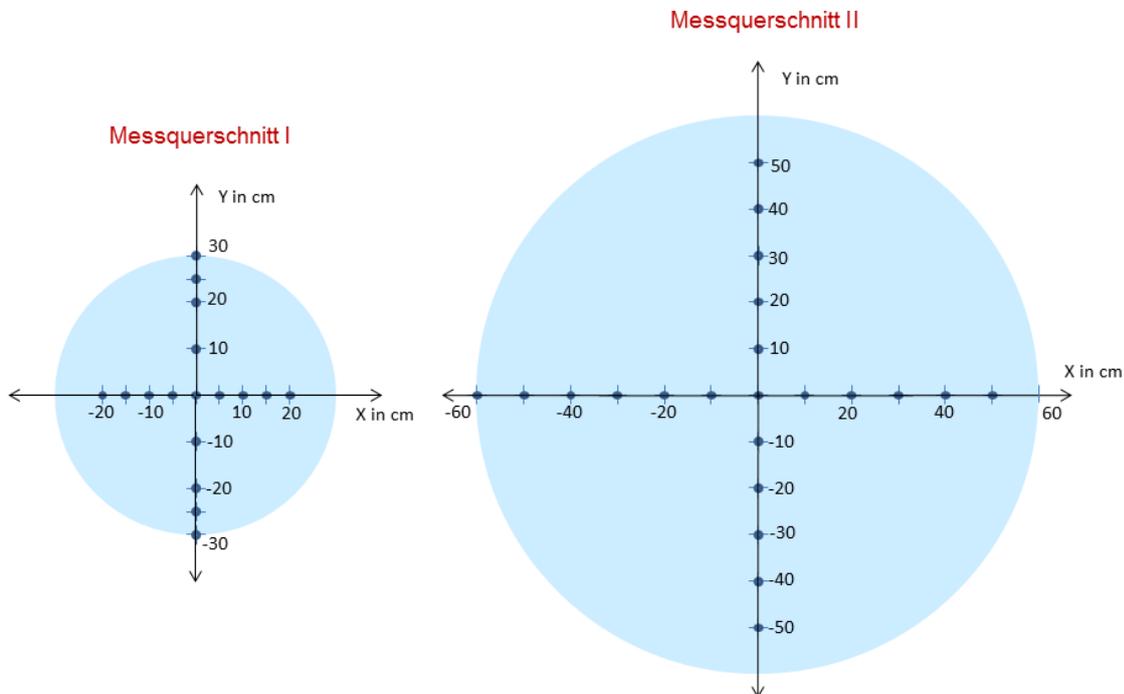


Bild A4.4: Lage der Messpunkte in den Messquerschnitten für die PDA-Messungen

A5 Messwerte der mittleren Tropfengrößen und Tropfengeschwindigkeiten

Die Messprotokolle der PDA-Messungen für alle drei Düsen sind in den Tabellen A5.1 bis A5.6 (Seiten A-15 bis A-20) angefügt. Als Messwerte sind darin die mittlere Tropfengeschwindigkeit und als gemittelte Tropfengrößenparameter der Längendurchmesser D_{10} , der Oberflächendurchmesser D_{20} , der Volumendurchmesser D_{30} und der Sauterdurchmesser D_{32} aufgeführt. Grafische Darstellungen von Sauterdurchmesser und mittlerer Tropfengeschwindigkeit in den Messebenen entlang der horizontalen und vertikalen Mittelachse für die verschiedenen Düsen zeigen nachfolgend die Bilder A5.1 bis A5.6.

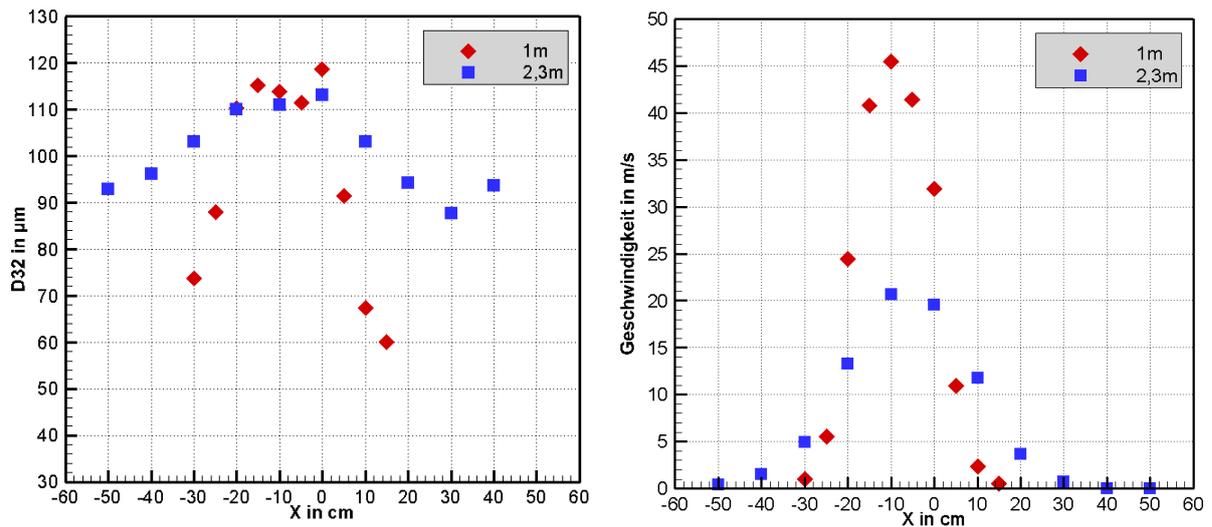


Bild A5.1: Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der horizontalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse A (20 l/min)

