BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Ermittlung der Anforderungen an Druckluftschaum-Systeme im Löscheinsatz 140

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

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

Forschungsbericht Nr. 140

Ermittlung der Anforderungen an Druckluftschaum-Systeme im Löscheinsatz

von Dipl.-Ing. C. Axel Föhl

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

> Karlsruhe Oktober 2004

FA-Nr. 182 (4/01) ISSN 0170-0060

BERICHTS-KENNBLATT

Nummer des Berichtes:	Titel des Berichtes:		ISSN:	
140	Ermittlung der Anforderungen an Druck- luftschaum-Systeme im Löscheinsatz 0170-0060		0170-0060	
Autoren:		durchführende Institution:		
DiplIng. C. Axel Föhl		Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)		
		Hertzstraße 16		
		D-76187 Karlsruhe		
Nummer des Auftrages:		auftraggebende Institution:		
182 (4/01)	Ständige Konferenz der Lände	ler Innenminister und r. Arbeitskreis V.	
Abschlußdatum: Oktobe	,		ehrangelegenheiten,	
Seitenzahl:	Bilder:	Tabellen:	Literaturverweise:	
79	13 *) sh. Kurzfassung	6	73	

Kurzfassung:

Im Inneneinsatz können mit dem DLS-Löschverfahren Wasserschäden vermieden werden. Hervorzuheben ist, daß zwar in den Brandrückständen nach dem Ablöschen eines Wohnraumes im Vollbrand je nach Versuch $38\cdots275$ L Wasser gebunden werden, daß darüber hinaus aber praktisch kein unverdampftes, durchtropfendes Löschwasser anfällt, das heißt, daß nicht nur der sonst beim Löschen mit reinem Wasser auftretende Wasserschaden minimiert wird, sondern daß dies auch für die Gefährdung der Umwelt durch austretendes Löschwasser gilt.

Im Außeneinsatz ermöglichen die Handhabungsvorteile (große Wurfweite, hohe Mobilität wegen des geringen Gewichts) in Verbindung mit dem günstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnis einen raschen Löscherfolg.

Wie bei jedem anderen Löschverfahren auch ist jedoch eine gute Ausbildung des Strahlrohrführers die wichtigste Voraussetzung, um die vorgenannten Ziele zu erreichen. Das DLS-Verfahren ist geeignet, den Ausbildungserfolg spürbar zu verbessern.

Schlagwörter:

CAF, DLS, Druckluftschaum, Feuerwehrausbildung, Gesamt-Löschwasserverbrauch, indirekter Löschangriff, Löscheffizienz, Löschmittel, Löschschaum, Löschtaktik, Löschversuche, Löschwasser-Zusätze, Quellkörper, Salem-Test, Salze, Schaummittel-Konzentration, Schlauchgewicht, Tenside, Wurfweite

INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER A	ABKÜRZUNGEN UN	DΙ	CORMELZEICHEN

1.	EINLEITUNG	5
2. 2.1 2.2 2.3 2.4	LÖSCHWASSER MIT ZUSÄTZEN Salze als Löschwasser-Zusatz Quellkörper als Löschwasser-Zusatz Tenside als Löschwasser-Zusatz Schaum als Löschmittel	6 7 8
3. 3.1 3.2 3.3 3.4	DRUCKLUFTSCHAUM Funktion des Druckluftschaum-Verfahrens Verfahrensvorteile nach Herstellerangaben Frühere DLS-Versuche Brand- und Löschversuche mit DLS an der Forschungsstelle für	11 16
3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 3.10	Brandschutztechnik Verlauf des DLS-Löschversuchs SCH 1 Verlauf des DLS-Löschversuchs SCH 2 Verlauf des DLS-Löschversuchs HZ 1 Verlauf des DLS-Löschversuchs SCH 3 Verlauf des DLS-Löschversuchs HZ 2 Auswertung des DLS-Löschversuchs HZ 1	24 25 26 28 29
4. 4.1 4.2	BEWERTUNG DES DLS-LÖSCHVERFAHRENS UND VERGLEICH MIT FRÜHEREN LÖSCHVERSUCHEN AN DER FFB	33
5. 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6	Bewertung der Herstellerangaben bezüglich der DLS-Qualitäten "schneller gelöscht, weniger Wasser" "geringe Schaummittel-Konzentration" "Schaumerzeugung mit weniger Wasser" "weniger Wasserdampf, bessere Sicht" "größere Wurfweite" "leichter zu handhaben"	38 39 41 41
6.	EINSATZTAKTIK ZU BEGINN DES LÖSCHENS	47
7.	ZUSAMMENFASSUNG	49
8.	ANHANG: FLASH-OVER, BACK-DRAFT, ROLL-OVER	51
9.	LITERATURVERZEICHNIS	53
10	Tadellen lind Ril ded	58

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Kürzel	Bedeutung	Dimension
α	Anstellwinkel einer Wurfparabel	0
A_1	Strömungsquerschnitt im Schlauch	mm²
A ₂	Strömungsquerschnitt in der Mündung	mm²
AFFF	aqueous film forming foam	_
AR	alcohol resistant	
c_0	Wurf-Anfangsgeschwindigkeit	m/sec
c_1	Strömungsgeschwindigkeit im Schlauch	m/sec
c_2	Strömungsgeschwindigkeit in der Mündung	m/sec
C _{SM}	Konzentration des Schaummittels in der Schaummittel- Lösung	%
C_{W}	Konzentration des Wassers in der Schaummittel-Lösung	%
CAF(S)	compressed air foam (system)	_
CAS	Chemical Abstracts Service	_
Δ	Differenz	
D_1	Schlauch-Innendurchmesser	mm
D_2	Mündungs-Durchmesser	mm
DLS	Druckluftschaum(-Anlage)	—
Е	Verschäumungszahl	L/L
E_p	Verschäumungszahl unter Betriebsdruck	L/L
FFB	Forschungsstelle für Brandschutztechnik	_
g	Erdbeschleunigung	m/sec²
H_{u}	Heizwert	kJ/kg
K _{SM}	Konzentration des Schaummittels bezogen auf Wasser	%
1	Wurfweite	m
LF	Löschfahrzeug	_
$m_{LB;LE}$	Masse bei Löschbeginn bzwende	kg
m _{PB;PE}	Masse zu Beginn bzw. Ende der Löschpause	kg

Kürzel	Bedeutung	Dimension
m_{S}	Masse des Schaumes	kg
m_{SM}	Masse des Schaummittels	kg
m_{W}	Masse des Wassers im Schaum	kg
m _{W+SM}	Masse der Schaummittel-Lösung	kg
m' _S	spezifische Masse des Löschmittels "Schaum"	kg/m
m' _{S,p}	spezifische Masse des Schaumes unter Betriebsdruck	kg/m
m' _W	spezifische Masse des Löschmittels "Wasser"	kg/m
ṁ	Abbrand	kg/sec
$\dot{m}_{ m Fl}$	Massenstrom im Strahlrohr	kg/sec
p	Förderdruck des Löschaggregates	bar
Q	Wärmefreisetzung	kW
ρ_1	Dichte im Schlauch	kg/L
ρ ₂	Dichte in der Mündung	kg/L
ρς	Dichte des Schaumes	kg/L
ρѕм	Dichte des Schaummittels	kg/L
ρ_{W}	Dichte des Wassers	kg/L
ρ_{W+SM}	Dichte der Schaummittel-Lösung	kg/L
$9_{\mathrm{FN;FS}}$	nördliche bzw. südliche Temperatur unter dem Fenstersturz	°C
$artheta_{ ext{LB}; ext{LE}}$	mittlere Brandraum-Temperatur bei Löschbeginn bzwende	°C
$9_{\mathrm{Mu;Mo}}$	Decken-Temperatur in der Mitte des Versuchsraumes unten bzw. oben	°C
9 _{SO;SW;NW;NO}	Decken-Temperatur in der SO-, SW-, NW- bzw. NO-Ecke des Versuchsraumes	°C
9 _{РВ;РЕ}	mittlere Brandraum-Temperatur zu Beginn bzw. Ende der Löschpause	°C
$\dot{9}_{ ext{LB}}$	Temperatur-Gradient bei Löschbeginn	°C/min
t	Zeit	sec

