

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

**Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den
Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in
ausgebauten Dachgeschossen**

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

169

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

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

Forschungsbericht Nr. 169

**Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den
Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in
ausgebauten Dachgeschossen**

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

April 2014

BERICHTSKENNBLATT

<p>Nummer des Berichtes:</p> <p style="text-align: center;">169</p>	<p>Titel des Berichtes: Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in ausgebauten Dachgeschossen</p>	<p>ISSN:</p> <p style="text-align: center;">0170-0060</p>	
<p>Autor:</p> <p style="text-align: center;">Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann</p>	<p>durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe</p>		
<p>Nummer des Auftrages: FA. Nr. 217 (2/2011)</p>	<p>auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung</p>		
<p>Abschlussdatum: April 2014</p>			
<p>Seitenzahl: 138</p>	<p>Bilder: 20</p>	<p>Tabellen: 13</p>	<p>Literaturverweise: 72</p>
<p>Kurzfassung:</p> <p>In der vorliegenden Arbeit werden die besonderen Problemstellungen bei ausgebauten Dachgeschossen im Hinblick auf den speziellen konstruktiven Aufbau, die Brand- und Rauchausbreitung, die Einsatztaktik und die Brandbekämpfung mit unterschiedlichen Löschmitteln dargestellt. Fenster und Ausstiege sind für die Feuerwehr über den zweiten Rettungsweg wegen der Dachschrägen zum Teil schwieriger zu erreichen als bei Normalgeschossen. Dies gilt insbesondere bei zwei- oder mehrgeschossig ausgebauten Dachgeschossen und Maisonette-Wohnungen. Die mechanisch widerstandsfähige Dachhaut bedeutet beim Entfernen eine Gefährdung für Einsatzkräfte. Der zunehmende Einsatz von dicken zum Teil auch brennbar klassifizierten Wärmedämmungen erschwert das Schaffen von Dachöffnungen. Hochwertige Zwei- und Dreifachverglasungen mit hoher Standzeit bei thermischer Belastung im Brandfall bilden auch im gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss für längere Zeit und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können bzw. begünstigen vermehrt Glimm- und Schwelbrände aufgrund von Sauerstoffmangel. Dies führt zu einer erhöhten Gefährdung durch Backdraft (Verpuffung mit Feuerball) und Rollover (Rauchdurchzündung ohne nennenswerten Druckaufbau). Bei ausreichendem Sauerstoffangebot ist in kurzer Zeit mit einem Flashover und nachfolgenden Vollbrand zu rechnen. Die Brandausbreitung bzw. –weiterleitung zwischen Räumen über Hohlräume (z.B. unter Dachschrägen, Ständerwände, Holzbalkendecken) unterhalb der Dachhaut kann oft wegen fehlender feuerwiderstandsfähiger trennender Bauteile und Anschlusspunkte nicht verhindert werden. Die Detailausbildung von Anschlusspunkten feuerwiderstandsfähiger trennender Bauteile ist in Dachgeschossen wesentlich schwieriger auszuführen als z.B. bei massiven Geschosstrenndecken.</p> <p>Bei der Brandbekämpfung ist der Einsatz unterschiedlicher Löschmittel wie reines Wasser oder Wasser mit Schaummittelzusatz in Form von Netzwasser oder Druckluftschaum üblich. Für eine effektive Brandbekämpfung, die sich aus Brandrauchkühlung beim Vorgehen der Feuerwehreinsatzkräfte und direkter Brandbekämpfung zusammensetzt, ist es erforderlich, dass das richtige Löschmittel mittels eines geeigneten Löschgerätes und unter Anwendung der korrekten Löschtechnik und geeigneter Taktik räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmt eingesetzt wird. Handelsübliche Mehrbereichsschaummittel und Class-A-Foam werden üblicherweise in Konzentrationen zwischen 0,5 und 1% zugesetzt und sind überwiegend in der Wassergefährdungsklasse WGK 2 eingeordnet. Von besonderem Interesse bei den Untersuchungen ist daher auch die Betrachtung der umweltrelevanten Gesichtspunkte beim Einsatz der unterschiedlichen Löschmittel.</p> <p>Weitere Kriterien zur Beurteilung der zur Brandbekämpfung eingesetzten Technik sind z.B. die Zuverlässigkeit und einfache Bedienbarkeit der Anlage, Anschaffungskosten, Wartungs- u. Reparaturkosten, gesicherte Ersatzteilversorgung über lange Zeiträume, Anfälligkeit der elektronischen Steuerungen z.B. gegen Überspannungen (Gewitter) oder geomagnetische Stürme, Schutz der elektronischen Steuerungen und Rechner gegen Schadprogramme.</p>			
<p>Schlagwörter: Dachgeschossausbau, Brandbekämpfung, Wasser, Schaumlöschmittel, Druckluftschaum(DLS, CAF), Netzwasser, Immediate Flame Knock Down, Umwelteigenschaften, Wassergefährdung</p>			

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	I
TABELLENVERZEICHNIS	III
1. VORWORT	1
2. AUSGEBaute DACHGESCHOSSE	3
2.1. Konstruktive Details und Bauordnung	3
2.2. Brände in ausgebauten Dachgeschossen – Gefährdungsbeurteilung im Vergleich mit Normalgeschossen	11
3. LÖSCHMITTEL UND LÖSCHTECHNIKEN	34
3.1. Löschmittel Wasser	34
3.2. Zusätze zum Löschmittel	44
3.2.1. Schaumlöschmittel zur Herstellung von Netzmittel / Netzwasser	46
3.2.2. Schaumlöschmittel zur Herstellung von Löschschaum	48
3.2.3. Druckluftschaum (DLS, CAF)	53
3.2.4. Brand- und Löschversuche mit DLS im Vergleich mit anderen Löschmitteln – weitere in- und ausländische Untersuchungen	76
3.2.5. Schaumlöschmittel – Umweltrelevante Gesichtspunkte	103
4. ZUSAMMENFASSUNG	112
5. LITERATURVERZEICHNIS	119

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1:</i> Gebäudeklassen nach Musterbauordnung ([MBO /2012/, /2/] sowie Feuertrutz Brandschutzatlas [Mayr und Battran /2013/, /15/]).	4
<i>Abbildung 2:</i> Ausgebautes Dachgeschoß ohne bauliche Brandschutzmaßnahmen. Schwachstellen: Brandausbreitung ist über die Wege 1 bis 10 möglich. [Mayr und Battran /2013/, /15/]	8
<i>Abbildung 3:</i> Feuerwiderstandsfähiger Dachausbau ohne Brandbrücken [Mayr und Battran /2013/, /15/]	8
<i>Abbildung 4:</i> Zeit bis zur Entstehung eines Flashovers [Kunkelmann /2003/, /6/]	20
<i>Abbildung 5:</i> Gefährdungen durch Brandrauch und Sauerstoffmangel bei Bränden [Kunkelmann /2003/, /6/]	21
<i>Abbildung 6:</i> Versuchseinrichtung zur Untersuchung von unterschiedlichen Fenstern mit realitätsnaher thermischer Belastung [Kunkelmann /2013/, /10/].	25
<i>Abbildung 7:</i> Die Löschwasser-Effizienz verschiedener Löschverfahren nach Angaben von DLS-Herstellern (die 5 Balken links im Diagramm) und nach Versuchsergebnissen der FFB (die 6 Balken rechts) [Föhl /2004/, /50/]	69
<i>Abbildung 8:</i> Lage des Wannenbrandes in der Versuchsanlage und Bewegung der Feuerwehreinsetzungskraft beim Löscheinsatz [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	79
<i>Abbildung 9:</i> Wurfweitenerhöhung des Löschmittelstrahles beim Öffnen des Strahlrohres bei nassem Druckluftschäum [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	80
<i>Abbildung 10:</i> Wurfweite des ausgebildeten stationären Löschmittelstrahles bei nassem Druckluftschäum [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	80
<i>Abbildung 11:</i> Beaufschlagung von vertikalen Flächen mit Druckluftschäum: Bild links: trockener Schäum, rechts: nasser Schäum [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	81
<i>Abbildung 12:</i> Beaufschlagung mit Druckluftschäum: Bild links: Nasser Schäum auf rauher Oberfläche, Bild rechts: auf glatter Oberfläche ein paar Minuten nach der Beaufschlagung [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	81
<i>Abbildung 13:</i> Angriffsweg der Feuerwehr [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	87
<i>Abbildung 14:</i> Treppenraum, Podest und Eingangstür in den Brandraum (Raum 2.) [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	87

-
- Abbildung 15:* Brandlast in den Räumen (2 Holzplatten, Zündquelle: 1 l Flüssig-Grillanzünder) [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] 88
- Abbildung 16:* Vergleich der Temperaturentwicklung der oberen (Höhe: 1,5 m) und mittleren (Höhe: 1,0 m) Temperaturmessstellen bei den brandlastgesteuerten Brandversuchen mit Einsatz von Wasserdampf und DLS [Zhang, J. et al. /2011/, /64/] 92
- Abbildung 17:* Vergleich der Temperaturverläufe bei den ventilationsgesteuerten Bränden ohne Löschmassnahmen (Brandszenarium 1) [Zhang, J. et al. /2011/, /64/] 93
- Abbildung 18:* Vergleich der Temperaturverläufe bei den ventilationsgesteuerten Bränden unter Einsatz von Wasserdampf (Brandszenarium 2) [Zhang, J. et al. /2011/, /64/] 94
- Abbildung 19:* Vergleich der Temperaturverläufe bei den ventilationsgesteuerten Bränden unter Einsatz von Druckluftschaum (Brandszenarium 3) [Zhang, J. et al. /2011/, /64/] 95
- Abbildung 20:* Bild links: Brandräume mit Flur (Bild links), Bild rechts: Brandlast (Holzkrippen und OSB Platte) [Kim und Crampton /2009/, /69/] 97

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Beispiele für die Zuordnung von Anforderungen an die Gebäudeklassen nach Musterbauordnung ([MBO /2012/, /2/ sowie Feuertrutz Brandschutzatlas [Mayr und Battran /2013/, /15/])	5
Tabelle 2-2: Anforderungen an notwendige Treppen und Treppenträume sowie Angaben zu Türen, Rauchableitung, Beleuchtung und Leitungsanlagen bei den verschiedenen Gebäudeklassen	7
Tabelle 2-3: Auswahl brennbarer Brandpyrolysegase im Brandrauch [Kunkelmann /2003/, /6/]	22
Tabelle 2-4: Versagenszeiten von unterschiedlichen Fenstern mit realitätsnaher thermischer Belastung [Kunkelmann /2013/, /10/]	26
Tabelle 2-5: Übersicht der Dämmstoffe für die Untersuchung des Schwel- und Glimmverhaltens in Anlehnung an den ULC-Test c723 nach [Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/]	30
Tabelle 3-1: Unterschied zwischen Turbinen- und Festkranz-Hohlstrahlrohr [Ebner /2010/, /29/]	37
Tabelle 3-2: Klassifizierung von Druckzumischanlagen (DZA) [DIN EN 16327 /2011/, /37/]	55
Tabelle 3-3: Klassifizierung von Druckluftschaumanlagen (DLS) [DIN EN 16327 /2011/, /37/]	56
Tabelle 3-4: Mittlere Änderung der Temperatur bei ausgewählten Temperaturmessketten pro Liter Wasser [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	83
Tabelle 3-5: Einsatzdauer und Gesamtlöschwassermenge für die beiden Versuche mit der Brandlast Holz [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]	89
Tabelle 3-6: Versuchsergebnisse [Kim und Crampton /2009/, /69/]	98
Tabelle 3-7: Versuchsergebnisse (Zahlenwerte nach Umrechnung von amerikanischen auf SI-Einheiten gerundet) [Cavette /2001/, /70/]	100
Tabelle 3-8: Übersicht über die Umwelteinflüsse verschiedener Schaummittelklassen [Prall /2014/, /44/]	109

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.

Die ausgewerteten in- und ausländischen Untersuchungen geben den Standpunkt und die Meinung der jeweiligen Autoren wieder und stellen nicht notwendigerweise den Standpunkt des Verfassers dieses Forschungsberichtes dar.

1. Vorwort

Der Antrag für das Forschungsprojekt erfolgte auf Grundlage eines im November 2009 durch die Feuerwehr Berlin an den TWB der vfdb e.V. gerichteten Vorschlags zur Untersuchung feuerwehreinsatzspezifischer Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Einsatz des Löschmittels Wasser und Wasser mit Zusätzen bei insbesondere in Trockenbauweise ausgebauten Dachgeschossen.

Der Projektvorschlag des Landes Berlin war mit der zusammenfassenden Überschrift „DLS im Einsatz zur Brandbekämpfung im „Trockenbau/Rigipseinsatz“ vor allem bei ausgebauten Dachgeschossen“ umschrieben worden.

Der Begleittext des Vorschlages ließ jedoch erkennen, dass eine Reihe weiterer im Zusammenhang damit stehender Fragestellungen mit dem Projekt abgehandelt werden sollte.

Untersucht werden die Einflüsse von Taktik und Vorgehensweisen in Verbindung mit dem jeweiligen Löschmittel und Löschtechnik und den zugrunde gelegten technischen Randbedingungen auf den Einsatzerfolg.

Weitere Fragestellungen ergeben sich bzgl. Löschwasserschäden und Abfließen kontaminierten Löschmittels im Gebäude und Freisetzung in die Umwelt.

Auch werden Erfahrungen der FFB im Brandschutz im Holzbau im Zusammenhang mit dem Einsatzerfolg der Feuerwehr, Fragen nach den Auswirkungen des Löscheinsetzes im Hinblick auf die Verminderung des akuten Brandschadens und der dauerhaften Schädigung der Konstruktion berücksichtigt. Infolge z.B. von Rissbildung oder auch Aufgehen von Fugen in Wand- und Deckenanschlüssen wird die Ausbreitung von Brandrauch und das Eindringen von Löschmittel in die Wand- und Deckenkonstruktionen begünstigt. Die eingebrachten Dämmstoffe werden aufgrund der Durchfeuchtung und des Eindringens von Brandrauch beschädigt und kontaminiert.

Diese Schädigungsformen können außer bei ausgebauten Dachgeschossen im Übrigen auch in Gebäuden des modernen Holzbaus (z. B. Holzständer- und Holztafelbauweise) vorkommen.

Die Musterbauordnung [MBO /2012/, /2/] fordert z.B. für den mehrgeschossigen Holzbau in Holztafel-, Holzrahmen- und Fachwerkbauweise, dass in Gebäudeklasse 4 (bis 13 m Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist) tragende, aussteifende und raumabschließende Teile aus Holz oder Holzwerkstoffen eine allseitig brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen aufweisen müssen (=> hochfeuerhemmende Bauteile).

Die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise [M-HFHolzR /2004/, /1/] konkretisiert hierbei die Anforderungen an die Bauteile für Gebäudeklasse 4:

Verhinderung

- des Brennens der tragenden und aussteifenden Holzkonstruktionen.
- der Einleitung von Feuer und Rauch in die Wand- und Deckenbauteile über Fugen, Installationen oder Einbauten sowie eine Brandausbreitung innerhalb dieser Bauteile.
- der Übertragung von Feuer und Rauch über Anschlussfugen von raumabschließenden Bauteilen in angrenzende Nutzungseinheiten oder Räume.

Erkenntnisse aus diesem Projekt könnten auch zur Verbesserung des Kulturgutschutzes bei Bränden im Zusammenhang mit „schonender“ Brandbekämpfung und erleichterter Schadenfolgenbehebung z.B. in Archiven und Museen Verwendung finden.

2. Ausgebaute Dachgeschosse

2.1. Konstruktive Details und Bauordnung

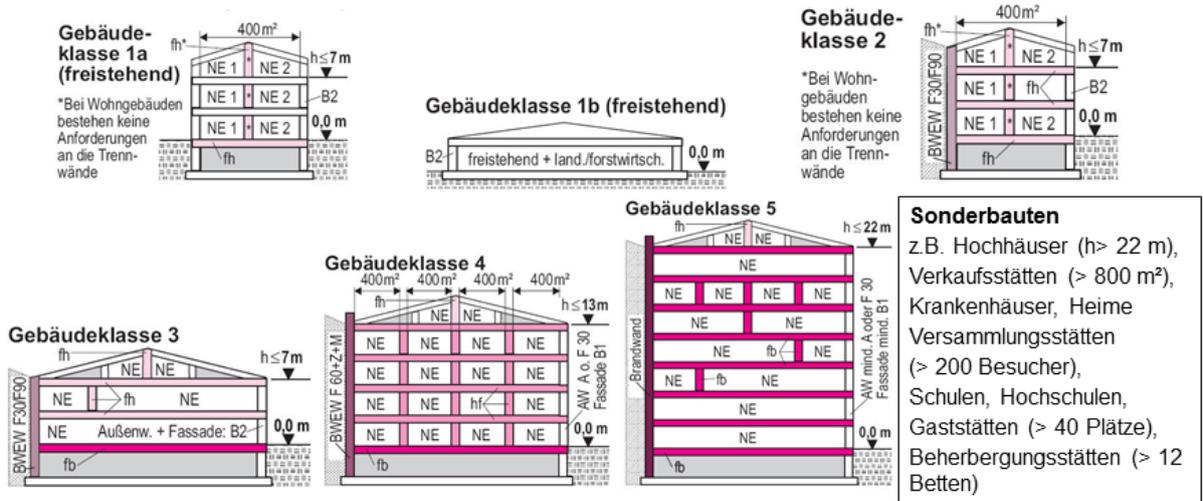
Nach [Battran und Mayr /1996/, /14/] wurden früher Dachräume mit Neigung in der Regel nicht ausgebaut sondern dienten überwiegend dem Regenschutz bzw. der Nutzung als Speicher. Aufgrund von z.B. Wohnungsmangel, wirtschaftlicher Erwägungen bei der Grundstücksausnutzung sowie aufgrund des besonderen Raumerlebnisses wurde der Ausbau von Dachgeschossen bei Bauherren und Architekten attraktiv.

Der Dachgeschossausbau wird in den einzelnen Bundesländern sehr unterschiedlich behandelt. Das Bauordnungsrecht ist hierbei Landesrecht. Grundsätzlich unterliegen Dachgeschoßausbauten der Genehmigungspflicht. In einigen Bundesländern ist jedoch in Wohngebäuden der Einbau einzelner Aufenthaltsräume in das Dachgeschoß unter gewissen Voraussetzungen genehmigungsfrei, wobei allerdings Anforderungen einzuhalten sind, die durch öffentlich-rechtliche Vorschriften an bauliche Anlagen gestellt werden. [Battran und Mayr /2011/, /15/]

An dieser Stelle sollen zunächst einige grundlegende Details zum vorbeugenden Brandschutz im Hinblick auf die besonderen Problemstellungen bzgl. der Brand- und Rauchausbreitung sowie dem Rettungseinsatz bei ausgebauten Dachgeschossen dargestellt werden.

Die nachfolgende Bildzusammenstellung in *Abbildung 1* zeigt die verschiedenen Gebäudeklassen im Feuertrutz Brandschutzatlas [Mayr, Battran /2013/, /15/] entsprechend der überarbeiteten Musterbauordnung [MBO /2012/, /2/] bzw. auch z.B. der Landesbauordnung von Baden-Württemberg [LBO BW /2010/, /3/].

Gebäudeklassen nach der Musterbauordnung (MBO)



h = Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über Geländeoberkante im Mittel;
 Flächen sind die Brutto-Grundflächen der Nutzungseinheit (NE), ausgenommen Flächen im Kellergeschoß.
 fh = feuerhemmend (F 30);
 hf = hochfeuerhemmend (F 60 - tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen, allseitig brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen, Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen)
 fb = feuerbeständig (F 90 - tragende und aussteifende Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen und bei raumabschließenden Bauteilen zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen)

© Feuertrutz GmbH, Brandschutzatlas

Abbildung 1: Gebäudeklassen nach Musterbauordnung ([MBO /2012/, /2/] sowie Feuertrutz Brandschutzatlas [Mayr und Battran /2013/, /15/]).

Hier soll insbesondere auf die Anforderungen bzgl. der Widerstandsfähigkeit gegen Brandbeanspruchung für tragende Wände, Stützen, Trennwände und Decken für Dachgeschosse bei den verschiedenen Gebäudeklassen hingewiesen werden, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind. Diese können der Tabelle 2-1 entnommen werden.

Aufenthaltsräume sind hierbei Räume, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt oder geeignet sind.

		GKI 1	GKI 2	GKI 3	GKI 4	GKI 5
§ 27	Tragende Wände, Stützen					
	Im Dachgeschoss, wenn darüber keine Aufenthaltsräume möglich sind (oberstes DG):	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
	Im Dachgeschoss, wenn darüber Aufenthaltsräume möglich sind:	ohne	fn	fn	hfn	fb
	Im Normalgeschoss:	ohne	fn	fn	hfn	fb
	Im Kellergeschoss:	fn	fn	fb	fb	fb
§ 28	Außenwände					
	nichttragende Außenwände und Teile:	ohne	ohne	ohne	A oder fn	A oder fn
	außenseitige Oberflächen:	ohne	ohne	ohne	B 1	B 1
§ 29	Trennwände					
	von Nutzungseinheiten im obersten DG: (Wohngebäude):	fn (ohne)	fn (ohne)	fn	fn	fn
	von Nutzungseinheiten im DG, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind (Wohngebäude):	fn (ohne)	fn (ohne)	fn	hfn	fb
	von Nutzungseinheiten im Normalgeschoss (Wohngebäude):	fn (ohne)	fn (ohne)	fn	hfn	fb
	von Aufenthaltsräumen im Kellergeschoss (Wohngebäude):	fn (ohne)	fn (ohne)	fb	fb	fb
	v. Räumen m. Explosionsg./ erh. Brandgef. (Wohngebäude):	fb (ohne)	fb (ohne)	fb	fb	fb
§ 30	Brandwände und zulässige Wände anstelle von Brandwänden					
	Gebäudeabschlusswände:	hfn o. fn/fb	hfn o. fn/fb	hfn o. fn/fb	hfn+M	fb+A+M
	Innere Brandwände:	(entfällt)	(entfällt)	hfn	hfn+M	fb+A+M
§ 31	Decken					
	Im Dachgeschoss, wenn darüber keine Aufenthaltsräume möglich sind:	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne
	Im Dachgeschoss, wenn darüber noch Aufenthaltsräume möglich sind :	ohne	fn	fn	hfn	fb
	Im Normalgeschoss:	ohne	fn	fn	hfn	fb
	Im Kellergeschoss:	fn	fn	fb	fb	fb
	v. Räumen m. Explosionsg./ erh. Brandgef. (Wohngebäude):	fb (ohne)	fb (ohne)	fb	fb	fb
§ 35	Wände notwendiger Treppenträume					
	In allen Geschossen: treppenraumseitige Oberflächen:	entfällt	entfällt	fn A	hfn+M A	fb+A+M A
§ 36	Wände notwendiger Flure					
	In Normal- und Dachgeschossen: flurseitige Oberflächen:	entfällt	entfällt	fn A	fn A	fn A
	In Kellergeschossen: (Wohngebäude):	fn (entfällt)	fn (entfällt)	fb	fb	fb
§ 39	Fahrschachtwände					
	In allen Geschossen: schachtsseitige Oberflächen:	entfällt	entfällt	fn A	hfn A	fb+A

Tabelle 2-1: Beispiele für die Zuordnung von Anforderungen an die Gebäudeklassen nach Musterbauordnung ([MBO /2012/, /2/] sowie Feuertrutz Brandschutzatlas [Mayr und Battran /2013/, /15/])

Für den ersten und zweiten Rettungsweg gilt nach § 33 der [MBO /2012/, /2/]:

(1) Für Nutzungseinheiten mit mindestens einem Aufenthaltsraum wie Wohnungen, Praxen, selbstständige Betriebsstätten müssen in jedem Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige Rettungswege ins Freie vorhanden sein; beide Rettungswege dürfen jedoch innerhalb des Geschosses über denselben notwendigen Flur führen.

(2) Für Nutzungseinheiten nach Absatz 1, die nicht zu ebener Erde liegen, muss der erste Rettungsweg über eine notwendige Treppe führen.

Der zweite Rettungsweg kann eine weitere notwendige Treppe oder eine mit Rettungsgeräten der Feuerwehr erreichbare Stelle der Nutzungseinheit sein.

Ein zweiter Rettungsweg ist nicht erforderlich, wenn die Rettung über einen sicher erreichbaren Treppenraum möglich ist, in den Feuer und Rauch nicht eindringen können (Sicherheitstreppenraum).

(3) Gebäude, deren zweiter Rettungsweg über Rettungsgeräte der Feuerwehr führt und bei denen die Oberkante der Brüstung von zum Anleitern bestimmten Fenstern oder Stellen mehr als 8 m über der Geländeoberfläche liegt, dürfen nur errichtet werden, wenn die Feuerwehr über die erforderlichen Rettungsgeräte wie Hubrettungsfahrzeuge verfügt.

Die folgende Tabelle 2-2 enthält Anforderungen an notwendige Treppen und Treppenräume sowie Angaben zu Türen, Rauchableitung, Beleuchtung und Leitungsanlagen bei den verschiedenen Gebäudeklassen.

Erster Rettungsweg - Anforderungen an notwendige Treppen und notwendige Treppenträume und Türen					
Gebäude- klasse	Treppen (tragende Teile)	Treppenraum	Türen zu notwendigen Fluren	Rauchableitung Beleuchtung	Leitungsanlagen
1a	keine besonderen Anforderungen	keine besonderen Anforderungen	keine besonderen Anforderungen	Belüftung: in jedem oberirdischen Geschoss ins Freie führende Fenster mit mind. 0,5 m ² , Beleuchtung	keine besonderen Anforderungen
1b	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant	nicht relevant
2	keine besonderen Anforderungen	keine besonderen Anforderungen	keine besonderen Anforderungen	Belüftung: in jedem oberirdischen Geschoss ins Freie führende Fenster mit mind. 0,5 m ² , Beleuchtung	keine besonderen Anforderungen
3	nichtbrennbare Baustoffe oder feuerhemmend	Wände feuerhemmend	rauchdicht, selbstschließend (Rauchschutztür)	Belüftung: in jedem oberirdischen Geschoss ins Freie führende Fenster mit mind. 0,5 m ² , Beleuchtung	Brennbare Leitungsanlagen unzulässig oder F 30-A / I 30 Abkapselung
4	nichtbrennbare Baustoffe	Wände hochfeuerhemmend, standsicher	rauchdicht, selbstschließend (Rauchschutztür)	Belüftung: in jedem oberirdischen Geschoss ins Freie führende Fenster mit mind. 0,5 m ² , Beleuchtung	Brennbare Leitungsanlagen unzulässig oder F 60-A / I 60 Abkapselung
5	feuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Wände in der Bauart von Brandwänden	rauchdicht, selbstschließend (Rauchschutztür)	höher 13m: Öffnung zur Rauchableitung an oberster Stelle mit mind. 1 m ² , Sicherheitsbeleuchtung	Brennbare Leitungsanlagen unzulässig oder F 90-A / I 90 Abkapselung

Tabelle 2-2: Anforderungen an notwendige Treppen und Treppenträume sowie Angaben zu Türen, Rauchableitung, Beleuchtung und Leitungsanlagen bei den verschiedenen Gebäudeklassen

Die folgenden Bilder aus dem Brandschutzatlas von [Mayr und Battran /2013/, /15/] zeigen in *Abbildung 2* ein ausgebautes Dachgeschoß ohne bauliche Brandschutzmaßnahmen mit den vielfältigen Möglichkeiten der Brand- und Rauchausbreitung sowie in *Abbildung 3* einen feuerwiderstandsfähigen Dachausbau.

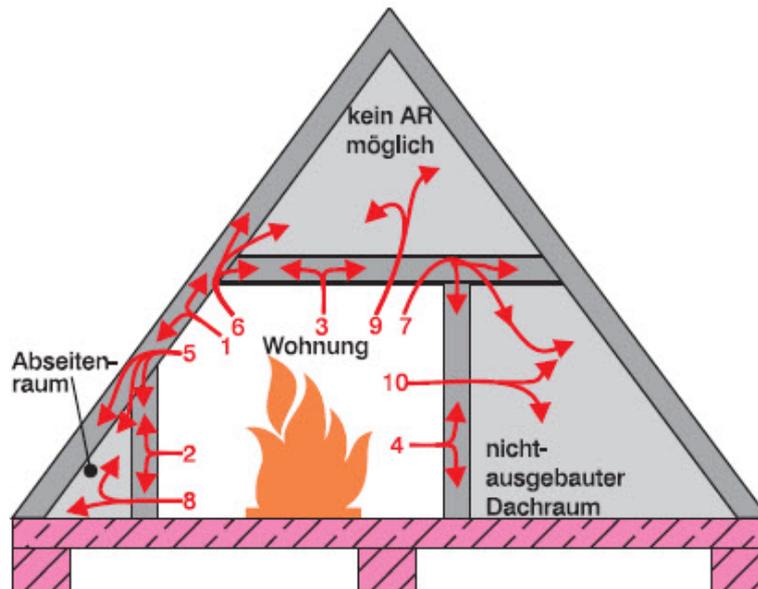


Abbildung 2: Ausgebautes Dachgeschoß ohne bauliche Brandschutzmaßnahmen. Schwachstellen: Brandausbreitung ist über die Wege 1 bis 10 möglich. [Mayr und Battran /2013/, /15/]

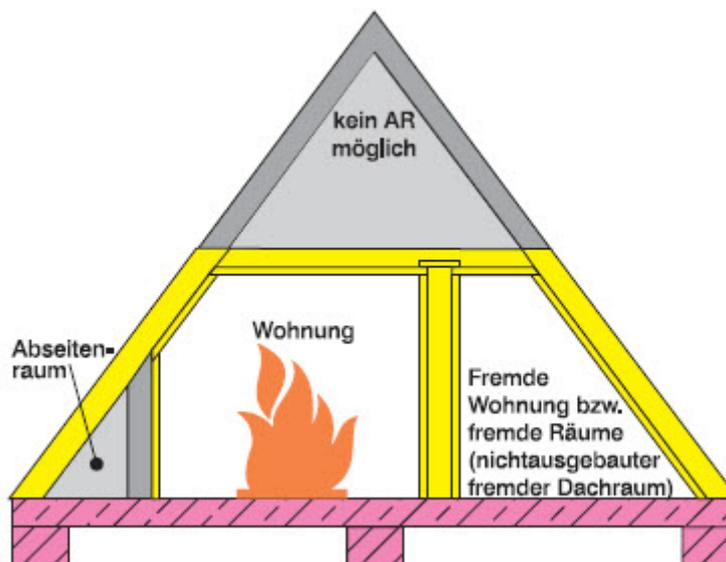


Abbildung 3: Feuerwiderstandsfähiger Dachausbau ohne Brandbrücken [Mayr und Battran /2013/, /15/]

[Wachs /2009/, /17/] empfiehlt für einen feuerwiderstandsfähigen Dachausbau ohne Brandbrücken, dass Trennwände, Holz- oder Kehlbalkendecken und Dachdecken entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung in der geforderten Feuerwiderstandsklasse ausgeführt werden. Die brandschutztechnischen Anforderungen, wie Feuerwiderstandsdauer und Ausbildung der oberen, unteren und seitlichen Anschlüsse müssen sich nach der Funktion der Wand richten.

Folgende Bauarten von Trennwänden können im Dachgeschossausbau unterschieden werden:

- Trennwände zwischen Wohnungen sowie zwischen Wohnungen und fremden Wohnungen bzw. fremden Räumen
- Trennwände zwischen Wohnungen (bzw. Aufenthaltsräumen) und nichtausgebauten fremden Dachräumen, in denen Aufenthaltsräume möglich sind
- Trennwände zum nichtausgebauten Dachraum, in dem keine Aufenthaltsräume möglich sind
- Abseitenwände

Aus Sicht des baulichen Brandschutzes ist es empfehlenswert bzw. erforderlich, Wände zum nichtausgebauten Dachraum, in dem keine Aufenthaltsräume möglich sind, auch mindestens feuerhemmend auszuführen [Wachs /2009/, /17/].

Nach [Wachs /2009/, /17/] werden im Trockenbau folgende Baustoffe verwendet:

- Plattenwerkstoffe
 - Gipsbauplatten (Gipsplatten, -faserplatten, -vliesplatten)
 - Kalziumsilikat- und -sulfatplatten
 - Vermiculitplatten
 - Glasfaser-Leichtbauplatten
 - Holzwerkstoffplatten
 - Mineralwolle-Brandschutzplatten
- Tragkonstruktion / Unterkonstruktion
 - dünnwandige kalt geformte Metallprofile
 - Holz, Holzwerkstoffe

- Dämmstoffe
 - Mineralwolle-Dämmstoffe
 - Organische Faserdämmstoffe (z. B. Holz-, Flachs-, Zellulosefaser)
- Zubehör
 - Dichtungsbänder
 - Spachtelmassen

Nach [Wachs /2009/, /17/] ist das Abschottungsprinzip gegen die Ausbreitung von Feuer und Rauch nur wirksam, wenn die abschottenden Wände und Decken fachgerecht ausgeführt werden. Dies gilt insbesondere z.B. für die An- und Abschlüsse, die Ausführung im Dachbereich, die Führung von elektrischen Leitungen in und durch raumabschließende Trennwände sowie Einbettung von Hohlwanddosen in Wänden mit Dämmstoffen.

Nach [Handschel /2010/, /12/] „Vorbeugender Brandschutz Bauordnungsrecht“ ist der Ausbau eines zweiten Dachgeschosses nur möglich, wenn der zweite Rettungsweg sichergestellt ist und eine Brandübertragung auf einen Aufenthaltsraum des darüber liegenden Geschosses nicht möglich ist. Im Regelfall setzt somit der Einbau eines Aufenthaltsraumes im 2. Dachgeschoss den mindestens feuerhemmenden Ausbau des darunterliegenden Dachgeschosses (einschließlich der Dachschrägen) voraus.

Nach [Handschel /2010/, /13/] „Brandverhütungsschau für Kommandanten“ gab es in der Vergangenheit immer Probleme, wenn ein Gebäude ohne ausgebautes Dachgeschoss genehmigt wurde und später ein Dachgeschossausbau durchgeführt wurde. Ein späterer Ausbau des Dachgeschosses hatte oft zur Folge, dass die Fenster im Dachgeschoss mit Rettungsgeräten der Feuerwehr nicht erreichbar waren, wodurch der zweite Rettungsweg nachträglich nur mit großem Aufwand sichergestellt werden konnte. Der zweite Rettungsweg aus dem Dachgeschoss ist jedoch weiterhin erst dann zwingend, wenn sich im Dachgeschoss tatsächlich ein Aufenthaltsraum befindet.

[Goepfert /1992/, /16/] erwähnt beim Ausbau von Dachgeschossen ebenfalls die Problematik, dass hierdurch ein Gebäude von ursprünglich geringer Höhe in eine höhere Gebäudeklasse eingestuft werden muss und dadurch höhere Anforderungen an den Feuerwiderstand der Bauteile gestellt werden müssen.

2.2. Brände in ausgebauten Dachgeschossen – Gefährdungsbeurteilung im Vergleich mit Normalgeschossen

Dachgeschossbrände in der Vergangenheit und Gegenwart zeigen immer wieder, welche katastrophalen Ausmaße die Brandverläufe nehmen können.

Brände in Dachgeschossen laufen aufgrund des gegenüber Normalgeschossen abweichenden Auf- und Ausbaus im Allgemeinen wesentlich dramatischer und schneller in Bezug auf Personengefährdung und Sachschäden ab.

Als besonders eindrucksvolles Beispiel sei hier der Brand am 15.9.2011 in Würzburg genannt, der sich als größter Brand der Stadt seit dem Zweiten Weltkrieg entwickelte. Als problematisch stellten sich hierbei u.a. die engen Zufahrten durch die Gassen der Altstadt dar. Die Häuser bestehen aus EG, zwei Obergeschossen und zwei Dachgeschossen. Der Löschangriff erfolgte sowohl mit B und C- Rohren als auch mit Wenderohren im Innen- und Außenangriff. Nach etwa 6,5 Std. war der Brand unter Kontrolle; allerdings flammten immer wieder Glutnester auf. Brandursache war höchstwahrscheinlich Brandstiftung. Der Gesamtschaden belief sich auf über 1,5 Mio. €. [Müller /2012/, /66/].

Nach [Slaby und Wibel /2012/, /67/] erfolgt der Dachstuhlbrand nach folgenden Phasen:

1. Ausbreitung des Brandes

Allgemein erfolgt die Brandausbreitung aufgrund der Thermik des Brandrauches nach oben. Bei einem Dachstuhlbrand hingegen steht die Ausbreitung zu den Seiten hin auf den restlichen Dachstuhl im Vordergrund. Besonders groß ist diese Gefahr bei Doppelhäusern mit durchgehender Dachkonstruktion. Hier stellen die Giebelwände keine brandschutztechnische Abtrennung dar. Das Feuer kann sich hier schnell auf die andere Haushälfte ausbreiten.