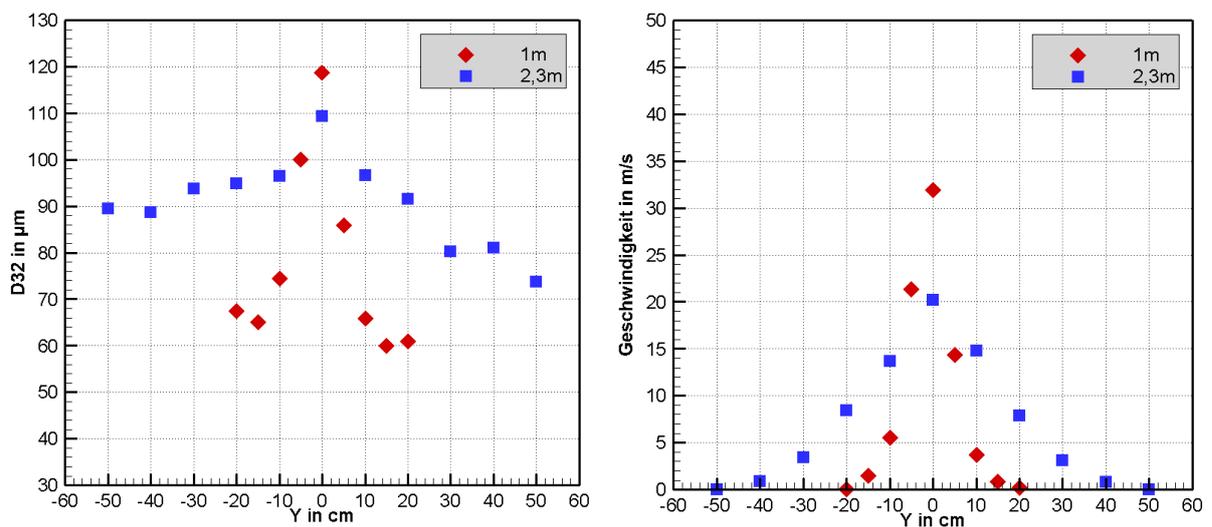


Bild A5.2: Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der vertikalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse A (20 l/min)

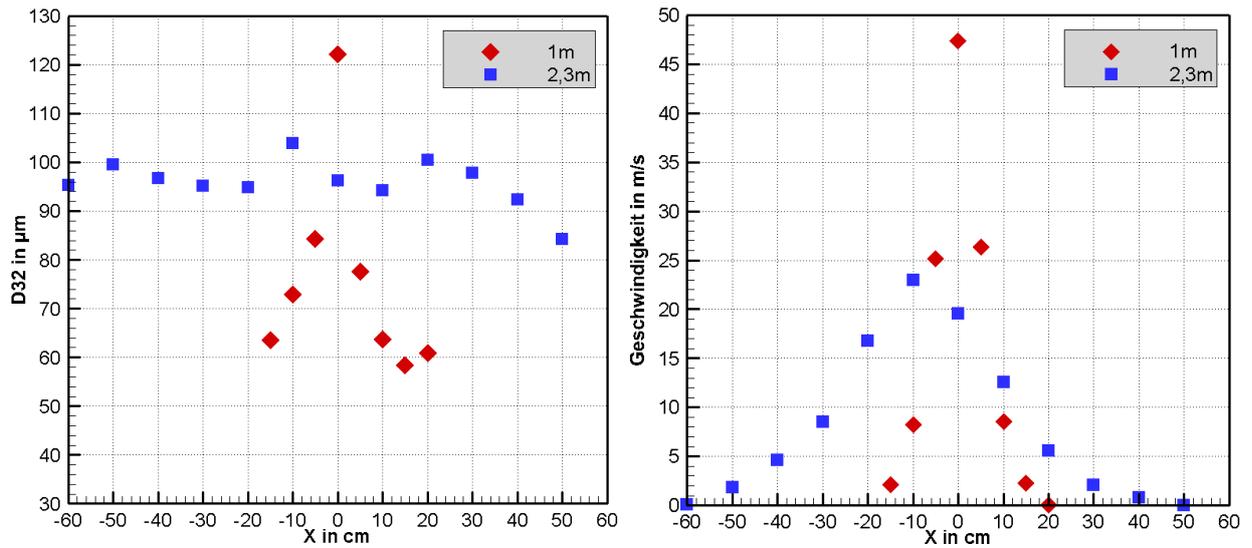


Bild A5.3: Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der horizontalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse B (30 l/min)