Kürzel	Bedeutung	Dimension
t _{Fl-ov}	Zeitpunkt des Flash-over	min
$t_{\mathrm{LB;LE}}$	Zeitpunkt des Löschbeginns bzwendes	min
t _{PB;PE}	Zeitpunkt des Beginns bzw. Endes der Löschpause	min
V _{ges}	Gesamt-Löschwasserverbrauch	L
$V_{H;N}$	Löschwasserverbrauch in der Haupt- bzw. Nachlösch- Phase	L
$V_{\rm L}$	Volumen der im Schaum eingeschlossenen Luft	L
$V_{L,p}$	Luft-Volumen im Schaum unter Betriebsdruck	L
V _S	Volumen des Schaumes	L
$V_{S,p}$	Volumen des Schaumes unter Betriebsdruck	L
V _{Schad}	Volumen des durchgelaufenen und des im Brandschutt gebundenen Schadenswassers	L
V_{SM}	Volumen des Schaummittels	L
$V_{ m W}$	Volumen des unverschäumten Wassers	L
V' ₁	spezifisches Schlauchvolumen	L/m
$\dot{\rm V}_{\rm L}$	Luft-Volumenstrom	L/min
$\dot{V}_{\rm L,p}$	Luft-Volumenstrom unter Betriebsdruck	L/min
$\dot{V_{S}}$	Schaum-Volumenstrom	L/min
$\dot{ m V}_{ m W}$	Wasser-Volumenstrom	L/min
WGK	Wassergefährdungs-Klasse	_

1. EINLEITUNG

Zur Bekämpfung von Bränden der Klasse A ist Wasser das am häufigsten eingesetzte Mittel, weil es zum einen das preiswerteste ist, ubiquitär verfügbar und leicht zum Brandherd zu befördern, und weil zum anderen sowohl seine Wärmekapazität als auch seine Verdampfungswärme größer ist als bei anderen möglichen Löschmitteln. Wegen dieses hohen Wärmebindungs-Vermögens beruht seine Wirkung hauptsächlich auf dem Kühleffekt [1···3]. Um den Löscherfolg möglichst schnell und mit möglichst wenig Wasser zu erzielen, können mit Hilfe von Zusätzen die chemischen oder physikalischen Eigenschaften (z.B. Inhibierungs- bzw. Benetzungsfähigkeit) dieses Löschmittels verbessert werden [4, 5].

Der Sinn und Nutzen des Druckluftschaum-Löschverfahrens – diskutiert und umstritten seit etwa 70 Jahren [5, 6] – besteht ebenfalls darin, den Löscherfolg zu verbessern und den Wasserverbrauch beim Löschen zu verringern, um die Ressourcen zu schonen und um die mit dem Löschen verbundenen Wasserschäden nach Möglichkeit zu minimieren.

2. LÖSCHWASSER MIT ZUSÄTZEN

In den zurückliegenden Jahren wurden an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) Löschversuche beim Vollbrand von Wohnräumen im Realmaßstab durchgeführt, um den Effekt von Zusätzen zur Verbesserung der Löschwirkung und zur Verringerung der Schadenswasser-Menge zu untersuchen [1, 7, 8]. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Versuche sind in den Tabellen 1···3 zusammengestellt.

In den ersten Zeilen der Tabellen werden Art und Menge des Brandgutes und die wichtigsten Daten zum Brandverlauf aufgeführt. Die Zeitangaben [min] für Flash-over und Löschbeginn werden ab dem Zündzeitpunkt gemessen. Die Abbrand-Geschwindigkeit [kg/min] und der daraus berechnete Brutto-Wärmestrom [kW] beziehen sich auf den Zeitpunkt direkt vor dem Beginn des Löschens. Es folgen Angaben zum Löschverfahren:

Löschmittel, verwendetes Strahlrohr, Arbeitsdruck und der maximale Wasser- beziehungsweise Gemisch-Volumenstrom.

Wenn die Versuchsprotokolle es zulassen, das heißt, wenn das Löschen etwa 7 Minuten oder länger dauert, wird zwischen Haupt- und Nachlösch-Phase unterschieden: Erste Abkühlung der Brandraum-Atmosphäre etwa von 800°C auf 200°C – weitere Abkühlung bis etwa 100°C. Sowohl für die beiden Löschphasen als auch für den Versuch insgesamt wird nach dem Gesamt-Löschwasserverbrauch und den Angaben zu eventuellen Löschwasser-Zusätzen die Schadenswasser-Menge genannt, also wieviel Wasser im Brandschutt gebunden oder durchgetropft unter dem Versuchsstand aufgefangen wurde. Aus der Differenz zum Gesamtverbrauch errechnet sich der verdampfte Anteil und die durch diesen dem Brand entzogene Wärme [kJ].

Tabelle 1 enthält Löschversuche bei Wohnungsbränden, bei denen Wasser, Wasser/ Tensid-Gemisch oder Mittelschaum eingesetzt wurden. Tabelle 2 enthält in der ersten Spalte eine Mittelung der Werte der Versuche 5 und 8 aus Tabelle 1, die zum Vergleich mit den Ergebnissen der Löschversuche mit Schwerschaum, Wasser/Fluortensid-Gemisch und Wasser/Salz-Lösung herangezogen werden können. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse von Löschversuchen mit Wasser/Salz-Lösungen, Wasser und Wasser/Quellkörper-Gemischen zusammengestellt. Die Ergebnisse der Versuche 6 und 7 in der damaligen Versuchsreihe [8] lagen so nahe beieinander, daß sie hier gemittelt wiedergegeben werden können. Versuch 8 unterscheidet sich von diesen beiden durch den höheren Salzgehalt im Löschwasser.

2.1 Salze als Löschwasser-Zusatz

Beim Verdampfen des Löschwassers kristallisieren die in ihm gelösten Salze aus und wirken dann wie in Trockenlöschpulvern oder in Flammschutzmitteln als fein verteilte Inhibitoren, die die freien Radikale in der Verbrennung binden und so die Verbrennungs-Kettenreaktion unterbrechen.

Mit Beimischungen von 5···20 % Diammonium-Sulfat ([NH₄]₂SO₄) beziehungsweise Diammonium-Hydrogen-Phosphat ([NH₄]₂HPO₄), – siehe Versuch 4 und Versuch 5 in Tabelle 2 und Versuch 6+7 und Versuch 8 in Tabelle 3 – konnte der Gesamt-Löschwasserbedarf gegenüber unvermischtem Wasser – siehe Versuch 5+8 in Tabelle 2 – um 24····75 % gesenkt werden. Die Menge des lösch-unwirksamen Schadenswassers ging bis auf 18 % des insgesamt eingesetzten zurück. In den Versuchen mit Phosphat-Lösung konnte darüber hinaus eine deutliche Verkürzung der erforderlichen Löschzeit erreicht werden [7, 8].

Wegen der Umweltbelastung und der Korrosionsgefahr für die Löschgeräte können Salze nicht als sinnvolle Löschwasser-Zusätze angesehen werden. Die erzielten Löschwasser-Reduzierungen zeigen jedoch, in welchem Maße der Löscherfolg gesteigert und der Wasserschaden verringert werden kann, wenn speziell die chemischen Eigenschaften des Löschmittels verbessert werden.

2.2 Quellkörper als Löschwasser-Zusatz

Quellkörper 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.

Mit Beimischungen von 0,50···0,55 % Natrium-Polyacrylat {CH₂-C(COONa)H} – siehe Versuch 1 und Versuch 3 in Tabelle 3 – konnte der Löschwasserbedarf gegenüber Wasser ohne Zusätze – siehe Versuch 5+8 in Tabelle 2 und Versuch 2 in Tabelle 3 – um etwa 37 % gesenkt werden; der Anteil des Schadenswassers wurde auf 34 % beziehungsweise auf 39 % reduziert. Gleichzeitig konnte die Löschzeit um 22···40 % verringert werden [1, 7].

Wegen der Unfallgefahr auf dem mit schlüpfrigem Quellkörpergemisch bedeckten Boden insbesondere bei Bekämpfung von Bränden in geschlossenen Räumen – der Einsatz von Quellkörperzusätzen bei der Waldbrandbekämpfung darf hingegen als bewährt und in dieser Hinsicht als eher unproblematisch gelten – und wegen der Gefahr, die Löschgeräte zu verstopfen [4, 5], können Quellkörper nicht als optimale Löschwasser-Zusätze angesehen werden. Die erzielten Löschwasser-Reduzierungen zeigen jedoch, wie der Löscherfolg ebenfalls gesteigert und der Wasserschaden verringert werden kann, wenn statt der chemischen die physikalischen Eigenschaften des Löschmittels verbessert werden.

2.3 Tenside als Löschwasser-Zusatz

Der Zusatz von Tensiden verringert die Oberflächenspannung so weit, daß Wasser nicht mehr abperlt, sondern die Brandgut-Oberfläche benetzt und auch in schmale Spalten kühlend eindringen kann [2, 4…6, 9…16]. Die dadurch vergrößerte Kontaktfläche zwischen Brandgut und Löschwasser verbessert den Wärmeübergang. Bei Bränden von Kunststoffen oder Autoreifen, die sich mit Wasser schlecht oder gar nicht löschen lassen [3, 5, 14, 17…20], aber auch bei Strohballen wird dieser Effekt zusätzlich durch die oleophilen Eigenschaften moderner Tenside gesteigert – beispielsweise in Klasse-A-Schaummitteln [6, 9, 13, 14].