2. Aufbrennen der Dachhaut (ggf. Rauchgasdurchzündung)

Der Hauptunterschied zum Zimmerbrand ist bei einem Dachstuhlbrand das „Aufbrennen“ des Dachstuhls: Beginnend mit den Dachlatten verbrennt die Konstruktion des Dachstuhles und versagt. Die Ziegel verlieren ihren Halt, fallen herab und geben dem Feuer den Weg frei.

Zu einem „Aufbrennen“ kommt es nach [Slaby und Wibel /2012/, /67/] immer, wenn sich das Feuer unmittelbar an der Dachkonstruktion befindet oder der Wärmestau unter dem Dach groß genug ist, um die Dachlatten zu entzünden. Da der heiße Brandrauch nach oben steigt, sammelt sich die meiste Wärme unmittelbar unter dem First. Aus diesem Grund fängt ein Dachstuhl meist auch im Bereich des Firstes an aufzubrennen. Ein solches Aufbrennen lässt sich nicht sicher vorhersagen, jedoch zeigt sich oftmals vor einem Aufbrennen eine typische Rauchentwicklung. Ein Aufbrennen eines Dachstuhls ist von der Abbrandgeschwindigkeit an den Dachlatten abhängig und tritt nach ca. 15 bis 30 Minuten Brandeinwirkung auf die Dachlatten ein. Der Rauch drückt in diesem Fall auf großer Fläche zwischen den Ziegeln hindurch. Erst über dem Dach nimmt der Rauch an Volumen zu und steigt nur noch langsam auf. Die Rauchfarbe ist dabei meist hellgrau. Bei starker Isolierung des Daches kann diese Rauchentwicklung auch nur sehr gering ausfallen und kaum beobachtbar sein. In der ersten Phase des Aufbrennens lassen sich oftmals, aufgrund der starken Rauchentwicklung über dem Dachstuhl, die eigentlichen Flammen noch gar nicht erkennen. Ein sicheres Anzeichen für ein erfolgreiches Aufbrennen ist es in dieser Phase, wenn eine dunklere und deutliche schnellere Rauchsäule aus der relativ hellen Rauchwolke über dem Dachstuhl emporsteigt. Da die Vorboten einer Rauchgasdurchzündung nur sehr schwer zu erkennen sind und auch nicht notwendigerweise mit dem Aufbrennen des Dachstuhls verknüpft sind, bleibt das Risiko einer Rauchgasdurchzündung bei allen Einsätzen bestehen [Slaby und Wibel /2012/, /67/].

3. Vollbrand

Hat das Feuer bereits auf den gesamten Dachstuhl übergegriffen, so wird sich das Feuer im weiteren Verlauf nach unten über den Treppenraum hin ausbreiten. Herabfallende brennende Teile führen hierbei schnell zu einer Brandausbreitung. Weiterhin ist auch über die Decke eine Brandausbreitung in die darunter liegenden Geschosse möglich. Eine Ausbreitung auf die Nachbargebäude bei einer freiste-

henden Bauweise ist ebenfalls möglich. Die starke Wärmestrahlung von offenen Flammen kann zu einer Brandausbreitung auf benachbarte Gebäude führen.

Bereits nach ca. 15 Minuten Brandeinwirkung auf den Dachstuhl muss mit dem Beginn des Einsturzes der Ziegel gerechnet werden. Nach ca. 20 bis 40 Minuten Brandeinwirkung muss bei einem Dachstuhlbrand mit Instabilitäten zu den Seiten hin gerechnet werden [Slaby und Wibel /2012/, /67/].

Nach [Slaby und Wibel /2012/, /67/] ist die Einsturzgefahr bei einem Dachstuhlbrand deutlich minimiert, wenn man das Feuer spätestens 20 Minuten nach Brandausbruch im Dachstuhl unter Kontrolle hat. Das Risiko eines Einsturzes für Kräfte im Innenangriff bei einem Dachstuhlbrand lässt sich nie ganz ausschließen. Die größte Einsturzgefahr besteht immer im unmittelbaren Bereich des Brandes unter dem First. Aus diesem Grund sollen die Trupps im Innenangriff, wann immer möglich, diesen Bereich meiden, möglichst nahe der Traufkanten (Erläuterung des Begriffes „Traufe“: untere waagrechte Kante der Dachfläche. Meist ist hier die Dachrinne angebracht.) vorgehen und so weit wie möglich Abstand zum Brandherd halten. Von der Wurfweite des Sprühstrahls her sind 5 m Abstand ohne Probleme möglich, jedoch spielen auch andere Faktoren wie Sichtweite, Einrichtungsgegenstände usw. eine Rolle.

Nach [Slaby und Wibel /2012/, /67/] werden Gebäude in der heutigen Bauweise umfangreich isoliert. Das trifft auch auf das Dachgeschoss und den Dachstuhl zu. Giebel Fenster und große Dachflächenfenster lassen auf ein als Wohnraum ausgebautes Dachgeschoss schließen. Weiterhin deutet ein geringerer Rauchaustritt aus der Dachhaut aufgrund der Isolierung im Vergleich zum Ausmaß des Brandes auf ein ausgebautes Dachgeschoss hin. Schlagen sehr lange Flammen z.B. aus einem Dachflächenfenster handelt es sich um eine Flammenverlängerung, die immer für einen sehr starken Brand oder gar einen Vollbrand spricht. Eine Brandrauchentwicklung aus dem Treppenraumfenster, wie auch die Brandspuren im Bereich des Fensterrahmes und unter der Dachtraufe sind ein Anzeichen dafür, dass sich das Feuer in den Treppenraum nach unten ausgebreitet oder sich aus dem Treppenraum auf den Dachstuhl ausgeweitet hat. Bei der Menschenrettung beim Dachstuhlbrand aus verrauchten Bereichen werden Personen, welche sich an den Fenstern befinden über Leitern gerettet, Personen die im Gebäude vermisst sind, werden über den Treppenraum gerettet. Sollte es unterhalb des Dachstuhls ebenfalls brennen, so muss an

diesen Stellen zuerst eine Brandbekämpfung eingeleitet werden, bevor daran vorbei in den Dachstuhl vorgegangen wird. Die mögliche Einsturzgefahr für den vorgehenden Trupp ist zu beachten.

Ein Außenangriff macht bei einer geschlossenen Dachhaut keinen Sinn. Eine Kühlung des Dachstuhls durch die Ziegel hindurch ist ebenfalls nicht möglich. Riegelstellungen oder auch eine Brandbekämpfung von außen tragen in so einem Fall meist nur zum Wasserschaden bei [Slaby und Wibel /2012/, /67/].

[Blutsch /2012/, /68/] bemängelt, dass bei den meisten Bränden Löschwasser verschwendet wird. Dachdeckungen haben die Aufgabe, Regenwasser abzuhalten. In gleicher Weise wird daher auch Löschwasser von der Dachabdeckung abgehalten. Eine Kühlung des Daches im Brandfall ist nicht sinnvoll, da zum einen die üblicherweise als Dachdeckung verwendeten Materialien wie Ton, Beton oder Naturstein eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit haben und Dachdeckungen aus Metallen, wie sie z.B. bei Flachdächern zum Einsatz kommen, zwar eine bessere Wärmeleitfähigkeit haben diese aber aufgrund von Wärmedämmungen wieder beträchtlich reduziert wird.

Nach [Slaby und Wibel /2012/, /67/] schließen weder Anzeichen eines bevorstehenden Aufbrennens noch die einer bevorstehenden Rauchgasdurchzündung das Vorgehen im Innenangriff prinzipiell aus. Eine effektive Brandbekämpfung ist nur im Innenangriff möglich. Mit konsequent getragener Schutzausrüstung und richtigem taktischem Vorgehen wird das Risiko einer Rauchgasdurchzündung als tragbar bezeichnet.

[Slaby und Wibel /2012/, /67/] empfehlen, über den Treppenraum vorzugehen, im ersten Schritt die Brandbekämpfung aus dem Schutz des Treppenraumes heraus zu beginnen und sich dann vorsichtig und umsichtig Schritt für Schritt in den Dachstuhl hinein vorzuarbeiten. Die Gefahr eines Flashovers sowie von Rauchgasdurchzündungen nimmt mit dem Aufbrennen des Dachstuhls ab. Durch die aufgebrannte Dachfläche erhält der Dachstuhlbrand einen Rauch- und Wärmeabzug.

Beim Innenangriff dürfen sich die Trupps nicht gegenseitig stören bzw. gefährden (d. h. kein Zangenangriff; Trupps müssen aus ähnlichen Richtungen angreifen!), da sonst eine Gefährdung durch Löschwasser und Wasserdampfbildung möglich ist. Die Wasserabgabe über eine Riegelstellung macht erst mit dem Aufbrennen des Dachstuhls Sinn. Neben der vorbereiteten Riegelstellung sollte das Nachbargebäude so schnell wie möglich kontrolliert werden. Hierzu gehört auch das schnelle Schließen aller Fenster, insbesondere auch der Dachfenster, um das Gebäude vor Funkenflug und/oder Löschwasser zu schützen. Bei aufgebrannter Dachhaut ist neben dem Innenangriff über den Treppenraum ein Außenangriff über die Drehleiter mit C-Rohr (Sprühstrahl) durchzuführen, wobei möglichst kein Wenderohr wegen des großen Wasserschadens (1000 l / min) eingesetzt werden sollte [Slaby und Wibel /2012/, /67/].

Im Feuerwehr-Lehrbuch geht [Kircher /2012/, /23/] ebenfalls auf die Problematik bei Dachstuhlbränden ein. Wegen der schwierigen Zugänglichkeit und späten Entdeckung insbesondere bei höheren Gebäuden muss mit einem fortgeschrittenen Brand gerechnet werden. Wenn der Dachstuhlbrand noch keine offenen Flammen zeigt, ist die Brandausbreitung in verdeckten Hohlräumen zwischen Unterdecke und Dachhaut besonders schwierig zu bekämpfen. Bei ausgebauten Dachgeschossen dauert die Menschenrettung länger als in den unteren Geschossen da z.B. Dachflächenfenster durch Hubrettungsfahrzeuge nur schwer zu erreichen sind. Dachstuhlbrände werden bei starker Flammenerscheinung oft mit großvolumigen Strahlrohren und Wenderohren bekämpft. Dies ist in der ersten Zeit der Brandbekämpfung der stärksten Flammenerscheinungen zwar sinnvoll, führt aber danach zu großen Wasserschäden in den durch den Brand nicht betroffenen darunter liegenden Geschossen. Die Brandbekämpfung bei Dachstuhlbränden kann durch Photovoltaik- oder Solarthermie-Anlagen erschwert werden, wenn die Zugänglichkeit beim Außenangriff hierdurch stark eingeschränkt wird und nur noch ein Innenangriff möglich ist. Weiterhin können mit diesen Anlagen überbaute Brandwände ihre Schutzfunktion nicht mehr erfüllen. Ein mehrschaliger Dachaufbau zur Wärmedämmung ermöglicht bei ausgebauten Dachgeschossen eine Brandausbreitung im geschlossenen Dachbereich. Viele unzugängliche Hohlräume sind im Brandfall nur schwer zu erreichen. Decken müssen durch Werkzeuge geöffnet werden. Wenn keine Zugänglichkeit des Daches von un-

ten möglich ist, muss das Dach unter Beachtung der Sicherheitsmaßnahmen Absturzsicherung und Wasser am Strahlrohr von außen geöffnet werden.

Nach [Kircher /2012/, /23/] können die Flammen eines offenen Dachstuhlbrandes erhebliche Höhen erreichen und müssen zuerst soweit niedergekämpft werden, dass der Prozess der sich immer weiterentwickelnden Energiefreisetzung reduziert wird. Bei Dachstühlen mit mehr als zwei Geschossen ist das erste Niederschlagen der Flammen nur über eine Riegelstellung per Hubrettungsfahrzeug möglich. Brandwände müssen kontrolliert werden, damit diese nicht durch Sparren oder Latten überbrückt oder durchdrungen sind und es zu einer Brandausbreitung auf der feuerabgewandten Seite des Brandes kommt. Beim Betreten des Dachstuhles muss mit Einsturzgefahr gerechnet werden. Die Kontrolle von darunterliegenden Nutzungseinheiten ist bzgl. vertikaler Brandausbreitung und Löschwasserschäden zu kontrollieren.

Nach [Kircher /2012/, /23/] sind geschlossene Dachstuhlbrände aufgrund der Gefahr einer Durchzündung weit gefährlicher als offene Dachstuhlbrände. Die erhebliche Brandausbreitung im Innern der Dachkonstruktion ist oft nicht sofort erkennbar. Der Einsatz von Wärmebildkameras zur Ermittlung der Brandausbreitung ist möglich, jedoch können Wärmedämmungen die Wärmeleitung nach außen verhindern, sodass die Wärmebildaufnahme nicht das tatsächliche Ausmaß der Brandausbreitung wiedergibt. Eine Öffnung der Dachhaut ist daher erforderlich. Beim Dachgeschossausbau ist dies vom Innern aus möglich. Wasser muss beim Öffnen des Daches sofort am Strahlrohr verfügbar sein. Die Öffnungsschnitte müssen in ausreichender Entfernung vor der vermuteten Brandfront geschehen. Es muss immer mit Brandausbreitungspfaden gerechnet werden, die im Bereich der Abseiten des Daches liegen.

Eine spezielle Problematik, die hier der Vollständigkeit halber noch erwähnt werden soll, ergibt sich nach [Kircher /2012/, /23/] bei Reetdächern, die als weiche Bedachung gelten. Ein Brand an einem Reetdach breitet sich in kurzer Zeit großflächig sowohl auf der Dachoberfläche als auch nach innen aus. Um die Brandausbreitung einzugrenzen, müssen große Wassermengen auf das Reet aufgebracht und die Glutnester entfernt werden, um eine Brandausbreitung nach innen zu verhindern. Abstürzende Glutnester können ebenfalls zu einer Brandausbreitung beitragen. Auch hierbei ist parallel ein Innenangriff durchzuführen. Netzmittel und Schaum bewirken

bei diesen Dächern keinen Löscherfolg, da sie nicht ins Reet eindringen; sie eignen sich nur für Nachlöscharbeiten an bereits vom Dach geborgenen Garben.

Belegt wird diese Aussage durch den Brand eines historischen Reetdach-Hauses in Altenholz in Schleswig-Holstein im März 2012 [siehe Andersen /2012/, /24/]. Trotz massivem Außenangriff und Innenangriff mit Wenderohr-, B-Rohr- und C-Rohr-Einsatz konnten die Brandausbreitung über das gesamte Dach und der Vollbrand des Gebäudes nicht verhindert werden. Beschleunigt wurde die Brandausbreitung durch starken Wind. Die Bergung von Wertgegenständen musste von den Einsatzkräften abgebrochen werden, als die Holzbalkendecke einzubrechen begann. Eine Abdeckung der hölzernen Geschossdecke mit Löschschaum zeigte aufgrund der starken Windböen kaum Wirkung. Durch versteckte Glutnester kam es ca. 6 Stunden nach Abrücken der Brandwache erneut zu einem Brand in der Zwischendecke. Die Brandursachenermittler gingen davon aus, dass der Brand durch einen technischen Defekt ausgebrochen war. Reetdachbrände führen in den meisten Fällen zum Totalverlust des Gebäudes. Selbst im brennenden Zustand schirmen darunterliegende Schichten im Reet (Schilfrohr) wirksam gegen Wasser und andere Löschmittel ab. Das Wasser läuft größtenteils ohne Löschwirkung vom Dach ab. Ein Abdecken der noch nicht vom Brand betroffenen Dachfläche ist sehr schwierig, da die Reetbündel zum Teil mit Stahldrähten am Dachstuhl verschraubt sind. Früher wurden die Dächer mit Sisal genäht. Ein Durchbrennen lässt ganze Dachpartien abrutschen. Dies kann von Vorteil für die Einsatzkräfte sein, kann diese aber auch gefährden.

Die nachfolgenden Ausführungen von [Battran und Mayr /1996, 2013/, /14/, /15/] zeigen, dass beim ausgebauten Dachgeschoß einige Besonderheiten vorliegen, die zu einer Erhöhung des Gefährdungspotentials führen:

- Die Flucht- und Rettungs- sowie die Angriffswege sind für die Feuerwehr länger als bei den Normalgeschossen und die Bewohner des Dachgeschosses sind dadurch am weitesten von der „rettenden“ Geländeoberfläche entfernt.
- Die Fenster und Ausstiege sind für die Feuerwehr wegen der Dachschrägen schwieriger zu erreichen.

- Der zweite Rettungsweg ist mit Rettungsgeräten der Feuerwehr bei einstufig ausgebauten Dachgeschossen in der Regel noch problemlos möglich.
- Bei zwei- oder mehrgeschossig ausgebauten Dachgeschossen oder bei Maiso-
nette-Wohnungen kann der zweite Rettungsweg durch mit Rettungsgeräten der
Feuerwehr erreichbare Stellen in den Dachflächen des oberen Geschosses in der
Regel nicht mehr hergestellt werden bzw. es sind entsprechend aufwändige Auf-
und Einbauten notwendig.
- Problematisch kann auch die Nichteinsehbarkeit der anleiterbaren Stellen von
unten sein. Die zu rettenden Personen müssen sich bei der Feuerwehr bemerk-
bar machen können.

Davon ausgenommen sind Dachgeschosse mit Giebelwänden. Hier besteht be-
züglich der Anleiterbarkeit die gleiche Situation wie in Normalgeschossen.

- Oft werden beim Dachausbau im Unterschied zu Normalgeschossen brennbare
Baustoffe wie Holz und brennbare Dämmstoffe bei Wand- und Deckenkonstruktio-
nen eingesetzt.
- Die Detailausbildung von Anschlusspunkten feuerwiderstandsfähig trennender
Bauteile ist wesentlich schwieriger auszuführen als z.B. bei massiven Geschoss-
trenndecken.
- Der nachträgliche Dachausbau erfolgt oft in Eigenleistung. Liegen die hierzu er-
forderlichen Kenntnisse und Fähigkeiten nicht vor, ergeben sich neben bauphysi-
kalischen Mängeln auch Schwachstellen im vorbeugenden Brandschutz.
- Mängel im vorbeugenden Brandschutz machen sich im Gegensatz zu Mängeln im
Schallschutz, Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz oder der Standsicherheit erst im
Brandfall bemerkbar.
- Oft sind Brände in Dächern von innen für die Brandbekämpfung nicht zugänglich.
- Eine Brandbekämpfung von außen scheitert an der regendichten Dachhaut. Es
können nur die Stellen erreicht werden, an denen die Dachkonstruktion bereits
zerstört ist und die Flammen aus dem Dach schlagen. Es muss unter schwierigen
Bedingungen über Leitern zeitaufwendig gearbeitet werden.

- Brandausbreitung bzw. –weiterleitung über Hohlräume (z.B. unter Dachschrägen, Ständerwände, Holzbalkendecken) unterhalb der Dachhaut kann nicht verhindert werden.
- Gefahr von Rauchgasverpuffungen aufgrund von Schwelbränden mit unvollständiger Verbrennung durch Sauerstoffmangel in den Hohlräumen.
- Ausbreitung der brennbaren Brandrauchbestandteile auch in Bereiche, die noch nicht vom Feuer erfasst sind. Wird jetzt an einer entfernten Stelle die Konstruktion geöffnet, tritt Luftsauerstoff hinzu und die vorgenannten Brandphänomene können auch in diesen Bereichen aufgrund z.B. eines Zündfunken entstehen.
- Staubablagerungen und brennbare Lagergüter erhöhen die Gefährdung.
- Weitere Brandrisiken entstehen aufgrund der Durchführung von brennbaren und nichtbrennbaren Installationen durch raumabschließende Bauteile (z.B. Heizungs- und Wasserrohre, Sanitär, Lüftung, Elektro- und Kommunikationstechnik). Weiterhin ist eine Brandübertragung z.B. durch Wärmetransport in der Rohrleitung selbst, durch Entzündung anliegender Baustoffe, unzureichende Abschottungen, Versagen von Rohrhalterungen, Zerstörung der Wand und Decke bzw. des Bauteilverschlusses infolge thermischer Längenänderungen der Rohre möglich.

Nach [Battran und Mayr /1996/, /14/] ist neben der frühzeitigen und sicheren Branderkennung durch Rauchmelder bzw. Brandmelder insbesondere z.B. für schlafende Personen die möglichst lange Begrenzung eines Brandes auf den Brandausbruchsbereich durch eine feuerwiderstandsfähige Einhausung (feuerwiderstandsfähiger Dachausbau) von entscheidender Bedeutung. Besondere Schwachstellen (Brandbrücken) sind der obere An- bzw. Abschluss der Trennwände an die Dachschrägen. Das Eindringen von Feuer und Rauch von einer Nutzungseinheit des Dachgeschosses in den nichtausgebauten Dachgeschossbereich (z.B. Spitzboden, Abseitenräume, Speicher) und in Hohlräume bzw. in die Dachkonstruktion ist für eine ausreichend lange Zeit zu verhindern, da sich sonst der Brand schnell über das gesamte Dach ausbreiten kann. Werden die feuerwiderstandsfähigen Trennwände vom Feuer überlaufen, werden bei aneinander gereihten Gebäuden als nächstes die Brandwände bzw. die Gebäudetrennwände vom Brand und Rauch beansprucht.

[Kunkelmann /2003/, /6/] zeigt, dass bereits bei normalen Gebäudebränden die Brandentwicklung sehr schnell verlaufen kann. Anschaulich wird dieses in der Zusammenstellung von Zeiten bis zur Entstehung eines Flashover in *Abbildung 4* bzw. von Gefährdungen durch Brandrauch und Sauerstoffmangel bei Bränden in *Abbildung 5* am Beispiel eines Brandversuches in einem Wohnzimmer.

Personen werden im Brandraum zumeist und in erster Linie durch die aus der Inneneinrichtung der Räume resultierende Brandlast und erst im weiteren Brandverlauf durch die Brandlast, welche die Gebäudekonstruktion beinhaltet, gefährdet. Dies ist unmittelbar aus *Abbildung 5* erkennbar.

Bereits in der Brandentstehungsphase (Schwelphase) bilden sich große Mengen an hochtoxischem Brandrauch.

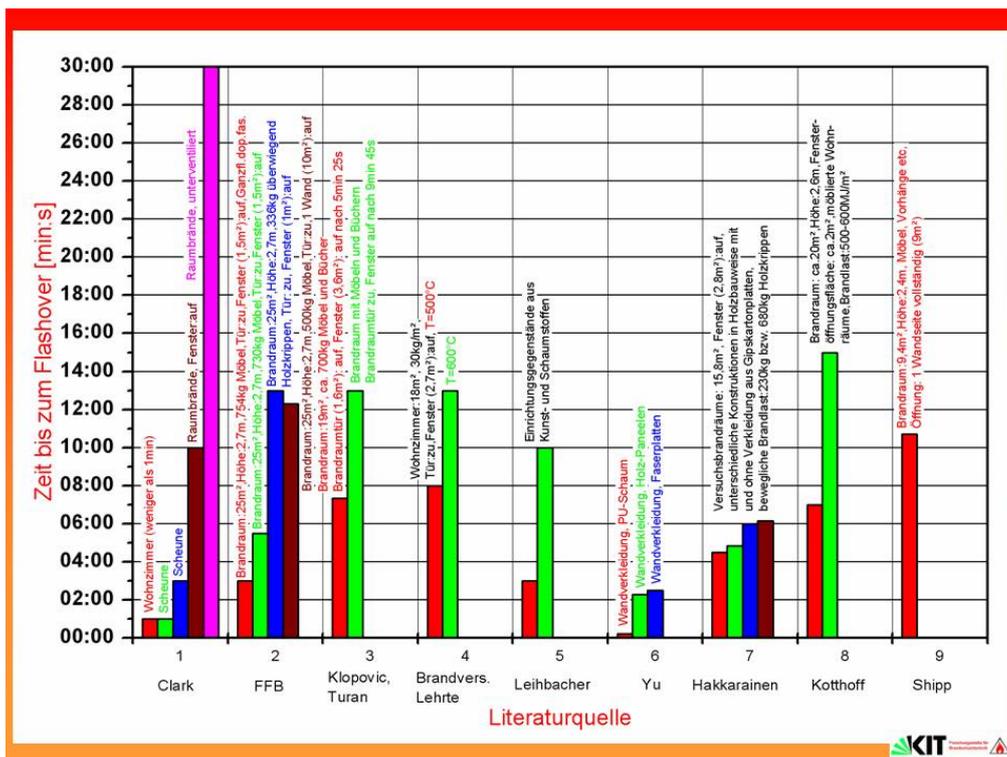


Abbildung 4: Zeit bis zur Entstehung eines Flashovers [Kunkelmann /2003/, /6/]

Gefährdungen durch Brandrauch und Sauerstoffmangel bei Bränden	
• Sauerstoff:	12 Vol.-%: Sauerstoffmangelkrankheit: Kopfschmerzen, Gähnen, Konzentrationsmangel, rasche Ermüdbarkeit, Übelkeit, Sprachstörungen, Gangunsicherheit, Sehstörungen 3 Vol.-%: baldiger Erstickungstod
• Kohlendioxid:	Arbeitsplatzgrenzwert (AGW-Wert): 5000 ppm ^{*)} (0,5 Vol.-%) 3 - 4 Vol.-% (Kurzezeitwirk.): 300%ige Erhöhung der Atmung, leichtes Unbehagen 5 - 6 Vol.-%: bei schnellem Anstieg der Konzentration: hämmernde Kopfschmerzen, Ohrensausen, Atemnot, Schweißausbruch, Ohnmacht
• Kohlenmonoxid:	12 - 15 Vol.-%: nach wenigen Minuten Atemstillstand, bewusstlos AGW-Wert: 30 ppm 800 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 45 Min. 1.600 ppm: Kopfschmerzen, Brechreiz, Schwindel nach 20 Min. 3.200 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 5 - 10 Minuten, Bewußtlosigkeit und Tod nach 20 Minuten 6.400 ppm: Kopfschmerzen, Schwindel nach 2 - 3 Min., Tod nach 10 - 15 Min. 12.000 ppm: Tod nach 5 Minuten
Beispiel: Wohnzimmerbrand an der FFB: Brandraum in Massivbauweise - Flashover: ca. 3 Min.	
Sauerstoff:	12 Vol.% nach 2 min 40 s, 3 Vol% nach 4 min 42 s unterschritten
Kohlendioxid:	12 Vol.-% nach 3 min überschritten (Meßwert: max. ca. 200.000 ppm)
Kohlenmonoxid:	1.600 ppm nach 1 min 40 s, 3.200 ppm nach 2 min 25 s überschritten 12.000 ppm nach 2 min 54 s überschritten (Meßwert: über 50.000 ppm)
Die Gefahren durch die Brandrauchbestandteile Ruß, aromatische Kohlenwasserstoffe, Reizgase und sonstige Pyrolyseprodukte sind zusätzlich zu berücksichtigen. Wie diese Brandrauchbestandteile sowie die Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Konzentration in ihrer Zusammenwirkung den (menschlichen bzw. tierischen) Organismus schädigen, ist bis jetzt unzureichend geklärt.	
*) 1 Vol.-% = 10.000 ppm **) Meßstelle: zentral, 1,5 m über dem Brandraumboden	

Abbildung 5: Gefährdungen durch Brandrauch und Sauerstoffmangel bei Bränden
[Kunkelmann /2003/, /6/]

Ganz entscheidend für den Brandverlauf sind die Art, Anordnung und Menge der Brandlast im Raum, die Abmessungen und Geometrie des Raumes sowie die Ventilationsbedingungen.

Je nach Sauerstoffkonzentration im Raum entscheidet sich, ob ein brandlastgesteuerter oder ventilationsgesteuerter Brand vorliegt.

Bei einem brandlastgesteuerten Brand steht ausreichend Sauerstoff zur Verbrennung zur Verfügung. Ein brandlastgesteuerter Brand liegt in der Brandentwicklungsphase vor dem Flashover vor.

Bei einem ventilationsgesteuerten Brand steht nicht mehr ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung im Raum zur Verfügung.

Im Extremfall kann, wie Versuche auch an der FFB gezeigt haben, bei geschlossener Tür und geschlossenem Fenster der Flammenbrand im Raum ausgehen, weiterhin werden aber zündfähige Brandrauchpyrolyseprodukte produziert. Beim Öffnen z.B. der Tür oder des Fensters ist die Gefahr einer schlagartigen Brandrauchdurchzündung oder eines Backdrafts dann besonders hoch.

Tabelle 2-3 zeigt zur weiteren Erläuterung bei der Entstehung von schnellen Brandphänomenen Backdraft und Rollover eine Auswahl brennbarer Brandpyrolysegase im Brandrauch mit Angaben zu den Explosionsgrenzen, Zündtemperaturen und Gasdichten. [Kunkelmann /2003/, /6/].

Die Zündgrenzen werden bei Atmosphärendruck (101,3 kPa) und 20°C ermittelt. Mit zunehmender Temperatur werden die Explosionsgrenzen (= Zündgrenzen) weiter, was mit dem abnehmenden Bedarf an Fremdenergie für die Zündung erklärt werden kann. Bei weiter steigender Temperatur nimmt dieser Bedarf schließlich auf null ab, es tritt Selbstentzündung ein. Diese Temperatur wird Zündtemperatur genannt. [Günther /1974/, /7/]

Pyrolysegas	Explosionsgrenze in Luft Vol.-%		Zündtemperatur °C	Dichte kg/m ³ (0°C, 1 bar) Luft: 1,29 kg/m ³
	untere	obere		
Kohlenmonoxid (CO)	10,9	76,0	605	1,25
Methan (CH ₄)	4,4	16,5	595	0,77
Acetylen (C ₂ H ₂)	2,4	88,0	325	1,16
Ethen (C ₂ H ₄)	2,7	34,0	425	1,25
Ethan (C ₂ H ₆)	2,7	16,0	515	1,35
Hexan (C ₆ H ₁₄)	1,0	7,4	240	3,83
Ammoniak (NH ₃)	15,0	30,0	630	0,77

Tabelle 2-3: Auswahl brennbarer Brandpyrolysegase im Brandrauch [Kunkelmann /2003/, /6/]

Die Zündtemperaturen liegen bei diesen Stoffen im Bereich zwischen 240°C und 630°C. Man erkennt unmittelbar die Problematik, dass aufgrund des Stoffgemisches ein breites Spektrum von zündfähigen Substanzen vorliegt.

An dieser Stelle soll daher noch einmal betont werden, dass es kein sicheres Anzeichen für einen bevorstehenden Backdraft (Verpuffung mit Feuerball) gibt. Dies ist unmittelbar einleuchtend, wenn man sich das Gemisch der verschiedenen Brandrauchbestandteile mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften anschaut.

Hier wird deutlich, welche Bedeutung das von den Feuerwehreinsatzkräften ausgewählte Löschmittel und die Ausbringung des Löschmittels (Sprühstrahl, Vollstrahl) beim Einsatz hat. Das Löschmittel und das Lösungsverfahren müssen gleichermaßen zur schnellen und effektiven Kühlung von zündfähigem Brandrauch als auch zum Ablöschen des Brandherdes geeignet sein.

Nach [Orlik /2014/, /60/] haben sich die Rahmenbedingungen an Einsatzstellen in den vergangenen Jahren drastisch verändert, z.B.

- Klassische Zimmermannsdachstühle gibt es kaum noch
- Ausgebaute Dachgeschosse haben zahlreiche unzugängliche Hohlräume, um Wohnflächen zweckmäßig zu gestalten
- Verwendung von Dämmstoffen
- Brandherde hinter gedämmten Flächen sind nicht zwingend mit Wärmebildkamera erkennbar
- Die ausreichende Bereitstellung des Löschmittels wird immer schwieriger (im Vordergrund steht die Trinkwasserversorgung und nicht die Löschwasserversorgung)
- Großer Wasserschaden ist häufig schlimmer als ein möglicher Brandschaden
- Ein schneller Löscherfolg ist die beste Art der Personenrettung.

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] ist es für die Feuerwehreinsatzkräfte am wichtigsten, die unterschiedlichen Zustände vor Ort zu erkennen. Feuerwehreinsatzkräfte werden heute zunehmend mit ventilationsgesteuerten Bränden aufgrund ge-

änderter Bauweisen und veränderter Brandlasten (z.B. zunehmender Einsatz von Kunststoffen statt unbehandeltem Holz) konfrontiert.

Neben dem zunehmenden Einsatz von dicken zum Teil auch brennbar klassifizierten Wärmedämmungen und der mechanisch widerstandsfähigen Dachhaut, die erhöhte Anforderungen bei Entfernungen und Gefährdungen für die Feuerwehreinsatzkräfte bedeuten, sind zunehmend auch hochwertige Zwei- und Dreifachverglasungen, wie sie bei modernen Bauweisen wie z.B. Niedrigenergie-, Passiv- und Nullenergiehäusern immer häufiger zum Einsatz kommen, beim Feuerwehreinsatz zu beachten.

Aufgrund der hohen Standzeit bei thermischer Belastung im Brandfall bilden diese auch im gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss für längere Zeit und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können und zu einer erhöhten Gefährdung durch Backdraft (Verpuffung mit Feuerball) und Rollover (Rauchdurchzündung ohne nennenswerten Druckaufbau) können.

In der Arbeit von [Kunkelmann /2013/] wurde experimentell das thermisch und das mechanisch bedingte Versagen von Fenstern und Verglasungen unter besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendung bei modernen Bauweisen wie z.B. Niedrigenergie-, Passiv- und Nullenergiehäusern untersucht.

Zur Erzielung reproduzierbarer realistischer thermischer Realbrandbelastungen wurde für diese Versuche als Brandquelle eine flüssiggasbetriebene Wärmestrahlerwand (siehe *Abbildung 6*) verwendet.

In den Versuchen wurden folgende thermische Belastungen gewählt:

- Temperaturniveau 1 (niedrig): Entstehungsbrand mit Temperaturen in der Heißgasschicht bis ca. 370 °C, mit anschließender Steigerung der Strahlwandleistung in zwei Stufen auf Temperaturen bis ca. 500 °C, Abstand Strahlwand – Fenster: 2,35 m
- Temperaturniveau 2 (mittel): Einsetzen des Flashovers mit über der gesamten Versuchsdauer ungefähr konstanter Temperatur in der Heißgasschicht von ca. 550 °C, Abstand Strahlwand – Fenster: 1 m

- Temperaturniveau 3 (hoch): Ein Versuch mit über der gesamten Versuchsdauer ungefähr konstanter Temperatur in der Heißgasschicht von ca. 730 °C , Abstand Strahlwand – Fenster: 1 m

Die maximale Versuchsdauer betrug ca. 60 min bzw. es erfolgte ein vorzeitiger Abbruch des Versuches bei vollständigem Versagen der Fenster.

Die Fenster waren etwa zur Hälfte in die Heißgasschicht eingetaucht. Durch das nur teilweise Eintauchen des Versuchsobjekts in die Heißgasschicht sollte der Fall eines Raumbrandes bei in einen angrenzenden Raum geöffneter Zimmertür simuliert werden.



Abbildung 6: Versuchseinrichtung zur Untersuchung von unterschiedlichen Fenstern mit realitätsnaher thermischer Belastung [Kunkelmann /2013/, /10/].

Tabelle 2-4 zeigt die Versagenszeiten der Fenster in den Versuchen.