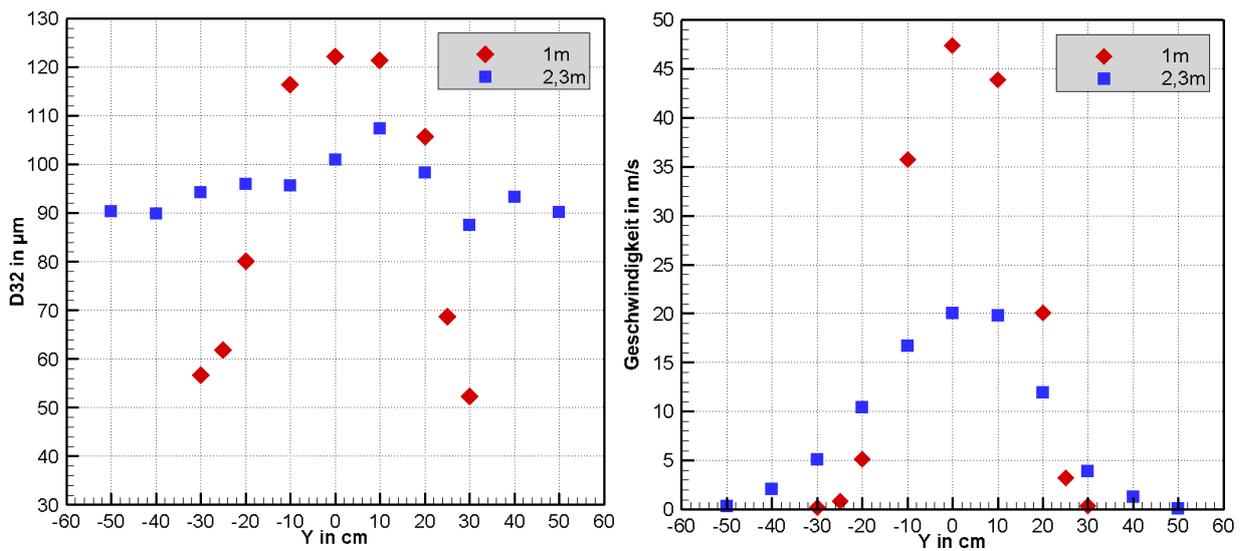


Bild A5.4: Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der vertikalen Mittelachse in den Messquerschnitten in 1 m und 2,3 m Entfernung für Düse B (30 l/min)

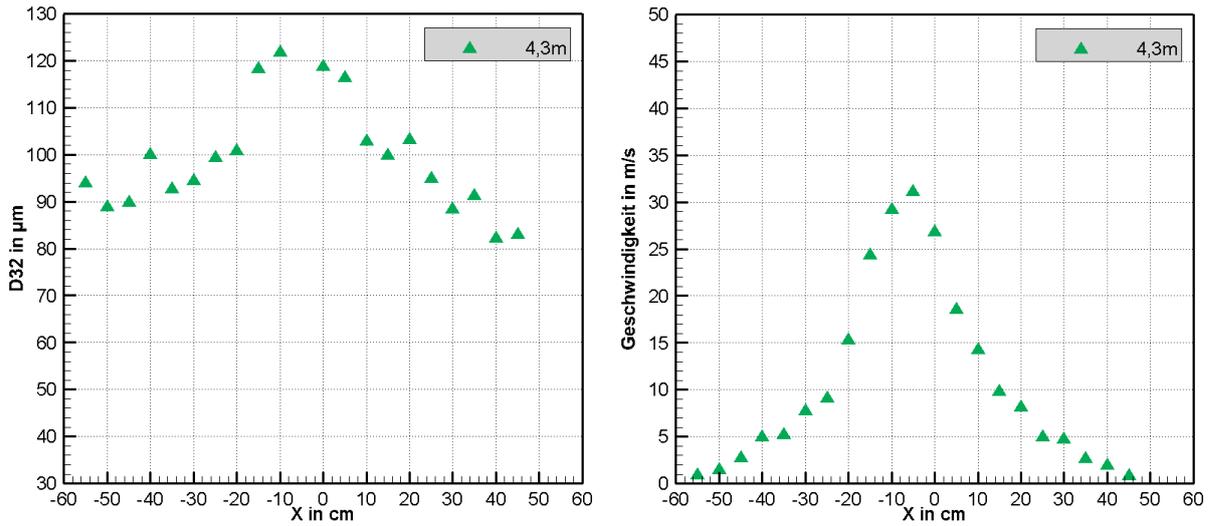


Bild A5.5: Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der horizontalen Mittelachse im Messquerschnitt in 4,3 m Entfernung für Düse C (39 l/min)