Mit Beimischungen von 1% eines handelsüblichen Tensids oder 5% eines Fluor-Tensids – siehe Versuch 7 in Tabelle 1 und Versuch 3 in Tabelle 2 – konnte der Gesamt-Löschwasserbedarf gegenüber reinem Wasser – siehe Versuch 5+8 in Tabelle 2 – um 14% beziehungsweise 20% gesenkt werden, der Schadenswasser-Anteil sank auf 44···51%, die Löschzeit ging um 12···40% zurück [7, 8].

Von den genannten Löschwasser-Zusätzen sind die Tenside am einfachsten zu handhaben, weil sie Pumpen, Schläuche und Armaturen nicht verstopfen und nach dem Einsatz keine aufwendige Reinigung erfordern. Unter Verzicht auf die Möglichkeit, die Schaummittel-Konzentration unterschiedlichen Brandbedingungen anpassen zu können, läßt sich das Problem der genauen Dosierung durch die Verwendung von vorgemischten Tensidlösungen umgehen [9]. Auch um jegliche Korrosionsgefahr für die Kreiselpumpe auszu-

schließen, zieht es die Feuerwehr jedoch vor, das Tensid erst auf der Druckseite einzuspeisen [4, 14, 21···23,].

Löscherfolge, die mit sogenanntem Class-A-Foam¹) erzielt werden, beruhen – da häufig eben nicht verschäumt wird – auf der durch die Beimengung von Tensiden zum Löschwasser verbesserten Benetzung des Brandgutes [4···6, 10, 19]. Ein leichter Verschäumungseffekt tritt lediglich dadurch ein, daß bei Verwendung einer Hohlstrahl- oder einer Sprühstrahldüse im Mündungsbereich Luft mitgerissen und eingemischt wird [9, 14].

2.4 Schaum als Löschmittel

Wasser/Tensid-Gemische können mit Luft zu einer je nach Herstellungsverfahren mehr oder weniger homogenen Wasser/Luft-Dispersion verschäumt werden [24], wodurch der Löscherfolg auf dreifache Weise verbessert wird:

- Die bessere Benetzung vergrößert die Kontaktfläche und steigert den Wärmeübergang zwischen Brandgut und Löschmittel – siehe Abschnitt 2.3.
- 2. Solcher Schaum haftet an abschüssigen Flächen ähnlich wie ein Quellkörper/Wasser-Gemisch und erhöht damit die Kontaktdauer zwischen Brandgut und Löschmittel – im besten Fall so lange, bis es verdampft ist (sh. Abschnitt 2.2) [11, 17, 20].
- Das gegenüber Wasser gesteigerte Oberflächen/Volumen-Verhältnis verbessert ebenfalls den Wärmeübergang zwischen Brandgut und Löschmittel. Schon mit dem im Vergleich zu einem C-Mehrzweckstrahlrohr höheren Oberflächen/Volumen-Verhältnis des mit einem D-Mehrzweckstrahlrohr ausgebrachten Löschwassers wurden – bei etwas

Nach amerikanischem Sprachgebrauch – und inzwischen auch hier üblich – werden die dem Wasser beigemischten Tenside, mit denen Schaum zum Löschen von Bränden der Klasse A produziert werden könnte, anstatt mit "surface acting agents" oder abgekürzt "surfactants" mit "foam" bezeichnet. Der eigentliche Löschschaum heißt dann "finished foam" [4···6, 9, 25, 26].

verlängerter Löschzeit – Löschwasser-Einsparungen von 32 % beziehungsweise 13 % erzielt. Der Schadenswasser-Anteil sank auf 33…43 %: Versuch 6 in Tabelle 1 verglichen mit Versuch 5+8 in Tabelle 2 und Versuch 5 in Tabelle 2 verglichen mit Versuch 4 in Tabelle 2 [7, 8].

Mit herkömmlich erzeugtem Mittelschaum (Verschäumungszahl \approx 40, Versuch 9 in Tabelle 1) konnte beim Wohnungsbrand zwar weder eine Reduzierung der Schadenswasser-Menge noch des insgesamt erforderlichen Löschwassers erreicht werden; die Löschzeit wurde jedoch deutlich verkürzt: auf 9 % des Wasser-Vergleichswertes [7]! Dagegen konnten mit Schwerschaum (Verschäumungszahl \approx 10, Versuch 1 in Tabelle 2) sowohl die Löschzeit ($\Delta t = -56$ %) als auch die Löschwassermenge ($\Delta V_{ges} = -24$ %) und der Schadenswasser-Anteil ($V_{schad} = 36$ % von V_{ges}) im Vergleich zum Löschmittel "Wasser" spürbar verringert werden [8].

Der Einsatz von Schaum war bislang im wesentlichen für Brände der Klasse B vorgesehen [5, 14, 23, 27, 28], die im allgemeinen mit Wasser nicht gelöscht werden können, wenn das spezifische Gewicht der brennenden Flüssigkeiten geringer ist als das von Wasser. In erster Linie dient Schaum also dazu, das Löschmittel in der brennbaren Flüssigkeit nicht untergehen zu lassen. Zusätzlich vermag er, die brennende Flüssigkeitsoberfläche vom Luftsauerstoff zu trennen, die aufsteigende brennbare Phase zurückzuhalten und durch Abscheiden des Wasseranteils zu kühlen. Laut DIN sind deshalb Schaumqualitäten auch nur für die Brandklasse B definiert [4, 14, 29, 30] und Schaum gilt bei der Feuerwehr folglich als Sonderlöschmittel für brennende Flüssigkeiten analog zum Klasse-D-Löschpulver, dem Sonderlöschmittel für brennbare Metalle.

Doch hat auch für Brände der Klasse A bereits der herkömmlich im Schaumrohr erzeugte Schaum gegenüber dem Löschmittel "Wasser" die oben genannten Vorteile, daß er

• das Brandgut besser benetzt und länger haftet,

- bei geschlossener Brandgut-Oberfläche analog zu Klasse-B-Bränden, wenn er flächig, deckend aufgebracht werden kann, die Sauerstoffzufuhr zum Brand unterbricht und die vom Brandgut produzierten Pyrolysegase zurückhält [5, 21, 23, 27],
- darüber hinaus da sichtbar, augenfällig aufgebracht sparsamer eingesetzt werden kann [3, 68].

Besonders bei Bränden in Containern, wo das Löschmittel nahe zum Brand gebracht werden kann, wo also keine großen Wurfweiten erforderlich sind, wirken sich diese Löscheffekte aus.

Im Unterschied zu reinen Klasse-B-Schäumen, die eine hohe Haltbarkeit haben sollen, um die Flüssigkeits-Oberfläche sicher zu versiegeln, soll die Haltbarkeit von Klasse-A-Schäumen nicht zu hoch sein, weil ihre Hauptlöschwirkung auf der Brandgut-Kühlung beruht – und zwar durch die Verdampfung des im Schaum enthaltenen Wassers [4, 5, 9, 14, 20, 31] und nicht, wie auch unterstellt wird [10], durch die in den Schaumblasen enthaltene Luft. Deshalb wird durch die Verschäumung einer bestimmten, zur Verfügung stehenden Löschwassermenge auch nicht die "Löschmittelmenge" vergrößert [6, 14, 19, 32···35], sondern lediglich die zu ihrer Förderung benötigte Zeitspanne.

3. DRUCKLUFTSCHAUM

3.1 Funktion des Druckluftschaum-Verfahrens

Im Gegensatz zum herkömmlichen Löschschaum, der dadurch erzeugt wird, daß das Löschwasser in einer VENTURI-Düse Schaummittel ansaugt, bevor das Schaumrohr – wiederum nach Art der Wasserstrahlpumpe – dieses Gemisch mit Luft versetzt, wird der Schaum beim Druckluftschaum-Löschverfahren (DLS, englisch: Compressed Air Foam System – CAFS) von einem mobilen oder fest installierten Aggregat [14, 36···38] produziert, das aus Feuerlösch-Kreiselpumpe, Schaummittel-Dosiereinrichtung und Kompressor besteht, von welchem der Schaum in der vorgewählten Konsistenz durch die Schläuche gepumpt wird (Bild 1 [39]):