Fensterart			Temperaturniveau		
			Z = Zerstörung TZ = teilweise Zerstörung NZ = nicht zerstört		
Rahmen	Verglasung		1 (niedrig)	2 (mittel)	3 (hoch)
PVC	2-fach	Innenscheibe 1. Riss	2:56	1:13	
		Außenscheibe	NZ	Z: 31:42	
Holz	2-fach	Innenscheibe 1. Riss	1:49	1:18	
		Außenscheibe	NZ	TZ: 60:00	
PVC	2-fach außen VSG (RC2, früher WK II)	Innenscheibe 1. Riss	2:19	0:56	
		Außenscheibe	NZ	Z: 26:22	
PVC	3-fach („Passiv- haus“)	Innenscheibe 1. Riss	0:05	1:07	
		Außenscheibe	NZ	Z: 43:52	
Holz	3-fach („Passiv- haus“)	Innenscheibe 1. Riss	1:59	1:00	0:52
		Außenscheibe	NZ	NZ: > 60:00	Z: 30:00

Tabelle 2-4: Versagenszeiten von unterschiedlichen Fenstern mit realitätsnaher thermischer Belastung [Kunkelmann /2013/, /10/]

Aus den Untersuchungen konnten u.a. folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

- Durch die erhöhte Luftdichtheit der modernen Gebäude steigt die Wahrscheinlichkeit eines Rollover und/oder Backdraft.
- Bei einem Brand, bei dem die Raumöffnungen und somit auch die Fenster geschlossen bleiben, kann es durch mangelnde Luftzufuhr zum Erlöschen offener Flammen kommen.
- Der Flashover erfolgt bei mangelnder Luftzufuhr nicht. Infolgedessen steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit für die vorgenannten Brandphänomene.
- Die in Gebäuden moderner Bauweise installierten Lüftungsanlagen sind nicht zur Rauchabführung geeignet und sollten im Brandfall abgeschaltet werden.
- Die Lüftungstechnik in Gebäuden moderner Bauweise setzt Überströmöffnungen zwischen den einzelnen Räumen der betroffenen Nutzungseinheit voraus. Deshalb ist mit einer schnelleren Ausbreitung von Rauch innerhalb der gesamten Nutzungseinheit zu rechnen. Dies hat auch nachteilige Konsequenzen für die Selbstrettung.
- Der Einsatz von schnellansprechenden Branddetektoren ist unverzichtbar.
- Löschsysteme wie z.B. der FOGNAIL[®] erlauben, in einen Raumbrand ohne das Öffnen von Türen und Fenstern Löschmittel einzubringen und zu kühlen. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Rollover / Backdraft kann hierdurch deutlich verringert werden.
- Die Luftdichtheit des Gebäudes kann zu einer verspäteten Branderkennung von außen führen. Dies verursacht wiederum lange Brandentwicklungszeiträume (z. B. langandauernde Schwelbrände) mit entsprechender Gefährdungserhöhung. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, die Brandmeldung auch außerhalb des Gebäudes anzuzeigen.
- Die Außenscheiben halten bei Fenstern mit Holzrahmen sowohl mit einer 2-fach als auch einer 3-fach Verglasung einer höheren Temperaturbeanspruchung länger stand und erhöhen daher durch die Verhinderung des Rauch- und Wärmeabzuges die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Rollovers und Backdrafts.
- Bei entsprechender Wärmebelastung setzte die Rissbildung bei den in den Versuchen untersuchten verwendeten Fenstern sehr früh ein.
- Der frühe Zeitpunkt für den ersten Riss sagt jedoch noch nichts darüber aus, wie lange insgesamt die Scheiben im Fenster auch im gerissenen Zustand einen rela-

tiv dichten Raumabschluss bilden und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen können.

- Bei der rechnerischen Beschreibung des Versagens von Verglasungen ist daher der effektive Zeitpunkt zu berücksichtigen, bei dem das Fenster eine Öffnung freigibt.
 - Entscheidend sind hierbei nicht nur die Werkstoffkenngrößen des Glases wie z.B. zulässige Betriebstemperatur für das Glas, sondern das Versagen der Verglasung in Zusammenhang mit den Eigenschaften des Rahmens (Größe, Material, Dichtungen, etc.) und der Einbausituation.

Gerade aufgrund eines meistens fehlenden feuerwiderstandsfähigen Dachausbaus mit den entsprechenden vielfältigen Brand- und Rauchausbreitungsmöglichkeiten (siehe *Abbildung 2*) ist das Entstehen von Schwel- und Glimmbränden in der Konstruktion nicht zu verhindern und muss daher bei der Brandbekämpfung neben dem offenen Flammenbrand besonders beachtet werden.

Nach [Bussenius /1996/, /21/] können in Staubschüttungen Schwel- oder Glimmbrände bereits bei Sauerstoffkonzentrationen ab 2 Vol.-% entstehen.

[Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/] hat das Schwel- und Glimmverhalten von Dämmstoffen untersucht. Der Einsatz von Wärmedämmung ist nicht nur zum Erreichen von Niedrigenergie- oder Passivhausstandards notwendig, sondern gewinnt auch bei Wohnhäusern an Bedeutung, wo Dachgeschosse ausgebaut werden und Dächer wärmedämmend werden müssen. Die Einteilung der Baustoffe in [DIN 4102 Teil 1 /1998/, /18/] in nicht brennbare Baustoffe („A“) und brennbare Baustoffe („B“) berücksichtigt nicht den Schwel- und Glimmbrand, der besonders bei Dämmstoffen vorkommen kann. Im Vergleich zu einem Schwelbrand der ohne Leuchterscheinungen abläuft, wird das Glimmen als Verbrennung eines Materials im festen Zustand ohne Flammerscheinung, jedoch mit Lichtausstrahlung aus der Verbrennungszone in [DIN EN ISO 13943 /2011/, /19/] definiert. Bei einem Schwelbrand handelt es sich um einen kontrollierten, heterogenen Verbrennungsprozess, der infolge Sauerstoffmangels ohne Flammerscheinung bei Temperaturen von ca. 500°C und unter Rauchentwicklung abläuft. Schwelbrände zählen zu den ventilationsgesteuerten Bränden, bei denen nicht genügend Luft bzw. Sauerstoff für eine vollständige Ver-

brennung zugeführt wird. Ein Glimmen tritt erst bei Temperaturen oberhalb 600°C auf.

Schwel- und Glimmbrände treten bei lokaler Überhitzung in schwel- und glimmfähigen Materialien (Ablagerungen brennbarer Stäube, Schüttgüter, faserige Naturprodukte, Schaumkunststoffe, Dämmstoffe etc.) auf, wenn

- das Temperaturniveau für einen offenen Flammenbrand zu niedrig ist oder
- die Sauerstoff zur Zündung der entstehenden brennbaren Gase nicht ausreicht oder
- die Konzentration die untere Zündgrenze nicht erreicht.

Je besser die Wärmedämmung ist und je mehr Sauerstoff durch die Porenstruktur eindringen kann, desto besser kann sich ein Glimmbrand entwickeln.

Häufige Ursachen für Schwel- und Glimmbrände sind nach [Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/] Öfen, Kamine, Rauch- bzw. Ofenrohre, elektrische Kurzschlüsse, Installationsfehler in elektrischen Bauteilen, Trennschneidarbeiten in Verbindung z.B. mit leicht entflammbaren Dämmstoffen und eine nicht wirksame Brandabschnittsbildung. Die Brände können sich durch Wände und Decken über mehrere Geschosse ausbreiten und sind vor allem auch in Bezug auf den Holzbau von großer Bedeutung.

In der Untersuchung von [Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/] wurden unterschiedliche Dämmstoffe in einer Prüfapparatur in Anlehnung an den kanadischen ULC-Test c723 (ULC, 1979) wie folgt thermisch beaufschlagt:

- 550°C – 600°C über eine Dauer von 5 min.
Dieser Temperaturbereich stellt die charakteristischen Temperaturen eines Schwelbrandes dar und wird vor dem Auftreten eines Flashovers erreicht.
- Bei ausgewählten Dämmstoffen ca. 850°C über eine Dauer von 5 min.
Dies entspricht nach dieser Norm ungefähr der thermischen Belastung bei der Vollbrand-Belastungstemperatur.

Tabelle 2-5 zeigt eine Zusammenstellung der in den Versuchen untersuchten Materialien nach [Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/].

Stoffgruppe	Versuchs- serie	Dämmstoff	Rohdichte bzw. Schüttdichte [kg/m ³]	ULC-Test Belastungstemperatur	
				550 °C	850 °C
Anorganische Faserstoffe	A	Steinwollematte	30	x	x
	B	Glaswollematte	14	x	x
Organische Stoffe pflanzlichen und tierischen Ursprungs	C	Holzfaserdämmplatte	116	x	–
	D	Korkplatte	105	x	x
	E	Zellulosefaserplatte	95	x	x
	F	Hanfmatte	45	x	x
	G	Flachmatte	35	x	x
	H	Zelluloseflocken I	70	x	–
	I	Zelluloseflocken II	65	x	–
	J	Baumwollmatte	25	x	–
	K	Schafwollmatte	–	–	–
	L	Kokosfasermatte	70	x	–
	M	Stroh	85-90	x	–
Anorganische Schaumstoffe	N	Schaumglas	120	x	x
	O	Blähperlite	–	–	–
Organische Schaumstoffe	P	EPS	12	x	x
	Q	XPS	28	x	x

Tabelle 2-5: Übersicht der Dämmstoffe für die Untersuchung des Schwel- und Glimmverhaltens in Anlehnung an den ULC-Test c723 nach [Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/]

Über die Zusammensetzung der untersuchten Stoffe z.B. hinsichtlich zugesetzter Flammschutzmittel etc. werden keine näheren Angaben gemacht.

Die untersuchten Stoffe zeigten folgendes Schwelverhalten:

Anorganische Faserstoffe:

- Steinwolle: keine Neigung zum Schwelen bei Beflammungstemperaturen von 550°C und 850°C. In elektronenmikroskopischen Aufnahmen vor und nach der Brandbelastung konnte ein Schmelzen des Bindemittels, jedoch keine Verände-

rung der Faser festgestellt werden.

- Glaswolle: Ähnlich wie bei der Steinwolle konnte kein Schwelverhalten nachgewiesen werden.

Organische Stoffe:

- Holzfaserplatten:

Im Gegensatz zur Stein- und Glaswolle, bei denen die Temperatur unmittelbar nach dem Beenden der Beflammung in der Prüfapparatur zurückging, entwickelte sich die Temperatur in der Holzfaserplatte langsam und kontinuierlich weiter. Die Schwel- (Glimm-) Temperaturen lag bei 500°C. Diese Temperatur sank erst nach der vollständigen Zersetzung des Materials.

- Korkplatte:

Während der Beflammung wurde bei den beiden Prüftemperaturen zwar eine Rauchentwicklung beobachtet, aber kein Schwelbrand ausgelöst.

- Zellulosefaserplatte:

Bei keiner der Beflammungstemperaturen wurde ein Schwelbrand ausgelöst. Lediglich die direkte Beflammung führte wie bei der Korkplatte zur lokalen Zersetzung des Materials.

- Hanfmatte:

Durch direkte Beflammung konnte zwar ein Schwel- (Glimm-)vorgang ausgelöst werden, dieser Zersetzungsprozess hörte jedoch selbständig wieder auf. Eine höhere Beflammungstemperatur von 850°C hatte eine intensivere thermische Zersetzung des Materials zur Folge. Der gesamte Verbrennungsprozess kam nach 120 Minuten selbständig zum Stillstand.

- Flachsfaserplatte:

Die thermische Zersetzung der Flachsmatte infolge der Beflammung von 550°C war im Vergleich zur Hanffaserplatte intensiver, der Schwelprozess wurde jedoch selbständig beendet. Bei 850°C wurde ein Schwelbrand ausgelöst. Das Material zersetzte sich vollständig. Zersetzungstemperaturen lagen bei 450 – 500°C

- Zelluloseflocken I:
Bereits die Beflammungstemperatur von 550°C hatte einen anhaltenden Schwelbrand zur Folge. Zersetzungstemperaturen reichten bis max. 600°C. Zersetzungstemperaturen in der mittleren Materialschicht lagen bei 450 – 500°C.
- Zelluloseflocken II:
Auch bei diesem Material kam es zu einem Schwelbrand, allerdings mit einem schneller ablaufenden Zersetzungsprozess. Zersetzungstemperaturen in der mittleren Materialschicht lagen bei 450 – 550°C.
- Baumwollmatte:
sehr rasch verlaufender Schwelbrand. Zersetzungstemperaturen lagen bei 550°C.
- Schafwollmatte:
keine Untersuchung gem. ULC-Test C723.
- Kokosfasermatte:
starke Glimmneigung des Materials.
- Stroh:
Bereits bei einer Beflammungstemperatur von 550°C intensiver Glimmbrand mit starker Rauchentwicklung.

Anorganische Schaumstoffe:

- Schaumglas:
kein Schwelbrand sowohl bei 550°C als auch bei 850°C. Nach dem Ende der Beflammung gehen alle erhöhten Temperaturen (max. ca. 200°C) wieder auf die Anfangstemperatur zurück.

Organische Schaumstoffe:

- Expandierter Polystyrol-Partikelschaum (*EPS*):
Rasches Schmelzen bei höheren Temperaturen, Abtropfen des Materials,
Kein Schwelbrand jedoch Entzündung des Materials bei 850°C.
- Extrudierter Polystyrol-Hartschaum (*XPS*):
Beflammung führt zum Schmelzen. Im Vergleich zu EPS trat auch bei der Beflammungstemperatur von 850°C keine Entflammung der Probe auf.

[Giertlová, Z. et al. /2001/, /20/] weist auch darauf hin, dass die Intensität der Brandrauchgasentwicklung ebenso wie das Brandverhalten von Baustoffen keine Materialeigenschaft ist, sondern von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, wie z.B. Art der Zündquelle, Sauerstoffangebot, Beschaffenheit und Eigenschaften des brennbaren Materials.

In Kürze wird voraussichtlich der Normentwurf [DIN EN 16733 /2014/, /22/] erscheinen, der sich mit „Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Bestimmung der Neigung eines Bauprodukts zum kontinuierlichen Glimmen“ beschäftigt.

3. Löschmittel und Löschtechniken

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] ist es für den Löscherfolg unerlässlich, dass gut ausgebildete Feuerwehreinsatzkräfte das richtige Löschmittel mittels eines geeigneten Löschgerätes und unter Anwendung der korrekten Löschtechnik und geeigneter Taktik räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmt einsetzen. Bei der Innenbrandbekämpfung kommen heute primär Wasser und Wasser-Schaummittel-Gemische zum Einsatz.

Nachfolgend wird an Hand einer Auswertung der in- und ausländischen Literatur ein Überblick über Löschmittel, Löschwirkung, Löschtechniken und Einsatztaktik insbesondere im Hinblick auch auf den Einsatz bei Raumbränden und Bränden in ausgebauten Dachgeschossen gegeben.

3.1. Löschmittel Wasser

Nach [de Vries /2008/, /38/] ist Wasser das am häufigste verwendete Löschmittel für die Brandklasse A (fest, glutbildende Stoffe). Der Hauptlöscheffekt des Wassers ist die Kühlung. Der Wärmeübergang vom Brandgut und der Brandraumatmosphäre auf das Wasser erfolgt überwiegend durch Wärmeleitung bzw. konvektiven Wärmeübergang. Wird die Masse von 1 kg Wasser von 20°C auf 100°C erwärmt, so werden 335,2 kJ Energie erforderlich. Zum Verdampfen von 1 kg Wasser sind weitere 2.250 kJ Energie erforderlich. Wasser kann einem Feuer theoretisch max. 2.585,2 kJ Energie pro kg Wasser entziehen. Beim Phasenübergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf nimmt das Wasservolumen um das 1.700 fache zu. Der Wärmeübergang vom Brandgut zum Löschmittel hängt von der Größe der Kontaktfläche zwischen Brandgut zum Löschmittel, der Zeit für den Wärmeübergang, der Temperaturdifferenz zwischen Brandgut und Löschmittel und dem Wärmeübergangskoeffizienten ab. Bei reinem Wasser sind die Größe der Kontaktfläche (erreichbare Oberflächen der Brandlast) und die Temperatur zwischen Brandgut/Brandraumatmosphäre von der Feuerwehr nicht unmittelbar beeinflussbar. Das Zeitintervall für den Wärmeübergang auf das Wasser ist in der Praxis von der Feuerwehr ebenfalls kaum beeinflussbar, da dieses Zeitintervall vor allem von der Verweildauer des Wassers auf dem Brandgut

bzw. in der Flammenphase bzw. im heißen Brandrauch abhängt [de Vries /2008/, /38/.]

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/] ist für die maximale Kühlwirkung des Wassers erforderlich, einen möglichst großen Anteil des aufgebrachtten Wassers zu verdampfen. Dazu muss ein Tropfen möglichst lange auf der Oberfläche verweilen, um die maximale Energie aufnehmen zu können. Dies hängt davon ab, wie groß die Wassertropfen sind und wie groß die Oberflächenspannung ist.

Zur Sicherung des Angriffsweges und der Umgebung werden die Methoden der Brandrauchkühlung und der Inertisierung mit der gezielten Verdampfung von Wasser in der Rauchsicht eingesetzt um eine Entzündung und Stichflammenbildung der Rauchsicht zu verhindern [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/].

Größere Tropfen verdampfen aufgrund des schlechteren Wärmeüberganges langsamer, haben allerdings auch einen größeren Impuls, um eine Brandrauchströmung zu durchdringen und um auf die zu kühlende Oberfläche zu gelangen. Kleinere Tropfen verdampfen schneller werden jedoch auch stärker durch die Brandrauchströmung und Ventilationsströmungen abgelenkt.

Weitere Informationen zur Tropfenbewegungen, Tropfenverdampfung, Verhalten von Tropfenschwärmen, Tropfenzerteilung, Tropfenvereinigung etc. finden sich auf der Webseite <http://www.ffb.kit.edu/392.php> der Forschungsstelle für Brandschutztechnik, wobei hier als Beispiel nur die Arbeit von [Schatz und Kunkelmann /1985/, /28/] erwähnt werden soll.

[Krüger und Radosch /1956/, /26/] haben in Ihren Untersuchungen zur Wasserzerstäubung im Strahlrohr festgestellt, dass bei Drücken bis 10 bar und strömungstechnisch günstigen Düsen eine für die Brandbekämpfung ausreichende Zerstäubung erreicht wird. Im Hinblick auf den Auftrieb des Feuers dürfte jedoch zur direkten Brandbekämpfung ein Strahlrohr günstiger sein, das einen größeren Bereich des Tropfenspektrums umfasst als ein solches, das nur ein schmales Tropfenspektrum erzeugt. [Krüger und Radosch /1956/, /26/] kommen zusammenfassend zu der Aussage, dass Theorie und Löschversuche gezeigt haben, dass ein mittlerer Tropfen-

durchmesser von 0,1 - 1,0 mm als löschtechnisch günstig angesehen werden kann. Bei kleineren Durchmessern besteht die Schwierigkeit den Strahl zum Brandherd zu bringen. Bei größeren Durchmessern erfolgt die Verdampfung zu langsam und bei Flüssigkeitsbränden ist die Löschwirkung nicht mehr für alle brennbaren Flüssigkeiten gegeben.

Nach [Ebner /2010/, /29/] erzeugen die gängigen Hohlstrahlrohre je nach Öffnungswinkel und Druck Tropfendurchmesser von ca. 0,2 bis 0,5 mm.

Für die Brandrauchkühlung ist es erforderlich, dass die Tropfen nicht zu klein und nicht zu groß sind. Tropfen kleiner 0,2 mm verdampfen unter Umständen bereits, bevor sie in die Rauchsicht eindringen können, werden aufgrund ihrer geringen Masse von den Luftströmungen weggetragen und tragen nur unbedeutend zur Kühlwirkung bei. Tropfen größer 0,6mm sind bei den üblichen Austrittsgeschwindigkeiten des Wasserstrahls zu groß, um vollständig in der Rauchsicht verdampfen zu können (Verweilzeit zu kurz). Die großen Tropfen durchdringen die Rauchsicht und verdampfen auf den aufgeheizten Decken und Wänden sowie auf anderen heißen Oberflächen. Dort wird durch die Verdampfung zum einen keine Kühlung der Rauchsicht erreicht, zum anderen entsteht unter Umständen zu viel Wasserdampf, da diese Oberflächen deutlich heißer werden als die Rauchsicht. [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/]

[Ebner /2010/, /29/] gibt folgende Wurfweiten und Eigenschaften für ein Hohlstrahlrohr mit dem Löschmedium Wasser an

Wasserdurchflussmenge: 100 l/min, Betriebsdruck: 5 bar

- 5 m bei breitem Sprühstrahl (ausschließlich Schutzwirkung (Abschirmung von Wärmestrahlung, Brandrauchkühlung))
- 7 m bei schmalem Sprühstrahl (Wurf- und Schutzwirkung)
- 17 m bei Vollstrahl (ausschließlich Wurfwirkung)

Wasserdurchflussmenge: 250 l/min, Betriebsdruck: 5 bar

- 5 m bei breitem Sprühstrahl (ausschließlich Schutzwirkung)
- 10 m bei schmalem Sprühstrahl (Wurf- und Schutzwirkung)
- 30 m bei Vollstrahl (ausschließlich Wurfwirkung)

Bei Hohlstrahlrohren wird unterschieden zwischen den Bauformen Turbinen- und Festkranz-Hohlstrahlrohr (siehe Tabelle 3-1)

	Turbinen-Hohlstrahlrohr	Festkranz-Hohlstrahlrohr
Kegelsprühstrahlart	Hohlkegel, innerhalb des Kegels befindet sich kein Wasser	Vollkegel, innerhalb des Kegels befindet sich Wasser
Rauch und Flammen werden vom Sprühkegel angesaugt	ja	nein
Sprühbild	ohne Fingerbildung, das Sprühbild ist homogen	mit Fingerbildung, das Sprühbild ist inhomogen

Tabelle 3-1: Unterschied zwischen Turbinen- und Festkranz-Hohlstrahlrohr [Ebner /2010/, /29/]

[Ebner /2010/, /29/] empfiehlt für den Innenangriff ein Festkranz-Hohlstrahlrohr. Der erzeugte Vollkegel bewirkt einen effizienteren Wassereintrag und Rauch und Flammen werden „weggedrückt“.

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] besteht die Möglichkeit, dass durch die ununterbrochene Abgabe eines Voll- oder Sprühstrahles in einen Raum auch Luft mit hineingesaugt wird, wodurch die Verbrennung intensiviert wird. Diesem Phänomen begegnet man, indem der Sprühstrahl nicht ununterbrochen in die Rauchsicht abgegeben wird, sondern in kürzeren oder längeren Impulsen. Hierdurch wird eine Kühlung des Brandrauches, eine Inertisierung im Raum und eine Ablöschung brennender Gase beabsichtigt. In der Regel ist eine Impulsdauer von 1 s empfehlenswert.

Durch die kurzen Sprühstöße soll das thermische Gleichgewicht erhalten bleiben, d.h. der Brandrauch bleibt in der Überdruckzone im oberen Bereich, so dass im unte-

ren Bereich gute Sichtverhältnisse vorliegen. Die abgegebene Wassermenge ist bei diesem Verfahren sehr gering und soll die Einsatzkräfte nicht durch den entstehenden Wasserdampf belasten. Die Kühlung der Rauchsicht bleibt nur einige Sekunden bestehen, so dass beim weiteren Vorgehen Wasser kontinuierlich abgegeben werden muss. Bei längeren Impulsen mit größerer Wasserabgabe kann das thermische Gleichgewicht gestört werden und die Sicht kann durch das Absinken oder Verwirbeln der Rauchsicht schlechter werden [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/].

Durch alleinige Anwendung des Impulskühlverfahrens kann ein Brand nicht gelöscht werden. Dieses muss durch direkte Brandbekämpfung erfolgen. Deshalb sollte der Begriff „Impulslöschverfahren“ vermieden werden [Ridder, Cimolino et al. /2013/, 25/].

Bei der direkten Brandbekämpfung aus relativ kurzer Distanz ist es kontraproduktiv, wenn das Löschwasser verdampft, bevor es das Brandgut erreicht, da durch eine übermäßige Wasserdampfbildung die Feuerwehreinsatzkräfte gefährdet werden [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/].

Im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben „Anforderungen und Prüfmethoden für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA)“ [Grabski, Brein et al. /2010/, /32/] wurden von der Feuerwehr Karlsruhe und der FFB Versuche in der feststoffbefeueten Brandübungsanlage der Feuerwehr Karlsruhe durchgeführt, um die thermische Belastung der Atemschutzgeräte an einer Feuerwehreinsatzkraft zu untersuchen.

Im Gespräch mit dem Cheftrainer der Brandübungsanlage wurde dem Autor mitgeteilt, dass es beim Eintritt und Vorrücken in der Brandübungsanlage das Ziel ist, durch Abgabe kurzer Sprühnebel-Sprühstöße mit dem Hohlstrahlrohr in die Rauchsicht die Temperatur unter 100°C zu halten. Dieses hat den Zweck, zum einen die thermische Belastung der Feuerwehreinsatzkräfte durch die Kühlwirkung des Wassers zu reduzieren und zum anderen die Temperaturen soweit zu absenken, dass die Explosions-/Zündtemperaturen des Brandrauches nicht erreicht werden und damit das Risiko eines Rollovers oder Backdrafts verringert wird.

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] wird die Temperatur von 100°C derart überprüft, dass eingebrachtes Wasser (kurzer Impuls < 1 s gegen die vermutlich heiße Decke) entweder verdampft oder flüssig bleibt und wieder nach unten fällt. Rauchgase, die kühler als 100°C sind, sind jedoch nicht als völlig ungefährlich anzusehen. Die Wahrscheinlichkeit eines Verbrennens bzw. Explodierens der Rauchgase nimmt jedoch mit sinkender Gastemperatur ab.

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] ist die Brandrauchkühlung in Wohngebäuden in der Regel anwendbar, bei Bränden in größeren Gebäuden und Räumen sinkt die Effektivität sehr stark, da der Sprühstrahl nicht den ganzen Raum abdeckt. Bei Bränden in Wohngebäuden ist ein Löschmittelstrom von mindestens 150 l/min für die Brandrauchkühlung erforderlich. Unter Berücksichtigung des für den direkten Angriff erforderlichen Volumenstromes muss ein Strahlrohr, mit dem sowohl Brandrauchkühlung als auch direkter Angriff möglich sein soll, ist nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] ein Volumenstrom von 200 l/min – 300 l/min zu empfehlen.

[Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] gehen auch auf die Methode der Raumkühlung als Löschmethode ein. Bei der Raumkühlung werden primär zum einen brennende und brennbare Oberflächen (Wände, Deckenverkleidungen, Einrichtungsgegenstände) direkt mittels Sprüh- oder Vollstrahl gekühlt um eine von hier ausgehende Entzündung der Rauchsicht zu verhindern und sekundär Wasserdampf zur Inertisierung der Rauchsicht zu bilden.

Gerade bei verdeckten Schwel- und Glimmbränden, wie sie in ausgebauten Dachgeschossen mit hoher Wahrscheinlichkeit vorkommen können ist es besonders wichtig, dass das Löschmittel in ausreichender Menge an den Brandherd gelangt.

Nach [Pleiß, G. et al. /1996/, /34/] können bei verdeckten Bränden einzelne Oberflächen des Brandstoffes nicht direkt beaufschlagt werden, so dass an diesen Orten praktisch kein Löscherfolg erzielt werden kann. Das Löschmittel muss zur Brandbekämpfung direkt an die inneren Oberflächen gebracht werden. Zugänge zu verdeckten Bränden sind vor allem Kanäle und Spalten mit geringen Abmessungen. In diesen Kanälen werden die heißen Rauchgase abgeführt und es befinden sich Flammzonen darin. Zusätzlich bildet sich an den Oberflächen nichtschmelzender Feststoffe Glut mit Oberflächentemperaturen von 300 bis 500 °C aus, die aus koh-

lenstoffreichen organischen Zersetzungsprodukten besteht und eine große poröse Oberfläche besitzt. An diesen heißen Oberflächen reagiert vorhandener Luftsauerstoff in heterogener Reaktion mit Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid, welches in die Flamme abgeführt wird. Die Gluttemperatur ist ausreichend, um bei einer Volumenlöschung die Pyrolyseprodukte neu zu zünden. Damit ist eine Volumenlöschung von Feststoffbränden, mit Ausnahme kleiner Brände schmelzender Feststoffe in der Anfangsphase vor Ausbildung verdeckter Brände, unmöglich. Infolge der geringen Öffnungsflächen für den Löschmitteeintritt sind Sprühdüsen mit großen Öffnungswinkeln ungeeignet. Selbst beim Einsatz von Sprühdüsen mit geringem Öffnungswinkel muss der Abstand zur Öffnungsfläche des Kanals gering sein. Bei größeren Abständen sind nur noch kompakte Strahlen in der Lage, einen genügenden Löschwasseranteil an die Oberflächen der verdeckten Brände zu transportieren. [Pleß, G. et al. /1996/, /34/] nennt als typische Oberflächen verdeckter Brände z.B. Kanäle zwischen Palettenstapeln, Flächen zwischen Brandstoff und Wänden, Brandflächen innerhalb unterschiedlicher Lagermaterialien (Hohlräume zwischen sperrigen Formteilen, Hohlräume in Schüttungen, Brände innerhalb von Verpackungen, Zwischenräume innerhalb der Stapel), Brandflächen, die sich durch Abbrand ausbilden (durch Lagergut verdeckte Kanäle, Hohlräume infolge örtlichem Abbrand oder Ausschmelzen, Hohlräume durch Abdecken mit Bauteilen).

Auf einen weiteren Punkt soll bei der Brandbekämpfung im Brandraum hingewiesen werden. Beim Öffnen einer Tür in den Brandraum ist darauf zu achten, dass Türen, die in Richtung des Angriffstrupps öffnen, mittels Türklinke auch schnell wieder geschlossen werden können. Türen, die sich entgegengesetzt nach innen öffnen, müssen mit einer Bandschlinge geöffnet werden, so dass sie sich hierdurch ebenfalls wieder schnell verschließen lassen und damit die Gefährdung der Einsatzkräfte durch eine Rauchgasdurchzündung verringert wird. [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/].

[Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] stellen die Methode der „Mannschaftsbrause“ (schnelles und massives Öffnen des Strahlrohres mit weitem Sprühwinkel) bei gleichzeitigem Fallenlassens des Trupps auf den Rücken oder die Seite zum Schutz vor einem Flashover in Frage, da bei einer Durchzündung des Raumes alle brennbaren Gegenstände um den Trupp in Vollbrand stehen. Ein statisches Verharren des

Trupps in dieser Situation wird als nicht erfolgversprechend betrachtet. Dies kann anders sein, wenn die Rauchdurchzündung im abströmenden Rauch (z.B. in einem Flur vor dem eigentlichen Brandobjekt) erfolgt und sich der Trupp im Flur und nicht im Brandraum aufhält.

An der FFB wurden in der Vergangenheit zahlreiche Brand- und Löschersuche im 25m²-Brandraum bei vollentwickelten Wohnzimmerbränden sowohl mit üblichen Mehrzweckstrahlrohren und Hohlstrahlrohren als auch mit Hochdruck-Strahlrohren und dem Impulslöschverfahren durchgeführt. Hierbei hat sich gezeigt, dass mit Hochdruck-Wassernebel kein Löscherfolg erzielt werden konnte. Es kam bei den Versuchen zwar im Bereich der Austrittsstelle des Wassernebels zu einer guten Löschwirkung, jedoch erfolgten sofort Rückzündungen, wenn der Nebelstrahl in einen anderen Bereich des Raumes gerichtet wurde. Die feinen Wassernebeltropfen konnten aufgrund der schnellen Verdampfung und der Ablenkung durch die Brandrauchströmung keine Kühlwirkung auf der Brandlast erzielen. Die Ventilationsbedingungen im Raum können ebenfalls die Löscheffektivität aufgrund der Ablenkung des Sprühnebels stark herabsetzen. Die rasche Verdampfung des Löschwassers bei diesen Verfahren birgt eine nicht unerhebliche Verbrühungsgefahr durch Wasserdampfeinwirkung. Wegen der geringen Wurfweite des fein verteilten Wassers sind ausreichende Sicherheitsabstände nur schwierig einzuhalten.

[Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] bestätigen die Aussagen der FFB und verweisen z.B. ebenfalls auf die schnelle Verdampfung der kleinen Wassertropfen, die begrenzte Reichweite des Löschwasserstrahls und die Verbrühungsgefahr durch den Wasserdampf. Durch die geringe Eindringtiefe aufgrund der Auffächerung ist die Kühlung der Rauchsicht, des Raumes und von Glutnestern unzureichend. Der Löschmittelvolumenstrom einer HD-Pumpe ist im Vergleich zu einer Normaldruckpumpe stark begrenzt.

Weiterhin wurden an der FFB Brand- und Löscherfahrungen mit stationärem Niederdruck- als auch mit stationärem Hochdruck-Wassernebel bei glutbildenden Brandstoffen (z.B. Holz in Form von Holzkrippen, Tierstreu in Form von getrocknetem Wiesensheu) durchgeführt. Hierbei wurde der Löschvorgang in der Brandentwicklungsphase begonnen. Auch hier konnte mit Hochdruck-Wassernebel im Unterschied zu Niederdruck-Wassernebel kein Löscherfolg erzielt werden. Die Sichtverhältnisse wurden

durch HD-Wassernebel beträchtlich mehr verschlechtert als durch ND-Wassernebel [Kunkelmann /2010, 2012/, /30/, /31/].

Ein weiterer Nachteil beim Einsatz von Hochdruck-Wassernebel im Feuerwehreinsatz ergibt sich nach [de Vries /2008/] dadurch, dass bei der Verwendung von Hochdrucklöschanlagen formstabile Schläuche erforderlich sind, die zur Vermeidung hoher Druckverluste immer ganz abgehaspelt werden müssen.

[Pulm /1999/, /8/] und [Kunkelmann /2003/, /6/] beschreiben mit dem Fognail[®] und dem Löschmittel Wasser ein Verfahren zur Brandbekämpfung bei zunächst geschlossenen Türen und Fenstern. Der Fognail[®] ist eine Art Löschanze, bei der an der Spitze Wasser in fein verteilter Form austritt. Jede geschlossene Tür trägt dazu bei, Feuer und Brandrauch zurückzuhalten. Die Löschwirkung des Fognail[®] beruht auf zwei Effekten. Neben dem für das Löschmittel Wasser typischen Kühleffekt wird die sauerstoffverdrängende (erstickende) Wirkung des sich schlagartig bildenden Wasserdampfes angegeben.

Das Öffnen einer Tür sorgt für eine verstärkte Ausbreitung von Brandrauch und erhöht die Gefährdung der Feuerwehreinsatzkräfte durch die schnellen Brandphänomene Rollover und Backdraft. Rettungswege können durch die Verrauchung unpassierbar werden und den Angriff der Feuerwehr erschweren. Schadstoffe, die am Ruß gebunden sind, lagern sich auf den Oberflächen von Einrichtungsgegenständen, Wänden usw. ab und führen zu hohen Sachschäden, Sanierungskosten und langen Ausfallzeiten. Wann immer es möglich ist, im Brandfall eine Tür geschlossen zu halten, so ist dies von entscheidendem Vorteil.

Der Fognail[®] wird über einen D-Schlauch mit Wasser versorgt. Es gibt zwei Arten des Fognail[®], die sich durch ihr Sprühbild unterscheiden. Dieses Sprühbild wird durch die unterschiedlichen Anordnungen der Austrittsöffnungen in der Düse erreicht. Bei der Variante „Restrictor“ entsteht ein Wasserfächer. Er dringt nur 2 m weit in den Raum ein und deckt eine Breite von 5 m ab. Er ist vom Sprühbild und von der Anwendung her mit dem Hydroschild vergleichbar. Dieser eignet sich nicht, um gezielt Löschmittel auf den Brandherd zu bringen. Bei der Variante „Attack“ ergeben die Wasserstrahlen einen Kegel, der 8 m tief in den Raum eindringt und eine Breite von

maximal 3 m abdeckt. Die Wasserverteilung ist nicht ganz so fein wie bei der erstgenannten Variante. Die Einspeisung erfolgt mit der herkömmlichen Feuerlöschkreiselpumpe des Fahrzeuges. Der Wasserdurchfluss beträgt ca. 70 l/min bei 8 bar. Für die Anwendung als Löschgerät wird der Fog Nail durch ein vorbereitetes Loch (Durchmesser: 17,5 mm) in den Brandraum eingebracht. Das Loch kann mit einem Bohrer geschaffen werden. Durch dünne Hindernisse wie z.B. Holztüren, Autobleche usw. kann der Nagel auch mittels Hammerschlägen getrieben werden.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, werden bei Einsatz des Fognail[®]

- eine deutliche Absenkung der Temperatur im Brandraum
- eine Reduzierung der Beanspruchung von Bauteilen
- eine Verlangsamung der Reaktionsgeschwindigkeit
- eine Reduzierung der Abbrandrate
- das Unterbinden des Flammenaustritts aus dem Fenster
- die Verhinderung einer Brandausbreitung u.a. über die Außenfassade

bewirkt (siehe [Pulm /1999/, /8/] und [Kunkelmann /2003/, /6/]).

3.2. Zusätze zum Löschmittel

Nach [Rodewald, Rempe /2005/, /42/] sind vom einsatztaktischen Standpunkt her löschwirksame Zusätze zum Löschwasser vertretbar, wenn mit beschränkten Löschwasservorräten gelöscht werden muss.

Nachfolgend werden zunächst einige Zusätze zum Löschmittel aufgeführt, welche in dieser Untersuchung nicht näher betrachtet werden.