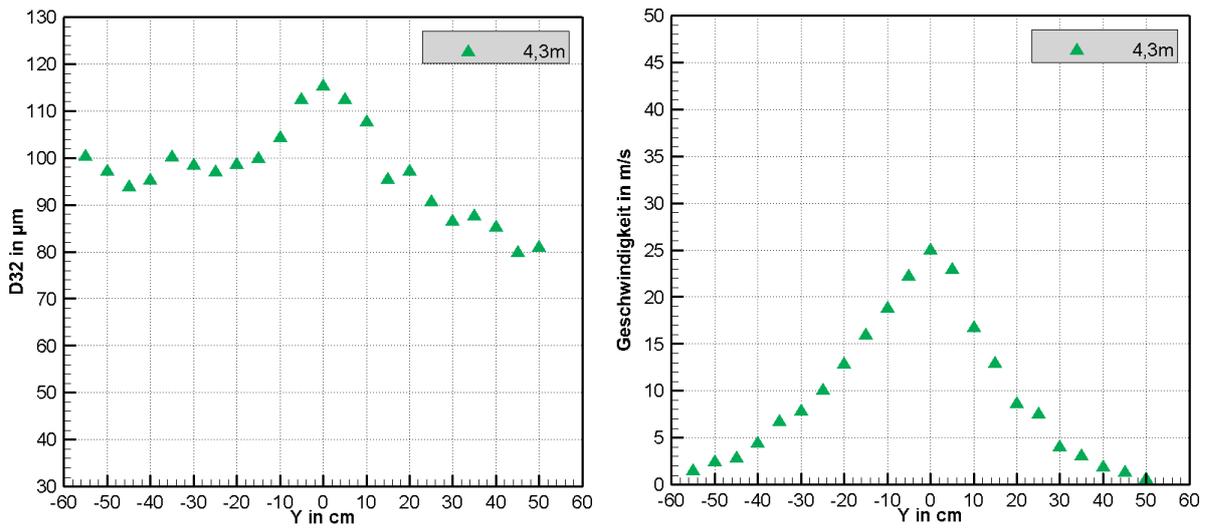


Bild A5.6: Verteilung des Sauterdurchmessers (links) und der mittleren Tropfengeschwindigkeit (rechts) entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt in 4,3 m Entfernung für Düse C (39 l/min)

Die Diagramme in den Bildern A5.7 bis A5.12 zeigen eine Gegenüberstellung der Tropfenverteilungen und der mittleren Tropfengeschwindigkeit der verschiedenen Düsen im Messquerschnitt II sowie der Düsen A und B im Messquerschnitt I (in 1 m Entfernung).

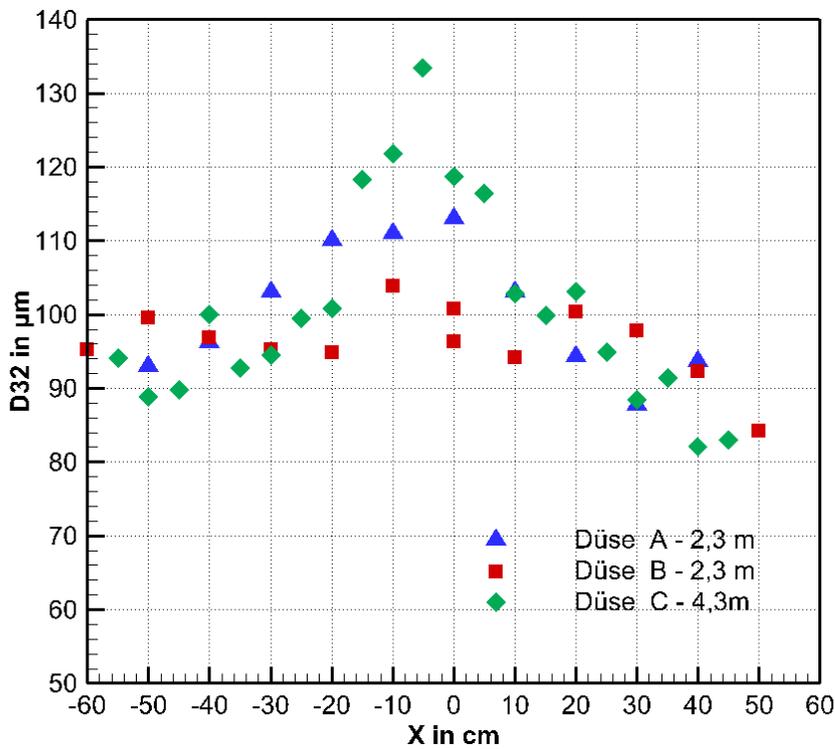


Bild A5.7: Verteilung des Sauterdurchmessers entlang der horizontalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C

Bereits die Gegenüberstellung der visuellen Aufnahmen der verschiedenen Düsen im Brandversuch in Bild A4.2 zeigte eine gleichmäßige Tropfengrößenverteilung für Düse B, die sich deutlich von denen der Düsen A und C unterschied, bei denen ein ausgeprägter Kernstrahl beobachtet wurde. Die PDA-Messwerte spiegeln das wider.

Die Maximalwerte der Tropfengrößen und Tropfendurchmesser wurden auf der Strahlachse gemessen. Nach außen hin, mit zunehmender X- und Y-Koordinate, sinken die Messwerte. Die entlang der X- und Y-Achse im Querschnitt ermittelten Messwerte weisen den Verlauf einer Glockenkurve auf. Für Düse C werden Tropfendurchmesser im Bereich von 80 μm bis 135 μm gemessen. Das sind die größten Tropfendurchmesser und größten Tropfengeschwindigkeiten. Im Vergleich dazu wurden bei der Düse B mittlere Sauterdurchmesser (D_{32}) im Bereich von 90 μm bis 100 μm über den gesamten Querschnitt gemessen. Diese relativ gute Gleichverteilung zeigt sich in einer sehr flachen Glockenkurve im Gegensatz zu der steil verlaufenden Glockenkurve bei Düse C.