- Die Wasser-Förderung durch die Kreiselpumpe erfolgt wie gewohnt.
 Sie kann bei abgeschaltetem Schaummittel- und Luft-Volumenstrom auch alleine betrieben werden.
- Die Kreiselpumpe wird von den Löschmittel-Beimengungen nicht tangiert, es besteht also keine Verschmutzungs- oder Korrosionsgefahr [14, 39, 40].
- Die Förderung des Schaummittels durch eine eigene Druckzumischanlage [41] hat den Vorteil, daß die Schaumproduktion ohne Zeitverzug erfolgt [19, 33, 42] und daß im Unterschied zur VENTURI-Düse die Schaummittel-Beimischung unabhängig vom Wasser-Volumenstrom eingestellt werden kann und daß sie wechselndem Durchsatz verhältnis-konstant folgen kann [14, 19, 43].
- Nach Angaben der Hersteller kann in ihren Druckluftschaum-Aggregaten jedes zugelassene Klasse-A-Schaummittel eingesetzt werden.
- Das Dosieren und Konstanthalten aller F\u00f6rderstr\u00f6me wird elektronisch geregelt.
- Die in der Mischkammer generierte Schaumqualität kann mit Hilfe des Luft-Regulierventils gewählt werden: von naß bis trocken (letzteres z.B. mit Schaummitteln für Brände der Klasse B) [3, 14, 19, 20, 36, 43].
- Zwischen den einzelnen Bausteinen des DLS-Aggregates befinden sich Rückschlagventile [10], um bei Fehlfunktion eines Bauteiles die anderen vor Beschädigung zu schützen. Insbesondere wird sichergestellt, daß bei Ausfall der Schaummittel-Förderung auch die Luft-Förderung unterbleibt. Da Wasser und Luft nur mit Hilfe von Schaummitteln (homogen) gemischt werden können, würde die

Einleitung von Luft in reines Wasser gefährliche Stöße am Strahlrohr hervorrufen [3, 6, 14, 44, 45].

DLS ist – bei Verwendung von Klasse-A-Schaummitteln – grundsätzlich für den Einsatz bei Feststoffbränden vorgesehen, kann aber bei Verwendung passender Schaummittel, beispielsweise filmbildender (z.B. AFFF – die im Gegensatz zu Klasse-A-Schaummitteln oleophobe Eigenschaften besitzen, um sie zur Bildung eines Trennfilmes zwischen den brennenden flüssigen Kohlenwasserstoffen und dem Schaum zu befähigen [9, 14, 26]), auch alkoholbeständiger (AR), ebenso bei Bränden der Klasse B eingesetzt werden, wenn eine entsprechend hohe Verschäumung gewählt wird.

Untersuchungen der Nationalen Wissenschaftlichen Forschungsgesellschaft in Kanada – NRC – zufolge kann Klasse-A-Schaum in üblicher, eher geringer Verschäumung zur Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden sogar mit besserem Erfolg als Klasse-B-Schaum eingesetzt werden [37]²). Auch bei der Bewertung von Klasse-A-Löschversuchen, die auf dem Gelände der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Trauen durchgeführt wurden, wird dieser Schluß gezogen [4, 5] – in diesem Falle allerdings noch weniger nachvollziehbar, denn der Löscherfolg von Klasse-B-Schaummittellösung, die ja ebenfalls benetzend wirkt [24], rangiert hier noch hinter dem von schlichtem Wasser.

Das wesentliche Kennzeichen zur Charakterisierung eines Schaumes ist die Verschäumungszahl E, mit der beschrieben wird, um wieviel das Volumen des Schaumes größer ist als das des noch unverschäumten Wasser/Schaummittel-Gemisches.

$$E = V_S / (V_W + V_{SM})$$
 (1)

Bei herkömmlich produziertem Schaum wird dementsprechend zwischen Schwer-, Mittel- und Leichtschaum unterschieden [23, 24, 29]. Schaummittel, die sich in unterschiedlichen Verschäumungsbereichen einsetzen lassen, werden als Mehrbereichs-Schaummittel bezeichnet³). (Diese Bezeichnung bedeutet nicht, daß diese Schaummittel

²) 3 Jahre später konstatiert dieselbe Forschungsgesellschaft jedoch wieder das Gegenteil [38]

³) Definition laut DIN 14.272-2, wird in den Folgenormen EN 1.568-1,2 nicht mehr erwähnt [29, 46]

für unterschiedlich Brandklassen geeignet wären, wie man aus folgender Formulierung schließen könnte: Mehrbereichs-Schaummittel ist für feste Brennstoffe besser geeignet als andere Schaumtypen [5].)

Schwerschaum hat Verschäumungszahlen zwischen 5 und 20. Er wird im wesentlichen zum Abdecken von Flüssigkeitsbränden, im Einzelfall auch von Feststoffbränden
eingesetzt. Sein Löscheffekt liegt in der Kühlung des Brandgutes und in seiner Trennung
vom Luftsauerstoff. Die Verschäumungszahlen von Mittelschaum reichen von 20 bis 200
(bzw. bis 75 [47]), er dient vorzugsweise dem vorbeugenden Schutz der Brandumgebung.
Seine Wirkung beruht auf dem Trenn-, dem Kühl- und dem Verdrängungseffekt. Leichtschaum mit Verschäumungszahlen über 200 bis 1000 wird verwendet, um Keller, Container oder Schiffsladeräume zu fluten und dort den Sauerstoff zu verdrängen [9, 23, 48].

Bei Druckluftschaum liegen die Verschäumungszahlen zwischen 3 und über 20. Unterhalb von 10 handelt es sich um Naßschaum, darüber um Trockenschaum [41]. Einzelne Hersteller benutzen für den Bereich von 10 bis 20 die hausinterne Bezeichnung "feuchter Schaum", die Verschäumung von Trockenschaum liegt bei ihnen über 20 [40].

Das Schaum-Volumen kann in einem Auffangbehälter gemessen und das Volumen der darin enthaltenen wässerigen Mischung aus einer Wägung der Schaum-Masse berechnet werden:

$$V_W + V_{SM} = m_{W+SM} / \rho_{W+SM}$$
 (2)

$$\rho_{W+SM} = C_W \cdot \rho_W + C_{SM} \cdot \rho_{SM}$$
 (3)

$$C_{W} = 1 - C_{SM} \tag{4}$$

Da die Konzentrationsangabe für das Schaummittel K_{SM} jedoch nicht auf das Gemisch, sondern auf dessen Wasseranteil bezogen wird,

$$K_{SM} = V_{SM} / V_{W}$$
 (5)

sind folgendermaßen der Anteil des Schaummittels C_{SM} in der Mischung,

$$C_{SM} = K_{SM} / (1 + K_{SM})$$
 (6)

deren Dichte

$$\rho_{W+SM} = (\rho_W + K_{SM} \cdot \rho_{SM}) / (1 + K_{SM})$$
(7)

und ihr Volumen zu berechnen:

$$V_W + V_{SM} = m_{W+SM} \cdot (1 + K_{SM}) / (\rho_W + K_{SM} \cdot \rho_{SM})$$
 (8)

Für die Verschäumungszahl ergibt dies

$$E = V_S \left(\rho_W + K_{SM} \cdot \rho_{SM} \right) / \left(m_{W+SM} \cdot (1 + K_{SM}) \right) \tag{9}$$

Bei geringen Schaummittel-Konzentrationen verschwindet die Differenz zwischen C_{SM} und K_{SM} , und weil darüber hinaus die Dichte des Schaummittels von der des Wassers nur wenig abweicht ($\Delta \rho = 3 \cdots 5$ %), kann – unter atmosphärischen Bedingungen, das heißt, $m_{W+SM} \approx m_S$ – die Verschäumung mit ausreichender Genauigkeit auf

$$E = \rho_W \cdot V_S / m_W = \rho_W / \rho_S \quad \text{mit} \quad \rho_W = 1 \text{ kg/L}$$
 (10)

vereinfacht werden, was der Berechnungsformel im Normblatt [29] entspricht, in dem allerdings der Faktor ρ_W zur Dimensionskorrektur fehlt.