Gelbildner als Löschwasserzusatz erhöhen die Viskosität des Wassers so weit, dass es an abschüssigen Flächen (länger) haftet und damit den Wärmeübergang vom Brandgut auf das Löschmittel verbessert. Im optimalen Fall haftet das Löschwasser so lange, bis es verdampft ist, das heißt, es entzieht dem Brand die maximal mögliche Wärmemenge. Auf den Zusatz von Gelbildnern zum Löschwasser wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da Untersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vor einigen Jahren mit der damals verfügbaren Technologie gezeigt haben, dass eine bessere Abkühl- und Löschwirkung bei Feststoffbränden zwar zum Teil erzielt werden kann, jedoch eine mögliche Verstopfungsgefahr der Pumpen, Schläuche, Armaturen und Strahlrohre nicht ausgeschlossen werden kann. Vergleichbare Untersuchungen wurden an der Forschungsstelle in neuerer Zeit nicht mehr durchgeführt. In jedem Fall ist eine Rutschgefahr auf Treppen und Böden nicht auszuschließen.

Salze als Löschwasserzusatz, die als fein verteilte Inhibitoren die freien Radikale in der Verbrennung binden und so die Kettenreaktion bei der Verbrennung unterbrechen, werden wegen der Umweltbelastung und der Korrosionsgefahr für die Löschgeräte als nicht als sinnvolle Löschwasser-Zusätze angesehen und daher hier ebenfalls nicht betrachtet auch wenn bzgl. der Verringerung des Löschmittelverbrauchs bei Bränden im Realmaßstab positive Erfahrungen vorliegen.

Auf neuartige Löschwasserzusätze wie Mizellen-Einkapselungs-Agenzien oder Siloxan-Tenside wird in dieser Arbeit ebenfalls nicht eingegangen, da eine Beurteilung der Eigenschaften aufgrund von zum gegenwärtigen Zeitpunkt unzureichenden wissenschaftlichen Untersuchungsergebnissen noch nicht erfolgen kann.

In den nachfolgenden Ausführungen wird ausschließlich auf den Zusatz von handelsüblichen Schaumlöschmitteln zum Löschwasser in Form von Netzwasser und Löschschaum eingegangen.

Generell gilt auch bei Zusätzen zum Löschwasser, wie bereits in Abschnitt 3.1 für das Löschmittel Wasser ausgeführt die Aussage von [Pleß, G. et al. /1996/, /34/], dass praktisch kein Löscherfolg erzielt werden kann, wenn bei verdeckten Bränden die einzelnen Oberflächen des Brandstoffes nicht direkt beaufschlagt werden. Das Löschmittel muss zur Brandbekämpfung direkt an die inneren Oberflächen gebracht werden.

3.2.1. Schaumlöschmittel zur Herstellung von Netzmittel / Netzwasser

Nach [Herterich /1960/, /27/] kann dem Löschwasser zur Steigerung des Netzvermögens (Eindringungs- oder Penetrationsvermögen) ein Netzmittel zugesetzt werden.

Als Netzmittel werden üblicherweise Schaummittel verwendet.

Nach [Ridder, Cimolino, et al. /2013/, /25/] spielt die Oberflächenspannung des Wassers eine wichtige Rolle bei der Interaktion von Wassertropfen mit der Brandstoffoberfläche. Wasser hat eine große Oberflächenspannung. Dadurch bildet das Wasser keinen gleichmäßigen Feuchtigkeitsfilm auf dem Material, sondern bildet Tropfen. Durch die Zugabe von Tensiden (wie z.B. in Schaum- bzw. Netzmitteln enthalten) sinkt die Oberflächenspannung und es kommt zu einer besseren Benetzung des Brandstoffs. Des Weiteren kann durch den Einsatz von Schaum verhindert werden, dass das Wasser zu schnell vom Brandgut abläuft.

Nach [VdS 3141 /2011/, /48/] werden Schaummittel werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung unterteilt in

- synthetische Schaummittel
 - AFFF – wasserfilmbildendes Schaummittel,
 - AFFF (AR) – alkoholbeständiges, polymerfilmbildendes Schaummittel,
 - AFFF (AR-LV) – alkoholbeständiges, niedrigviskoses Schaummittel,
 - MBS – Mehrbereichsschaummittel
- Protein-Schaummittel
 - P – Protein-Schaummittel,
 - FP Fluor-Proteinschaummittel,
 - FFFP wasserfilmbildender Fluor-Proteinschaum,
 - FFFP (AR) alkoholbeständiger, polymerfilmbildender Fluor-Proteinschaum.

In dieser Arbeit wird überwiegend auf fluorfreie Schaumlöschmittel und hier insbesondere auf synthetische Mehrbereichsschaummittel und Klasse -A Schaumlöschmittel (Class-A-Foam) eingegangen, die überwiegend bei Feststoffbränden zum Einsatz kommen können.

Das Netzwasser wird hierbei unverschäumt über Mehrzweck- oder Hohlstrahlrohre abgegeben.

[Herterich /1960/, /27/] erwähnt, dass bei der Wasserzerstäubung der Zusatz von Netzmittel energiesparend wirkt, d.h. dass bei gleichem Energieaufwand eine feinere Zerstäubung erreicht wird. Netzmittel müssen neben einer optimalen Netzfähigkeit weitere Eigenschaften aufweisen. Sie sollen niederviskos sein, damit sie sich bei der Zumischung schnell mit dem Wasserstrom mischen, verträglich mit z.B. Frostschutzmitteln sein und keine zusätzliche Korrosion bewirken. In der Praxis kommt dem Netzwasser bei der Brandbekämpfung von Stäuben z.B. Braunkohlestaub sowie Schwel- und Glutbränden bei Faserstoffen (Heu, Stroh, Baumwolle, Torf, Holz u.dgl.) besonders in Ballen und Haufen, Textilballen eine gewisse Bedeutung zu, da das Netzmittel bei diesen Stoffen rascher eindringt und so eine größere Tiefenwirkung ermöglicht.

Nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] werden als Netzmittel im Netzwasser insbesondere Mehrbereichsschaummittel, als Faustregel in Konzentrationsbereich zwischen 0,5% bis 1% zugesetzt, allerdings ist ein Einsatzbereich mit Konzentrationen im Bereich zwischen 0,1 bis 5 % durchaus in der Praxis auch üblich. Bei der Zumischrate sind allerdings die Angaben der Hersteller der Schaummittel zu beachten.

Man erkennt hier unmittelbar die große Bandbreite der Konzentration, mit der Schaumlöschmittel in der Praxis eingesetzt werden können.

Nach [Rodewald, Rempe /2005/, /42/] wird durch den Einsatz von Netzmitteln einerseits die Löschzeit verkürzt, andererseits aber auch der Löschwasserverbrauch reduziert.

Nach [Schwartz /1964/, /33/] kann bei gehäuften Lagerungen entweder zerstäubtes Netzwasser auf die freie Oberfläche des Brandgutes aufgebracht werden oder das Netzwasser mittels Lanzen in das Innere des Haufens gepresst werden. Das Netzwasser kann durch entsprechende Mischeinrichtungen auf der Einsatzstelle selbst erzeugt oder in gebrauchsfertiger Lösung zum Brandherd gebracht werden.

Nach [Pleiß, G. et al. /1996/, /34/] kann bei verdeckten Bränden der Einsatz von Schäumen die Luftzufuhr entscheidend verringern und Flächen verdeckter Brände können durch den Schaum erreicht werden. Da enge Durchflüsse den fließenden Schäumen hohe Widerstände entgegensetzen, werden meist nur die größeren Kanäle geschlossen. Es entstehen bevorzugte Fließrichtungen für den Schaum, die zum Fehlschlagen eines Schaumeinsatzes führen können. Schäume wirken nur in den Bereichen, in denen die Schaumschicht ansteht.

[de Vries /2008/, /38/] berichtet über Untersuchungen von Kasakow aus dem Jahre 1964 zu vergleichenden Löschversuchen an Holzbränden, die mit reinem Wasser und 0,2 % Sulfonatlösung gelöscht wurden. Die Zumischung des Sulfonats als Netzmittel reduzierte die Löschdauer auf die Hälfte, den Gesamtverbrauch an Löschmittel auf ein Viertel und verhinderte somit einen größeren Wasserschaden.

[de Vries /2008/, /38/] erwähnt, dass Mehrbereichsschaum bzw. Netzwasser in Deutschland bei Klein- und Mittelbränden in der Regel nicht, bei Großbränden oft erst dann eingesetzt wird, wenn nach „stundenlangem“ Einsatz reinen Wassers abzusehen ist, dass kein Löscherfolg zu erzielen ist.

3.2.2. Schaumlöschmittel zur Herstellung von Löschschaum

Nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] kann gewöhnliches Wasser wegen seiner hohen Oberflächenspannung ohne Zugabe von Schaummittel keinen beständigen Schaum bilden.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 aufgeführt, werden nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] Mehrbereichsschaummittel im Konzentrationsbereich zwischen 0,5% bis 1% zugesetzt, allerdings ist ein Einsatzbereich mit Konzentrationen im Bereich zwischen 0,1 bis 5 % durchaus in der Praxis auch üblich. Bei der Zumischrate sind allerdings die Angaben der Hersteller zu beachten.

Nach [de Vries /2008/, /38/] und [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] sind synthetische Mehrbereichsschaummittel bei den kommunalen Feuerwehren in Deutschland am weitesten verbreitet, da mit ihnen Leicht-, Mittel- und Schwertschaum erzeugt

werden kann. Sie kommen vorzugsweise bei Feststoffbränden der Brandklassen A und B (Brände nicht schaumzerstörender Kohlenwasserstoffe) zum Einsatz.

Eine wichtige Kennzahl eines Schaumes ist die Verschäumungszahl VZ.

$$\text{Verschäumungszahl VZ} = \frac{\text{Schaumvolumen}}{\text{Flüssigkeitsvolumen}}$$

oder

$$\text{Verschäumungszahl VZ} = \frac{1}{\text{Dichte des Schaums in kg/l}}$$

Hierbei ist das Flüssigkeitsvolumen das unverschäumte Wasser/Schaummittel – Gemisch.

Löschschaum gibt es in der Form von Leicht-, Mittel- und Schwertschaum.

Die Löschwirkung des Schwertschaumes (VZ bis 20) beruht nach [Rodewald und Rempe /2005/, 42/] auf Ersticken und Abkühlen. Schwertschaum wird zum Löschen brennbarer Flüssigkeiten, festen Brandstoffen und zum Schutz von brandgefährdeten Objekten eingesetzt. Bei dem in dieser Untersuchung hauptsächlich betrachteten Ablöschen fester Brandstoffe kommt hauptsächlich die Kühlwirkung zum Tragen. Schwerer Schaum mit hohem Flüssigkeitsgehalt ist hierbei löscher als leichter. Der Durchfluss der Schwertschaumrohre liegt zwischen 200 l/min (Schwertschaumrohr S2, Wurfweite mind. 12 m) und 4000 l/min (Schaumwerfer SW40, Wurfweite mind. 65 m).

Die Löschwirkung von Mittelschaum (VZ von 20 bis 200) entspricht nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] im Wesentlichen der des Schwertschaumes, aufgrund des geringeren Wassergehaltes ist die Kühlwirkung jedoch geringer als bei Schwertschaum. Der Durchfluss der Mittelschaumrohre liegt zwischen 200 l/min (Mittelschaumrohr M2, Wurfweite mind. 6 m) und 800 l/min (Mittelschaumrohr M 8 W, Wurfweite mind. 65 m).

Die Löschwirkung von Leichtschaum (VZ von 200 bis 1000) beruht auf dem Ersticken. Eine nennenswerte abkühlende Löschwirkung ergibt sich beim Leichtschaum wegen des äußerst geringen Wassergehaltes nicht [Rodewald und Rempe /2005/, /42/].

Bei welchen Verschäumungszahlen die Schäume am löschwirksamsten sind, ist von der Art der brennenden Stoffe, der jeweiligen Lage und Größe des Brandes und vielen anderen Faktoren abhängig.

Einflussgrößen auf die Verschäumungszahl haben z. B.

- die Art der Zumischung (Zumischer oder vorgemischte Lösung),
- der Druck am Schaumrohr,
- die Schlauchlänge zwischen Zumischer und Rohr,
- die Beschaffenheit des Wassers und der Luft (Beimengung von Brandgasen, Rauch, starke Verschmutzungen etc.)
- die Temperatur der Wasser/Schaummittel-Lösung sowie der Luft

Weitere Kenngrößen sind die

- Fließfähigkeit:

Die Fließfähigkeit ist nach [de Vries /2008, /38/] eine Voraussetzung für die zügige Abdeckung des Brandgutes, insbesondere brennender Flüssigkeitsoberflächen. Die Fließfähigkeit ist keine genormte Eigenschaft eines Schaumes sondern wird bei den Brand- und Löschversuchen des jeweiligen Zulassungsverfahrens geprüft.

Schwerschäume haben nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] eine Fließgeschwindigkeit von 5 bis 10 cm/s, leichtere Schäume haben eine geringere Fließfähigkeit.

- Wasserhalbzzeit:

Wasserhalbzzeit (WHZ) ist nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] ein Maß für die Beständigkeit eines Schaumes und zwar die Zeit, in der die Hälfte der im Schaum enthaltenen Flüssigkeit ausgetreten ist. Sie liegt bei Schwer- und Mittelschaum im Bereich zwischen 15 und 25 min. Beim Leichtschaum sind die Werte erheblich höher.

Nach [de Vries /2008, /38/] muss die WHZ einerseits hoch genug sein, damit eine stabile Schaumschicht über einen gewissen Zeitraum erhalten bleibt um z.B. auf brennbaren Flüssigkeiten das Wiederentzünden zu verhindern, andererseits darf die WHZ nicht zu hoch sein, damit das aus der Schaumschicht heraustretende Wasser verdampfen und dadurch die heiße Oberfläche des Brandgutes kühlen kann.

- Abbrand- und Durchbruchwiderstand:

Nach [Rodewald und Rempe /2005/, 42/] ist der Abbrandwiderstand ein Maß für Beständigkeit eines Schaumes gegen Wärme (direkte Flammenberührung, heiße Wandungen von Behältern, Strahlungswärme).

Der Durchbruchwiderstand charakterisiert die Fähigkeit eines Schaumes, den Durchbruch brennbarer Dämpfe durch die Schaumschicht zu verhindern. [de Vries /2008/, /38/]

- Haftfähigkeit des Schaumes:

Nach [de Vries /2008, /38/] wird hierdurch die Fähigkeit eines Schaumes beschrieben, an senkrechten oder schrägen Flächen eine stabile Schaumschicht zu bilden. Die Haftfähigkeit des Schaumes ist keine genormte Eigenschaft.

Nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] gibt es keinen für alle Brandeinsätze optimalen Schaum. Schaummittel verschiedener Art und Herkunft dürfen aufgrund ihrer unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung und Reaktion nicht beliebig miteinander gemischt werden. Z.B. verringern bereits geringe Mengen an Mehrbereichschaummitteln in Proteinschaummitteln die Verschäumungszahl und die Schaumstabilität erheblich.

Nach [de Vries /2008/, /38/] werden Class-A-Schaumlöschmittel seit den 1990er Jahren in den USA, Kanada und teilweise auch in Australien als unumstrittener Stand der Technik zur Bekämpfung und Abriegelung unkontrollierter und kontrollierter Vegetationsbrände eingesetzt. In den USA geprüfte und zugelassene Klasse-A-Schaummittel sind ausschließlich für die Bekämpfung von Feststoffbränden (Holz, Stroh, Reifen, Kohle) entwickelt worden. Mit einigen Schaummitteln können im Notfall auch Kohlenwasserstoffbrände bekämpft werden, wenn keine anderen Schaummittel zur Verfügung stehen. Klasse-A-Schaummittel sind aber in den USA weder für die Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden geprüft noch zugelassen. In Deutschland

müssen Klasse-A-Schaummittel aufgrund fehlender geeigneter Prüfnormen für Feststoffbrände als Mehrbereich-Schaummittel geprüft und zugelassen werden.

Nach [de Vries /2008/, /38/] beruht die Löschwirkung von Klasse-A-Schaum auf folgenden Eigenschaften:

- Verringerung der Tropfengröße von Wasser beim Wasserstrahlrohr (=> verbesserter Wärmeübergang Löschwasser/Brandgut/Brandraumumgebung)
- Verringerung der Oberflächenspannung des Wassers verbessert die Durchfeuchtung porigen Materials und die Bekämpfung tief sitzender Glutnester.
- Schaum fixiert das Wasser auf dem Brandgut. Wasser wird beim Zerfall der Schaumschicht in kleinen Raten abgegeben und kann mehr Wärme absorbieren als wenn es sofort abfließt.
- Sichtbehinderung ist geringer, da die Entstehung von Wasserdampf unterdrückt bzw. verzögert wird.
- Schaum bildet eine Trennschicht auf dem Brandgut.
Aus dem Brandgut austretende Pyrolysegase werden teilweise zurückgehalten. Die Schaumschicht trennt das Brandgut vom Luftsauerstoff.
Die Luft in den Schaumblasen wirkt wärmeisolierend.
- Aus dem Brandgut aufsteigende Gase können das Wasser-Schaummittel verschäumen und zur Löschwirkung beitragen.
- Die Klasse-A-Schaumschicht darf nicht so stabil sein wie eine Schaumschicht über einer brennbaren Flüssigkeit, damit sich das Feuer nicht unbemerkt darunter weiter ausbreitet.
- Durch die geringe Zumischrate des Schaummittels von weniger als 0,5 % verringert sich das Nachschubproblem.

3.2.3. Druckluftschäum (DLS, CAF)

Nach [DIN EN 16327 /2011/, /37/] wird in einer Druckluftschäumenanlage DLS dem Löschwasser nach der Feuerlöschkreiselpumpe unter Druck Schaummittel auf chemischer Basis oder Schaummittelkonzentrat (nachfolgend auch als Schaummittel bezeichnet) und Druckluft zur Schaumbildung zugeführt.

Es wird davon ausgegangen, dass in einer Druckluftschäumenanlage immer eine Druckzumischanlage nach einer Feuerlöschkreiselpumpe dem Wasser Schaummittelkonzentrat kontinuierlich unter Druck in dosierter Menge durchflussproportional zuführt.

Die Europäische Norm DIN EN 16327 basiert auf der [DIN 14430 /2008/, /35/] und wurde von Deutschland als europäisches Normungsprojekt angeregt.

Ziel dieser Art der Verschäumung ist es, das Eindringvermögen und die wirksame Oberfläche des Löschmittels Wasser zu vergrößern sowie die Haftfähigkeit auf abschüssigen Flächen des Brandgutes zu verbessern. Dabei werden das Zeitintervall für einen effektiven Wärmeübergang und der Kühleffekt vergrößert.

Im internationalen Sprachgebrauch werden diese Anlagen z. B. als Class-A-Foam-Anlagen bezeichnet.

Druckluftschäumenanlagen können aber mit jedem geeigneten Schaummittel wie z.B. Mehrbereichsschaummittel betrieben werden.

Im Gegensatz zu mit einem Strahlrohr angesaugtem Schaum nach DIN EN 1568 (z.B. [DIN EN 1568-3 /2008/, /36/]) wird Druckluftschäum durch das Verhältnis von Schaummittellösungsstrom zu Luftstrom (Luft im Normzustand) und nicht durch die Verschäumungszahl (Verhältnis des Schaumvolumens zum Volumen der Schaummittellösung, aus der der Schaum erzeugt wurde) festgelegt.

Nassschäum, der mit einer Druckluftschäumenanlage erzeugt wird, hat hierbei nach [DIN EN 16327 /2011/, /37/] ein Volumenverhältnis Schaummittellösung zu Luft von 1:3 bis 1:10, Trockenschäum ein Volumenverhältnis von über 1:10.

Nach [DIN EN 16327 /2011/, /37/] gelten für die Prüfung des Schaumes vor der Lieferung der DLS-Anlage an den Endverbraucher u. a. folgende Vorgaben:

- Die Prüfung muss mindestens mit Nassschaum und gegebenenfalls mit Trockenschaum durchgeführt werden.
- Die Zumischraten bei der Prüfung dürfen vom Kunden/Besteller festgelegt werden, typisch sind eine Einstellung für Nassschaum und eine Einstellung für Trockenschaum.
- Wenn der Kunde/Besteller keine Zumischraten für die Prüfung festgelegt hat, darf der Anlagenerrichter diese aus den in dieser Norm angegebenen Bereichen auswählen.
- Wenn vom Kunden/Besteller nichts anderes festgelegt wurde, muss ein 25-mm-Strahlrohr für diese Prüfung verwendet werden. Vollstrahlrohre müssen einen Durchmesser von mindestens 19 mm haben. Sprühstrahlrohre müssen bei dieser Prüfung einen Wasserdurchfluss von mindestens 400 l/min aufweisen (Bemessung mit reinem Wasser).

Nach [Schumann /2014/, /61/] ist ein Prüfverfahren für den mit DLS erzeugten Schaum unbedingt nötig, um einheitliche Maßstäbe anlegen und verlässliche Aussagen erhalten zu können. Hersteller und Anwender verwendeten bisher unterschiedliche Verfahren, bis hin zur subjektiven, optischen Einschätzung.

Nach [DIN EN 16327 /2011/, /37/] darf Schaummittel erst dann hinzugefügt werden können, wenn Wasser gefördert wird. Die Zumischanlage muss es ermöglichen, bei Störungen, Fehlbedienungen oder Ausfall einer Komponente begonnene Löscharbeiten mit Wasser weiterzuführen.

Druckluft darf erst zugeführt werden können, wenn dem Wasser ein ausreichend hoher Anteil an Schaummittel beigemischt ist und ein Anlageneingangsdruck von min. 1 bar vorhanden ist. Wird die Injektion von Schaummittel unterbrochen oder der notwendige Anlageneingangsdruck unterschritten, muss die Zuführung von Druckluft sofort abgeschaltet werden.

Wenn bei einer DLS der Druckluftteil ausfällt, muss die Druckzumischanlage (DZA) noch genutzt werden können.

Die Anlagen müssen für einen Dauerbetrieb von mindestens 6 h bei Nennförderstrom und der vom Hersteller angegebenen maximalen Zumischrate geeignet sein.

Nach [DIN EN 16327 /2011/, /37/] werden Druckzumischanlagen (DZA) nach den in Tabelle 3-2 angegebenen Kriterien klassifiziert, wobei immer eine Zumischung von 0,5% bis 1 % anzusetzen ist:

Klassifizierung von Druckzumischanlagen (DZA) Kurzbezeichnung	Garantiepunkt 1 Schaummittel-lösung-Nennförderstrom bei Nenn-Zumischrate 1 % l/min	Garantiepunkt 2 Schaummittel-lösung Förderstrom bei Zumischrate 0,5 % l/min
DZA 2	200	100
DZA 4	400	100
DZA 8	800	100
DZA 16	1600	200
DZA 24	2400	800
<p>Anmerkung 1: Die für Garantiepunkt 1 genannten Werte sind Mindestanforderungen.</p> <p>Anmerkung 2: Mit den für Garantiepunkt 2 genannten Werten wird festgelegt, wann spätestens die Zumischung von Schaummittel erfolgen muss. Damit wird sichergestellt, dass auch bei Förderströmen unterhalb des Nennförderstromes (z. B. bei der Vornahme nur eines Strahlrohres) eine ausreichende Zumischung gewährleistet ist.</p>		

Tabelle 3-2: Klassifizierung von Druckzumischanlagen (DZA) [DIN EN 16327 /2011/, /37/]

Druckluftschäumenanlagen (DLS) werden [DIN EN 16327 /2011/, /37/] nach den in Tabelle 3-3 angegebenen Kriterien und durch die verwendete Druckzumischanlage (DZA) (Tabelle 3-2) klassifiziert.

Klassifizierung von Druckluftschäumen (DLS) Kurzbezeichnung	Luft-Nennförderstrom l/min
DLS 1 200	1 200
DLS 2 400	2 400
DLS 4 800	4 800

Tabelle 3-3: Klassifizierung von Druckluftschäumen (DLS) [DIN EN 16327 /2011/, /37/]

[Braun /2010/, /57/] geht ebenfalls auf die Eigenschaften und die Löschwirkung von Druckluftschäumen ein:

- DLS haftet durch die homogene und feinporige Schaumblasenstruktur besonders gut an abschüssigen Flächen mit einer gegenüber Wasser herabgesetzten Fließfähigkeit.
- Das gespeicherte Wasser durchfeuchtet brennbare feste Stoffe.
- Die weiße Schaumschicht reflektiert die Wärmestrahlung und isoliert die Oberfläche gegen Wärmeübertragung durch heiße Gase.

Nach [Braun /2010/, /57/] sind für die Zumischung hochkonzentrierter Schaumlöschmittel zum Löschwasser Druckzumischanlagen erforderlich. Mit einer Druckzumischanlage kann sowohl Luftschäumen als auch Druckluftschäumen hergestellt werden.

Nach [Braun /2010/, /57/] können durch eine Druckluftschäumenanlage folgende Betriebszustände gefahren werden:

- Abgabe von Wasser (konventioneller Betrieb)
- Abgabe eines Wasser-/Schaummittelgemisches
- Abgabe von Druckluftschäumen

Das Druckluftschäumensystem arbeitet unabhängig von der Feuerlöschkreiselpumpe. Fällt es aus, ist ein konventioneller Wasserbetrieb möglich [Braun /2010/, /57/].

Nach [Braun /2010/, /57/] haftet der nasse Druckluftschaum hervorragend an senkrechten Flächen, auch an Metall, Reifen und Beton, wobei der Schaum trotzdem noch fließfähig ist. Der trockene Druckluftschaum hat im Vergleich zu nassem Druckluftschaum einen geringeren Wasseranteil und wird z.B. bei Nachlöscharbeiten eingesetzt.

Nach [Braun /2014/, /59/] können Druckluftschäumenanlagen mit allen handelsüblichen Schaummitteln betrieben werden. Aus logistischen Gründen (Größe des Schaummitteltanks bei Löschfahrzeugen, Bevorratung des Schaummittels an den Feuerwachen) werden allerdings hochkonzentrierte Schaummittel wie Class-A-Foam bzw. Mehrbereichsschaummittel meistens mit einer Zumischrate von 0,5 Vol.-% eingesetzt.

Beim Druckluftschäumlöschverfahren ist eine weitere Verwendung der bisher vorhandenen Schläuche und Armaturen möglich, jedoch wird der Gebrauch leistungsfähiger Hohlstrahlrohre empfohlen [Braun /2010/, /57/].

An dieser Stelle soll auf den Feuerwehreinsatz in Tübingen im Dezember 2005 hingewiesen werden.

Während eines Feuerwehreinsatzes in Tübingen im Dezember 2005 kamen zwei Feuerwehrleute ums Leben. In dem Bericht der Kommission die dieses Unglück untersucht hat, werden mehrere Fakten beleuchtet. Unter anderem platzte der Druckluftschaum führende Schlauch, mit dem der verunfallte Trupp vorging, und wies ein untypisches Rissbild auf [IM BW /2006/, /52/].

[Föhl und Schaaf /2008/, /51/] haben im Hinblick auf dieses Unglück die Haltbarkeit von Druckluftschaum führenden Feuerweherschläuchen im Vergleich zu Wasser führenden untersucht. Es ergaben sich hierbei z.B. folgende Fragestellungen:

- In welchem Maße hängt die Haltbarkeit von wärmebeaufschlagten Feuerweherschläuchen von ihrem Inhalt (Wasser, nasser, trockener Schaum) ab?
- Wie weit übertrifft die (vermutete höhere) Wärmebelastbarkeit von Wasser führenden Schläuchen diejenige von Druckluftschaum (DLS) führenden?

Es zeigte sich, dass Feuerwehrschräuche mit allen hier verwendeten Löschmitteln (Wasser, DLS mit verschiedenen Verschäumungen) – und sogar wenn sie nur Luft enthalten – bis weit über das von den Schlauchherstellern angegebene Limit von 80°C hinaus der Temperatur- und Druckbeanspruchung standhalten, solange das Medium im Schlauch fließt. Erst wenn das Strahlrohr geschlossen wird, treten signifikante Verhaltensunterschiede auf. Während Schläuche mit DLS-Inhalt in einer 270; 300; 400°C warmen Umgebung nach 35; 8...13; 2 min versagen, platzen wasserführende Schläuche bei 400°C erst 48 min nach dem Schließen des Strahlrohres, ohne Berücksichtigung einer „Wasserhammer-Druckspitze“ bei Wasser ohne Zusätzen.

Der Technische Bericht Druckluftschäum [vfdb /2010/, /56/] vom Referat 5 „Brandbekämpfung –Gefahrenabwehr“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der vfdb befasst sich mit der Untersuchung der thermischen Belastung höherwertiger Feuerwehrschräuche der Klassen 2 und 3. Für alle Versuche wurde eine Ofentemperatur von 275°C gewählt, weil einerseits nach den vorliegenden Erfahrungen erst über 250°C mit Schlauchversagen zu rechnen ist und weil andererseits nach Ansicht von Feuerwehrleuten ein Druckschlauch keiner höheren Temperatur ausgesetzt wird. Bei den Versuchen mit Wärmeübertragung auch durch Kontakt mit einem „heißen Boden“ wurde nach der 5-minütigen Versuchs-Anfangsphase mit fließendem Löschmittel und bei nahezu konstanten Temperaturen eine 450°C warme Platte von unten gegen den Schlauch gedrückt.

Hierbei ergaben sich folgende Versuchsergebnisse:

- Ohne Kontakt mit heißem Brandschutt halten Wasser und DLS führende Schläuche aller drei Klassen mindestens 30 Minuten lang, auch wenn in dieser Zeit das Strahlrohr geschlossen bleibt.
- Ohne Kontakt mit heißem Brandschutt halten Wasser führende Schläuche aller drei Klassen, wenn das Strahlrohr länger als 30 Minuten geschlossen bleibt. Mit DLS halten nur Schläuche der Klasse 2.
- Auf heißem Brandschutt halten DLS führende Schläuche aller drei Klassen, solange das Löschmittel fließt. Für Wasser gilt dies nur in Schläuchen der Klasse 3.
- Sowohl mit DLS als auch mit Wasser halten auf heißem Brandschutt nur Schläuche der Klasse 3, wenn das Strahlrohr kürzer als 5 Minuten geschlossen bleibt.

- Wenn das Strahlrohr länger als 5 Minuten geschlossen bleibt, halten auf heißem Brandschutt nur noch Wasser führende Schläuche der Klasse 3.

Die Hinweise für den Einsatz von Druckluftschaum bei der Brandbekämpfung und für den Umgang mit Feuerweherschläuchen im Innenangriff [IM BW /2014/, /53/] verweisen sowohl auf die Untersuchungen von [Föhl und Schaaf /2008/, /51/] als auch auf [vfdb /2010/, /56/].

[IM BW /2014/, /53/] gibt aufgrund dieser Forschungsergebnisse den Feuerwehren bei Verwendung der Feuerweherschläuchen nach DIN 14811 – C, Kategorie 1 (üblicherweise in Deutschland verwendete Feuerweherschläuche, siehe auch [DIN 14811 /2012, 2014/, /55/]) folgende Verhaltenshinweise:

- Im Innenangriff soll bei der Verwendung von DLS immer die Stellung „Nass“ nach DIN 14430 verwendet werden.
- Feuerweherschläuche sollen normalerweise nicht einer Umgebungstemperatur von über 250°C ausgesetzt werden. Falls eine solche Temperaturbelastung nicht ausgeschlossen werden kann oder eine entsprechende Situation unvorhergesehen eintritt (beispielsweise, dass der Schlauch hoher umströmender Konvektionswärme z.B. im Treppenraumauge, direktem Kontakt mit warmen Oberflächen z.B. auf Blechdächern oder intensiver Wärmestrahlung z.B. beim Durchbrand einer Wand ausgesetzt wird), darf in der Folge die Löschmittelabgabe unabhängig vom Löschmittel an den betroffenen Angriffsleitungen nicht dauerhaft (nur kurzzeitig im Minutenbereich) unterbrochen werden.

Da bei DLS führenden Schläuchen die Versagenswahrscheinlichkeit ab einer Umgebungstemperatur von 250°C signifikant ansteigt, sollte im Temperaturbereich über 250°C beim Einsatz von DLS auf die Zugabe von Druckluft und damit auf die Bildung von DLS verzichtet werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird dadurch soweit verringert werden, dass diese derjenigen bei der Verwendung von Wasser entspricht. Der Maschinist schaltet hierzu die Druckluftzufuhr ab, so dass die gesamte Schlauchleitung mit Wasser-/Schaummittelgemisch gefüllt und keine Druckluft mehr im Schlauch ist. Zu beachten ist, dass sich durch diese Maßnahme die Wurfweite am Strahlrohr verringert.

Beide Maßnahmen können jedoch das kurzfristige Versagen des Schlauches bei noch höheren Temperaturen (über ungefähr 500°C) nicht verhindern; eine solche Situation muss ausgeschlossen werden.

- Die „alte Regel“, dass jeder Kontakt von Feuerwehrschräuchen mit Brandschutt, Glut oder anderer Temperaturbeanspruchung zu vermeiden ist, gilt auch bei den heute verwendeten Feuerwehrschräuchen und zwar unabhängig vom geförderten Löschmittel.

Nach der Fachempfehlung des [AGBF FA Technik /2014/, /54/] verwenden die deutschen Feuerwehren zum überwiegenden Teil Druckschräuche der Klasse 1 ohne äußere Gummibeschichtung nach [DIN 14811 /2012, 2014/, /55/]. Das Impulslöschverfahren und/oder Nutzung von Hohlstrahlrohren mit einer Wasserabgabe von bis zu 400 l/min stellen mit vielen anderen Faktoren eine hohe Belastung des Schlauchmaterials dar. Das Platzen des Schlauches stellt ein hohes Sicherheitsrisiko dar.

Druckschräuche nach [DIN 14811 /2012, 2014/, /55/] der Klasse 1 werden zukünftig in drei Leistungsstufen (L1 bis L3) eingeteilt. Die Einteilung erfolgt auf Grundlage von Abriebsprüfungen, die die mechanische Belastbarkeit abbilden.

- Leistungsstufe L1: entspricht etwa den bisherigen normativen Mindestanforderungen
- Leistungsstufe L2: zusätzlich hohe Qualitätsanforderungen bei der mechanischen Beanspruchung
- Leistungsstufe L3: zusätzlich sehr hohe Qualitätsanforderungen bei der mechanischen Beanspruchung.

Eine bessere Qualität bedeutet aber auch, dass der Schlauch ein etwas größeres Volumen hat sowie schwerer (und teurer) ist.

Alle Druckschräuche nach DIN 14811 der Leistungsstufen L1 bis L3 werden nur noch mit Edelstahl-Einbindedraht eingebunden, der die notwendige Korrosionsbeständigkeit gegen Schaummittel und eine deutlich höhere Festigkeit aufweist.

Alle Druckschräuche der Leistungsstufe L2 und L3 sind nach dem aktuellen Beratungsstand in dem zuständigen Normungsgremium mit einem sogenannten Schlag- und Scheuerschutz auszurüsten, der das Schlauchgewebe am Ende des Einbindestutzens schützt.

Nach [Braun /2010/, /57/] sollte bei Hohlstrahlrohren bei Verwendung von Druckluftschaum die Einstellung eines Volumenstromes im Bereich von mehr als 300 l/min möglich sein. Bei Einstellungen unter 300 l/min sind die Querschnitte an der Austrittsöffnung für den Druckluftschaum zu gering, wodurch eine sehr wässrige Dispersion mit einer geringen Schaumschichtstärke entsteht. Bei der Einstellung „nass“ beträgt der Wasservolumenstrom immer noch 200 l/min. Der Wasseranteil ist erforderlich, um eine ausreichend große Wurfweite zu ermöglichen und bei intensiveren Bränden eine wirksame Löschwirkung zu erzielen.

[Braun /2010/, /57/] gibt folgendes Beispiel für die Volumenströme an einem Hohlstrahlrohr bei der Verwendung von CAFS bei einem Druck von 7 bar:

- Einstellung am Hohlstrahlrohr: 300 l/min
- Durchflussmenge Wasser-/Schaumlöschmittel: 200 l/min
- Durchflussmenge Druckluft (komprimiert) 100 l/min

Bei der Verwendung von Hohlstrahlrohren kann DLS auch mit dem Sprühstrahl abgegeben werden [Braun /2014/, /59/].

[Braun /2014/, /59/] bemerkt in dieser Veröffentlichung allerdings, dass sich ein „schöner Schaum“ nur mit Rundstrahldüsen (Minstdüsenquerschnitt: 19 mm) herstellen lässt.