Die für die X-Achse und Y-Achse ermittelten Messwerte, sowohl bei den Durchmessern als auch den Geschwindigkeiten stammen aus separaten Messversuchen, bei denen der Betriebsparameter Druck und die Düsenausrichtung und -arretierung neu eingestellt wurden. Daher sind die Messwerte im Koordinatenursprung bei $X=0$ und $Y=0$ nicht zwangsläufig identisch.

Die größten Tropfendurchmesser und größten Tropfengeschwindigkeiten werden mit Düse C im Messquerschnitt II erzielt. Bei den Düsen mit ausgeprägtem Kernstrahl (Düse A und C)

nehmen die Messwerte sehr schnell nach außen hin ab und zeigen damit den Verlauf einer steilen Glockenkurve. Bei Düse B, die eine gleichmäßigere Tropfengrößenverteilung aufweist, verläuft diese Glockenkurve sehr flach.

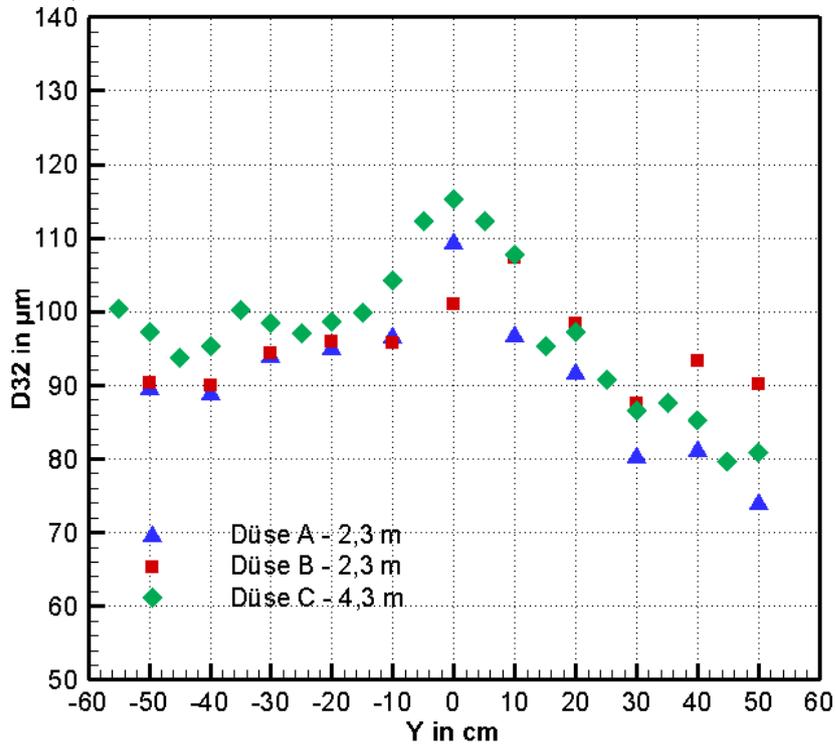


Bild A5.8: Verteilung des Sauterdurchmessers entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C

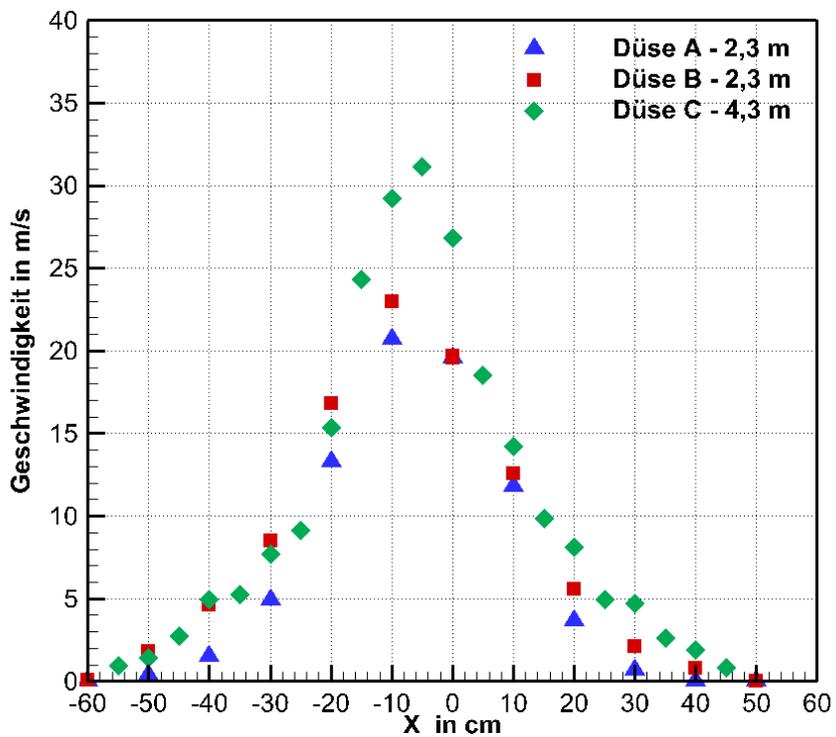


Bild A5.9: Verteilung der mittleren Tropfengeschwindigkeit entlang der horizontalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C