Unter den während der Schaum-Förderung im Schlauch herrschenden Betriebsbedingungen reduziert sich das Luft-Volumen von V_L auf $V_{L,p}$. Näherungsweise wird hierbei der vom Förderaggregat produzierte Druck zu Grunde gelegt, der über die gesamte Schlauchlänge ansteht, solange das Strahlrohr noch geschlossen bleibt. Statt Gleichung (10) gilt dann

$$E_{p} = \rho_{W} \cdot V_{S,p} / m_{W} = V_{S,p} / V_{W}$$
 (11)

$$V_{S,p} = V_{L,p} + V_W = V_L \ / \ p + V_W = (V_S - V_W) \ / \ p + V_W$$

$$= (\mathbf{E} \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{W}} - \mathbf{V}_{\mathbf{W}} + \mathbf{p} \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{W}}) / \mathbf{p} = (\mathbf{E} - 1 + \mathbf{p}) \cdot \mathbf{V}_{\mathbf{W}} / \mathbf{p}$$
(12)

$$E_p = (E - 1 + p) / p$$
 (13)

Statt der Verschäumung nach Gleichung (1) benutzen – was manchmal verwechselt wird [34, 40] – amerikanische Autoren [3, 9, 18, 49] gerne das Verhältnis Luft-/Wasservolumenstrom, den einen in Kubikfuß, den anderen in Gallonen pro Minute gemessen. Das vorzugsweise gewählte Verhältnis

$$1 \text{ cfm} / 1 \text{ gpm} = 28.3 \text{ L/min} / 3.8 \text{ L/min} = 7.48$$

entspricht einer Verschäumung von

$$E = (28,3+3,8) / 3.8 = 8.48.$$

3.2 Verfahrensvorteile nach Herstellerangaben

In folgenden Angaben von Herstellern von Druckluftschaum-Löschgeräten und von Anwendern in Deutschland und in Amerika werden weitere Vorzüge des Druckluftschaumes zusätzlich zu jenen des herkömmlich im Schaumrohr generierten Schaumes herausgestellt:

- Ein Brand könne schneller gelöscht werden bei gleichzeitig verringertem Wassereinsatz und minimiertem Wasserschaden⁴) [11, 12, 14, 20, 34, 40, 50···53], da auf Grund seines Herstellungsverfahrens weniger Wasser für die gleiche Menge Schaum benötigt werde. Der geringe Wasserverbrauch prädestiniere das Verfahren zum Einsatz bei schwieriger Wasserversorgung, weshalb es in Amerika vorzugsweise zur Bekämpfung von Waldbränden eingesetzt werde [4···6, 10, 11, 14, 21, 25, 26, 50].
- Das Verfahren sei besonders umweltfreundlich, denn die Schaummittel-Zumischung betrage nur 0,3…1% der Löschwassermenge.
- Der Druckluftschaum habe eine höhere Verflüssigungs-Halbwertszeit und sei der für die Brandbekämpfung bessere, weil homogenere Schaum [14].
- Der Druckluftschaum sei dichter, hafte besser an abschüssigen Flächen und erfülle deshalb die Löschfunktionen "ersticken" und "schützen" besser als herkömmlicher Schaum [20].
- Beim Löschen werde weniger Wasserdampf erzeugt, die Sicht im Brandraum sei deshalb besser [14, 20].

_

⁴) dessen Anteil am Gesamtschaden eines Brandes mit bis zu 80% beziffert wird [21]

- Der Druckluftschaum könne mit größerer Wurfweite ausgebracht werden, wodurch die Sicherheit des Löschenden verbessert werde.
- Das DLS-Löschverfahren sei leichter zu handhaben, weil das Schlauchgewicht geringer sei.
- Die von einigen Herstellern hervorgehobene Möglichkeit, neben Schaum auch gleichzeitig Wasser zum Löschen bereitzustellen [14, 40, 51, 54, 55], muß wie von Anwenderseite betont wird eher als Nachdenn als Vorteil gewertet werden, weil die Gefahr besteht, daß mit dem Wasserstrahl der Schaum samt aller seiner bislang aufgezählten Vorzüge wieder abgewaschen wird [5, 19, 26, 33, 56, 57].

Die gerne als Hauptvorteil des Verfahrens bezeichnete Eigenschaft, seine hohe Löscheffizienz (beim herkömmlichen Löschen werde nur 1/10 des eingesetzten Wassers zum Löschen genutzt, 9/10 gingen ungenutzt verloren [3, 9, 11, 14, 32, 58] – beim DLS seien diese Verhältniszahlen gerade umgekehrt), ist schon hier zu relativieren, denn die Löscheffizienz hängt nach Ansicht der Forschungsstelle für Brandschutztechnik grundsätzlich mehr von der Virtuosität des Feuerwehrmannes am Strahlrohr ab als von den technischen Möglichkeiten des Löschverfahrens.

3.3 Frühere DLS-Versuche

Bislang wurden Brand- und Löschversuche zur Bewertung des Druckluftschaum-Löschverfahrens im Realmaßstab in zu geringer Zahl durchgeführt. Schon bei "Versuchsreihen", die lediglich aus zwei oder drei Versuchen bestanden, wurden – bei mangelhafter meßtechnischer Ausrüstung – Brandräume und Brandlast variiert [26]. Auch bei Versuchswiederholungen innerhalb umfangreicherer Versuchsreihen wurden so viele Randbedingungen verändert, daß schlüssige Vergleiche nicht angestellt werden können.

In bisher durchgeführten DLS-Experimenten

• 1992: 3 Versuche in Salem/Connecticut [18],

- 1993: 2 Versuche in Fairfax/Virginia [3, 5],
- 1995 und '96: 58 Versuche in Rissington/GB [5] und
- 1997 und '98: 19 Versuche in Canterbury/Neuseeland [12, 59]

wurden in unterschiedlichen Räumen (9···64 m²) Löschmittel-Vergleiche angestellt. Diese Räume waren durchweg in Leichtbauweise errichtet (Holz oder Holz mit Gipskarton).

Als Brandlast dienten

- Holzkrippen,
- Europaletten,
- Heu- oder Strohballen,
- Matratzen

jeweils in einer kompakten, dichten Anordnung, die dem Löschmittel "Schaum" Vorteile bietet, weil durch flächiges Aufbringen des Schaumes dessen Fähigkeit, das Brandgut vom Luftsauerstoff abzuschotten, genutzt werden kann.

Bei den jüngsten und umfangreichsten der oben genannten Versuchsreihen in Rissington und Canterbury konnten bei den eingesetzten Löschmitteln

- Wasser, z.T. unter Hochdruck,
- Wasser mit verschiedenen Schaummitteln, z.T. unter Hochdruck und
- Druckluftschaum

durchgängig verfahrenstypische Unterschiede bei der

- Abkühlung des Brandes,
- Löschdauer oder der
- erforderlichen Löschmittelmenge

nicht festgestellt werden. Bei vergleichbaren Versuchen weichen die Ergebnisse mehrfach um über 100% voneinander ab, wodurch eindrucksvoll die Aussagekraft von Einzelversuchen relativiert wird. — In einem Teil der Canterbury-Versuche erweist sich DLS als das wirksamste Löschmittel; seine im Vergleich zum Hochdruckverfahren vielfach größere Wurfweite wird im Bericht deutlich herausgestellt [12].

Bei 17 Löschversuchen an Krippenbränden – die Krippen waren etwa 30 kg schwer und bestanden zu 4/5 aus Holz-, zu 1/5 aus Kunststoffstäben –, die 1998 bei NIST durchgeführt wurden [13], konnten mit Wasser und verschiedenen Tensid-Lösungen vergleichbare Löscherfolge erzielt werden.

Bei 31 Versuchen an brennenden Reifenstapeln, ebenfalls 1998 bei NIST [13], die mit Wasser nur zu beherrschen sind, wenn der Löschangriff aus geringer Distanz erfolgt, konnte mit Tensid-Lösung beziehungsweise mit herkömmlich erzeugtem AFFF-Schaum und mit DLS der Brand in etwa 3 bis α der Zeit gelöscht werden, die mit Wasser gebraucht wurde. Bei Wasser und Tensid-Lösung flammte der Brand nach etwa 6 min wieder auf, bei konventionellem Schaum nach durchschnittlich 12 min, bei DLS nach 19 min. Daß beim letztgenannten Löschmittel nur bei der Hälfte der Versuche ein Wiederaufflackern zu beobachten war, zeigt zum einen eine gewisse Überlegenheit des DLS gegenüber den anderen oberflächenspannungs-senkenden Löschmitteln für Problembrände, zum anderen aber auch wie weit Versuchsergebnisse trotz identischer Randbedingungen voneinander abweichen können.

Bei den 17 der 21 Brand- und Löschversuche – durchgeführt 1997 im Versuchsstollen der Grube Tremonia der Deutschen Montan-Technik –, die dem Brandverlauf nach verglichen werden können [5], handelte es sich im wesentlichen um die Bewertung der Löschmittel "Wasser" und "Class-A-Foam" und der Löschtaktiken "direkt" und "indirekt". Die Brandlast bestand zu etwa 80 % aus Europaletten. Da auch in dieser Versuchsreihe zu viele Parameter variiert wurden, ist – im Gegensatz zur Ansicht des Berichterstatters – ein schlüssiger Vergleich nicht möglich.

Bei den wenigeren, älteren Tests (bei den 3 Einzelversuchen mit Wasser, Wasser/ Schaummittel-Gemisch oder DLS in Salem) wurde eine Überlegenheit des DLS-Verfahrens gegenüber dem Wasserstrahl konstatiert, weil das Thermoelement in halber Raumhöhe eine schnellere Temperatur-Abnahme signalisierte, wenn mit Druckluftschaum gelöscht wurde.