Löschwirksam ist ausschließlich nasser DLS mit hohem Wasseranteil und einer Verschäumungszahl zwischen 5 und 8. [Braun /2014/, /59/]

Nach [Braun /2014/, 59/] kommen die Vorteile der Technologie erst dann vollständig zur Geltung, wenn beim Löscheinsatz ausschließlich mit DLS gearbeitet wird, d.h. wenn sämtliche Löschfahrzeuge der taktischen Einheit hiermit ausgerüstet sind.

Bei Druckluftschaum wurden maximale Wurfweiten handgeführter Hohlstrahlrohre beim C-Rohr von 35 m und beim B-Rohr von 50 m bei einem Druck von 10 bar ermittelt. Durch die großen Wurfweiten lassen sich Bauteile aus sicherer Entfernung mit einer Schaumschicht abdecken und damit nachhaltig löschen bzw. kühlen. Durch

eine bewegliche Strahlrohrführung lassen sich möglichst große Flächen wie Wände und Decken mit einer Schaumschicht bedecken [Braun /2010/, /57/]

[Braun /2010/, /57/] sieht weitere Vorteile beim Einsatz von DLS beim Gewicht der Schläuche und der damit verbundenen Beweglichkeit der Feuerwehreinsatzkräfte. Ein 20 m langer wassergefüllter B-Schlauch hat ein Gewicht von 105 kg, bei DLS nass 80 kg und bei DLS trocken 35 kg.

[Braun /2010/, /57/; /2014/, /59/] geht ebenfalls auf die Taktik beim Innen- und Außenangriff ein. Bei der Innenbrandbekämpfung sollte zunächst der Vollstrahl aus sicherer Entfernung und anschließend im Nahbereich der Sprühstrahl angewendet werden. Sobald die beaufschlagte Fläche weiß ist und weiß bleibt, ist die Oberflächentemperatur auf $< 100^{\circ}\text{C}$ abgekühlt und ein weitere Schaummittelaufgabe macht keinen Sinn [Braun /2014/, /59/].

Da es nicht immer gelingt, den Brandherd direkt mit dem Löschmittelstrahl zu erreichen, kann auch durch eine möglichst großflächige Verteilung des Schaums im Brandraum eine Löschwirkung erzielt werden. Durch die Entstehung einer Wasserdampf Wolke wird das für die exotherme Reaktion der Verbrennung erforderliche Mischungsverhältnis zwischen brennbaren Gasen und dem Luftsauerstoff gestört [Braun /2014/, /59/].

Beim Innenangriff ist die DLS –Anlage in der Stellung „nass“ zu betreiben. Mit der DLS-Technik gibt es zwei Möglichkeiten, eine Rauchgasdurchzündung zu vermeiden:

- Kühlen der Bauteile mit Voll- und Sprühstrahl
- Kühlen des Rauchgases mit getaktetem Sprühstrahl

Werden bei der Lageerkundung keine offenen Flammen sondern nur Rauchentwicklung festgestellt, ist der Innenangriff vorzubereiten. Nach dem Öffnen der Tür ist der Brand mit dem Löschmittelstrahl direkt zu bekämpfen, sofern dieser bei der Rauchentwicklung erkennbar ist [Braun /2014/, /59/].

Nach [Braun /2014/, /59/] ist der Außenangriff mit Vollstrahl ausdrücklicher Bestandteil der DLS-Taktik. Der Autor berichtet, dass in wenigen Sekunden ein schlagartiges Zusammenbrechen der Flammen beobachtet werden kann (Immediate Flame Knock Down). Dieser Effekt kommt bei vollentwickelten Raumbränden zustande, wenn der durch die Löschmaßnahmen erzeugte Dampf im Brandraum erhalten bleibt. Kann der Dampf ungehindert nach oben abströmen (z.B. durch Öffnungen in der Geschossdecke oder offene Rauch- und Wärmeabzugsanlagen) kommt dieser Effekt nicht zum Tragen. Wichtig ist, dass sich der Außenangriff nicht mit dem Innenangriff überschneidet. Es besteht sonst die Gefahr, dass durch die erzeugten Dampf Wolken die unverbrannten Gase in Richtung der im Inneren vorgehenden Einsatzkräfte geschoben werden.

Besteht nach [Föhl /2004/, /50/] der Brandraum selbst aus Materialien mit geringer Wärmekapazität (z.B. Stahlcontainer), so kann der Sprühstrahl bis zum und auch noch kurz nach dem Flashover zur Rauchgaskühlung unter der Decke eingesetzt werden. Im Vollbrand-Stadium ist wegen der dann herrschenden Verbrühungsgefahr durch Wasserdampf davon abzuraten. Eignet sich der Brand in einem Raum in Massivbauweise (z.B. Mauerwerk), so besteht diese Gefahr bereits kurz nach dem Flashover. Hat er sich zum Vollbrand entwickelt, kann mit einiger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die "Dampfexplosion", wenn der Sprühstrahl die heiße Decke trifft, die Einsatzkräfte durch Heißdampf und durch sich ausbreitende teilverbrannte, durchzündende Rauchgase (Rollover) gefährdet. Diese Durchzündung (explosionsartiger Flammenpilz) am Brandraum-Fenster ergab sich in einem Versuch an der FFB mit einer Brandlast von 730 kg Möbel (Löschbeginn 17,7 min nach Zündung bei einem Abbrand von 40% = 292 kg) bereits 1,5 s nach Beginn des Löschvorganges. Nach Angaben von [Föhl /2004/, /50/] wurde hierbei zunächst für eine Dauer von 2,6 min mit DLS mit einer Verschäumungszahl von 12 gearbeitet und anschließend werden die Nachlöscharbeiten mit der Verschäumungszahl von 9,5 für eine Dauer von ca. 30 min die Nachlöscharbeiten durchgeführt.

Nach [Braun /2010/, /57/] ist ein Außenangriff nur dann wirksam, wenn das Brandgut auch getroffen werden kann. Das Bewässern geschlossener Fassaden und von dichten Dächern ist sinnlos. Eine der wichtigsten Maßnahmen ist deshalb die Nutzung

von Öffnungen. Offene Dachstuhlbrände lassen sich meist nur schlecht oder gar nicht vom Erdboden aus löschen. Hier kann DLS über Hubrettungsfahrzeuge eingesetzt werden. Grundsätzlich ist jedoch der Innenangriff der wirksamste Löschangriff und sollte – wann immer möglich – bevorzugt werden. In Dachdämmungen und Zwischendecken kann sich das Feuer unbemerkt ausbreiten. Zur Kontrolle sind Sondieröffnungen erforderlich.

[Braun /2010/, /57/] beschreibt als Beispiel die Brandbekämpfung eines Vollbrandes im 4. OG eines 7-geschossigen Gebäudes. Hier wurde durch einen kurzen Außenangriff mit Druckluftschaum-Vollstrahl der Brand erheblich eingedämmt und ein Feuerüberschlag verhindert. Durch den kurzen Außenangriff entstand kein Wasserschaden. Der Außenangriff ist hierbei zu unterbrechen, wenn der Angriffstrupp mit dem Innenangriff beginnt. Die Nachlöscharbeiten wurden mit der Einstellung „trocken“ durchgeführt. Glutnester wurden mit mechanischen Werkzeugen z.B. Feuerwehraxt freigelegt und abgelöscht. Hierzu sind auch verschiedene Rohrkonstruktionen verfügbar, um unzugängliche Glutnester und Hohlräume mit dem Löschmittel zu erreichen.

[Braun /2010/, /57/] beschreibt noch weitere Beispiele, bei denen Dachstuhlbrände zunächst mit einem kurzen Außenangriff mit DLS durch Öffnungen und anschließendem Innenangriff ebenfalls mit DLS erfolgreich bekämpft wurden, wobei als positiver Nebeneffekt ein nur geringer Wasserschaden entstand.

Bei Bränden in unübersichtlichen Kellerräumen, bei denen mit einer hohen Gefährdung der Einsatzkräfte zu rechnen ist, kann über ein handgeführtes Löschrohr mit mehreren Bohrungen durch eine mit dem Bohrhammer geschaffene Bohrung DLS eingebracht werden [Braun /2010/, /57/].

[de Vries] hat sich ebenfalls in verschiedenen Arbeiten intensiv mit der Thematik Druckluftschaum beschäftigt.

[de Vries /2008/, /38/] weist darauf hin, dass es bei Vegetationsbränden extrem gefährlich sein kann, mit zu trockenem Schaum zu arbeiten. Es ist möglich, dass der Brand unter diesem vermeintlich stabil aussehenden Schaum hindurchläuft. Dieses

Problem kann in gleicher Weise kommunale Feuerwehren bei der Bekämpfung von Raum-, Wohnungs- und anderen Feststoffbränden betreffen.

Weiterhin ist nach [de Vries /2008/, /38/] wichtig, dass beim Betrieb von Druckluftschaumanlagen die Löschmittelbestandteile in der Reihenfolge Wasser, dann Schaummittel, dann Luft zu beachten sind. Wird kein Schaummittel zugemischt weil z.B. der Schaummittelvorrat aufgebraucht ist, muss die Luftzumischung sofort unterbunden werden. Die Anlagen müssen entsprechende Sicherheitseinrichtungen haben, um diese Funktionsweise zu gewährleisten. Weiterhin sollen nur Schläuche verwendet werden, die für die Verwendung von Druckluftschaum geprüft und zugelassen sind. Es ist hierbei auf einwandfrei eingebundene und unbeschädigte Schläuche sowie einwandfreie Armaturen zu achten. Beim Auslegen von Schläuchen ist darauf zu achten, dass sie ohne Verdrehungen und ohne Kinken (= scharfer Knick beim verdrehten Schlauch) verlegt werden. Beim Innenangriff sind die Schläuche entweder durch das Treppenauge oder am Boden entlang der Außenwand des Treppenraumes zu verlegen.

Bzgl. der Verwendung von Strahlrohren bemerkt [de Vries /2008/, /38/], dass amerikanische Quellen für die Verwendung von Druckluftschaum Vollstrahlrohre bzw. teilweise Kugelhähne als optimal ansehen. In Deutschland werden dagegen fast ausschließlich Hohlstrahlrohre beim Einsatz von Druckluftschaum verwendet. [de Vries /2008/, /38/] bezweifelt daher, ob die Eigenschaften des ursprünglich in der Anlage erzeugten Druckluftschaumes beim Einsatz von Hohlstrahlrohren erhalten bleiben.

Nach [de Vries /2008/, /38/] ist es bei Druckluftschaum wichtig, dass sich möglichst wenige Störkörper im Strahlrohr befinden, damit die Struktur der Schaumbläschen erhalten bleibt.

Nach [de Vries /2008/ /38/] ist bei der Brandbekämpfung in geschlossenen Räumen nicht davon auszugehen, dass über einen längeren Zeitraum ein konstanter Volumenstrom abgegeben wird womit auch der Wasserschaden zu verringert werden soll. Bei einer pulsierenden Brandrauchgaskühlung muss mit mehreren Schaltvorgängen pro Minute gerechnet werden.

Nach [de Vries /2010/, /41/] wurde in Untersuchungen festgestellt, dass bei schnellen Schaltfolgen die Mess-Regel-Technik von Druckluftschaumanlagen nicht in der Lage ist, wirksam zu folgen. Bei den Versuchen lag die Empfindlichkeit bei einer Schaltdauer von 5 s bis 15 s. Der Autor folgert hieraus, dass das Impulslöschverfahren und Druckluftschaumanlagen inkompatibel sind, da das Strahlrohr mindestens 5 bis 15 s in einer Schaltposition (Volumenstrom) betrieben werden muss. Bei längeren Schlauchleitungen (hier 5 * 15 m B-Schlauch + 4 * 15 m langer C-Schlauch) ist zu erwarten, dass diese Zeitspanne noch länger wird. Bei der Verwendung von Druckluftschaumanlagen sind somit andere Löschtaktiken zu wählen (Löschmittelabgabe von mindestens 5 s oder länger – „Wände streichen“ statt „Wasserstöße in die Rauchschiicht“). Beim Betrieb von Druckzumischanlagen und insbesondere bei Druckluftschaumanlagen wurde wiederholt beobachtet, dass der Zustand des abgegebenen Schaumes stark variiert, wenn am Strahlrohr schnell nacheinander mehrere Schaltvorgänge („Wasser halt“/„Wasser marsch“) durchgeführt werden. Es konnte beobachtet werden, dass die Schaumqualität während der Sequenzen zwischen „wässriger Lösung“ und „Rasierschaum“ schwankte, ohne dass Einstellungen an der Druckluftschaumanlage verändert wurden. Druckluftschaumanlagen sind also nicht für Lösungsverfahren mit schnellen Schaltfolgen geeignet [de Vries /2010/, /41/].

In der Arbeit von [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] wird erwähnt, dass DLS aus einer großen Anzahl von kleinen Luftblasen im Durchmesserbereich zwischen 300 – 1200 µm besteht. Die Größe der Blasen variiert innerhalb des Schaumes. Wenn sich unter Wärmeeinwirkung die Luft ausdehnt, platzen die Blasen. Hierdurch wird der Wasseranteil sehr fein zerstäubt, kann schneller erwärmt werden und verdampfen. Dieser Mechanismus erlaubt es nach [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/], dass das Schaummittel-/Wassergemisch in die Nähe des Brandherdes transportiert wird ohne auf dem Weg dorthin zu verdampfen.

[de Vries /2010/, /41/] berichtet über Brand- und Löschversuche der Berufsfeuerwehr Wuppertal in einem feststoffbefeuertem Brandübungscontainer. Hierbei wurde u.a. die Rauchgaskühlung mittels Druckluftschaum, Impulstechnik und einem Strahlrohr mit Runddüse, vergleichbar wie beim Vorgehen mit Hohlstrahlrohr untersucht. Hierbei wurden Löschimpulse von 1 bis 2 s Dauer in den Deckenbereich des Beobachtungsraumes abgegeben. Dabei prallte der Druckluftschaum von der Decke ab und

verteilte sich großflächig im Raum. Die Rauchgaskühlung wurde hierbei als nicht so effektiv angesehen wie mit dem Sprühstrahl eines Hohlstrahlrohres. Bei Abgabe des Löschmittels gegen die Decke des Beobachtungsraumes konnte eine kurze Intensitätszunahme im eigentlichen Brandraum beobachtet werden. Anschließend wurde ein direkter Löschangriff in den Brandraum vorgenommen. Hierbei kam es zu einem Rollover, was auf die im Löschmittelstrahl mitgeführte Luft zurückgeführt wurde. Es wurde festgestellt, dass die flächendeckende Abgabe des Druckluftschaumes mit einer Runddüse nur schwer möglich ist. Die Löschmittelabgabe im Impulslöschverfahren blieb fast wirkungslos. Eine gute Löschwirkung konnte erzielt werden, indem der Druckluftschaum in Form eines „Z“ im Deckenbereich aufgebracht wurde. Das prophylaktische Einschäumen der Decken- und Wandbereiche vor der Brandraumtür hatte keinen Einfluss auf die Entstehung und den Verlauf der Rauchgasdurchzündung.

Aus dem Versuch erlangte man folgende Erkenntnisse nach [de Vries /2010/, /41/]:

- Ein Innenangriff mit Rundstrahldüse kann bei ausbleibendem Schaummittel oder Störung der Druckluftanlage aufgrund des dann nur noch zur Verfügung stehenden Wasser-Vollstrahles mit geringer Kühlwirkung beim Brand sehr gefährlich werden.
- Die Runddüse ist nur im Außenangriff einzusetzen.
- Im Innenangriff ist immer ein Hohlstrahlrohr zu verwenden.
- Die Verschäumungszahl sollte nicht größer als 10 gewählt werden, damit immer nasser Schaum erzeugt wird.
- Der Volumenstrom des Hohlstrahlrohres sollte mindestens 200 l/min betragen damit bei 50% Luftanteil noch 100 l/min Wasser zur Verfügung steht. Als optimal werden Hohlstrahlrohre mit einem Volumenstrom von 300 bis 400 l/min zur Kühlung des Brandraumes insbesondere des Brandrauches, des Brandgutes sowie von Bauteilen angesehen.
- Das Impulslöschverfahren sollte beim Druckluftschaum vermieden werden.
- Nachteilig ist der hohe Rückschlag bei der Verwendung von Druckluftschaum beim Öffnen des Hohlstrahlrohres.

- Sobald die Vollbrandphase überwunden ist, ist es möglich, die Durchflussrate zu verringern und ggf. die Nachlöscharbeiten mit trockenem Schaum fortzuführen um den Löschwasserschaden zu reduzieren.

[de Vries /2010/, /41/] sieht auch Probleme darin, wenn mehrere Strahlrohre über den gleichen Verteiler gespeist werden und unterschiedliche Schaumqualitäten beim Löschvorgang erforderlich sind.

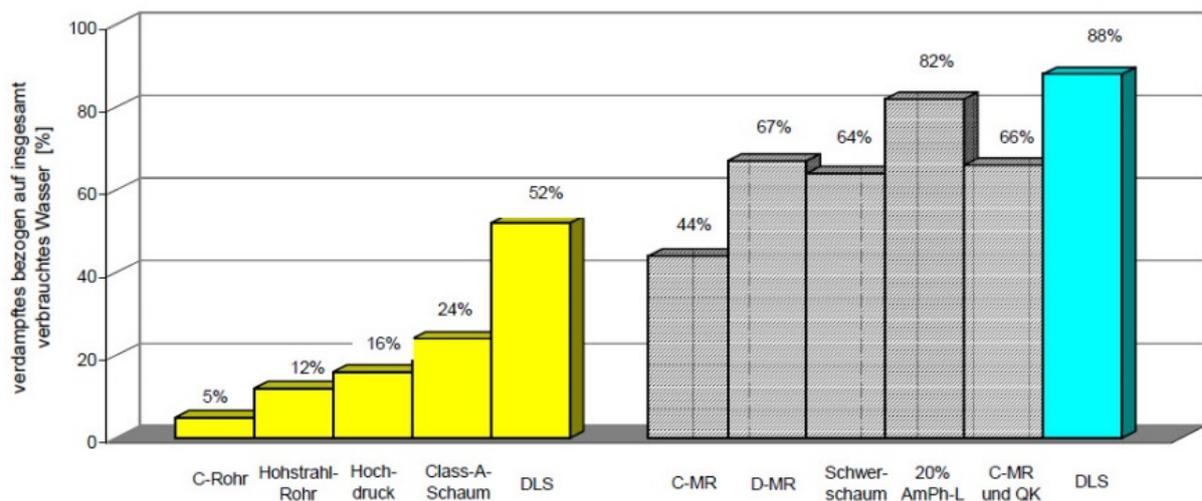
[Föhl /2004/, /50/] berichtet über in den zurückliegenden Jahren an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) durchgeführte Löschversuche beim Vollbrand von Wohnräumen im Realmaßstab, um den Effekt von Zusätzen zur Verbesserung der Löschwirkung und zur Verringerung der Schadenswasser-Menge zu untersuchen. Es werden Löschversuche bei Wohnungsbränden verglichen, bei denen Wasser, Wasser/ Tensid-Gemisch, Mittelschaum, Schwerschaum, Wasser/ Fluortensid-Gemisch, Wasser/Salz-Lösung und Wasser/Quellkörper-Gemischen eingesetzt wurden.

[Föhl /2004/, /50/] macht Angaben zu

- Art und Menge des Brandgutes
- wichtige Daten zum Brandverlauf
- Zeit bis zum Flashover
- Löschbeginn
- Abbrandgeschwindigkeit und daraus berechneter Brutto-Wärmestrom vor dem Beginn des Löschens.
- Angaben zum Löschverfahren: Löschmittel, verwendetes Strahlrohr, Arbeitsdruck und zum maximalen Wasser- beziehungsweise Gemisch-Volumenstrom.
- Schadenswasser-Menge (wie viel Wasser im Brandschutt gebunden oder durchgetropft unter dem Versuchsstand aufgefangen wurde)
- Aus der Differenz zum Gesamtverbrauch errechneter verdampfter Anteil und die durch diesen dem Brand entzogene Wärme.

[Föhl /2004/, /50/] zeigt in *Abbildung 7* die Löschwasser-Effizienz verschiedener Löschverfahren nach Angaben von DLS-Herstellern (die 5 Balken links im Diagramm) und nach Versuchsergebnissen der FFB (die 6 Balken rechts).

Die gerne als Hauptvorteil des Druckluftschäum-Verfahrens bezeichnete Eigenschaft, seine hohe Löscheffizienz gegenüber reinem Wasser ist allerdings zu relativieren, denn die Löscheffizienz hängt in der Einsatzpraxis nicht nur von den technischen Möglichkeiten des Löschverfahrens, sondern in hohem Maße auch von den Fähigkeiten und Erfahrungen der Feuerwehreinsetzungskraft am Strahlrohr ab, wie die rechte Seite der *Abbildung 7* verdeutlicht. An dieser Stelle soll allerdings der Hinweis nicht fehlen, dass sich innerhalb der vergangenen 10 Jahre zwischen dem Bericht von [Föhl /2004/, /50/] und heute die Praxis der Brandbekämpfung fortentwickelt und damit auch der Erkenntnisse in der Fachöffentlichkeit relativiert haben.



C-, D-MR = C-,D-Mehrzweckstrahlrohr; QK = Quellskörperzusatz; AmPh-L = 20%ige Diammonium-Hydrogen-Phosphat-Lösung

Abbildung 7: Die Löschwasser-Effizienz verschiedener Löschverfahren nach Angaben von DLS-Herstellern (die 5 Balken links im Diagramm) und nach Versuchsergebnissen der FFB (die 6 Balken rechts) [Föhl /2004/, /50/]

[Föhl /2004/, /50/] sieht folgende Vorteile das DLS-Löschverfahren:

- Der hohe Löschmittel-Volumenstrom bedingt eine deutliche Steigerung der Wurfweite, nicht nur gegenüber konventionellem Schaum, sondern auch gegenüber Wasser – was einen erheblichen Sicherheitsgewinn für die Feuerwehr darstellt – und ermöglicht es, damit besser aufsteigende Rauchgasströme zu durchdringen.

- Die Zumischung von Schaummittel und Luft erfolgt im Löschgruppenfahrzeug, die Schaumqualität kann also durch kontaminierte Luft nicht beeinträchtigt werden.
- Das geringere Gewicht der schaumführenden Schläuche erleichtert deren Handhabung. Die Förderhöhe beträgt ein Vielfaches von konventionellem Schaum, das Doppelte von Wasser. Der statische Gegendruck ist für die Schaumerzeugung unerheblich.
- Die geringe Schaummittel-Konzentration und das mit diesem Schaum mögliche Intervall-Löschverfahren erlauben es, den Vorteil der Sichtbarkeit dieses Löschmittels zu nutzen, das heißt, Löschmittel zu sparen, Wasser- und Umweltschäden zu vermeiden.
- Die sichtbare Anwendung des Löschmittels erleichtert die Ausbildung und verbessert den Löscherfolg.
- Sinnvoll ist die Rauch- und Raumkühlung in zum Brandraum benachbarten Räumen.
- Besteht der Brandraum selbst aus Materialien mit geringer Wärmekapazität (z.B. Stahlcontainer), so kann der Sprühstrahl bis zum und auch noch kurz nach dem Flashover zur Rauchgaskühlung unter der Decke eingesetzt werden. Im Vollbrand-Stadium ist wegen der dann herrschenden Verbrühungsgefahr davon abzuraten.
- Eignet sich der Brand in einem Raum in Massivbauweise (z.B. Mauerwerk), so besteht diese Gefahr bereits kurz nach dem Flashover. Hat er sich zum Vollbrand entwickelt, kann mit einiger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die "Dampfexplosion", wenn der Sprühstrahl die heiße Decke trifft, die Einsatzkräfte durch Heißdampf und durch sich ausbreitende teilverbrannte, durchzündende Rauchgase (Rollover) gefährdet.
 - Diese Durchzündung (explosionsartiger Flammenpilz) am Brandraum-Fenster ergab sich in einem Versuch an der FFB mit einer Brandlast von 730 kg Möbel (Löschbeginn 17,7 min nach Zündung bei einem Abbrand von 40% = 292 kg) bereits 1,5 s nach Beginn des Löschvorganges. Nach Angaben von [Föhl /2004/, /50/] wurde hierbei zunächst für eine Dauer von 2,6 min mit DLS mit einer Verschäumungszahl von 12 gearbeitet und anschließend wurden die Nachlöscharbeiten mit der

Verschäumungszahl von 9,5 für eine Dauer von ca. 30 min durchgeführt.

- Bei den Versuchen bewegte sich der für das Löschen mit DLS erforderliche Zeitaufwand bis zum Kommando "Feuer aus" in ähnlicher Größenordnung wie bei anderen Löschverfahren.

[Föhl /2004/, /50/] kommt zu dem Schluss, dass im Inneneinsatz mit dem DLS-Löschverfahren Wasserschäden vermieden bzw. deutlich verringert werden können. Die im Rahmen der hier beschriebenen Brand- und Löschversuche eingesetzten Druckluftschaum-Systeme (DLS) erweisen sich als geeignet, um einen Zimmerbrand zu löschen. Hervorzuheben ist insbesondere die Tatsache, dass zwar in den Brandrückständen je nach Versuch 38...275 L Wasser gebunden wurden, dass darüber hinaus aber praktisch kein unverdampftes, durchtropfendes Löschwasser anfiel. Auch im Außeneinsatz ermöglichen die Handhabungsvorteile (große Wurfweite und Durchschlagskraft, hohe Mobilität wegen des geringen Gewichts) in Verbindung mit dem günstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnis einen raschen Löscherfolg und eine dementsprechende Verringerung der Schadstoff-Emission durch den Brand.

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] hat DLS als Vollstrahl keine Kühlwirkung beim Eintritt in die Rauchsicht oder Flammenzone. Erst bei Kontakt mit heißen Oberflächen tritt eine Kühlwirkung ein. Der Kühleffekt auf den Brandrauch erfolgt indirekt aufgrund der Wasserdampfbildung. Bei fehlender Löschmittelabgabe kommt es zu einer Phasentrennung, der Druckluftschaum zerfällt also innerhalb des Schlauches in Wasser-Schaummittel-Gemisch und Druckluft. Dies führt zu einem „Stottern“ des Strahlrohres. Aufgrund der Phasentrennung hat die Anwendung des Impulslöschverfahrens mit DLS zu unterbleiben. Die Löschmittelabgabe sollte mindestens 5 s oder länger erfolgen. Eine einsatzbereite DLS-Angriffsleitung hat beim Öffnen des Strahlrohres durch die Dekompression des DLS höhere Reaktionskräfte als eine mit Wasser gefüllte Leitung, was zu unkontrollierten Bewegungen des Schlauches führen kann. Für einen sicheren Einsatz von DLS ist es erforderlich, mit der Brandbekämpfung von außen (durch Fenster und Türen) zu beginnen und erst dann den Brandraum zu betreten, wenn die Löschwirkung bereits eingesetzt hat. Das Betreten des Brandbereichs erfolgt mit geöffnetem Strahlrohr unter ständiger Abgabe des

Löschmittels. Der sichere Einsatz von DLS muss umgekehrt der Löschtaktik mit Hohlstrahlrohren erfolgen.

[Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] berichten über Versuche der Feuerwehr New York und des National Institute of Standards and Technology (NIST) im Jahr 2012, bei denen u.a. Außen- und Innenangriff bei Bränden im UG und EG erfolgte. Z.B. wurde ein 60 s andauernder Außenangriff bei einem Kellerbrand durchgeführt. Die Temperatur im Brandraum fiel von 900° C auf 150°C, im Treppenraum des EG von 650°C auf 200°C und im Treppenraum des OG von 300°C auf 100°C. Bei allen Versuchsreihen in der Größenordnung von Zimmerbränden mit Außenangriffen blieben die Temperaturen an allen Messstellen gleich oder fielen. Eine Erhöhung der Temperaturen oder eine Verlagerung („Schieben“) des Brandes wurde nicht festgestellt. Ein kurzzeitiger Außenangriff hat in allen untersuchten Fällen die Situation in den Räumen des Gebäudes verbessert.

Nach [Ridder, Cimolino et al. /2013/, /25/] müssen an Hand der Ergebnisse in New York bei der Durchführung eines kurzzeitigen Außenangriffs als Vorbereitung und Sicherung eines folgenden Innenangriffs folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Das Feuer muss von außen erreichbar sein. Das kann bei Kellerbränden oder Bränden in höheren Geschossen eventuell nicht möglich sein. Ferner muss der Außenangriff auch schnell genug erfolgen können (vor dem Innenangriff).
- Der Außenangriff bindet Personal für mehrere Minuten. Dieses Personal steht mitunter nicht anderweitig zur Verfügung (Wasserversorgung, Sicherheitstrupp etc.)
- Eine gleichzeitige Wasserabgabe im Außen- und Innenangriff kann zu einer Beeinträchtigung des vorgehenden Trupps führen. Daher ist eine funktionierende Kommunikation zwischen Innen- und Außenangriff Voraussetzung für diese Technik. Ein gleichzeitiger Innen- und Außenangriff ist daher zu vermeiden.
- Das Ziel eines kurzzeitigen Außenangriffs ist eine Entschärfung, ein „Reset“ des Brandes, nicht aber das „unter Kontrolle bringen“ oder gar Löschen des Brandes. Der Außenangriff muss daher zeitlich begrenzt sein und ein Innenangriff muss sofort anschließen.
- Ein gleichzeitiger Innen- und Außenangriff ist nach wie vor zu vermeiden.
- Die technische Ausstattung der Feuerwehr sollte

- nicht zu vielfältig sein
 - einfach zu bedienen sein
 - nicht anfällig gegenüber Störungen sein.
- Taktische Handlungsvarianten der Feuerwehr müssen sicherheitsorientiert sein und von der Mannschaft verstanden und umgesetzt werden können.
 - Führungskräfte müssen die Vor- und Nachteile sowie die Gefahren der verschiedenen Einsatztechniken und damit einhergehenden Einsatztaktiken kennen und demgemäß den Einsatz leiten.

Nach [vfdb /2010/, /56/] ist beim Einsatz von Rundstrahl- anstelle von Hohlstrahlrohren im Innenangriff darauf zu achten, dass sich beim Ausfall des Kompressors die Wurfweite mit dann nur noch Wasser mit Schaummittel fast auf die Hälfte des mit Druckluftschaum gültigen Wertes reduziert, was eine erhebliche Gefährdung der Feuerwehreinsatzkraft darstellen kann. Deshalb sind Hohlstrahlrohre vorzuziehen, damit dieser Effekt teilweise kompensiert werden kann.

Nach [vfdb /2010/, /56/] ist das schlagartige Schließen von Strahlrohren (Takten des Löschmittelstrahles im Sekundenrhythmus zur Brandrauchkühlung) beim Einsatz von Druckluftschaum im Gegensatz zu Einsatz von Wasser unkritisch, da Druckstöße (Wasserhammer) aufgrund des kompressiblen Luftanteils nicht auftreten können.

Nach [vfdb /2010/, /56/] ist bei allen Bränden mit hohen Temperaturen davon auszugehen, dass auch verdeckte Brände Hohlräume vom Brand erfasst sind. Die Hohlraumproblematik besteht unabhängig vom Löschverfahren. Ohne Öffnungen kann kein Löschmittel eindringen. Gegenüber Wasser begünstigt die wesentlich reduzierte Oberflächenspannung sowohl von Wasser/Schaummittelgemisch als auch von Druckluftschaum das Eindringen in enge Zwischenräume.

Nach dem Technischen Bericht Druckluftschaum [vfdb /2010/, /56/] ergeben sich Zusatzkosten für Druckzumischanlagen von 5.000 bis 20.000 €. Für die Umrüstung auf Druckluftschaum mit Kompressor sowie Regel- und Steuerungstechnik ergeben sich zusätzliche Mehrkosten in Höhe von 10.000 bis 30.000 €.

Bunk /2010/ berichtet über den Brand eines aufgesetzten Dachgeschosses eines elfstöckigen Hochhauses in der Pinneberger Innenstadt. In dem als Abstellraum genutzten Dachgeschoss in ca. 35 m Höhe wurde ein Feuer gelegt. Bei der Brandbekämpfung wurde ausschließlich Druckluftschaum über Hohlstrahlrohre eingesetzt. Reines Wasser als Löschmittel kam nicht zum Einsatz. Die Nachlöscharbeiten in der Zwischendecke gestalteten sich aufgrund von Glutnestern als schwierig. Das mit Dachpappe gedeckte Dach musste von den Einsatzkräften mit der Kettensäge geöffnet werden. Außerdem wurden sämtliche losen Teile von Dachverkleidung oder Fassade entfernt, damit diese nicht unkontrolliert zu Boden fielen. Trotz des massiven Einsatzes von drei Strahlrohren konnten nach Abschluss der Löscharbeiten alle Mieter in ihre Wohnungen zurückkehren. Selbst die Wohnungen im obersten Stockwerk waren bewohnbar. Es gab keinen die weitere Nutzung beeinträchtigenden Wasserschaden, selbst das Treppenhaus war trocken.

[Kircher /2012/, /23/] berichtet wie bereits in Abschnitt 2.2 erwähnt, dass zwischenzeitlich gute Erfahrungen mit dem Einsatz von Druckluftschaum bei einem offenen Dachstuhlbrand gemacht werden, um die Flamme in der ersten Phase soweit niederzukämpfen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit reduziert wird. Parallel muss aber ein Innenangriff erfolgen, um die Flammen im Dachstuhl sorgfältig zu löschen. Die Kontrolle von darunterliegenden Nutzungseinheiten ist bzgl. vertikaler Brandausbreitung und Löschwasserschäden erforderlich.

An dieser Stelle soll auf die von [Braun /2014/, /59/] bereits erwähnte Methode des Immediate Flame Knock Down eingegangen werden.

Nach [Föhl, A /2004/, /50/] und [vfdb /2010/, /56/] ist, wie bereits erwähnt, darauf zu achten, dass der Löschmittelstrahl nicht konzentriert auf Stellen hoher Wärmekapazität (z.B. massive Zimmerdecke) gerichtet wird. Durch die damit verbundene erhöhte Dampfbildung würden sonst im Raum befindliche brennbare Gase durch Türen und Fenster nach außen gedrückt und können dort neue Brände bzw. Brandrauchdurchzündungen verursachen. Dieser taktische Fehler lässt sich vermeiden, wenn zunächst – vom eigenen Standort aus beginnend – der Löschmittelstrahl möglichst gleichmäßig im Raum verteilt und die gewünschte Abkühlung der Atmosphäre bzw. der Bauteile herbeigeführt wird.

Die möglichen Vorteile aber auch die mögliche Gefährdungen von Einsatzkräften der Feuerwehr ist im Hinblick auf die Vorgehensweise bei der Methode des „Immediate Flame Knock Down“ mit kurzem Außenangriff vor dem Innenangriff bzgl. folgender Parameter zu untersuchen:

- Wie breitet sich der zündfähige Brandrauch im Treppenraum bzw. in darüber- und darunterliegende Räume aus?
 - Tür zur Dachgeschosswohnung ist geschlossen: kurzer Außenangriff mit DLS, dann Innenangriff
 - Tür zur Dachgeschosswohnung ist offen: kurzer Außenangriff mit DLS, dann Innenangriff
- Ununterbrochene Kommunikation zwischen dem Trupp im Innen- und Außenangriff ist erforderlich, um eine Gefährdung des Trupps im Innenangriff auszuschließen
- Welche Auswirkungen haben unterschiedlich große Öffnungen im Dachbereich für diese Art des Außenangriffes?
- Sind die Dachfenster noch intakt und befinden sich dadurch zündfähige Brandrauchbestandteile (Schwelgase) aufgrund von Sauerstoffmangel (erloschener Flammenbrand) im Dachgeschoß?

Aufgrund der aus den Versuchen an der FFB gewonnenen Erkenntnisse über das mögliche lange Standhalten von Fenstern sowohl mit Zweifach- als auch Dreifachverglasungen bei thermischer Belastung im Brandfall ist ersichtlich, dass die Vorgehensweise kurzer Außenangriff vor dem Innenangriff über Öffnungen evtl. nur bedingt durchführbar ist.

- Wie groß ist der Dachgeschossbereich bzgl. der möglichen Brand- und Rauchausbreitung?

Größere Dachgeschossräume, mehrgeschossige Dachgeschossausbauten und Maisonette-Wohnungen (Wohnraum zusammenhängend mindestens zweistöckig innerhalb des Gebäudes angeordnet) mit großem Luftvolumen ergeben unterschiedliche Anforderungen an die Brandbekämpfung.