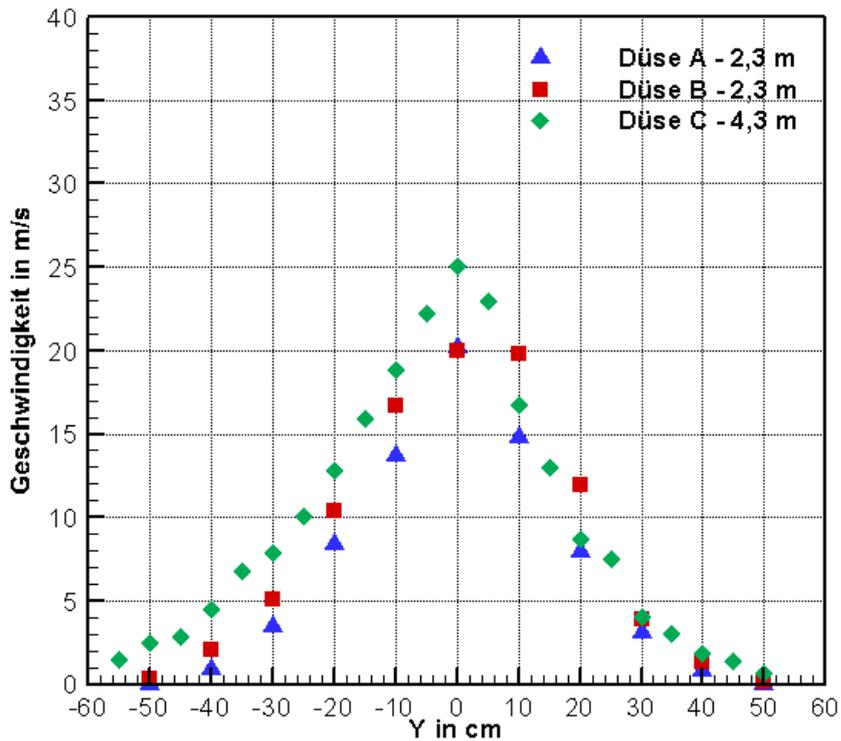


Bild A5.10: Verteilung der mittleren Tropfengeschwindigkeit entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt II für die Düsen A-C

Der Vergleich der Sauterdurchmesser in 1 m Entfernung von der Düse (Bild A5.11) spiegelt das unterschiedliche Sprühbild von Düse A und B wider. Mit Düse A werden nur in Strahlmitte punktuell Durchmesser größer als 100 μm gemessen, bei Düse B in einem weit größeren Bereich von ca. 40 cm Breite in der Strahlmitte. Maximalwerte des Sauterdurchmessers werden für beide Düsen mit ca. 120 μm ermittelt.

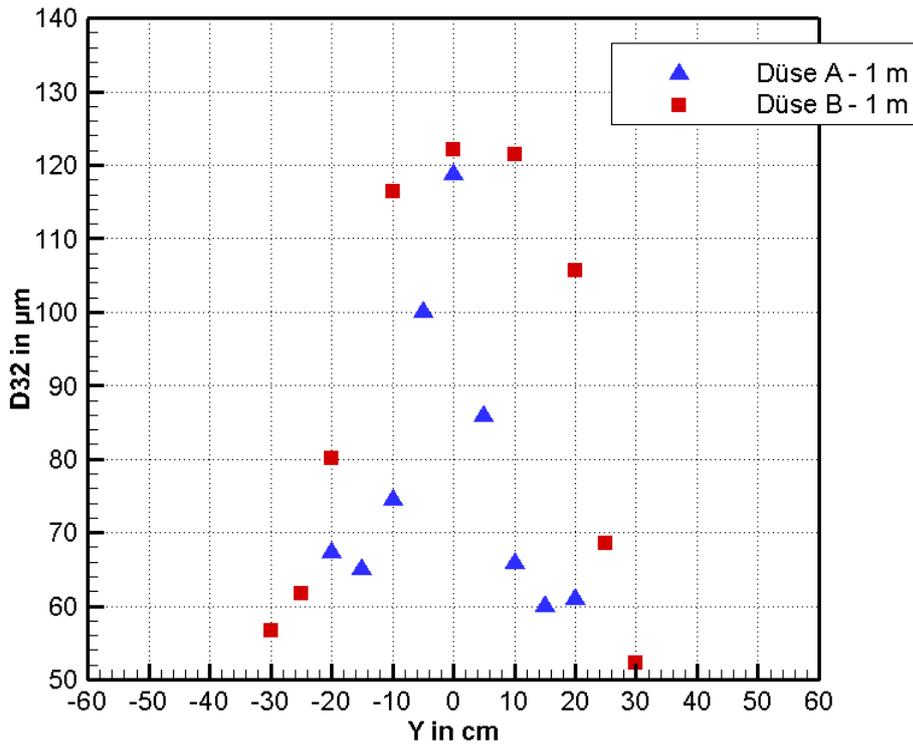


Bild A5.11: Verteilung des Sauterdurchmessers entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt I für die Düsen A und B