Bei diesen 3 Versuchen wurde jeweils gemessen, wie lange es dauert, um die Temperatur von 538°C (= 1000°F) auf 100°C zu senken. Dazu wurde der Löschmittelstrahl zuerst 60 sec gegen die Decke gerichtet

wie die Forschungsstelle für Brandschutztechnik dieses Vorgehen beurteilt, wird im Kapitel 6 erläutert werden

und dann 60 sec in den Raum. Ob beziehungsweise wie nach diesen zweimal 60 sec weitergelöscht wurde, wird im Versuchsbericht nicht erwähnt und die wirklich zum Löschen benötigte Löschmittelmenge wurde bei den Salem-Tests nicht bestimmt, auch wenn von vielen Autoren der gegenteilige Eindruck erweckt wird [6, 14, 34, 49, 53, 55] – bis hin zu der Behauptung dort sei gemessen worden [20, 40].

Wie nicht anders zu erwarten reagierte das *eine*, unter der Decke montierte Thermoelement prompt — egal von welchem Löschmittel es getroffen wurde. Das *andere* Thermoelement im Raum dagegen zeigte, daß kompakte Brandlasten (Strohballen auf Paletten) mit Schaum oder mit Wasser/Netzmittel-Gemisch besser zu löschen sind als mit reinem Wasser und darüber hinaus den Unterschied, den man beim Wärmeübergang auf das Löschmittel – das heißt, beim Entzug der Wärme aus der Atmosphäre im Brandraum – erreichen kann, wenn das eingebrachte Löschmittel eine große oder eine geringe spezifische Oberfläche aufweist. Der Temperaturabfall im fraglichen Bereich war am schnellsten beim Druckluftschaum und am langsamsten beim Wasserstrahl.

Der bekannte Unterschied zwischen fein verteilt und konzentriert eingebrachtem Löschmittel wurde bestätigt⁵): Eine feine Verteilung verkürzt die Abkühlungs-Phase. Auf dieser Erkenntnis basiert das Bestreben, den Wärmeübergang durch Vergrößerung der Löschmittel-Oberfläche zu verbessern, sei es mit dem Sprühstrahl, mit dem fog-nail-Verfahren – mit oder ohne Schaum – oder im Extremfall mit dem Hochdrucknebel-Löschverfahren.

_

⁵) Noch schlechter als der Wasserstrahl hätte in diesem Vergleich wohl nur der historische Ledereimer abschneiden können.

3.4 Brand- und Löschversuche mit DLS an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Die im Rahmen der Bewertung des DLS-Löschverfahrens von der FFB durchgeführten Versuche fanden unter realitätsnahen und reproduzierbaren Bedingungen statt:

- Der verwendete Versuchsraum (Bild 2) ist kein dünnschaliger Container aus Blech oder Holz, statt dessen besteht er aus massiven Wänden und einer ebensolchen Decke mit hoher Wärmekapazität und realistischer Rückzündungsgefahr. Die Grundfläche des Versuchsraumes mißt 25 m², seine Höhe 2,7 m.
- Die Brandlast besteht nicht aus einer konzentrierten Masse mit nahezu geschlossener Oberfläche, sondern aus über den Raum verteilten Altmöbeln mit einer großen spezifischen Oberfläche (Bilder 2 und 3). Die Masse der Brandlast beträgt üblicherweise 730 kg, das entspricht einer spezifischen Brandlast von ca. 30 kg/m².

Der Brand- und der Löschverlauf können durch kontinuierliche Wägung dokumentiert werden, weil der Boden des Versuchsraumes als Waageplattform ausgeführt ist, mit deren Hilfe der Massenverlust (d.h. der Abbrand) verfolgt werden kann (Bilder 4···8). Aus der Ableitung dieser Kurve nach der Zeit und dem Heizwert des Brandgutes läßt sich die momentane (Brutto-)Wärmefreisetzungsrate (= Brandleistung) berechnen. Gleichzeitig führt das im Brandgut beziehungsweise -schutt gebundene Löschwasser zu einer Massenzunahme, während das überschüssige Löschwasser unter dem Versuchsstand aufgefangen wird. Die Differenz zwischen der Summe dieser beiden Beträge und der insgesamt eingesetzten Löschwassermenge ergibt den verdampften Anteil, der die Temperatursenkung im Brandraum bewirkt.

Größere Sprünge der Gewichts-Kurve werden von den Feuerwehrleuten beim Betreten beziehungsweise beim Verlassen des Versuchsraumes verursacht.

10 cm unter der Decke des Versuchsraumes sind an den in Bild 2 gekennzeichneten Positionen 5 Thermoelemente installiert. Ein sechstes hängt in Raummitte in 150 cm Höhe. Zwei weitere Thermoelemente befinden sich im Fenster des Brandraumes direkt unter dem Sturz und somit wie die Decken-Thermoelemente ebenfalls in 260 cm Höhe. Die von den Thermoelementen fortlaufend gemessenen Temperaturen werden neben den Abbrand-Kurven in den Bildern $4\cdots 8$ aufgetragen.

Der Brandversuchsraum wird mit Altmöbeln bestückt, die bei allen Versuchen in einer vergleichbaren Anordnung aufgestellt werden:

- an der Westwand des Versuchsraumes eine Reihe von Schränken oder Regalen,
- vor der Nordwand eine Sitzgruppe, bestehend aus Couch, Tisch und Sesseln,
- niedriges Mobiliar wie Sideboard oder Klappbett unter dem Fenster in der Ostwand,
- ein Küchenbuffet und Regale, ein Eßtisch und Stühle vor der Südwand.

Als Zündquelle befindet sich unter der geöffneten Tür eines der Schränke vor der Westwand eine 20·30 cm² großen Blechwanne mit 500 mL Heptan, das zu Versuchsbeginn entzündet wird. Nach der Zündung wird die Tür – 0,7·2,1 m² in der Südwand des Brandraumes – wieder geschlossen. Die Belüftung des Brandes erfolgt durch ein 1,4 m² großes Fenster in der Mitte der östlichen Wand.

Die annähernd gleichbleibende Positionierung der Brandlast und des Brandursprunges führt dazu, daß die Brandentwicklung und die lokale Wärmeverteilung sich bei allen Versuchen ähnlich darstellt: Die höchsten Temperaturen werden sowohl vor (810····894°C) als auch nach dem Flash-over (883····996°C) in der Nordwestecke des Brandraumes gemessen, gefolgt von der Nordost- und der Südwestecke. Die geringsten Temperaturen herrschen während der Brandentwicklungs-Phase in halber Raumhöhe (83···391°C) und später im Fenster (572···728°C).

Die Brandentwicklungs-Phase bis zum Flash-over (sh. Kapitel 8)

 zu erkennen daran, daß von diesem Zeitpunkt an die Abbrand-Kurve schneller fällt und daß gleichzeitig alle Raumtemperaturen einen Spitzenwert von etwa 700····750°C erreichen, gefolgt von einer geringen Abkühlung; in den Videoaufzeichnungen durch eine kurzfristige Verdunkelung der Brandraum-Atmosphäre gekennzeichnet, die durch den erhöhten Rußanteil wegen momentanen Sauerstoffmangels im Rauchgas verursacht wird —

dauert üblicherweise etwa 7 Minuten (± 2,2 min). Aus ungeklärten Gründen dauert diese Phase beim Versuch SCH 2 etwa doppelt so lang.

Das Löschen des Brandes beginnt im allgemeinen 16½ Minuten – in Fall SCH 2 erst 22½ Minuten – nach der Zündung, im voll entwickelten Brandstadium bei einem bis dahin verbrannten Anteil von 40 % der Brandlast (≈290 kg). Die Wärmefreisetzungsrate als Produkt aus Massenverlustrate und effektivem Heizwert beträgt zu diesem Zeitpunkt knapp 7.000 kW. Zum Löschen wird ein Druckluftschaum verwendet, der mit einem in ein – der FFB an diesem Tag zu Verfügung stehenden – Löschfahrzeug eingebauten DLS-System erzeugt wird. Es kommen Druckluftschaum-Aggregate der folgenden Hersteller zum Einsatz:

- Schmitz GmbH, Feuerwehr- und Umwelttechnik in Luckenwalde,
- Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik in Giengen und
- Hale Products Europe GmbH, Feuerwehr- und Rettungssysteme in Dieburg.

Im Anschluß an die Versuche werden unter atmosphärischen Bedingungen die Verschäumungszahlen der zum Löschen verwendeten Schaumqualitäten bestimmt: Mit dem bei der jeweiligen System-Einstellung entwickelten Schaum werden Blechwannen mit einer Grundfläche von 79,5 · 80 cm² und einer Höhe von 10,1 cm gefüllt und gewogen. Mit Hilfe der Gleichung (10) wird aus dem Volumen und dem Gewicht des Schaumes die Verschäumungszahl E berechnet. Unter Berücksichtigung des Arbeitsdruckes ergibt Gleichung (13) die Verschäumungszahl E_p im Schlauch.