3.2.4. Brand- und Löschversuche mit DLS im Vergleich mit anderen Löschmitteln – weitere in- und ausländische Untersuchungen

[de Vries und Hölemann /2001/, /40/] berichten über folgende Brand- und Löschversuche von Löschschaum und Druckluftschaum im Vergleich mit Wasser und anderen Löschmittelzusätzen:

- 1997: Universität Wuppertal / Versuchsgrube Tremonia der DMT in Dortmund
Brände von Mobiliar wurden in einem Versuchsraum mit Wasser als Löschmittel, Gel-Zumischung und Class-A-Foam bekämpft. In der überwiegenden Anzahl der Versuche wurde ein D-Hohlstrahlrohr verwendet. In einem Versuch kam in der Anfangsphase auch ein Schwerschaumrohr zum Einsatz. In den Versuchen zeigte sich, dass bezüglich des Abkühlens des Brandraumes das thermische Verhalten der Löschmittel Wasser und Class-A-Foam (0,5 % Zumischung) annähernd gleich war. Mit Gel gelang es, eine bessere Abkühlung des Brandraumes zu erzielen, allerdings verstopfte das Gel alle wasserführenden Armaturen und erzeugte einen extrem rutschigen Belag auf dem Stoltenboden. Der Löschmittelaufwand war bei Class-A-Foam wesentlich geringer als bei Wasser. Der Löschaufwand mit 3% Gel-Zumischung lag im Mittelfeld.
- 1998: Universität Wuppertal /Berufsfeuerwehr Bochum
Hier wurden Brand- und Löschversuche an Altpapiersammelcontainern durchgeführt. Die Löschversuche erfolgten mit Wasser (C-Hohlstrahlrohr und D-Löschlanze) sowie Wasser mit Mehrbereichsschaummittel (C-Mehrzweckstrahlrohr ohne Mundstück, Mittelschaumrohr, D-Löschlanze). Die Verwendung von Schaummittel (Mehrbereich-Schaummittel und Class-A-Foam mit 0,3 % Zumischung) führte in allen Fällen bei einer geringeren Gesamtlöschmittelmenge zu einer stärkeren Durchfeuchtung der Papierschüttung und zu weniger ablaufendem Wasser. Die mit Löschlanze durchgeführten Versuche erforderten den geringsten Löschaufwand.

- 1997: Universität Wuppertal / Firma Hale /Berufsfeuerwehr Ingolstadt
Hier wurden Versuche in einem 20 Fuß ISO Container (ca. 6 m * 2,5 m * 2,5 m) mit u.a. Holzpaletten, Autositzen, Strohballen und Federkernmatratze durchgeführt. Es wurde sowohl Wasser als auch DLS (0,5 % Schaummittelzusatz) eingesetzt. Bei allen Versuchen wurde ein C-Vollstrahlrohr verwendet. Bei den unterschiedlichen Löschmitteln (Wasser/DLS) konnten keine Unterschiede im Abkühlen des Brandraumes zwischen Wasser und DLS festgestellt werden. Bei den DLS Versuchen war die Löschwassermenge und die Löschdauer wesentlich geringer als beim Einsatz von Wasser.
- 1993: Underwriters Laboratories
Beim Ablöschen von Nadelholzkrippen hatten Class-A-Foam und DLS eine deutlich bessere Löschwirkung als reines Wasser. Holz nimmt hierbei mit Schaummittelzusatz deutlich mehr Feuchtigkeit auf als reines Wasser, wodurch eine zeitliche Verzögerung der Entzündung erzielt wird.
- 1995 und 1996: Fire Research and Development Group (FRDG)
In einem Flugzeug-Hangar („Rissington“-Versuche) wurden Holzkrippen unter Verwendung von Wasser, AFFF, Mehrbereich-Schaummittel und Class-A-Foam abgelöscht. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich Löschdauer, Löschmittelmenge oder Reduktion der Brandintensität nach Löschbeginn zwischen den verschiedenen Löschmitteln.
- 1997: Universität von Canterbury, Neuseeland
Brand- und Löschversuche an Holzkrippen wurden in einem Brandraum mit reinem Wasser und mit Wasser mit 0,3 % Class-A-Foam Zumischung aus einer Hochdruck-Schnellangriffseinrichtung (30 bis 35 bar) sowie mit Druckluftschaum durchgeführt. Es zeigten sich nach Löschbeginn keine signifikanten Unterschiede der Brandraumtemperaturen oder der Reduktion der Energiefreisetzung der Brände zwischen den verschiedenen Löschmitteln. DLS und Hochdruck/Class-A-Foam erforderten etwa gleich große Löschmittelmengen. Bei der Verwendung von Hochdruck mit reinem Wasser ergab sich eine größere Löschmittelmenge. Beim Einsatz von DLS waren die Sichtverhältnisse im Brandraum am besten.

- 1992: Salem/Connecticut/USA

In einem Versuchsraum wurde die Löschwirkung von Wasser, Class-A-Foam und Druckluftschäum bei Strohballen und Holzpaletten untersucht. Ziel der Untersuchungen war nicht die Ermittlung der insgesamt erforderlichen Löschmittelmengen, sondern die Messung der Temperaturänderungen im Raum nach Beginn des Löschangriffs. Wasser erzielte das schlechteste Ergebnis, Class-A-Foam bewirkte eine doppelt so schnelle Verringerung der Temperaturen im Brandraum. Mit Druckluftschäum wurde die schnellste Abkühlung erzielt.

[Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] haben die Kühlwirkung von Druckluft-Schaum im Vergleich mit Hochdruck-Wasserebel beim Feuerwehreinsatz zum einen in einem Feuerwehrübungshaus und zum anderen durch Realbrandversuche in einem älteren zweistöckigen Holzhaus untersucht.

In der ersten Versuchsserie von [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] wurde in einem Feuerwehrübungshaus ein Wannenbrand (siehe *Abbildung 8*, Durchmesser 0,8 m, 20 l Heptan, ca. 1 MW Wärmefreisetzung, 7 Minuten Vorbrennzeit) als Brandherd verwendet, welcher beim Sprühvorgang absichtlich durch keines der beiden Löschmittel direkt beaufschlagt wurde. Class-A-Foam wurde in einer Konzentration von 0,3 % eingesetzt. Es wurde sowohl nasser Schaum mit einem Volumenverhältnis Schaummittellösung zu Luft von 1:5,5 (Wasser/Schaum Konzentrat: Luft) als auch trockener Schaum mit einem Volumenverhältnis von 1:12 verwendet.

Die Feuerwehreinsatzkraft gab aus dem Vorraum den Sprühstoß durch die Tür in den Raum mit dem Wannenbrand ab. Es wurde versucht, möglichst gleiche Mengen der verwendeten unterschiedlichen Löschmittel in die Räume abzugeben.

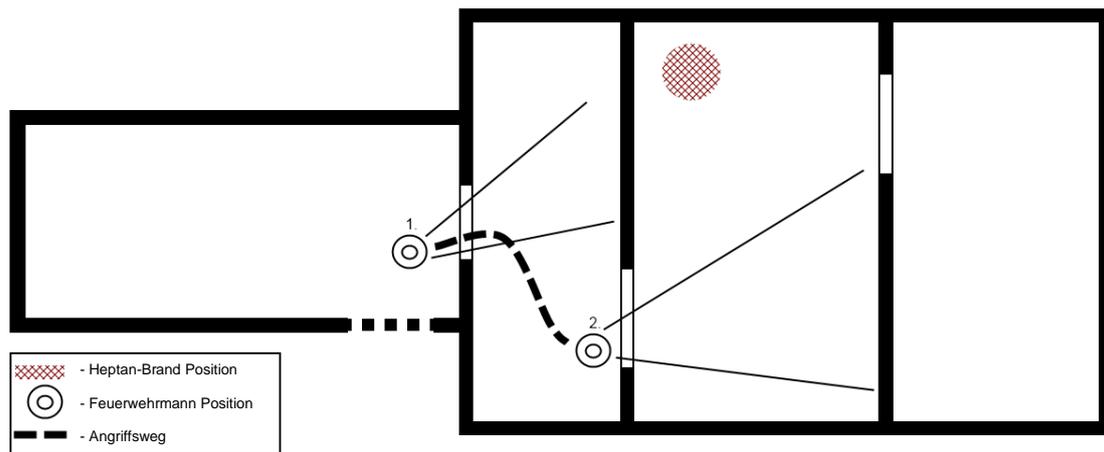


Abbildung 8: Lage des Wannenbrandes in der Versuchsanlage und Bewegung der Feuerwehreinsatzkraft beim Löscheinsatz [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]

Bei sämtlichen Versuchen ergab sich eine Maximaltemperatur von 500 – 600°C ca. 180 – 200 s nach der Entzündung der Brandlast. Danach ging der Brand in den unterventilierten Zustand über und die Temperatur fiel auf 250°C bis 350°C.

Der Wassernebel (HD-Nebel: Pumpendruck 38 bar, Druck an der Düse: 18 bar) wurde in einer Art „Streichbewegung“ eingebracht, um ein möglichst großes Raumvolumen abzudecken und nicht so sehr die heißen Oberflächen zu beaufschlagen.

Im Gegensatz zum HD-Wassernebel wurden mit DLS die heißen Oberflächen, hauptsächlich die Decke und die gegenüberliegende Wand beaufschlagt.

Um eine gleichmäßige ausgebildete Schaumströmung zu erzielen, war es bei DLS erforderlich, vorher Löschmittel für einige Sekunden in den Treppenraum abzugeben.

Das Wassernebel-Strahlrohr musste dagegen nicht zur Erzeugung eines ausgebildeten Sprühbildes im Voraus geöffnet werden.

Wie sich in Vorversuchen gezeigt hatte, ergaben sich beim Schließen und Öffnen des Strahlrohres mit DLS ein Druckstoß und dadurch eine Wurfweitenerhöhung des Druckluftschaumstrahles.

Dies hat Vorteile bei der Anwendung bei großen Abständen, führt aber bei kurzen Abständen dazu, dass die Schaumstruktur durch den hohen Impuls beim Auftreffen auf Oberflächen zerstört wird.

Der ausgebildete stationäre DLS Strom war gleichmäßig und ohne Rückstoß.

Die nachfolgenden *Abbildungen 9, 10, 11 und 12* zeigen einige Sprühbilder des eingesetzten Druckluftschaumes.



Abbildung 9: Wurfweitenerhöhung des Löschmittelstrahles beim Öffnen des Strahlrohres bei nassem Druckluftschaum [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]



Abbildung 10: Wurfweite des ausgebildeten stationären Löschmittelstrahles bei nassem Druckluftschaum [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]



Abbildung 11: Beaufschlagung von vertikalen Flächen mit Druckluftschäum: Bild links: trockener Schaum, rechts: nasser Schaum [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]

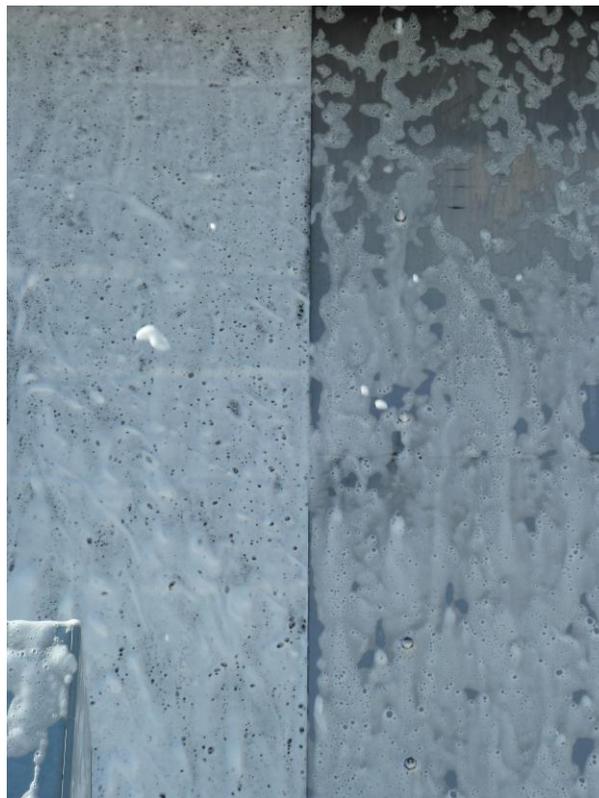


Abbildung 12: Beaufschlagung mit Druckluftschäum: Bild links: Nasser Schaum auf rauher Oberfläche, Bild rechts: auf glatter Oberfläche ein paar Minuten nach der Beaufschlagung [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]

Die Versuche haben gezeigt, dass DLS einen Kühleffekt auf die heißen Gase hat, wenn er direkt auf die heißen Oberflächen des Raumes gerichtet wird.

Weiterhin wurde festgestellt, dass Schaum, der zur heißen Decke gerichtet wird, innerhalb weniger Sekunden verdampft. Schaum, der auf die Wände gerichtet wird, hat eine wesentlich langsamere Verdampfungsrate.

Beim Vergleich von nassem und trockenem Schaum wurde die Beobachtung gemacht, dass Nassschaum eine dünnere gleichmäßige Schicht auf der heißen Oberfläche bildet, während der trockene Schaum eine dickere ungleichmäßige Schicht bildet.

Der feuchte Schaum schien auch an den Oberflächen in einem höheren Ausmaß als der trockene Schaum zu haften.

Durch die Sprühstöße im zweiten Raum verbesserte sich die Sicht durch nassen Schaum mehr als durch trockenen Schaum und Wassernebel.

Es wurde jedoch ebenfalls festgestellt, dass Druckluftschaum bei der Kühlung der heißen Gase eine geringere Kühlwirkung hat als der eingesetzte Hochdruck-Wassernebel.

Der Temperaturabfall erfolgte beim Einsatz von Hochdruck-Wassernebel unmittelbar nach dem Start der Anwendung.

Zum Teil kam es während der Löschmittelanwendung auch zu einer Erhöhung der Temperatur an den Messstellen im Bodenbereich.

Die folgende Tabelle 3-4 zeigt die mittlere Änderung der Temperatur bei ausgewählten Temperaturmessketten pro Liter Wasser.

Mittlere Änderung der Temperatur pro Liter Wasserbeaufschlagung [°C/l]			
Thermoelementkette	DLS (nass)	DLS (nass)	Wasser
X4d (oberste Messstelle)	- 3,39	-2,50	- 18,74
X4c	- 2,91	-3,88	- 16,00
X4b	+ 1,36	+ 0,70	- 0,51
X4a	+ 0,69	0,00	+ 9,11
X3d	- 5,41	- 4,63	- 33,26
X3c	- 4,33	- 3,04	- 31,86
X3b	+ 1,77	+ 1,00	- 0,71
X3a (unterste Messstelle)	+ 1,33	+ 0,50	+ 9,41

Tabelle 3-4: Mittlere Änderung der Temperatur bei ausgewählten Temperaturmessketten pro Liter Wasser [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]

Diese Aussagen bzgl. dem Vergleich der Kühlwirkung von Wasser und DLS werden bestätigt durch [Grimwood /2008/, /65/] wonach DLS sehr effizient als Löschmittel bei der Brandbekämpfung eingesetzt werden kann, jedoch nicht zur Kühlung von heißen Rauchgasen verwendet werden soll.

Aus den Versuchen im Feuerwehrübungshaus mit Wannenbrand wurden [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] folgende Erkenntnisse gewonnen:

- HD-Wassernebel erzeugt sehr feine Tropfen, die zu einer Einhausung eines großen Brandrauchvolumens führen und eine effektive Verdampfung bewirken.
- Tropfen, die nicht im heißen Brandrauch verdampfen, verdampfen entweder beim Aufprall auf die umgebenden Oberflächen oder rollen über die Oberflächen.
- Die Gaskühlwirkung durch HD-Wassernebel erfolgt sofort.
- Die Verdampfung von HD-Wassernebel im Brandrauch und auf den heißen Oberflächen führt zu einer Expansion von Dampf und zu einer Verschlechterung der Sicht.
- Die Expansion von HD-Wassernebel im oberen Bereich des Raumes drückt den heißen Brandrauch zum Boden und führt zu einer Erhöhung der Temperatur im unteren Bereich des Raumes.

- DLS hat seine Hauptkühlwirkung nicht auf dem Weg durch den heißen Brandrauch, sondern wenn der Schaum auf die heißen Oberflächen trifft und es dadurch zu einer indirekten Kühlung kommt.
- Bei der Abgabe von DLS durch ein Rundstrahlrohr ergibt sich ein geschlossener Schaumstrahl.
- Durch das Rundstrahlrohr bleibt die charakteristische Blasenstruktur des Schaumes erhalten, begrenzt aber dadurch die Kontaktfläche mit den umgebenden heißen Gasen. Dies verhindert einen Teil der frühen Verdampfung von DLS im Vergleich zu den Versuchen mit HD-Wassernebel.
- Bei den Versuchen mit DLS wurde daher keine Dampfexpansion festgestellt.
- Sobald DLS auf die heißen Oberflächen trifft, wird die Verdampfung effektiver aufgrund des Kontaktes mit der heißen Oberfläche und der weitaus größeren Kontaktfläche mit den heißen Gasen.
- Weiterhin wird die heiße Oberfläche durch den Schaum über einen längeren Zeitraum abgedeckt. Dadurch wird die Wärmerückstrahlung von der heißen Oberfläche auf die Gase reduziert und gleichzeitig die Oberfläche gekühlt.
- Die Gaskühlung mit DLS ist nach Beginn der Schaumanwendung um einige Sekunden verzögert.
- Die Anwendung von DLS führt zu einer langsameren und länger andauernden Temperaturänderung im Vergleich zu Wasser. Bestätigt wurde dies auch durch Thermografie-Aufnahmen, wobei die Wand für mehrere Minuten eine niedrigere Oberflächentemperatur aufwies.
- Oberflächenkühlung fand auch bei Verwendung von Wasser statt, jedoch sind die Effekte geringer und liegen über einen kürzeren Zeitraum vor.
- Da Wasser auch bei DLS die Hauptkühlkomponente ist, ergeben sich die Unterschiede durch die Schaumstruktur.
- DLS haftet besser an den heißen Oberflächen und bildet eine dickere Schicht als Wasser. Dadurch werden die Effekte durch DLS stark erhöht.
- Wenn Wasser die Thermolemente einhüllt, kommt es zu einem beträchtlichen linearen Temperaturabfall. Danach erfolgt allerdings wieder ein rascher Anstieg auf die heiße Umgebungstemperatur.
- Beim Einhüllen der Thermolemente durch DLS kam es bei den Versuchen zu einer Temperaturabsenkung auf 30°C und anschließend zu einer Erhöhung knapp unter 100°C. Diese Temperatur blieb so lange konstant, wie eine stabile

Schaumschicht das Thermoelement umhüllte. Nach der Zerstörung der Schaumschicht wurde die heiße Umgebungstemperatur wieder erreicht.

- Untersuchungen von anderen Forschungsinstituten haben gezeigt, dass brennbare Pyrolysegase durch DLS daran gehindert werden, die abgedeckte Oberfläche zu verlassen daher nicht zum Brandgeschehen beitragen können.
- Die vorgenannten Erkenntnisse gelten weitgehend sowohl für Nass und Trocken DLS.
- Der größte Unterschied trat beim Einsatz von trockenem DLS im Raum auf. Hierdurch kam es zu einer Erhöhung der Brandintensität. Im oberen Bereich des Raumes ergab sich eine nur geringfügige Verringerung oder sogar Erhöhung der Temperatur.

Dies kann eine Reihe von Ursachen haben:

Zuerst führt die Anwendung zu einem Röhreffekt im Raum, welcher dem unterventilierten Brand mehr Sauerstoff liefert.

DLS (trocken) hat einen höheren Luftanteil bzw. niedrigeren Wasseranteil als DLS (nass). Dieser zusätzliche Sauerstoffanteil scheint einen größeren Effekt auf den Brand zu haben als das verdampfende Wasser und wirkt dem Kühleffekt von trockenem DLS entgegen.

- Während der Versuche hat sich ebenfalls gezeigt, dass trockener DLS nicht so gut auf den heißen Oberflächen haftet wie nasser DLS und dadurch eine geringere Kühlwirkung aufweist.
- Diese Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass trockener DLS nicht zur Bekämpfung von Gebäudebränden geeignet ist.

Bei den Untersuchungen [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] wurden folgende Fehlerquellen und Einflussgrößen festgestellt, die einen möglichen Einfluss auf das Versuchsergebnis hatten:

- Mit Ausnahme von 2 Versuchen wurde der Brand ohne direkte Löschmittelaufgabe gelöscht. Dies war wahrscheinlich auf die unterventilierten Bedingungen zurückzuführen, die die Brandentwicklung abschwächte. Hierdurch war auch die Kühlwirkung sehr effektiv.
- Beim Versuch wurden sämtliche Ventilationsöffnungen zur Gewährleistung reproduzierbarer Versuchsbedingungen geschlossen um die Einflüsse äußerer Effekte

wie Wind und Außentemperatur zu begrenzen. Dadurch wurde der Brand geschwächt und erlosch nach der Löschmittelfreisetzung.

Hierdurch ergab sich die Schwierigkeit festzulegen, ob der Temperaturabfall eine Folge der Gaskühlung durch das Löschmittel oder durch die Abnahme der Brandintensität aufgrund der geschlossenen Ventilationsöffnungen war.

- Die Versuche wurden (nach Autorenangabe) in relativ großen Räumlichkeiten durchgeführt.
- Die Löschmittel wurden per Hand abgegeben. Dieses verursacht Probleme bzgl. der Reproduzierbarkeit der Versuche.
- Vor dem Löschmitteleinsatz lagen ungefähr gleiche Maximaltemperaturen und stabile Temperaturverhältnisse vor, wodurch eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Ausgangssituation erzielt werden konnte.
- Durch den Einsatz von erfahrenem Personal konnten die Abweichungen bei der Anwendung des Löschmittels minimiert werden.

Die zweite Versuchsreihe von [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/] wurde, wie bereits erwähnt in einem älteren zweistöckigen Holzgebäude jeweils unter Verwendung von Hochdruck-Wassernebel (40 bar, Druck an der Düse: 21 bar) bzw. mit Druckluftschäum (nass) durchgeführt. Die Versuche wurden in der zweiten Etage des Gebäudes in zwei fast identischen Räumen durchgeführt.

Die Wände in allen Zimmern waren mit lackierten Holzpaneelen verkleidet und teilweise auch mehrlagig tapeziert. Die Decke in einem Raum war mit Holz-Faserplatten verkleidet. Der Boden war mit Linoleum ausgelegt. (siehe Abbildung 13, *Abbildung 14*, *Abbildung 15*). Die Brandlast bestand aus Holz, im Gegensatz zur erstbeschriebenen Versuchsserie mit dem Wannenbrand.

Der Versuch mit Hochdruck-Wassernebel wurde in Raum 2, der Versuch mit Druckluftschäum in Raum 3 des Gebäudes durchgeführt.

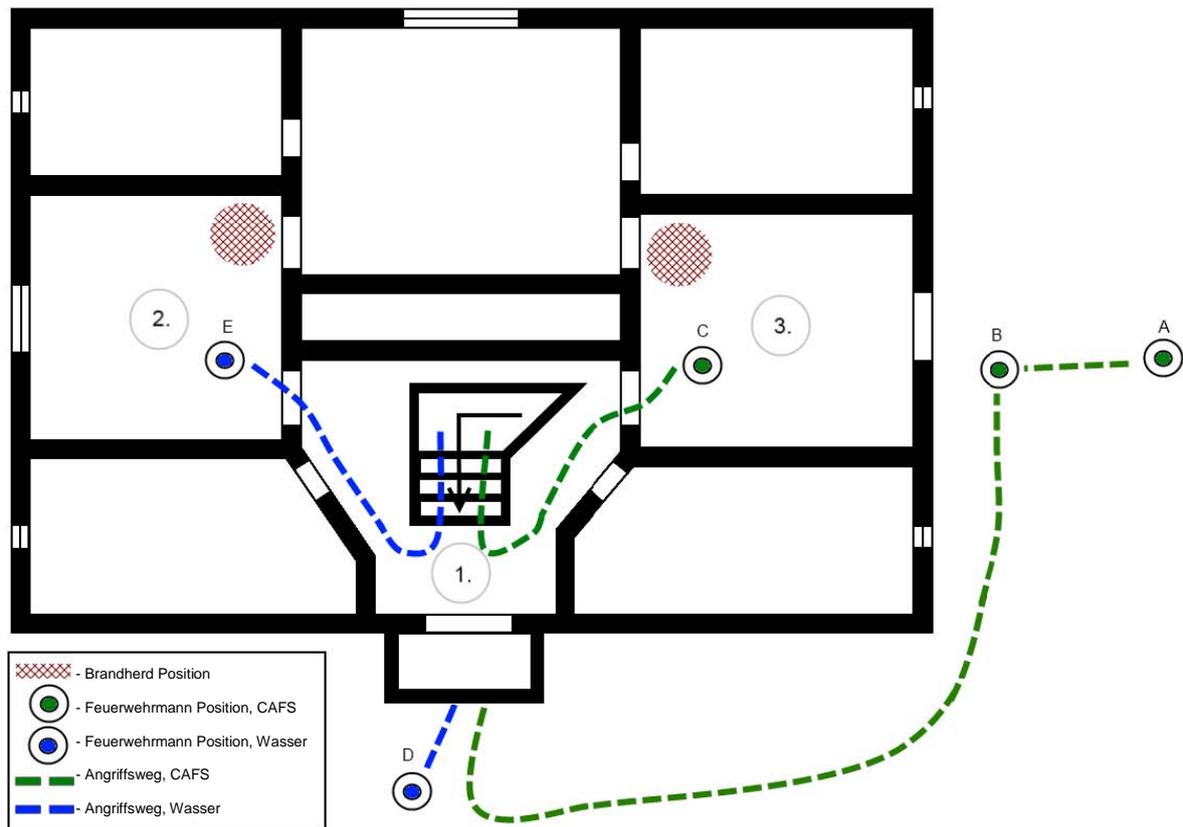


Abbildung 13: Angriffsweg der Feuerwehr [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]



Abbildung 14: Treppenraum, Podest und Eingangstür in den Brandraum (Raum 2.)
[Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]



Abbildung 15: Brandlast in den Räumen (2 Holzplatten, Zündquelle: 1 l Flüssig-Grillanzünder) [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]

Der Beginn der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr erfolgte unmittelbar nach Eintreten des Flashovers. Der Flashover erfolgte bei beiden Versuchen nach ca. 200 s. Die Maximaltemperatur bei den Versuchen betrug ca. 700 °C.

Der Löschangriff mit DLS begann von außen durch das Fenster über eine Zeitdauer von 10 s, wobei zunächst die Decke beaufschlagt wurde. Anschließend erfolgte der Innenangriff mit dem Ablöschen des Brandes.

Beim Einsatz von HD- Wassernebel erfolgte unmittelbar der Innenangriff ohne Außenangriff aufgrund der geringeren Wurfweite des Wassernebels. Beim HD- Wasser-nebel wurden die Feuerwehreinsatzkräfte aber ebenfalls außerhalb des Gebäudes positioniert, um die Zeitdifferenz aufgrund des Außenangriffs mit DLS zu simulieren.

Die folgende Tabelle 3-5 zeigt die Einsatzdauer und die Löschwassermengen für die beiden Versuche.

	Außen- angriff [s]	Innen- angriff [s]	Gesamt- zeit der Brand- bekämp- fung [s]	Volumen- strom [l/min]	Gesamt- lösch- wasser- menge [l]
HD-Wassernebel	-	11	11	103	18,9
DLS	10	1	11	122	22,4

Tabelle 3-5: Einsatzdauer und Gesamtlöschwassermenge für die beiden Versuche mit der Brandlast Holz [Lyckeback und Öhrn /2012/, /63/]

Die Gesamtwassermenge lag bei DLS 3,5 l höher als bei HD-Wassernebel. Die Autoren vermuten, dass der verwendete HD-Wassernebel im Gegensatz zu früheren Versuchen mit den dort verwendeten üblichen Strahlrohren mit höheren Volumenströmen und größeren Tropfen Vorteile aufweist und dass bei den früheren Versuchen relativ kleine Brände verwendet wurden, die vergleichsweise leicht mit beiden Systemen zu löschen waren.

Aufgrund der Tatsache, dass DLS zunächst durch das Fenster angewendet wurde, ergab sich beim Öffnen der Tür für den Innenangriff eine geringere Temperatur im Podestbereich vor dem Brandraum. Die Zeit bis die Temperatur im Brandraum unter 200°C fiel, dauerte bei Wassernebel etwas länger als bei DLS.

Die Hauptlöschmittelmenge an DLS wurde durch das Fenster aus sicherer Entfernung auf die Decke aufgebracht, nur ein kleiner Teil war bei dem anschließenden Innenangriff erforderlich, um den Brand zu löschen.

Dies bedeutet, dass der Brand fast vollständig durch die äußere Anwendung gelöscht wurde, obwohl DLS hier nicht direkt auf den Brandherd gerichtet wurde.

Der Wasserdampf dagegen wurde direkt im Brandraum zum Kühlen des Brandraumes und zum direkten Löschen angewendet.

Am Ende des Versuches konnte beim Einsatz von HD-Wasserdampf mehr Wasser auf dem Boden beobachtet werden.

Decke und Wände hatten bei Verwendung von HD-Wasserdampf eine größere Brandzehrung als beim Einsatz von DLS.

Es zeigte sich weiterhin, dass die Gefahr der Wiederentzündung bei DLS geringer als bei Wasserdampf war.

Aufgrund der Versuchsergebnisse ist mit DLS eine indirekte Brandbekämpfung aus sicherer Entfernung in einem Brandabschnitt möglich, ohne den Brandherd direkt mit Löschmittel zu beaufschlagen. Durch die erste Anwendung von außen durch das Fenster werden die Temperaturen im Brandraum stark abgesenkt und bessere Einsatzbedingungen für die Feuerwehreinsatzkräfte im anschließenden Innenangriff geschaffen.

Die Autoren bemerken, dass weitere Untersuchungen aufgrund der geringen Anzahl der hier durchgeführten Versuche erforderlich sind.

Zu untersuchen ist z.B. der Einsatz von DLS, wenn sichere Entfernungen für die Anwendung nicht möglich sind. Dies ist insbesondere in Hinblick darauf interessant, dass die Gaskühlwirkung von DLS schlechter als von Wasser ist. Diese Fragestellung wird auch von [Grimwood /2008/, /65/] aufgeworfen.

Weiterhin wäre interessant, wie die DLS Anwendung von außen in Verbindung mit anderen Maßnahmen wie z.B. Feuerwehlüften die Umgebungsbedingungen im Innern verbessern können und wie z.B. Löschlanzen für DLS bei Gebäudebränden eingesetzt werden können.

[Zhang, J. et al. /2011/, /64/] haben die Kühlwirkung von Druckluftschäum bei brandlast- und ventilationsgesteuerten Raumbränden im Vergleich mit Wasserdampf untersucht. Die experimentellen Untersuchungen wurden in Brandräumen, die aus Schiffscontainern hergestellt wurden, durchgeführt.

Die brandlastgesteuerten Brände wurden in einem Raum mit den Abmessungen Länge= 12 m, Breite = 2,4 m, Höhe = 2,4 m durchgeführt. Als Brandlast wurden 320 kg Spanplatten verwendet. Nach einer Vorbrennzeit von 5 min wurden die Löschangriffe mit Wasserdampf bzw. DLS gestartet. Zu Vergleichszwecken wurde die gleiche Fördermenge von Wasser für die Brandbekämpfung mit Wasserdampf als auch mit Druckluftschäum (0,5 % Schäumittelkonzentrat) verwendet. Die Fördermenge an Löschwasser betrug 60 l / min. Der Druckluftschäum bestand aus 100 Teilen Wasser, 750 Teilen Druckluft und 0,5 Teilen Class-A-Foam.

In der Arbeit werden keine Angaben über die verwendeten Strahlrohre für Löschmittelausbringung, Zerstäubungsdruck bzw. Sprühbild und Tropfengrößen beim Einsatz von Wasserdampf gemacht.

Bei den brandlastgesteuerten Bränden wurde der Wasserdampf nicht direkt auf die Brandlast aufgegeben, sondern nur zur Rauchgaskühlung verwendet.

Beim Einsatz von Wasserdampf verschlechterten sich die Sichtverhältnisse so, dass die Feuerwehreinsatzkräfte den Rückzug antraten und von außerhalb des Wasserdampf in den Brandraum abgeben mussten.

Bei der Verwendung von DLS konnten die Einsatzkräfte, selbst als die Sicht vollständig versperrt war, aufgrund der größeren Temperaturabsenkung im Brandraum den Löschangriff im Brandraum fortsetzen.

Die nachfolgende *Abbildung 16* zeigt den Vergleich der Temperaturen an der mittleren und oberen Position im Brandraum beim Einsatz von Wasserdampf und von DLS für die brandlastgesteuerten Brände.

Durch DLS wurden die Flammen fast vollständig gelöscht und die Temperaturen im Vergleich mit Wassernebel erheblich verringert. Die Autoren führen das auf die größere Wärmeabsorption bei DLS zurück.

Der andere Vorteil des DLS, nämlich weniger Wasserschaden zu erzeugen, konnte nicht bewertet werden, da in beiden Fällen der gleiche Löschwasserstrom verwendet wurde.

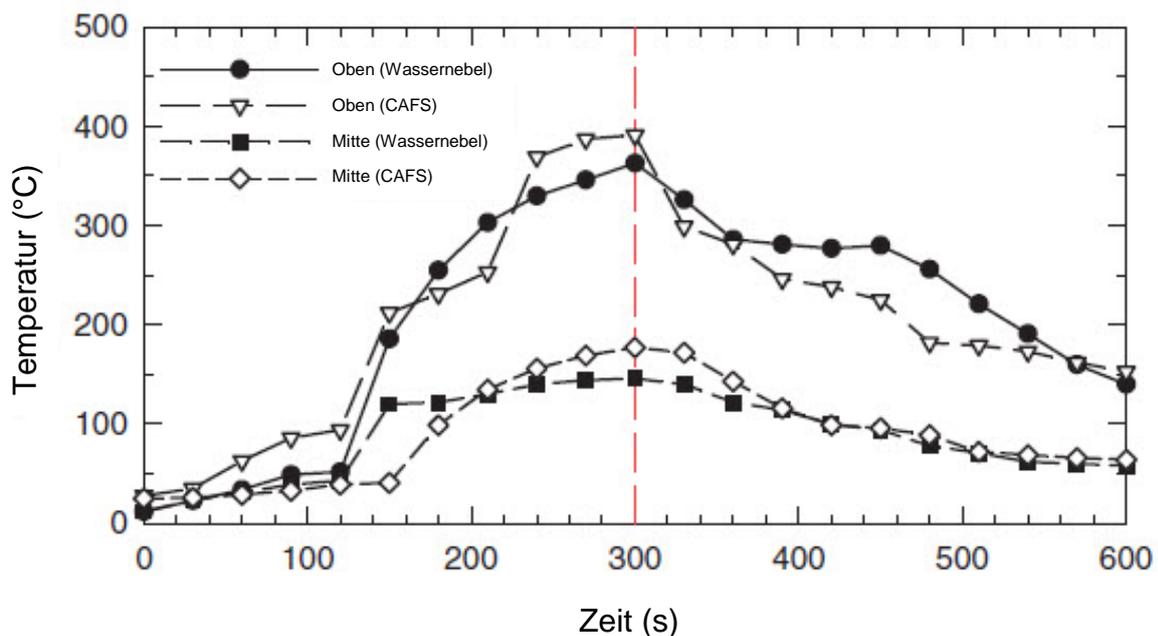


Abbildung 16: Vergleich der Temperaturentwicklung der oberen (Höhe: 1,5 m) und mittleren (Höhe: 1,0 m) Temperaturmessstellen bei den brandlastgesteuerten Brandversuchen mit Einsatz von Wassernebel und DLS [Zhang, J. et al. /2011/, /64/]

Für die ventilationsgesteuerten Brände wurde ein Raum mit den Abmessungen Länge = 6 m, Breite = 2,4 m, Höhe = 2,4 m verwendet. Als Brandlast wurden 200 kg Holzpaletten und Spanplatten verwendet. Bei den ventilationsgesteuerten Versuchen wurden die Türen nach einer Brandentwicklungszeit von 6 min vollständig für eine Zeit von 4 min zur Simulation von Backdraft-Bedingungen geschlossen. Während dieser Zeit von 4 min wechselte der Brand vom gut ventilierten zum stark unterventilierten Brand. Nach 10 min wurde die Tür wieder geöffnet.