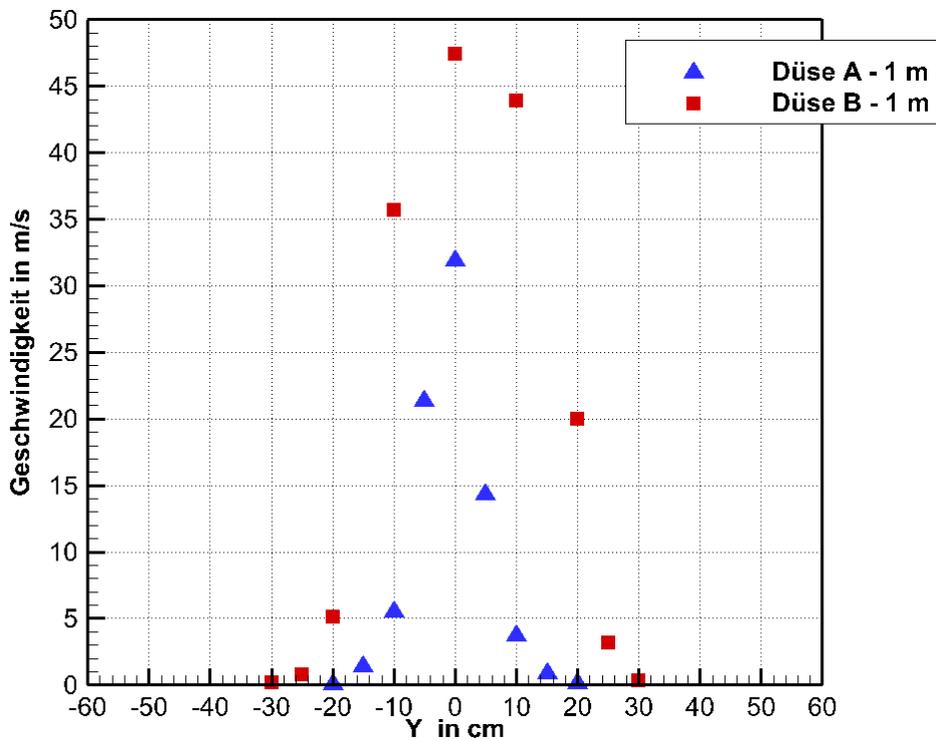


Bild A5.12: Verteilung der mittleren Tropfengeschwindigkeit entlang der vertikalen Mittelachse im Messquerschnitt I für die Düsen A und B

Die gemessenen Geschwindigkeiten, dargestellt in Bild A5.12, spiegeln ebenfalls die unterschiedliche Verteilung wider. Düse A zeigt den schmaleren Sprühstrahl mit der Maximalgeschwindigkeit von ca. 32 m/s auf der Sprühstrahlachse. Bei Düse B werden größere Geschwindigkeiten mit dem Maximalwert von 48 m/s auf der Strahlachse erzielt. Die Sprühstrahlausdehnung ist näherungsweise anhand des Abstandes, an dem die Geschwindigkeit sehr klein wird, erkennbar. Der Strahlquerschnitt weicht von der idealisierten kreisrunden Form ab. Die horizontale Ausdehnung ist geringer als die vertikale.

Literatur

[Lefebvre 89]

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

[Starke 96]

Starke, Horst; Wienecke, Friedrich; Grabski, Reinhard: Fein verteiltes Wasser als Volumen- und Oberflächenlöschmittel. Brandschutzforschung der Bundesländer – Bericht Nr. 98 - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, 1996

Tabelle A5.4: PDPA-Messprotokoll Düse B Messebene II

PDPA Messprotokoll IBK Abteilung Forschung										
Untersuchung Tropfenspektren										
Düsenbezeichnung: Düse B				Druck vor Düse / bar: -		Durchfluss / l/min: 32		Messabstand: 230 cm (1 x 100 cm)		
Dateibezeichnung: DÜSE B 230 XX YY				Druck nach Pumpe / bar: 180		-		Datum: 26.05. 2016		
Nr	Messposition		Teilchen	Rate	mittlerer korr. Durchmesser				mittl. Gesch.	Dateibezeichnung
	X/cm	Y/cm	Anz.	Freq. (kHz)	D10/µm	D20/µm	D30/µm	D32/µm	m/s	
1	0	0		3	83,5	87,8	92,0	100,8	19,7	DÜSE B 00 00
2	10	0		1,4	79,1	82,9	86,5	94,2	12,6	DÜSE B 10 00
3	20	0		0,6	84,9	88,8	92,4	100,4	5,6	DÜSE B 20 00
4	30	0		0,8	83,9	87,5	90,8	97,8	2,1	DÜSE B 30 00
5	40	0		0,3	79,4	82,8	85,9	92,3	0,8	DÜSE B 40 00
6	50	0		0,1	64,7	69,7	74,2	84,2	0	DÜSE B 50 00
7	0	0		1,9	81,2	85,1	88,7	96,3	19,6	DÜSE B w 00 00
8	-10	0		2,5	87,5	91,7	95,6	103,9	23,0	DÜSE B -10 00
9	-20	0		2,4	78,0	82,3	86,3	94,8	16,8	DÜSE B -20 00
10	-30	0		1,0	79,4	83,5	87,2	95,2	8,5	DÜSE B -30 00
11	-40	0		1,0	79,6	84,6	88,1	96,8	4,6	DÜSE B -40 00
12	-50	0		1,0	81,9	84,4	90,6	99,6	1,8	DÜSE B -50 00
13	-60	0		0,1	76,5	81,1	85,6	95,3	0,1	DÜSE B -60 00
14	0	0		2,0	83,0	87,4	91,7	101,0	20,0	DÜSE B ww 00 00
15	0	+10		1,8	88,9	93,5	97,9	107,3	19,8	DÜSE B 00 +10
16	0	+20		4,5	76,9	82,3	87,3	98,3	11,9	DÜSE B 00 +20
17	0	+30		3,7	65,9	71,2	76,3	87,5	3,9	DÜSE B 00 +30
18	0	+40		0,9	74,4	79,4	83,8	93,3	1,3	DÜSE B 00 +40
19	0	+50		0,01	63,9	70,7	76,7	90,2	0,1	DÜSE B 00 +50
20	0	-10		2,3	77,7	82,3	86,5	95,7	16,7	DÜSE B 00 -10
21	0	-20		4,0	75,9	80,9	85,6	95,9	10,4	DÜSE B 00 -20
22	0	-30		6,2	70,7	76,5	82,1	94,3	5,1	DÜSE B 00 -30
23	0	-40		5,5	-	-	-	89,9	2,1	DÜSE B 00 -40
24	0	-50		2,6	69,6	74,8	79,7	90,4	0,3	DÜSE B 00 -50
25	0	0	100 cm	1,8	88,3	95,2	103,0	120,7	46,3	DÜSE B 00 00 100cm