Um den Verlauf der fünf an der FFB durchgeführten DLS-Löschversuche miteinander vergleichen zu können, werden bei den Temperatur- und den Abbrand-Kurven in den Bildern 4…8 jeweils dieselben Maßstäbe für die Abszisse (Zeitachse) und die Ordinaten (links Temperaturen, rechts Massen) gewählt. Die charakteristischen Werte, wie Zeitpunkt des Flash-over t_{Fl-ov} , des Löschbeginns t_{LB} und des -endes t_{LE} und die dann gemessenen Massen m_{LB} , m_{LE} , sind in den Diagrammen gekennzeichnet. In Tabelle 4 sind die wichtigsten Versuchsdaten und -ergebnisse zusammengestellt, die nachfolgend erläutert werden.

3.5 Verlauf des DLS-Löschversuchs SCH 1

In diesem Versuch (Bild 4) mit 730,2 kg Brandlast ist 8,1 min nach der Zündung der Flash-over zu erkennen. Bei der Ermittlung dieses Zeitpunktes bleiben die Temperaturen in der Nordwestecke des Brandraumes 9_{NW} , wo schon früher ein Maximum auftritt, und im Fenster $9_{FN,S}$, wo dieser Wert noch nicht erreicht wird, unberücksichtigt.

Nach 17,7 min bei einem verbrannten Anteil von 40 % (=292,1 kg) wurde das Kommando zum Löschen gegeben. Der erste Löschmittelstrahl wurde 0,1 min später abgegeben. Innerhalb von 2,6 min – während der Hauptlösch-Phase – fielen die Temperaturen im Brandraum von durchschnittlich 800°C auf etwa 300°C. Eine knapp 1-minütige Pause diente dazu, den bisherigen Wasserverbrauch zu bestimmen und die Schaumqualität von "feucht" auf "naß" umzustellen. Das Nachlöschen dauerte anschließend noch 30,2 min und senkte die Temperaturen unter 70°C.

Aus später zu erläuternden Gründen (sh. Kapitel 6) wurden die beiden zu Versuchsbeginn löschenden Feuerwehrleute etwa 17 Minuten nach ihrem Einsatz von der Berufsfeuerwehr Karlsruhe abgelöst, die – wie man dem Verlauf der Massen-Kurve entnehmen kann – deutlich mehr Löschmittel ausbrachte als ihre Vorgänger. Bei Löschbeginn wog die Brandlast noch 434,6 kg, zu Beginn der Pause zwischen Haupt- und Nachlösch-Phase dagegen 507,7 kg, im Brandschutt wurden also 73,1 L Löschwasser gebunden. Am Ende der Versuchsaufzeichnung weist die Massen-Kurve 1048 kg aus. Hiervon sind die während der Pause gemessene Masse und die der beiden Feuerwehrleute (zusammen 235,5 kg), die sich noch im Brandraum befinden, abzuziehen, so daß sich für das in dieser zweiten Phase gebundene Löschwasser 304,8 L errechnen.

Der Versuch dauerte insgesamt 51,3 min, die Löschzeit betrug 32,8 min. Es wurden 722 L Löschwasser eingesetzt, 150 L in der Haupt- und 572 L in der Nachlösch-Phase. Die Verschäumungszahl war anfangs auf 12, später auf 9,5 eingestellt. Der Arbeitsdruck des DLS-Aggregates lag bei 7 bar, durchschnittlich wurden – berechnet aus dem Wasser-Volumenstrom, der Verschäumungszahl und der Löschdauer – 220 L/min Schaum gefördert. Der Temperatur-Gradient zu Beginn der Hauptlösch-Phase betrug 188°C/min – ein vergleichsweise hoher Wert, obwohl mit relativ trockenem Schaum gelöscht wurde.

3.6 Verlauf des DLS-Löschversuchs SCH 2

Bei diesem Versuch (Bild 5) mit 730,6 kg Altmöbeln tritt der Flash-over 14,7 min nach der Zündung ein – ermittelt wiederum ohne die Nordwest- und die Fenster-Temperaturen. An Hand dieses Versuches zeigt Bild 9 einige typische Photos aus dem Verlauf der fünf DLS-Versuche: Die Zündquelle unter der geöffneten Schranktür, das Stadium der Brandentwicklung nach 5 min und nach 10 min und den Beginn des Löschens. Das letzte Photo ist nicht wie die drei ersten durch das Brandraum-Fenster aufgenommen, sondern von der Seite, um die aus dem Fenster schlagenden Flammen zu zeigen.

Das Kommando zum Löschen wurde nach 22,2 min gegeben – bei einer Restbrandlast von 60 % (=438,4 kg), die 0,2 min später vom ersten Löschmittelstrahl getroffen wurde. In der Hauptlösch-Phase – innerhalb von 3,8 min – fielen die Temperaturen im Brandraum von knapp über 800°C auf etwa 230°C. Während einer knapp 2-minütigen Pause wurde der bisherige Wasserverbrauch bestimmt und die Schaumqualität von "feucht" auf "naß" umgestellt. Das anschließende Nachlöschen dauerte 11,4 min und senkte die Temperaturen unter 130°C.

Bei Löschbeginn wogen die Altmöbel noch 433,1 kg, zu Beginn der Pause zwischen Haupt- und Nachlösch-Phase jedoch 532,6 kg, das heißt, im Brandschutt wurden 99,5 L Löschwasser gebunden. Am Ende der Versuchsaufzeichnung zeigt die Massen-Kurve 632,8 kg. In der Nachlösch-Phase wurden also 100,2 L Löschwasser gebunden.

Der Versuch dauerte insgesamt 39,4 min, 15,2 min davon die Löschzeit. Es wurden 410 L Löschwasser eingesetzt, 235 L in der Haupt- und 175 L in der Nachlösch-Phase. Die Verschäumungszahl lag anfangs bei 14,8, später bei 8,6. Der Arbeitsdruck des DLS-Aggregates betrug 7 bar. Durchschnittlich wurden 330 L/min Schaum gefördert. Der Temperatur-Gradient zu Beginn der Hauptlösch-Phase betrug 208°C/min, obwohl mit relativ trockenem Schaum gelöscht wurde – während des gesamten Versuches von der Berufsfeuerwehr Karlsruhe, die schon in der Hauptlösch-Phase erkennbar mehr Löschmittel einsetzte als ihre Kollegen zum gleichen Zeitpunkt im vorigen Versuch.

3.7 Verlauf des DLS-Löschversuchs HZ 1

Die Brandlast bestand aus 730,8 kg Altmöbeln. Die Brandentwicklung (Bild 6) bis zum Flash-over dauerte in diesem Versuch nur 4,7 min. Der Zeitpunkt des Flash-over wird aus den aufgezeichneten Meßwerten wieder ohne Berücksichtigung der Nordwest- und der Fenster-Temperatur ermittelt. Aus gerätetechnischen Gründen mußte in diesem Versuch auf die Aufzeichnung der Meßwerte des zentralen Thermoelementes unter der Decke und des nördlichen unter dem Fenstersturz verzichtet werden.

Das Kommando zum Löschen kam nach 14,4 min – bei einer Restbrandlast von 60 % (=438,5 kg). Der erste Löschmittelstrahl folgte 0,2 min später. Während der Hauptlösch-Phase – innerhalb von 10,8 min – fielen die Temperaturen im Brandraum von etwa 810°C auf durchschnittlich 200°C.

Eine Pause, um die Schaumqualität zu verändern, entfiel bei diesem und den folgenden Versuchen: Haupt- und Nachlösch-Phase unterscheiden sich nur noch durch das Unterschreiten der 200°C-Grenze im Brandraum, weil die Hersteller der eingesetzten DLS-Aggregate inzwischen für beide Löschphasen dieselbe Verschäumung empfehlen. Das anschließende Nachlöschen dauerte 13,6 min und senkte die Temperaturen unter 130°C.

Bei Löschbeginn wogen die Altmöbel noch 435,3 kg, zu Beginn der Nachlösch-Phase dann 468,9 kg, das heißt, im Brandschutt wurden 33,6 L Löschwasser gebunden. Das Signal "Feuer-aus" und damit das Ende des Löschens kam 39 Minuten nach Versuchsbeginn. Die Massen-Kurve weist 469 kg aus. In der Nachlösch-Phase wurden also lediglich noch 0,1 L Löschwasser gebunden. Spätere Ausschläge der Massen-Kurve – ohne entsprechende Ausschläge der Temperatur-Kurven – wurden von Feuerwehrleuten verursacht, die (nach hinreichendem Löscherfolg und Abkühlung des Brandraums) den Versuchsraum kontrollierten, um sicherzugehen, daß keine weiteren Nachlösch-Arbeiten mehr erforderlich waren.

Der Versuch dauerte insgesamt 39 min, die Löschzeit betrug 24,4 min. Es wurden 273 L Löschwasser – 270 L in der Haupt- und 3 L in der Nachlösch-Phase – und 2,8 L Schaummittel (Einzelheiten hierzu sh. Kapitel 3.10) eingesetzt. Die durchschnittliche Konzentration des Schaummittels im Wasser betrug also näherungsweise 1%.