Bei den Versuchen wurden drei Brandszenarien betrachtet:

1. Kein Löscheinsatz – Tür an der Vorderseite des Raumes wird nach 10 min wieder geöffnet
2. Fronttür bleibt geschlossen, Abgabe von Wasserdampf durch die seitliche Tür für 4 min in die Heißgasschicht– Schließen der seitlichen Tür und Öffnen der Fronttür – Beobachtung des Backdraft
3. Wie Szenario 2. jedoch statt Wasserdampf Verwendung von Druckluftschaum (400 l DLS bestehend aus 50 l Wasser und 0,25 l Schaummittelkonzentrat)

Abbildung 17 zeigt die Temperaturentwicklung im Brandraum in den verschiedenen Höhen 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m für die ventilationsgesteuerten Brände ohne Löschmaßnahmen (Brandszenarium 1). Nach einer Brandentwicklung von 6 min wurde bei einer maximalen Temperatur von 594 °C die Öffnung des Brandraumes geschlossen. Die Temperatur fiel anschließend auf eine Temperatur von 297°C nach 4 min. Nach Öffnen der Tür bei 10 min entzündete sich der austretende Brandrauch nach 3,17 s und entwickelte sich zwischen 3,33 s und 4 s zu einem Feuerball.

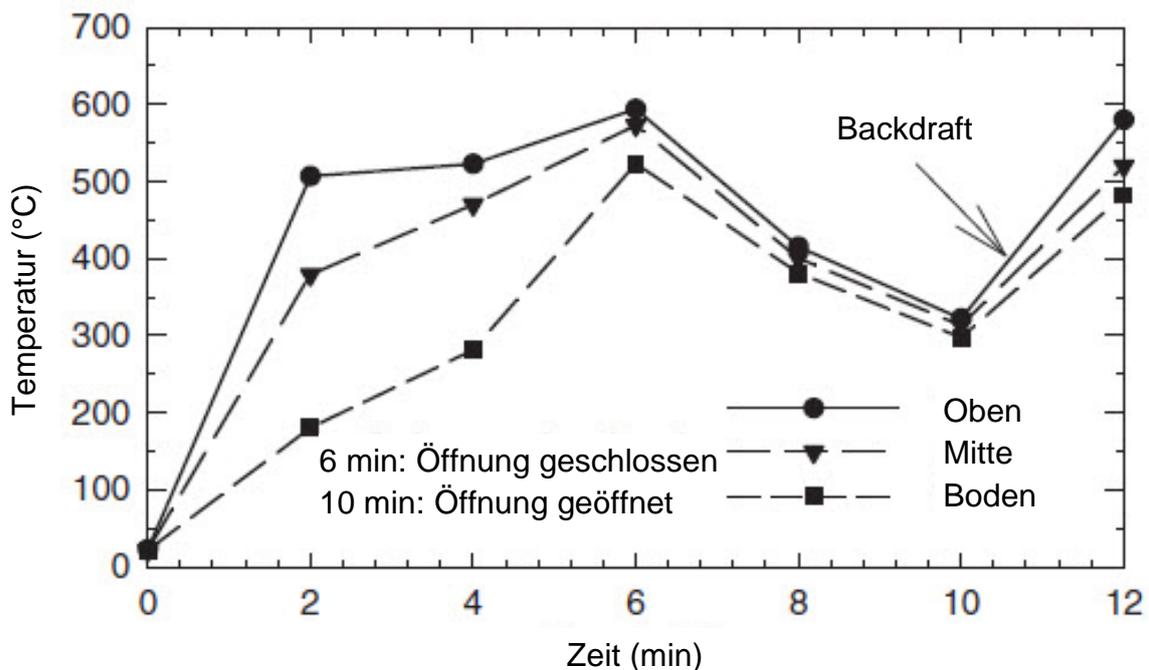


Abbildung 17: Vergleich der Temperaturverläufe bei den ventilationsgesteuerten Bränden ohne Löschmaßnahmen (Brandszenarium 1) [Zhang, J. et al. /2011/, /64/]

Beim Brandszenarium 2 der ventilationsgesteuerten Versuche wurde Wassernebel als Löschmittel eingesetzt.

Abbildung 18 zeigt die Temperaturverläufe beim Einsatz von Wassernebel bei dem ventilationsgesteuerten Brand. Bei diesem Versuch ergab sich nach 6 min eine maximale Temperatur von 601 °C. Nach Schließen der Tür fiel die Temperatur innerhalb von 4 min auf 320°C. Ein anschließender Wassernebeleinsatz über 4 min führte zum Anstieg der Gastemperatur auf 376°C. Nach 14 min wurde der Brandraum wieder geöffnet und es kam nach 7,5 s zum Backdraft mit einer maximalen Temperatur von 635°C.

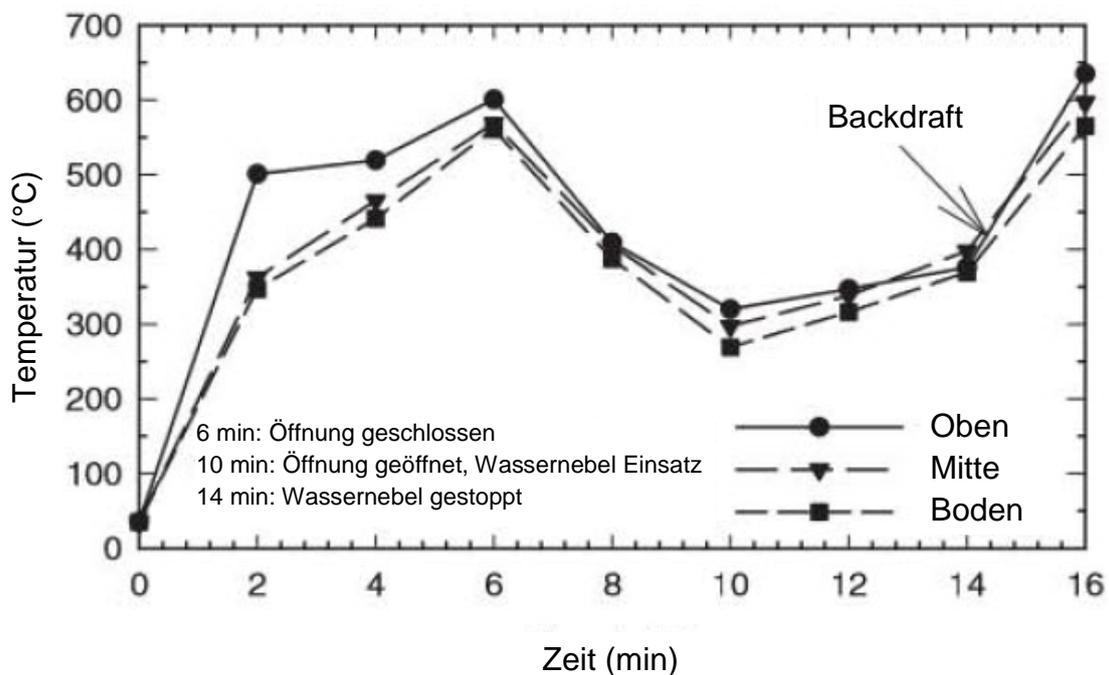


Abbildung 18: Vergleich der Temperaturverläufe bei den ventilationsgesteuerten Bränden unter Einsatz von Wassernebel (Brandszenarium 2) [Zhang, J. et al. /2011/, /64/]

Beim Brandszenarium 3 der ventilationsgesteuerten Versuche wurde Druckluftschaum eingesetzt (siehe *Abbildung 19*).

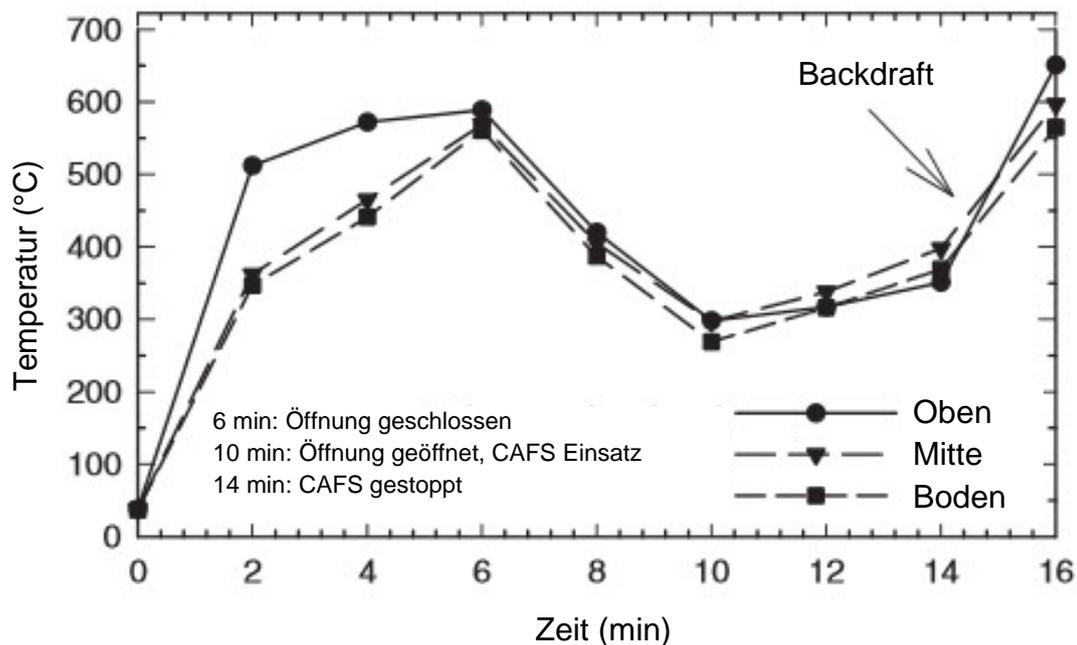


Abbildung 19: Vergleich der Temperaturverläufe bei den ventilationsgesteuerten Bränden unter Einsatz von Druckluftschaum (Brandszenarium 3) [Zhang, J. et al. /2011/, /64/]

Beim Einsatz von DLS ergaben sich fast die gleichen Versuchsergebnisse wie bei Wassernebel. Bei DLS erfolgte der Backdraft nach Wiederöffnen der Tür bei einer Versuchszeit von 14 min nach 5,8 s.

Bei beiden Löschmedien konnte keine signifikante Abmilderung des Backdrafts beobachtet werden.

Für weitere Untersuchungen ergibt sich die Fragestellung bei ventilationsgesteuerten Bränden, inwieweit ein länger als 4 Minuten dauernde Löscheinsatz mit DLS mit entsprechend größerem Lufteintrag eine Auswirkung auf die Entstehung des Backdrafts hat.

Weiterhin ergeben sich bei ventilationsgesteuerten Bränden weitere Fragestellungen bzgl. des Einflusses unterschiedlicher Oberflächenspannungen, Mischungsverhält-

nisse, Druckänderungen im Raum aufgrund unterschiedlicher Löschmittelmengen beim Einsatz von Druckluftschaum.

[Kim und Crampton /2009/, /69/] haben die Effektivität von DLS-Systemen im Vergleich zu reinem Wasser sowie Wasser mit Netzmittelzusatz untersucht. Bei den Versuchen mit Druckluftschaum wurden Systeme von zwei Herstellern verwendet. Als Schaummittel kam Class-A-Foam zum Einsatz. Die Brandräume bestanden aus Holzständerwänden und Gipskartonplatten. Die Abmessungen und der Aufbau der Brandlast sind *Abbildung 20* zu entnehmen.

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Luftzufuhr wurden verschiedene Ventilationsöffnungen verwendet (drei Öffnungen an der Wand in Bodennähe und ein Fenster). Das Fenster war während der Brandentwicklung geschlossen und wurde manuell zu Beginn der Brandbekämpfung zur Simulation der Zerstörung eines Fensters beim Feuerwehreinsatz geöffnet.

Die Brandlast mit einer Gesamtwärmefreisetzung von ca. 5,6 MW bestand aus Holzkrippen und OSB –Platten zur Modellierung eines Sofas sowie aus OSB-Platten für die Wand- und Deckenverkleidung. Als Zündquelle wurden Zündwannen mit Methanol unter den Holzkrippen verwendet.

Als Messtechnik kamen Thermoelement-Ketten im Brandraum und im Flur zum Einsatz. Im Brandraum wurde zusätzlich der Wärmestrom, im Flur die Konzentration von O₂, CO₂ und CO sowie der Rauchdichte gemessen.

Der Flashover erfolgte jeweils 3 min nach Zündung. Ungefähr 2 Minuten nach dem Flashover erfolgte der Löscheinsatz. Diese Zeit wurde gewählt, um einen tiefsitzenden Brand in den Holzkrippen zu erzielen.

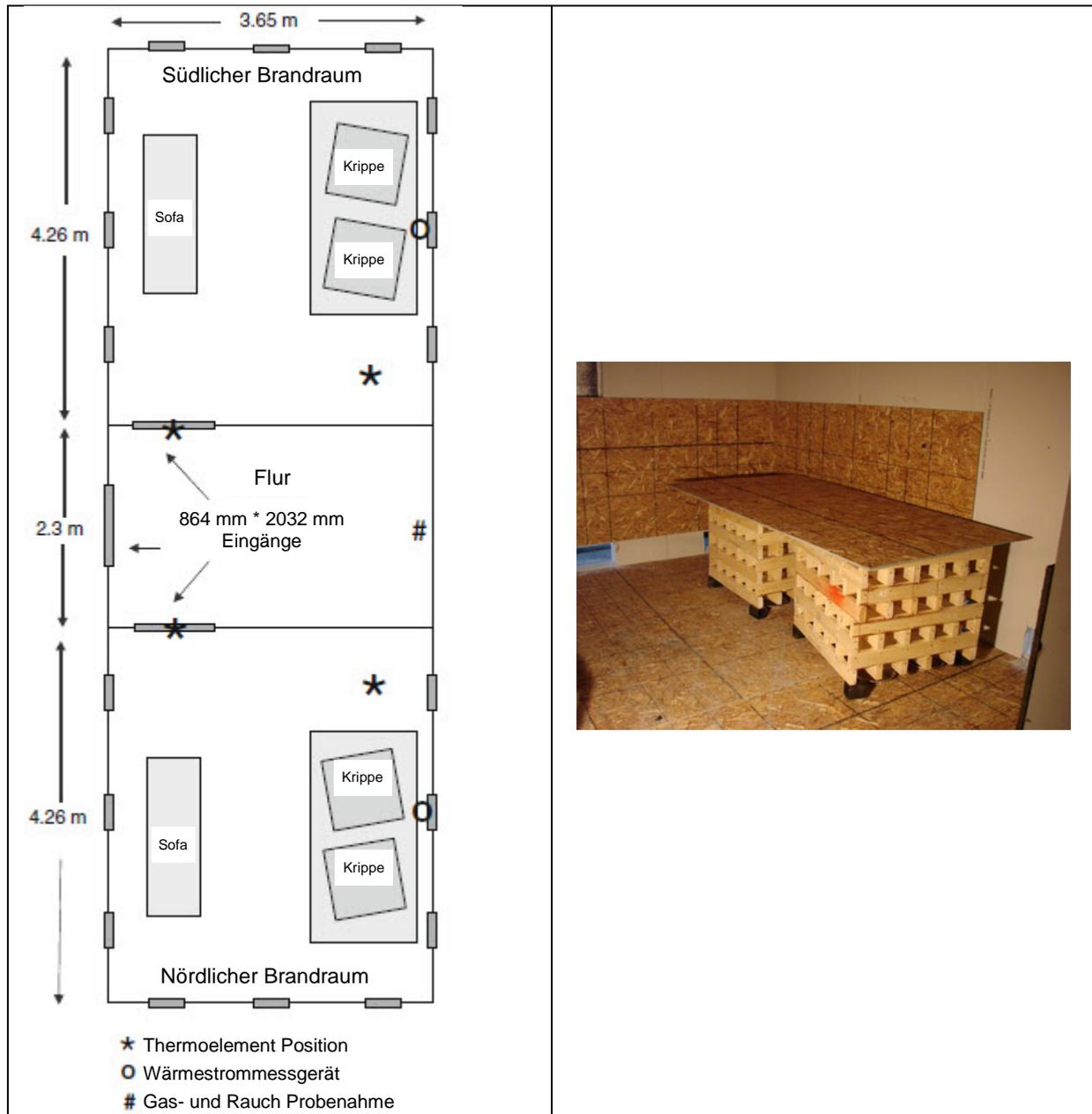


Abbildung 20: Bild links: Brandräume mit Flur (Bild links), Bild rechts: Brandlast (Holzkrippen und OSB-Platte) [Kim und Crampton /2009/, /69/]

Tabelle 3-6 zeigt die Versuchsergebnisse. Es wird sowohl der „knock-down“-Zeitpunkt bis zum Niederschlagen des Flammenbrandes mit der hierbei erforderlichen Löschwassermenge als auch der Gesamtlöschwasserverbrauch bis zum vollständigen Löschen des Brandes angegeben.

Bei den Versuchen wurde der Wasservolumenstrom auf einen konstanten Wert vor-
eingestellt, jedoch wurden während der Brandbekämpfung die Strahlrohre mit unter-
schiedlichem Öffnungsgrad bzw. intermittierend in Abhängigkeit von der Einsatztaktik
eingesetzt.

Ver- such	Lösch- mittel	Schaum- mittel- konz.	Brand- raum	Wasser- vol.strom [l/min]	„knock down“- Zeit [s]	Lösch- wasser- menge bis „knock- down“- [l]	Gesamt Lösch- wasser- verbrauch [l]
1a	DLS	0,5 %	Nord	250	46	<151	159
2a	Wasser		Süd	360	32	<132	170
3a	DLS	0,5 %	Süd	182	90	<284	367
4a	DLS	0,5 %	Nord	189	76	<246	265
5	Wasser		Nord	360	35	148	151
6	Wasser		Süd	360	40	87	95
7	Wasser mit Netz- mittel	0,5 %	Süd	360	32	53	238
8	Wasser mit Netz- mittel	0,3 %	Nord	360	13	57	96
9	DLS	0,3 %	Nord	95	15	23	91
10	DLS	0,3 %	Süd	95	15	23	87
a: DLS System 1: keine ausreichende Schaumqualität							

Tabelle 3-6: Versuchsergebnisse [Kim und Crampton /2009/, /69/]

Als aussagekräftigste Messwerte zur Beurteilung der Löscheffektivität im Brandraum
werden von [Kim und Crampton /2009/, /69/] die Temperaturmessungen sowie die
zum Löschen erforderliche Gesamtwassermenge.

Es konnte nachgewiesen werden, dass DLS bei der Brandbekämpfung weitaus ef-
fektiver als Wasser mit Netzmittel und als reines Wasser ist. Es hat sich jedoch auch
gezeigt, dass nicht alle DLS Systeme gleichwertig in der Löschwirkung sind. Es ist

hierbei erforderlich, die Schaumqualität und die Charakteristik der Schaumabgabe zu überprüfen.

Ein ganz entscheidender Faktor für die Effektivität der Brandbekämpfung ist aber auch das Vorgehen der löschenden Person.

[Cavette /2001/, /70/] berichtet über Brandversuche des Los Angeles County Fire Department in drei einstöckigen Einfamilienhäusern in Holzrahmenbauweise. Die Häuser wurden identisch mit neuen Möbeln und Einrichtungsgegenständen wie z.B. Tischen, Stühlen, Bücheregalen, Sofas, Betten und Bettwäsche etc. ausgestattet. Das Glas der Fenster wurde durch Sperrholzplatten ersetzt. Vorhandene Teppiche wurden entfernt.

Das Möbel wurde mittels einer Propangasflamme an mehreren jeweils verschiedenen Positionen innerhalb der 4 Haupträume entzündet. Zusätzliche Brandbeschleuniger wurden hierbei nicht verwendet.

Bei einer durchschnittlichen Innenraumtemperatur zwischen 550 ° F (ca. 290°C) und 850 ° F (ca. 450 °C) wurden die Sperrholzplatten von den Fenstern entfernt um das Versagen des Glases von Fenstern zu simulieren.

Der Löschangriff erfolgte zunächst von außen durch ein offenes Fenster oder eine offene Tür.

Bei den Versuchen wurden die Löschmittel Wasser ohne Zusätze, Netzwasser mit Class-A-Foam und DLS verglichen.

Für Wasser ohne Zusätze und für Wasser mit Netzmittel wurde ein Hohlstrahlrohr, für DLS eine Rundstrahldüse eingesetzt. Beim Löscheinsatz wurde bei den Versuchen immer das gleiche Feuerwehrpersonal eingesetzt.

Der Löschangriff wurde beendet, nachdem der Brand niedergeschlagen wurde („fire was knocked down“).

Bei dem Löscheinsatz mit reinem Wasser mussten die Feuerwehreinsatzkräfte eine Brandbekämpfung im Innern durch Umschalten auf Wasser mit Netzmittel durchführen.

Tabelle 3-7 zeigt die Versuchsergebnisse.

	Wasser	Netzwasser mit Class-A- Foam	DLS
Schaummittel- konzentration	-	0,5 %	0,2 %
Wasservolumen- strom	ca. 340 l/min (90 gpm)	ca. 340 l/min (90 gpm)	ca. 340 l/min (90 gpm)
Luftvolumenstrom	-	-	850 l/min (30 cfm)
Brandunterdrü- ckungszeit (knock down)	50 s	25 s	11 s
Wasserverbrauch bis zur Brandun- terdrückung	ca. 280 l (75 gal)	ca. 170 l (44 gal)	ca. 60 l (16 gal)
Temperaturabfall im Brandraum beim Löschein- satz von ca. 320°C (600°F) auf ca.95°C (200°F)	6 min 3 s	1 min 45 s	1 min 28 s

Tabelle 3-7: Versuchsergebnisse (Zahlenwerte nach Umrechnung von amerikanischen auf SI-Einheiten gerundet) [Cavette /2001/, /70/]

Bei den Versuchen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Beim Einsatz von DLS wird die erforderliche Löschwassermenge dadurch reduziert, dass die Brandunterdrückung schneller erfolgt und nicht dadurch, dass ein geringerer Volumenstrom verwendet wird. Bei DLS war die Löschzeit viermal schneller als bei Wasser.
- Beim Öffnen des DLS-Strahlrohres ist mit einem Druckstoß zu rechnen. Durch den energiereichen Löschmittelstrom können lose Gegenstände aufgewirbelt werden. Bei körpernahe Einsatz ist Augenschutz erforderlich.
- Ein Löschangriff mit DLS kann aus einer größeren und deshalb sichereren Entfernung durch Fenster und Türen erfolgen. Der Löschmittelstrahl wird hierbei vorzugsweise an die Decke gerichtet.
- Beim Niederschlagen eines Brandes durch DLS wird eine große Menge an Dampf erzeugt. Dieser breitet sich im Gebäude und durch Öffnungen aus. Andere Personen die im Umkreis arbeiten, sollten entsprechende Vorsichtsmaßnahmen treffen.
- Obwohl DLS die Temperaturen im Innenbereich schneller verringert als Wasser sind die Temperaturen im oberen Bereich des Raumes immer noch hoch. Nach der Brandunterdrückung sollen die Feuerwehreinsatzkräfte daher nicht so schnell die aufrechte Haltung einnehmen.
- Die Feuerwehreinsatzkräfte sollen nassen Schaum mit geringer Schaummittelkonzentration einsetzen, da trockener Schaum (hohe Schaummittelkonzentration) nur eine geringe Durchdringung hat.
- Die Versuche haben die Effektivität von DLS gegenüber reinem Wasser und gegenüber Wasser mit Netzmittel gezeigt.

Das Versuchsteam stellte noch weitere qualitative Vorteile von DLS fest:

- Geringere Schäden durch Brandrauch im Gebäude und geringere Freisetzung von Brandrauch in die Umgebung aufgrund der schnelleren Brandunterdrückung.
- Geringere Wasserschäden im Gebäude durch Vermeidung bzw. Reduktion der Menge des Abfließens von kontaminiertem Löschwasser.

- Größerer Abstand der Feuerwehreinsatzkräfte zum Brandherd aufgrund der um etwa 1/3 größeren Wurfweite des DLS Strahles möglich.

Nach [Grant /2012/, /71/] hat sich der Einsatz von DLS bei Gebäudebränden trotz insgesamt positiver Bewertungen bei der Löscheffektivität nicht wie erwartet durchgesetzt. Es blieben Fragestellungen bzgl. der abschließenden Bewertung der Löscheffektivität, Einsatztaktik, Einsatzgrenzen, Wartung und Zuverlässigkeit und Sicherheitsaspekte offen. Um diese Fragestellungen zu untersuchen, wurde ein zweijähriges Projekt mit einem Workshop von der California Polytechnic State University (CalPoly) zusammen mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST), der Fire Protection Foundation (FPRF) sowie Feuerwehren durchgeführt. Der Abschlussbericht sollte entsprechend der 2012 vorgestellten Projektablaufplanung bis Juli 2013 fertiggestellt sein, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt allerdings noch nicht öffentlich verfügbar.

3.2.5. Schaumlöschmittel – Umweltrelevante Gesichtspunkte

Nach [Rodewald und Rempe /2005/, /42/] ist es besonders wichtig, bei Brandeinsätzen darauf zu achten, wohin das verschmutzte und möglicherweise mit Chemikalien, Mineralölen oder sonstigen Giften verunreinigte Löschwasser fließt. Bei vielen Bränden werden verbrannte oder unverbrannte Stoffe und Pyrolyseprodukte freigesetzt, die mit dem Löschwasser weggespült werden und das Oberflächen- oder Grundwasser schädigen bzw. die Kläranlagen überlasten. Eine wichtige Aufgabe des Einsatzleiters beim Feuerwehreinsatz besteht darin, den Abfluss des Löschwassers zu kontrollieren und ggf. notwendige Schutzmaßnahmen zu ergreifen, um das Löschwasser aufzufangen und einer Entsorgung zuzuführen.

Nach [de Vries /2008/, /38/] muss grundsätzlich ebenfalls davon ausgegangen werden, dass von jeder Brandstelle kontaminiertes Löschwasser abfließen kann. Werden dem Löschwasser Tenside zugesetzt und Netzwasser und/oder Schaum verwendet, so erhöht sich die Schadstofffracht im abfließenden Löschwasser. Zum einen resultiert dies aus der Aquatoxizität der Schaummittel, zum anderen können Tenside die Auswaschung von Toxinen aus dem Brandgut erhöhen. Hierbei ist davon auszugehen, dass das Löschwasser in Gebäuden zur Kontamination der Baustanz und der Einrichtungsgegenstände führt sowie in das Erdreich, in die Vegetation und das Grundwasser gelangt. Die Feuerwehreinsatzkräfte sind durch Schadstoffeintrag in die Feuerweherschutzbekleidung und auf ungeschützte Körperpartien gefährdet.

Bei der Verwendung von Schaummittel zur Brandbekämpfung ist darauf zu achten, dass dieses nicht ins Trinkwasser gelangt. Ein Großteil der bestehender Gewerbebetriebe, Speditionen und Wohngebäude werden jedoch z. Zt. von den Auflagen zur Löschwasserrückhaltung nicht erfasst.

[Sthamer und Wunderlich /?/, /43/] geben Empfehlungen zum Üben und Erproben von Schaumlöschmitteln. Schaummittel enthalten wassergefährdende Stoffe, deshalb sind die Vorschriften und Verordnungen über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen einzuhalten. Beim Umgang mit den Schaummitteln sind die technischen Informationen (Produktdatenblätter) der Hersteller sowie hinsichtlich des Gesundheitsschutzes die Sicherheitsdatenblätter und Hinweise auf den Schaummit-

telbehältern zu berücksichtigen. Weiterhin ist darauf zu achten, dass Beeinträchtigungen der Umwelt auf ein Minimum beschränkt werden. Übungen und Erprobungen sind den zuständigen Behörden vor ihrer Durchführung anzuzeigen. Sie dürfen nur so durchgeführt werden, dass eine Beeinträchtigung der Gewässer, des Grundwassers oder des Bodens durch die Anlage oder durch den Stoff nicht erfolgt. Gelangt dennoch Schaum in ein Gewässer oder in den Boden, oder droht dieser dorthin zu gelangen, besteht die Verpflichtung, dies zu verhindern sowie die zuständigen Behörden umgehend zu benachrichtigen. Übungen und Erprobung müssen auf dichten Flächen durchgeführt werden. Ist im Einzelfall ein Ablauf vorhanden, so muss dieser an eine geeignete Abwasseraufbereitungsanlage (Kläranlage) angeschlossen sein. Die Zustimmung des Kläranlagenbetreibers zur Einleitung des Schaummittel-Wassergemisches ist einzuholen. Bei Vorliegen eines ausreichenden Verdünnungsverhältnisses von Schaumabwasser (Schaummittel-Wassergemisch) zum Kläranlagengesamtzulauf sind Beeinträchtigungen biologischer Kläranlagen nicht zu erwarten. Das Verdünnungsverhältnis ist beim Hersteller zu erfragen und mit dem Kläranlagenbetreiber abzustimmen. Sind keine Abläufe zu einer Kläranlage vorhanden, muss das Löschwasser durch andere geeignete Maßnahmen, z.B. Wannen, Planen, aufgefangen und ordnungsgemäß entsorgt werden. Rückstände von schwer abbaubaren Schaumlöschmitteln sind als Sonderabfall zu entsorgen. Bei Übungen oder Erprobungen von Schaummitteln, bei denen brennbare Flüssigkeiten als Brandstoff oder zur Entzündung anderer Brandstoffe eingesetzt werden, dürfen derartige Versuche unabhängig von sonstigen Aspekten der Luftverschmutzung nur unter Einsatz flüssigkeitsdichter Auffang- bzw. Brandwannen durchgeführt werden. Ein Verspritzen des Brandgutes ist zu vermeiden.

Gemäß der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen WGK [VwVwS /1999/, /2005/, /45/] sind wassergefährdende Stoffe feste, flüssige und gasförmige Stoffe, die geeignet sind, nachhaltig die physikalische, chemische oder biologische Beschaffenheit des Wassers nachteilig zu verändern [VwVwS /1999/, /2005/, /45/].

Wassergefährdende Stoffe werden entsprechend ihrer Gefährlichkeit in eine der folgenden Wassergefährdungsklassen eingestuft:

WGK 3: stark wassergefährdend

WGK 2: wassergefährdend

WGK 1: schwach wassergefährdend

Nicht wassergefährdend sind Gemische, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- a) Der Gehalt an Komponenten der WGK 1 ist geringer als 3 % Massenanteil.
- b) Der Gehalt an Komponenten der WGK 2 und 3 ist geringer als 0,2 % Massenanteil.
- c) Es sind keine Komponenten der WGK 3, krebserzeugende Komponenten oder Komponenten unbekannter Identität zugesetzt.
- d) Dem Gemisch sind keine Dispergatoren zugesetzt.

Auf Basis der Grundgesetzänderung zum 01. September 2006 und dem neuen Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 erlässt die Bundesregierung zurzeit eine neue Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen [AwSV /2013/, /47/]. Die AwSV /2013/ (Entwurf vom 22.7.2013) wird bundesweit einheitliche Anforderungen an Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen festlegen und die bisher gültigen unterschiedlichen Anlagenverordnungen der einzelnen Bundesländer ablösen. Außerdem wird die AwSV grundsätzlich die Einstufung von Stoffen, Gemischen und Abfällen in WGK regeln.

Nach [VdS 3124 /2013/, /49/] muss der Hersteller des Schaummittels folgende Unterlagen zur Verfügung stellen:

- Produkt-Datenblatt
- EG-Sicherheitsdatenblatt für das Schaummittel
- exakte Zusammensetzung des Schaummittels (Rezeptur)

In der Rezeptur dürfen Rohstoffe, für die der Hersteller Typen-/ Markenbezeichnung und Bezugsquelle nicht angeben will, codiert/ anonymisiert angegeben werden.

- EG-Sicherheitsdatenblätter für alle Rohstoffe

Für Rohstoffe, die der Hersteller in der Rezeptur codiert/anonymisiert angibt, dürfen Typen-/Markenbezeichnung und Bezugsquelle in den Sicherheitsdatenblättern geschwärzt sein. In diesem Fall wird im Rahmen der Überprüfung der Fertigungsqualität vom Auditor vor Ort die Übereinstimmung mit den eingesetzten Rohstoffen überprüft.

- Beschreibung der Kennzeichnung
- Qualitätsplan (Übersicht der regelmäßigen Eigenprüfungen während der Produktion oder am Endprodukt)
- Angabe von Materialien (metallische und nichtmetallische), mit denen der Einsatz des Schaummittels (Lagerung und Ausbringung) nicht empfohlen wird.
- Angabe von Materialien (metallische und nichtmetallische), mit denen der Einsatz der Schaummittels (Lagerung und Ausbringung) empfohlen wird.

Nach VdS 3124 /2013/ dürfen zur Herstellung von Schaummitteln nur nach der Europäischen Chemikalienverordnung REACH registrierte und REACH-konform dokumentierte Rohstoffe eingesetzt werden.

Für alle Rohstoffe müssen Sicherheitsdatenblätter nach REACH-Verordnung vorliegen. Grundsätzlich darf kein Rohstoff giftig (T), sehr giftig (T+), krebserregend (CMR) oder bioakkumulierbar im Sinne der Richtlinie 67/548/EWG bzw. der REACH-Verordnung sein. Für jede Ausnahme ist eine Einzelfall-Beurteilung erforderlich, in der nachgewiesen wird, dass die negative Einstufung des Rohstoffes der Verwendung des Rohstoffes in dem Schaummittel (Zubereitung) nicht entgegensteht (z. B. wegen vernachlässigbar kleiner Konzentration). Für das Schaummittel muss ein Sicherheitsdatenblatt nach REACH-Verordnung vorliegen. Das Schaummittel darf ebenfalls nicht giftig (T), sehr giftig (T+), krebserregend (CMR) oder bioakkumulierbar sein. Der Hersteller muss ein Verfahren beschreiben, mit dem die Zusammensetzung des Schaummittels so festgestellt und dokumentiert werden kann, dass bei erneuter Anwendung des Verfahrens Änderungen der Zusammensetzung erkennbar werden („Finger Print“). Das Schaummittel sollte eindeutig als Produkt der gemeldeten Fertigungsstätte identifizierbar sein. Bei mehreren Fertigungsstätten sollte jede Fertigungsstätte identifizierbar sein. In jedem Anerkennungsverfahren wird mit dem Hersteller vereinbart, ob und ggf. welche Änderungen des Produktes oder der Beschaffung bzw. Produktion ohne vorherige Freigabe von VdS zulässig sind.

Hierbei werden insbesondere auch folgende Fälle einbezogen:

- Lieferantenwechsel für einen Rohstoff
- Austausch eines Rohstoffes gegen einen anderen Rohstoff gleicher Spezifikation.

Nach Recherche in Sicherheitsdatenblättern für Mehrbereichsschaummittel und für Class-A-Foam wird überwiegend die Wassergefährdungsklasse WGK 2 (Einstufung gemäß VwVwS, Anhang 2) für diese Schaummittel angegeben (siehe [Sthamer /2013/, /72/]).

Man erkennt hier unmittelbar die Problematik:

- Nicht wassergefährdend, wenn Komponenten der Wassergefährdungsklasse WGK 2 und 3 geringer als 0,2 % Massenanteil sind, jedoch gängige
- Zumischrate der Netz- bzw. Schaummittel, die in WGK 2 eingeordnet sind: ca. 0,5 % bis 1%,
(Bemerkung: Da die Dichte von Wasser und Schaummittel ungefähr gleich sind, ist es unerheblich ob die Angabe in Volumen- oder Massenanteilen erfolgt.)

Dies bedeutet, dass bei der üblichen Schaummittelzumischung der zulässige Grenzwert bei WGK 2 bereits bei einer Zumischung von 0,5 bis 1% um das 2,5 bis 5 fache überschritten wird.

In der Praxis sind aber durchaus auch Konzentrationen von bis zu 5% Schaummittel möglich. Hierdurch würde der Grenzwert bei WGK 2 um das 25 fache überschritten.

Die vorstehenden Angaben lassen die große Bandbreite der Konzentration erkennen, mit der Schaumlöschmittel in der Praxis eingesetzt werden.

Nach [Prall /2014/, /44/] können die Umwelteigenschaften der Schaumlöschmittel in drei Bereiche unterteilt werden:

- die Toxizität der Produkte auf im Wasser lebende Organismen
- die biologische Abbaubarkeit und damit die Dauer des Verbleibs in der Umwelt
- die Wirkung der Produkte auf den Menschen

Die akute Toxizität ist die Sofortwirkung auf einen Organismus (Mensch, Fisch, Bakterie). Eine erkannte akute Toxizität führt zur Einstufung „Gesundheitsschädlich“ oder „giftig“. [Prall /2014/, /44/]

Die chronische Toxizität ist eine Langzeitwirkung, die nicht unmittelbar zu Gesundheitsbeeinträchtigungen oder –schäden führt.

Die folgende Tabelle 3-8 nach [Prall /2014/, /44/] zeigt eine Übersicht der Umwelteinflüsse verschiedener Schaummittelklassen.