Anhang B Geometrie von Brandraum 3

Inhalt

	Verzeichnis der Bilder	B-1
B	Beschreibung der Brandraumgeometrie	B-2

Verzeichnis der Bilder

B1	Grundriss des Brandhauses auf dem AÜG	B-2
B2	Grundriss der Brandräume 3 und 4	B-2
B3	Südansicht der Brandräume 3 und 4	B-3
B4	Westansicht des Brandraumes 3	B-3

Die in Bild B2 an den Brandraumseiten eingezeichneten Gitterroste sind 650 mm breit, jedoch sind wegen der Verkleidung der Wände von oben nur ca. 400 mm sichtbar. Die Rauchabzugsöffnung für den Brandraum 3 befindet sich auf der Westseite kurz unterhalb der Decke und die für den Brandraum 4 auf der Südseite. Die eingezeichneten roten Rechtecke markieren die Lage der Abzugsöffnungen in den eingezogenen Zwischendecken.

Bild B3 zeigt die Südansicht der Brandräume 3 und 4 sowie den Messgang. Die Westansicht des Brandraumes 3 zeigt Bild B4.

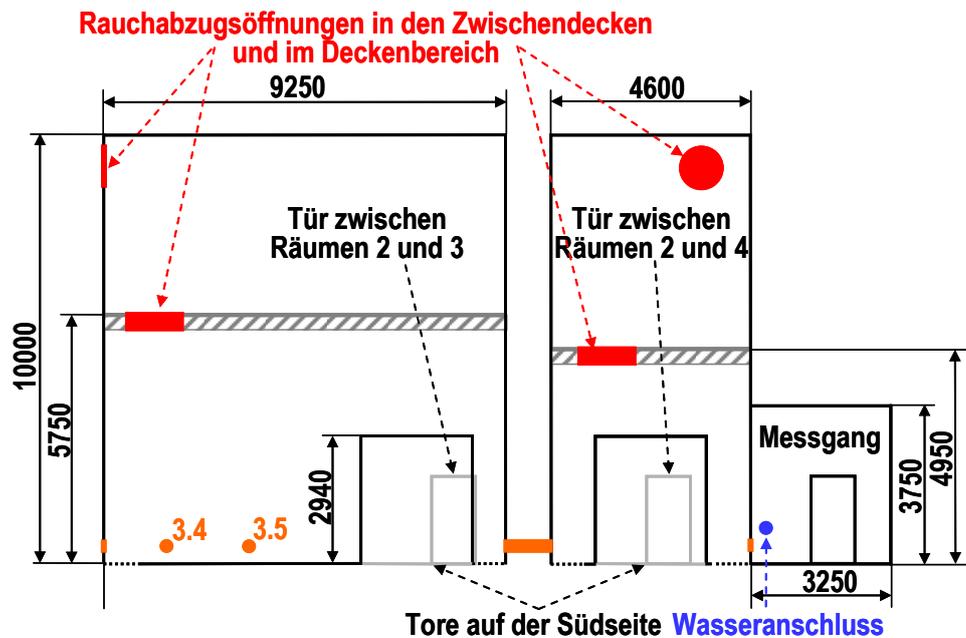


Bild B3: Südansicht der Brandräume 3 und 4

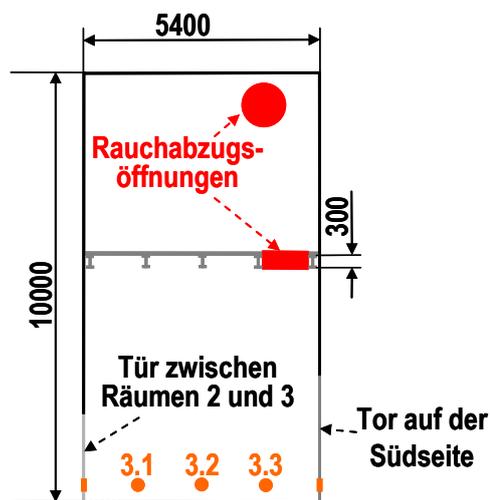


Bild B4: Westansicht des Brandraumes 3