	MBS/Class A	AFFF	AFFF/AR	P
Verträglichkeit für den Menschen	+	+	+	+
Abbaubarkeit (gem. Standard OECD 301c)	+	+	+	o
Bakterientoxizität	-	o	o	+
Fischttoxizität (gem. Standard OECD 203)	-	+	+	+
Krebstiertoxizität (gem. Standard OECD 202)	-	o	+	+
Algtoxizität (gem. Standard OECD 201)	-	-	-	+
100-prozentige Abbaubarkeit aller Inhaltsstoffe	+	-	-	(+) ^a
Akute Toxizität (Gesamtbewertung)	-	o	o	+
Chronische Toxizität (Gesamtbewertung)	+	-	+	(+) ^a
+ = gering/gut; o = durchschnittlich; - = hoch/schlecht				
^a nur bei PFC-freien Proteinschaummitteln; bei PFC-haltigen Proteinschaummitteln (FP, FFFP und FFFP/AR) = -				

Tabelle 3-8: Übersicht über die Umwelteinflüsse verschiedener Schaummittelklassen
[Prall /2014/, /44/]

Nach [Prall /2014/, /44/] gibt es so etwas wie ein „umweltfreundliches Schaummittel“ nicht. Überall wo Schaum jeglicher Art (nicht nur Löschschaum) gebildet wird, ist stets ein aquatisches und bakterientoxisches Potential vorhanden. Die örtlich begrenzte akute toxische Wirkung lässt sich durch geringe Einsatzkonzentrationen (z.B. mit einer Zumischrate unter 0,3 %) und effiziente Lösungsverfahren und Löschtaktik reduzieren. Soll eine Schaummittellösung zu Übungszwecken in die öffentliche Schmutzwasserkanalisation eingeleitet werden, ist dies stets in Absprache mit der zuständigen Wasserbehörde und dem Kläranlagenbetreiber zu tun. Zur Vermeidung

einer chronischen Umweltbelastung sollen PFC-haltige Schaumlöschmittel weder in die Umwelt, noch in die öffentliche Kanalisation eingeleitet werden (vgl. bereits weiter oben getroffene Aussagen).

Der Vollständigkeit halber soll hier nur erwähnt werden, dass fluorhaltige Schaumlöschmittel zwar in Wassergefährdungsklasse WGK 1 eingestuft werden [siehe Sthamer /2013/, /72/]. Fluorhaltige Schaumlöschmittel enthalten aber oberflächenaktive poly- oder perfluorierte Chemikalien und sind z.B. in wasserfilmbildenden Schaummitteln wie AFFF enthalten. Diese Chemikalien sind in der Natur sehr schwer oder gar nicht biologisch abbaubar und können langfristig zu Problemen für Mensch und Umwelt führen. Es ist daher notwendig, genau abzuwägen ob derartige Schaumlöschmittel notwendig sind [UBA et al. /2013/, /46/].

Nach [Prall /2014/, /44/] gelten Proteinschaummittel (ohne poly- und perfluorierte Tenside (PFC)) als das umweltfreundlichste Schaummittel. Diese sind zu 100 % biologisch abbaubar und hinterlassen keine nicht-natürlichen Reste oder Abbauprodukte. Dieses zeigt sich aus den im Vergleich zu anderen Schaummitteln besonders kleinen Verdünnungsfaktoren.

Mehrbereichsschaummittel und Class-A-Schaummittel sind ebenfalls zu 100 % biologisch abbaubar und hinterlassen keine nicht-natürlichen Reste oder Abbauprodukte. Aufgrund der hohen Inhaltsstoff-Konzentrationen (z.B. Tenside, Stabilisatoren) ergeben sich im Vergleich mit anderen Schaumlöschmitteln allerdings höhere erforderliche Verdünnungsfaktoren, um die erhöhte akute Toxizität zu verringern [Prall /2014/, /44/].

Löschwasser mit AFFF-Schaummittel sollte trotz der relativ geringen Toxizitätswerte nicht in die Kanalisation oder in Oberflächengewässer gelangen, da sich aufgrund des PFC-Anteils ein Beitrag zur chronischen Gewässerverschmutzung ergibt [Prall /2014/, /44/].

[de Vries /2008/, /38/] kommt nach Bewertung ihm vorliegender Untersuchungen zu dem Schluss, dass die toxikologischen Aspekte von Class-A-Foam unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzszenarien folgendermaßen bewertet werden können:

Die Toxizität des abfließenden Löschwassers wird von den aus dem Brandgut ausgewaschenen Stoffen und - bei sachgerechtem Einsatz - nicht durch die in geringen Zumischungen eingesetzten Schaummittel bestimmt."

Nicht außer Acht lassen darf man bei der Betrachtung allerdings auch, welche Löschmittelmengen bei einem Brandereignis eingesetzt werden, insbesondere auch im Hinblick auf die Brandgröße und die Anzahl und Größe der eingesetzten Strahlrohre.

4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die besonderen Problemstellungen bei ausgebauten Dachgeschossen im Hinblick auf den speziellen konstruktiven Aufbau, die Brand- und Rauchausbreitung, die Einsatztaktik und die Brandbekämpfung mit unterschiedlichen Löschmitteln dargestellt.

Fenster und Ausstiege sind für die Feuerwehr über den zweiten Rettungsweg wegen der Dachschrägen zum Teil schwieriger zu erreichen als bei Normalgeschossen. Dies gilt insbesondere bei zwei- oder mehrgeschossig ausgebauten Dachgeschossen und Maisonette-Wohnungen.

Die mechanisch widerstandsfähige Dachhaut bedeutet beim Entfernen eine Gefährdung für Einsatzkräfte. Der zunehmende Einsatz von immer dickeren Wärmedämmungen erschwert das Schaffen von Dachöffnungen. Zusätzlich wird bei Verwendung von brennbar klassifizierten Wärmedämmungen eine weitere Risikoerhöhung zu erwarten sein.

Hochwertige Zwei- und Dreifachverglasungen mit hoher Standzeit bei thermischer Belastung im Brandfall bilden auch im teilweise gerissenen Zustand einen relativ dichten Raumabschluss für längere Zeit und verhindern, dass zündfähige Brandpyrolyseprodukte abströmen bzw. verursachen, dass vermehrt Glimm- und Schwelbrände aufgrund von Sauerstoffmangel auftreten können. Dies führt zu einer erhöhten Gefährdung durch die Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Backdraft (Verpuffung mit Feuerball) und Rollover (Rauchdurchzündung ohne nennenswerten Druckaufbau). Bei ausreichendem Sauerstoffangebot ist in kurzer Zeit mit einem Flashover und nachfolgendem Vollbrand zu rechnen.

An dieser Stelle sei bemerkt, dass bei der numerischen Beschreibung von Brandentwicklungen deshalb auch darauf zu achten ist, dass die eingesetzten empirischen Gleichungen für die Bemessungsbrandszenarien z.B. nur für den Flammenbrand oder auch für langanhaltende Schwelbrände gültig sind.

Die Brandausbreitung bzw. –weiterleitung zwischen Räumen über Hohlräume (z.B. unter Dachschrägen, bei Ständerwänden, Holzbalkendecken) unterhalb der Dachhaut kann oft wegen fehlender feuerwiderstandsfähiger trennender Bauteile und Anschlusspunkte nicht verhindert werden. Die Detailausbildung von Anschlusspunkten feuerwiderstandsfähiger trennender Bauteile ist in Dachgeschossen wesentlich schwieriger auszuführen als z.B. bei massiven Geschosstrenndecken.

Oft werden beim Dachausbau von Gebäuden in massiver Bauweise im Unterschied zu Normalgeschossen bei Wand- und Deckenkonstruktionen brennbare Baustoffe wie Holz und brennbare Dämmstoffe z.B. in Leichtbauwänden eingesetzt.

Bei der Brandbekämpfung sind der Einsatz unterschiedlicher Löschmittel wie reines Wasser oder Wasser mit Schaummittelzusatz in Form von Netzwasser oder Druckluftschaum zur Brandbekämpfung üblich.

Für eine effektive Brandbekämpfung, die sich aus Brandrauchkühlung beim Vorgehen der Feuerwehreinsatzkräfte und direkter Brandbekämpfung zusammensetzt, ist es erforderlich, dass das richtige Löschmittel mittels eines geeigneten Löschgerätes und unter Anwendung der korrekten Löschtechnik und geeigneter Taktik räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmt eingesetzt wird.

Eine entscheidende Bedeutung für die Brandbekämpfung haben die Ausbringung des Löschmittels mit unterschiedlichen Strahlrohren, die Tropfengrößen, der Sprühkegelwinkel und die Wurfweite des Löschmittelstrahles sowie die Sichtverhältnisse beim Einsatz unterschiedlicher Löschtechniken.

Durch den Einsatz von Schaummittel kann infolge verbesserter Löschwirkung die Löschzeit verkürzt und im Zusammenhang damit der Löschwasserverbrauch reduziert werden. Durch den Einsatz von Druckluftschaum können Wasserschäden weiter verringert werden.

Die Löscheffizienz hängt in der Einsatzpraxis nicht nur von den technischen Möglichkeiten des Löschverfahrens, sondern in hohem Maße auch von den Fähigkeiten und Erfahrungen der Feuerwehreinsatzkraft am Strahlrohr ab.

Die Brand- und Rauchausbreitung bzw. –weiterleitung über Hohlräume unterhalb der Dachhaut (z.B. Dachschrägen, Ständerwände, Holzbalkendecken) kann in vielen Fällen nicht verhindert werden. Bei verdeckten Bränden können einzelne Oberflächen des Brandstoffes nicht direkt beaufschlagt werden, so dass an diesen Orten praktisch kein Löscherfolg erzielt werden kann. Das Löschmittel muss zur Brandbekämpfung direkt an die inneren Oberflächen gebracht werden. Hierdurch ist dann z. B. der Einsatz von Löschlanzen oder Freilegung der Hohlräume und gezieltes Ablöschen erforderlich.

Es gibt Hinweise darauf, dass sich bei der Verwendung von DLS aufgrund einer größeren Temperaturabsenkung im Brandraum infolge der Abdeckung von Brandgut mit Schaum geringere Belastungen für die Einsatzkräfte ergeben.

Bei der Verwendung der üblichen Feuerwehrschräuche nach DIN 14811 – C, Kategorie 1 ist darauf zu achten, dass im Innenangriff bei der Verwendung von DLS immer die Stellung „Nass“ verwendet wird. Feuerwehrschräuche sollen normalerweise nicht einer Umgebungstemperatur von über 250°C ausgesetzt werden. Falls eine solche Temperaturbelastung nicht ausgeschlossen werden kann oder eine entsprechende Situation unvorhergesehen eintritt, darf in der Folge die Löschmittelabgabe unabhängig vom Löschmittel an den betroffenen Angriffsleitungen nicht dauerhaft (nur kurzzeitig im Minutenbereich) unterbrochen werden. Da bei DLS führenden Schläuchen die Versagenswahrscheinlichkeit ab einer Umgebungstemperatur von 250°C signifikant ansteigt, sollte im Temperaturbereich über 250°C beim Einsatz von DLS auf die Zugabe von Druckluft und damit auf die Bildung von DLS verzichtet werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird dadurch soweit verringert werden, dass diese derjenigen bei der Verwendung von Wasser entspricht. Zu beachten ist, dass sich durch diese Maßnahme die Wurfweite am Strahlrohr verringert. Beide Maßnahmen können jedoch das kurzfristige Versagen des Schlauches bei noch höheren Temperaturen (über ungefähr 500°C) nicht verhindern; eine solche Situation muss ausgeschlossen werden. Jeder Kontakt von Feuerwehrschräuchen mit Brandschutt, Glut oder anderer Temperaturbeanspruchung ist zu vermeiden. Dies gilt auch bei den heute verwendeten Feuerwehrschräuchen und zwar unabhängig vom geförderten Löschmittel.

Im Innenangriff sind insbesondere auch die Schnelligkeit der Verlegung und die Stolpergefahr von Löschmittelschläuchen zu berücksichtigen.

Es gibt ebenfalls Hinweise darauf, dass DLS sehr effizient als Löschmittel bei der Brandbekämpfung eingesetzt werden kann, jedoch zur Kühlung von heißen Rauchgasen nicht so effektiv wie Sprühwasser ist.

Für die Brandrauchkühlung z.B. in Fluren oder Treppenträumen vor dem eigentlichen Brandraum ist es erforderlich, dass die Tropfen nicht zu klein und nicht zu groß sind. Wassertropfen kleiner 0,2 mm verdampfen bereits häufig, bevor sie in die Rauchschiicht eindringen können, werden aufgrund ihrer geringen Masse von den Luftströmungen weggetragen und tragen deshalb nur unbedeutend zur Kühlwirkung bei. Tropfen größer 0,6 mm sind zu groß, um vollständig in der Rauchschiicht verdampfen zu können. Die großen Tropfen durchdringen die Rauchschiicht und verdampfen auf den aufgeheizten Decken und Wänden sowie auf anderen heißen Oberflächen. Dort wird durch die Verdampfung zum einen keine Kühlung der Rauchschiicht erreicht, zum anderen entsteht unter Umständen zu viel Wasserdampf, da diese Oberflächen deutlich heißer werden als die Rauchschiicht. Durch kurze Sprühstöße (Impulsdauer ca. 1 s) soll das thermische Gleichgewicht erhalten bleiben, d.h. der Brandrauch bleibt in der Überdruckzone im oberen Bereich, so dass im unteren Bereich gute Sichtverhältnisse bleiben. Die abgegebene Wassermenge ist bei diesem Verfahren sehr gering und soll die Einsatzkräfte nicht durch den entstehenden Wasserdampf belasten. Die Kühlung der Rauchschiicht bleibt nur einige Sekunden bestehen, so dass beim weiteren Vorgehen kontinuierlich Wasser abgegeben werden muss. Bei längeren Impulsen mit größerer Wasserabgabe kann das thermische Gleichgewicht gestört und die Sicht durch das Absinken oder Verwirbeln der Rauchschiicht schlechter werden.

Druckluftschaum besteht aus einer großen Anzahl von kleinen Luftblasen im Durchmesserbereich zwischen 300 – 1200 µm. Die Größe der Blasen variiert innerhalb des Schaumes. Wenn sich unter Wärmeeinwirkung die Luft ausdehnt, platzen die Blasen. Hierdurch wird der Wasseranteil sehr fein zerstäubt, erwärmt sich und verdampft.

In Untersuchungen wurde festgestellt, dass es bei nassem Druckluftschaum zu einer Wurfweitenerhöhung des Löschmittelstrahles beim Öffnen des Strahlrohres kommt. Der anschließend ausgebildete stationäre Löschmittelstrahl weist eine geringere Wurfweite auf.

Hier besteht dringender Forschungsbedarf für den Vergleich der Effektivität der Kühlwirkung und Störung der Rauchsicht bei der Abgabe von DLS in die Rauchsicht im Vergleich mit Wasser insbesondere auch im Hinblick schneller Schaltfolgen zur Abgabe von Sprühstößen aufgrund der unterschiedlichen Anlagentechniken.

Es gibt ebenfalls Hinweise darauf, dass ein kurzer Außenangriff mit DLS durch vorhandene Dachöffnungen in Verbindung mit einem kurz danach erfolgenden Innenangriff zur schnelleren Brandunterdrückung führen kann (=> „Immediate Flame Knock Down“). Im Außenangriff ist insbesondere die große Wurfweite des Druckluftschau- mes hervorzuheben.

Die möglichen Vorteile aber auch die mögliche Gefährdung von Einsatzkräften der Feuerwehr ist insbesondere im Hinblick auf die Vorgehensweise bei der Methode des „Immediate Flame Knock Down“ mit kurzem Außenangriff vor dem Innenangriff zu untersuchen. Durch die mögliche Ausbreitung zündfähigen Brandrauches in andere Gebäudebereiche entsteht ein latent höheres Risiko. Die Gefährdung hängt dabei in besonderer Weise von im Zuge des Angriffsweges offenen oder geschlossenen Türen zum ausgebauten Dachgeschoß ab. Besonders hoch kann diese Gefährdung bei „nahezu gleichzeitigem“ Außen- und Innenangriff infolge mangelnder Koordination / Kommunikation werden. Es sind eindeutige Handlungsanweisungen erforderlich, um eine Minimierung der Gefährdung zu erreichen.

Für folgende Einflussparameter besteht daher weiterer Untersuchungsbedarf:

- Breitet sich der zündfähige Brandrauch im Treppenraum bzw. in darüber- und darunterliegende Räume aus? Folgende Szenarien sind hierbei denkbar:
 - Tür zur Dachgeschosswohnung ist geschlossen: kurzer Außenangriff mit DLS, dann Innenangriff

- Tür zur Dachgeschosswohnung ist offen: kurzer Außenangriff mit DLS, dann Innenangriff
- Erforderliche Kommunikation zwischen dem Trupp im Innen- und Außenangriff um eine Gefährdung des Trupps im Innenangriff auszuschließen
- Überprüfung der Wirksamkeit der Persönlichen Schutzausrüstung und des Einsatzes der Mannschutzbrause (Hohlstrahlrohr) bei schnellen Brandrauchdurchzündungen und Brandrauchverpuffungen
- Welche Auswirkungen haben unterschiedlich große Öffnungen im Dachbereich für diese Art des Außenangriffes?
- Sind die Dachfenster noch intakt und befinden sich dadurch zündfähige Brandrauchbestandteile (Schwelgase) aufgrund von Sauerstoffmangel (erloschener Flammenbrand) im Dachgeschoß?
Beim Außenangriff können nur diejenigen Stellen erreicht werden, an denen die Dachkonstruktion oder Fenster bereits zerstört sind. Eine effektive Brandbekämpfung ist sonst nur im Innenangriff möglich.
- Wie groß ist der Dachgeschossbereich bzgl. des Luft- bzw. Sauerstoffangebotes im Hinblick auf die mögliche Brand- und Rauchausbreitung?
Größere Dachgeschossräume, mehrgeschossige Dachgeschossausbauten und Maisonette-Wohnungen (Wohnraum zusammenhängend mindestens zweistöckig innerhalb des Gebäudes angeordnet) ergeben unterschiedliche Anforderungen an die Brandbekämpfung.

Hierbei sind angepasste Einsatzregeln in Verbindung mit besonderen Schutzmaßnahmen zu erwägen.

Schaummittel werden üblicherweise in Konzentrationen zwischen 0,5 und 1% zugesetzt. Mehrbereichsschaummittel und Class-A-Foam werden überwiegend in der Wassergefährdungsklasse WGK 2 eingeordnet. Gemische gelten dann als nicht wassergefährdend, wenn der Gehalt an Komponenten der WGK 2 geringer als 0,2 % Massenanteil ist. (siehe „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen“).

Dies bedeutet, dass bei der üblichen Schaummittelzumischung der zulässige Grenzwert für WGK 2 bereits bei einer Zumischung von 0,5 bis 1% um das 2,5 bis 5 fache

überschritten wird. In der Praxis sind aber durchaus auch Konzentrationen von bis zu 5% Schaummittel möglich. Hierdurch würde der Grenzwert bei WGK 2 um das 25 fache überschritten.

Grundsätzlich ist beim Schaumeinsatz zu bedenken, dass von jeder Brandstelle kontaminiertes Löschwasser abfließen kann, wobei die Tenside die Auswaschung von Toxinen aus dem Brandgut begünstigen. Umweltrelevant wird hierbei, inwieweit Brandgut und Löschmittel einer geordneten Entsorgung zugeführt werden, oder ob überschüssiges, kontaminiertes Löschwasser unkontrolliert abfließt. Bei der Verwendung von Schaummittel bei der Brandbekämpfung ist auch zu bedenken, dass nicht nur das Wasser und die toxischen Brandrauchbestandteile in Wände, Decken, Dämmstoffe und das Mobiliar eindringen, sondern auch das Schaummittel mit seinen mehr oder weniger toxischen Bestandteilen.

Weitere Kriterien zur Beurteilung der zur Brandbekämpfung eingesetzten Technik sind

- Zuverlässigkeit und einfache Bedienbarkeit der Anlage
- Anschaffungskosten
- Wartungskosten
- Reparaturkosten
- Gesicherte Ersatzteilversorgung z.B. insbesondere für elektronische Bauteile
- Anfälligkeit der elektronischen Steuerungen z.B. gegen Überspannungen (Gewitter), geomagnetische Stürme.
- Schutz der elektronischen Steuerungen und Rechner gegen Schadprogramme (z.B. Viren, Trojaner, Würmer) bzw. Angriffe über WLAN

5. Literaturverzeichnis

/1/	M-HFHHolzR /2004/	Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHHolzR, Juli 2004), http://www.is-argebau.de/
/2/	MBO /2012/	Musterbauordnung - MBO – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012 http://www.is-argebau.de/
/3/	LBO BW /2010/	Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) in der Fassung vom 5. März 2010 http://www.landesrecht-bw.de , Juris GmbH im Auftrag des Innenministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, 2010
/4/	LBOAVO - BW /2010/	Allgemeine Ausführungsverordnung des Ministeriums für Verkehr und Infrastruktur zur Landesbauordnung (LBOAVO), http://www.landesrecht-bw.de , Juris GmbH im Auftrag des Innenministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, 2010
/5/	Theißen, R. et al.: /2012/	Bauen im Bestand – Sanierung, Modernisierung, Umbau, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012, Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln 2012
/6/	Kunkelmann, J.: /2003/	Flashover / Backdraft – Ursachen, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen Forschungsbericht Nr. 130 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2003) http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php sowie Präsentation: Flashover Backdraft Rollover Druckbehälterzerknall http://www.ffb.kit.edu/download/FFB_Flashover_Backdraft_Rollover_Druckbehaelterzerknall-73-web-oV.pdf
/7/	Günther, R.: /1974/	Verbrennung und Feuerungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1974

/8/	Pulm, M.: /1999/	Fog Nail - Der Sprinkler für danach. Brandhilfe 10/1999, S. 345 – 352
/9/	Brein, D., Kunkelmann, J., /2010/	<p>Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise Teil 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Brände in Gebäuden moderner Bauweise • Gebäudekonstruktion • Gebäudetechnik in Gebäuden moderner Bauweise • Flashover / Rollover / Backdraft • Mobile Löschsysteme (Auswahl) • Erkennungsmerkmale für die Feuerwehr <p>Forschungsbericht Nr. 154 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2010) http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php</p>
/10/	Kunkelmann, J., /2013/	<p>Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise Teil 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung • Verhalten von Verglasungen beim Feuerwehreinsatz • Mechanische Zerstörung von Verglasungen • Zerstörung von Verglasungen durch Explosivmittel <p>Forschungsbericht Nr. 164 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2013) http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php</p>
/11/	Kunkelmann, J.: /2000/	<p>Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten.</p> <p>Teil 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Brand- und Rauchausbreitung sowie brandschutztechnische Maßnahmen bei Altbaugebäuden und Gebäuden aus dem Bereich des Denkmalschutzes - Baurechtliche Anforderungen - Wirkungsweise von Sprinkler- und Wassernebel-Löschanlagen - Experimentelle Untersuchungen (Versuchsaufbau: 4-

		geschossiger Treppenraum, Niederdruck-Wassernebellöschanlage) Forschungsbericht Nr. 120 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer. Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2000) http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php
/12/	Handschel, J.: /2010/	Vorbeugender Brandschutz Bauordnungsrecht Lernunterlage, Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg, Bruchsal 2010 http://www.lfs-bw.de/Fachthemen/vb/Seiten/bauordnungsrecht.aspx
/13/	Handschel, J.: /2010/	Brandverhütungsschau für Kommandanten - Handreichung – Lernunterlage, Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg, Bruchsal 2010 http://www.lfs-bw.de/Fachthemen/vb/Seiten/brandverhuetzungsschauhandreichung.aspx
/14/	Battran, L., Mayr, J.: /1996/	Brandschutz im ausgebauten Dachgeschoß s + s report, 6/1996, S. 22 – 29
/15/	Mayr, J., Battran, L.: /2011, 2013/	Handbuch Brandschutzatlas, 2. Auflage, München 2011 und Brandschutzatlas, Feuertrutz GmbH, Köln 2013
/16/	Goepfert, H.: /1992/	Ausbau von Dachgeschossen – Betrachtung aus Sicht der Feuerwehr. Der Feuerwehrmann, 10, 1992, S. 363 – 366
/17/	Wachs, P.: /2009/	Brandschutz im Detail – Trockenbau, Feuertrutz GmbH, Köln 2009
/18/	DIN 4102-1 /1998/	Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 1: Baustoffe DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin 1998

/19/	DIN EN ISO 13943 /2011/	Brandschutz –Vokabular DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011
/20/	Giertlová, Z. et al.: /2001/	Schwel- und Glimmverhalten von Dämmstoffen. Eigenverlag des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI), Universität für Bodenkultur Wien, 2001
/21/	Bussenius, S.: /1996/	Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, 1996
/22/	DIN EN 16733 /2014/	Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Bestimmung der Neigung eines Bauprodukts zum kontinuierlichen Glimmen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2014
/23/	Kircher, F.: /2012/	Das Feuerwehr-Lehrbuch – Grundlagen- Technik-Einsatz, Brandschutz/Deutsche Feuerwehrzeitung 2. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, 2012
/24/	Andersen, K.: /2012/	Reetdachhaus brennt lichterloh. Feuerwehrmagazin 9/2012, S. 32 - 35
/25/	Ridder, A., Cimolino, U. et al.: /2013/	Brandbekämpfung im Innenangriff. Flashover und Backdraft, Löschmethoden, Einsatztaktik, Realbrandausbildung Reihe: Einsatzpraxis, Herausgeber: Ulrich Cimolino ecommed Sicherheit, Heidelberg, 2013
/26/	Krüger, A.; Radusch, R.: /1956/	Wasserzerstäubung im Strahlrohr. Forschungsstelle für Feuerlöschtechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe, Forschungsbericht Nr. 329 des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen, 1956 http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/download/Krueger_Radusch_Wasserzerstaebung_im_Strahlrohr.pdf
/27/	Herterich, O.: /1960/	Wasser als Löschmittel Dr. Alfred Hüthig Verlag GMBH, Heidelberg, 1960

/28/	Schatz, H., Kunkelmann, J. /1985/:	Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen Teil II: Literaturübersicht und Berechnungsgrundlagen für die Wärmeübertragung bei Tropfen in einer Heißgasströmung Forschungsbericht Nr. 54 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985), http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php
/29/	Ebner, C.: /2010/	Innenangriff Sichere und effiziente Vornahme von Hohlstrahlrohren Die Roten Hefte / Ausbildung kompakt, Band 214 Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2010
/30/	Kunkelmann, J.: [2010]	Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer `Brandgefahrenklasse´. - Teil 2: <ul style="list-style-type: none"> • Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im 25 m²- Brandraum • Auslöseverhalten von fotoelektronischen Rauchmeldern und thermischen Glasfass-Auslöseelementen bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen Forschungsbericht Nr. 144 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2010), http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php
/31/	Kunkelmann, J.: [2012]	Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen. - Teil 2 <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau eines Versuchslabors mit Schleuse in Anlehnung an ein mikrobiologisches bzw. gentechnisches Labor der Sicherheitsstufe S3 • Strömungstechnische Untersuchungen • Brandrauchanalyse mit FTIR • Brand- und Löschversuche mit Niederdruck- und Hochdruck-Wassernebel Forschungsbericht Nr. 160 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2012), http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php

/32/	Grabski, R., Brein, D., et al.: [2010]	Anforderungen und Prüfmethode für die Persönlichen Schutzausrüstungen der Feuerwehreinsatzkräfte im Brandeinsatz unter besonderer Berücksichtigung des Atemschutzes (Persönliche Schutzausrüstung - PSA) <ul style="list-style-type: none"> • Teilschritt 1: Bericht • Teilschritt 1: Anhang: Vollständige Zusammenstellung der Bilder, Diagramme, Tabellen und Videoauswertungen (Videoprints) der Untersuchungen Forschungsbericht Nr. 161 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2010), http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/392.php
/33/	Schwartz, E. v.: /1964/	Handbuch der Feuer- und Explosionsgefahr. 6. Auflage, Feuerschutzverlag PH. L. Jung, München, 1964
/34/	Pleß, G. et al.: /1996/	Taktik des mobilen Löscheinsatzes bei Thermoplasten Teil 3: Wechselwirkung zwischen Löschwassertropfen und Plastoberflächen, Einbringung von Wassertropfen in Kanäle verdeckter Brände und organische Schadstoffe bei Plastbränden Forschungsbericht Nr. 101 im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Ausschuss "Feuerwehrangelegenheiten", Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, Juli 1996
/35/	DIN 14430 /2008/	Feuerwehrwesen – Druckzumischanlagen und Druckluftschaumanlagen DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
/36/	DIN EN 1568-3 /2008/	Feuerlöschmittel – Schaummittel – Teil 3: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwertschaum zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
/37/	DIN EN 16327 /2011/	Feuerwehrwesen – Druckzumischanlagen (DZA) und Druckluftschaumanlagen (DLS) DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011

/38/	de Vries, H.: /2008/	Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum, 3. Auflage, ecomed Sicherheit, Landsberg, 2008
/39/	de Vries, H.: /2000/	Untersuchungen zur Optimierung der Bekämpfung von Feststoffbränden mit Wasser und Schaum im mobilen Einsatz der Feuerwehren, LIBRI – Books on Demand, Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2000
/40/	de Vries, H., Hölemann, H.: /2001/	Class-A-Foam und Compressed-Air-Foam Brandschutz – Deutsche Feuerwehrzeitung 7/2001, S. 642 – 653
/41/	de Vries, H.: /2010/	Messung des Druckverlaufs an mit Wasser oder Druckluftschaum gefüllten Schlauchleitungen während des Betriebs. vfdB Zeitschrift, ; 1/2010, S. 10 – 17
/42/	Rodewald, G., Rempe, A.: /2005/	Feuerlöschmittel 7. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 2005
/43/	Sthamer, O., Wun- derlich, M.: /?/	Empfehlungen zum Üben und Erproben von Schaum- löschmitteln Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG Hamburg, Bun- desanstalt für Gewässerkunde, Koblenz stha- mer.com/deutsch/pdf/Merkblatt/GMAG_Erproben.pdf
/44/	Prall, M.: /2014/	Die Umweltverträglichkeit von Schaumlöschmitteln Brandschutz Deutsche Feuerwehrzeitung, 2/14 S. 114 – 117
/45/	VwVwS: /1999, 2005/	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaus- haltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe - VwVwS), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie Umweltbundesamt, Ber- lin, 1999
/46/	UBA et al.: /2013/	Fluorhaltige Schaumlöschmittel umweltschonend ein- setzen. Umweltbundesamt (UBA), Deutscher Feuerwehrver- band (DFV), Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. (bvfa), Dessau-Roßlau, Berlin, Würzburg, 2013 http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ratgeber-fluorhaltige-schaumloeschmittel

/47/	AwSV: /2013/	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Entwurf vom 22.7.2013, http://www.bmu.de ,
/48/	VDS 3141: /2011/	VdS-Merkblatt Schaummittel in ortsfesten Löschanlagen Ausgabe 2011-12 (01) VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, 2011
/49/	VDS 3124: /2013/	VdS-Richtlinien für Löschmittel Schaummittel – Anforderungen und Prüfmethode, Ausgabe 2013-06 (01) VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, 2013
/50/	Föhl, A.: /2004/	Ermittlung der Anforderungen an Druckluftschaum-Systeme im Löscheinsatz. Forschungsbericht Nr. 140 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, KIT - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2004) http://www.ffb.kit.edu/392.php sowie Präsentation: Bewertung des Druckluftschäumlösch Verfahrens (CAFS) und Anwendungsgrenzen für den "indirekten Löschanariff" http://www.ffb.kit.edu/download/DLS2003.pdf
/51/	Föhl, A., Schaaf, J.: /2008/	Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschaum führenden Feuerweherschläuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden. Forschungsbericht Nr. 150 der ständigen Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, KIT - Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2008) http://www.ffb.kit.edu/392.php

/52/	IM BW: /2006/	Innenministerium Baden-Württemberg, Landesbranddirektor und Unfallkommission „Tübingen“: Bericht zum Einsatz in Tübingen, Reutlinger Straße 34/1 am 17.12.2005, Stuttgart, 29.7.2006
/53/	IM BW: /2014/	Hinweise für den Einsatz von Druckluftschäum bei der Brandbekämpfung und für den Umgang mit Feuer- wehrschräuchen im Innenangriff Innenministerium Baden-Württemberg, Landesbranddirektor, Stuttgart, 2014
/54/	AGBF FA Technik: /2014/	Anforderungen an die Qualität von Druckschräuchen für die Feuerwehr – neue Leistungsstufen. AGBF Bund, Fachempfehlung des Fachausschusses Technik der deutschen Feuerwehren, http://www.dfv.org/fe-qualitaet-druckschlaeuche.html , 2014
/55/	DIN 14811: /2012, 2014/	DIN 14811 / A1 Feuerlöschschräuche - Druckschräuche und Einbände für Pumpen und Feuerwehrfahrzeuge; Änderung A1, DIN 14811 / A2 Feuerlöschschräuche - Druckschräuche und Einbände für Pumpen und Feuerwehrfahrzeuge; Änderung A2 DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012, 2014
/56/	vfdb: /2010/	Technischer Bericht Druckluftschäum (DLS) vfdb - Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenab- wehr“ (BG) des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brand- schutzes e.V., Altenberge, Oktober 2010 http://www.vfdb.de/Merkblaetter.110.0.html
/57/	Braun, U.: /2010/	Druckluftschäum. Die roten Hefte – Ausbildung kompakt, Bd. 211, W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart, 2010
/58/	Braun, U.: /2011/	Anwendung von Druckluftschäum – Technischer Be- richt des Referates 5 Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Tagungsband, Berlin, 2011

/59/	Braun, U.: /2014/	Brandbekämpfung mit Druckluftschäum Brandschutz Deutsche Feuerwehrzeitung, 2/14 S. 102 – 108
/60/	Orlik, L.: /2014/	Qualitätsmanagement CAFS in der Berliner Feuerwehr Brandschutz Deutsche Feuerwehrzeitung, 2/14 S. 110 – 113
/61/	Schumann, U.: /2014/	Technischer Bericht „Druckluftschäum“ der vfdb wird überarbeitet Brandschutz Deutsche Feuerwehrzeitung, 2/14 S. 118 – 122
/62/	Bunk, M.: /2010/	Ohne Wasserschaden effektiv gelöscht. Feuerwehr Retten-Löschen-Bergen, Heft 9, 2010, S. 34 bis 35
/63/	Lyckeback, E., Öhrn, J.: /2012/	Investigation on the gas-cooling effects of CAFS Report 5394, Department of Fire Safety Engineering and System Safety, Lund University, Sweden Lund 2012
/64/	Zhang, J. et al.: /2011/	Assessment of gas cooling capabilities of compressed air foam systems in fuel- and ventilation-controlled compartment fires Journal of Fire Sciences, 29 (6), 2011, 543 – 554
/65/	Grimwood, P.: /2008/	Promesis Research Project 2008 http://www.firetactics.com/CAFS.htm , 2013
/66/	Müller, A.: /2012/	Wenn 115 Meter Dachstuhl brennen. Feuerwehrmagazin 9/2012, S. 36 – 2012
/67/	Slaby, C., Wibel, A.: /2012/	Einsatztaktik für die Feuerwehr – Hinweise zu Dach- stuhlbränden. Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg, 2012 http://www.lfs- bw.de/meldungen/aktuelles/archiv/archiv2012/Seiten/M eldung2012029.aspx
/68/	Blutsch, A.: /2012/	Löschen – statt Dachreinigung. Eine kritische Betrachtung. Brennpunkt 4/2012, S. 10 – 13

/69/	Kim, A. K., Crampton, G. P.: /2009/	Evaluation of the Fire Suppression Effectiveness of Manually Applied Compressed-Air-Foam (CAF) System Fire Technology, 48, 2012, S. 549 – 564
/70/	Cavette, C.: /2001/	Bubbles beat water, http://firechief.com/suppression/foam/firefighting_bubbles_beat_water , 2001
/71/	Grant, Casey C.: /2012/	Capabilities and Limitations of Compressed Air Foam Systems (CAFS) for Structural Fire Fighting, Workshop Summary, Montgomery County Public Service Academy, Great Seneca Hwy, Rockville MD, Fire Protection Research Foundation, 2012
/72/	Sthamer: /2013/	Fabrik chemischer Präparate von Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG, Produktbeschreibungen und Sicherheitsdatenblätter zu Schaumlöschmitteln www.sthamer.com , Hamburg 2013

H i n w e i s

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

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

<http://www.ffb.kit.edu>

und des

Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge

<http://www.idf.sachsen-anhalt.de/start-idf/>

eingesehen werden.