Der Wasserverbrauch während des Löschens wird ermittelt, indem über eine geeichte Wasseruhr der zuvor volle Wasserbehälter des Löschfahrzeuges wieder gefüllt wird. Eine entsprechende Bestimmung des Schaummittel-Verbrauchs mit Wägungen vor und nach dem Löschen konnte in diesem Versuch nicht durchgeführt werden, denn der in das Aggregat integrierte Behälter konnte nicht gewogen werden.

Der Arbeitsdruck des DLS-Aggregates betrug 5 bar. Die Verschäumungszahl lag fast durchgängig bei 5,2.

Der Temperatur-Gradient zu Beginn der Hauptlösch-Phase erreicht nur 82°C/min – der mit großem Abstand geringste aller der in dieser Versuchsreihe erzielten Werte –, obwohl mit relativ nassem Schaum gelöscht wurde. Aus dem während des gesamten Versuches vorherrschenden Bestreben des Löschenden, das Löschmittel möglichst sparsam einzusetzen, resultiert auch der im Durchschnitt sehr geringe Schaum-Volumenstrom von knapp 60 L/min.

3.8 Verlauf des DLS-Löschversuchs SCH 3

Der Flash-over in diesem Versuch (Bild 7) mit einer Brandlast von 728,5 kg Altmöbeln tritt 9,9 min nach der Zündung ein – ermittelt ohne die Südost-Temperatur und jene in halber Raumhöhe. Das Kommando zum Löschen kam 17,6 min nach der Zündung – bei einer 60 %–Restbrandlast von 437,1 kg, die 0,1 min später vom ersten Löschmittelstrahl getroffen wurde. In der Hauptlösch-Phase – innerhalb von 3,7 min – fielen die Temperaturen im Brandraum von durchschnittlich 785°C auf 200°C. Das anschließende Nachlöschen dauerte 6,6 min und senkte die Temperaturen unter 140°C.

Am Löschbeginn wogen die Altmöbel noch 435,7 kg, nach der Haupt- beziehungsweise zu Beginn der Nachlösch-Phase jedoch 507,8 kg, im Brandschutt wurden also 72,1 L Löschwasser gebunden. Bei Versuchsende zeigt die Massen-Kurve dann 656 kg. Das heißt, in der Nachlösch-Phase wurden 148,2 L Löschwasser gebunden. 10 L durchgetropftes Wasser wurden unter dem Versuchsstand aufgefangen.

Die weiteren Ausschläge der m(t)-Kurve wurden von Versuchsbeobachtern verursacht, die den Brandraum inspizierten, um sich vom Erfolg der Löschmaßnahmen zu überzeugen. Die Höhe der Ausschläge zeigt, daß es sich hierbei nicht um Feuerwehrleute mit Einsatz-Ausrüstung handelte. 10 Minuten nach Versuchsende kühlte ein Mitarbeiter der FFB den Brandschutt (großzügig mit 34 L), um ihn auszuräumen und den Versuchsraum reinigen zu können.

Der Versuch dauerte insgesamt 28 min, wovon die Löschzeit 10,3 min ausmachte. Es wurden 342 L Löschwasser verbraucht, 145 L in der Haupt- und 197 L in der Nachlösch-Phase. Die Verschäumungszahl war während des ganzen Versuches auf 7 eingestellt. Der Arbeitsdruck des DLS-Aggregates betrug 8 bar. Durchschnittlich wurden 230 L/min Schaum gefördert. Der Temperatur-Gradient zu Beginn der Hauptlösch-Phase beträgt 228°C/min. Bei diesem hohen Wert, den hier die Berufsfeuerwehr Karlsruhe bei Löschbeginn erzielte, darf jedoch nicht übersehen werden, daß das Feuer unmittelbar danach noch einmal kräftig aufflammte und Temperaturen um 350°C erreichte, bevor sich der Löscherfolg tatsächlich einstellte.

3.9 Verlauf des DLS-Löschversuchs HZ 2

Der Versuch (Bild 8) startete mit einer Brandlast von 729,6 kg Altmöbeln. Der Flash-over tritt 6,7 min nach der Zündung ein – ermittelt ohne die Temperaturen unter dem Fenstersturz zu berücksichtigen. Das Kommando zum Löschen kam nach 16,5 min – bei einer Restbrandlast von 60 % (=437,8 kg). Der erste Löschmittelstrahl folgte 0,2 min später. Während der Hauptlösch-Phase – die ersten 5,6 min – fielen die Temperaturen im Brandraum von über 940°C auf durchschnittlich 200°C. Das anschließende Nachlöschen dauerte 10 min und senkte die Temperaturen unter 130°C.

Bei Löschbeginn wogen die Altmöbel noch 436,7 kg, zu Beginn der Nachlösch-Phase wieder 475,9 kg, das heißt, im Brandschutt wurden 39,2 L Löschwasser gebunden. Das Ende des Löschens wurde 32,3 min nach Versuchsbeginn erreicht. Die Massen-Kurve zeigt nun 486 kg. Also wurden in der Nachlösch-Phase nur 10,1 L Löschwasser gebunden.

Der Versuch dauerte 32,3 min, wovon 15,6 min auf die Löschzeit entfielen. Insgesamt wurden 320 L gebraucht, 254 L in der Haupt- und 66 L in der Nachlösch-Phase. Die Verschäumungszahl lag fast durchweg bei 6,6 und wurde erst gegen Versuchsende auf 20 erhöht. Der Arbeitsdruck des DLS-Aggregates betrug 5 bar.

Mit einem Temperatur-Gradient zu Beginn der Hauptlösch-Phase von 262°C/min erreichte der vom Hersteller des DLS-Aggregates gestellte Feuerwehrmann bei nicht ganz so sparsamem Löschmitteleinsatz wie im Versuch HZ 1 – aber bei deutlich verringerter Löschzeit – den höchsten Wert in dieser Versuchsreihe. Der Schaum-Volumenstrom lag mit etwa 150 L/min wieder näher bei der Größenordnung der Versuche SCH 1···3.

3.10 Auswertung des DLS-Löschversuchs HZ 1

Die Tangente an die Abbrand-Kurve m(t) – die dickere Linie in Bild 6 – ergibt unmittelbar vor dem Beginn des Löschens einen Abbrand von 0,57 kg/sec. Daraus errechnet sich mit dem Heizwert von 17.600 kJ/kg für trockenes Holz, beziehungsweise 15.840 kJ/kg für Holz mit einer Restfeuchtigkeit etwa 10 % eine theoretische Wärmefrei-

setzung von circa 9.000 kW zu diesem Zeitpunkt. Unter Berücksichtigung von (geschätzt) 20 % Ruß – das heißt, von dem im Holz enthaltenen Kohlenstoff verbrennen nur 80 % – entspricht dies einer effektiven Wärmefreisetzung von etwa 7.200 kW.

3 Minuten nach Löschbeginn sind die Temperaturen im Brandraum (die dünn ausgezogenen Kurven in Bild 6) um etwa 300°C gefallen und sinken innerhalb von weiteren 8 Minuten auf 200°C. Bei Versuchsende, 24½ Minuten nach Löschbeginn, liegen sie noch bei durchschnittlich 128°C.

Bis auf einen ausgesprochen kurzen Zeitabschnitt von 38 sec (etwa 2 Minuten nach Löschbeginn) wurde nach Auskunft des Maschinisten der Berufsfeuerwehr Ingolstadt durchgehend mit der Einstellung "trockener Schaum" gelöscht. Zum Löschen wurden eingesetzt:

- $V_W = 273 \, \text{L}$, gemessen mit der geeichten Wasseruhr der FFB die Anzeige am LF (an diesem speziellen, lt. Herstellerangabe mangelhaft geeichten) lautete jedoch auf 207 L, die Abweichung beträgt also, bezogen auf die Anzeige am Aggregat, 32 %;
- der Schaummittel-Verbrauch wird vom Aggregat mit 2,4 L angezeigt wird dieselbe prozentuale Abweichung unterstellt wie beim Wasserverbrauch, könnten es auch 3,17 L sein angenommener Mittelwert: V_{SM} = 2,8 L;
- das ergibt nach Gleichung (5): $K_{SM} = 0.88 \cdot \cdot \cdot 1.16\%$;
- laut Sicherheitsdatenblatt besteht das hier verwendeten Schaummittel zu $8\cdots 10\,\%$ aus Glykol-Monobutyl-Ether, CAS = [111-76-2], zu $4\cdots 8\,\%$ aus Glykol, CAS = [107-21-1] und zu mehr als $40\,\%$ aus Tensiden, die nicht näher definiert werden ebensowenig wie die zu $100\,\%$ fehlenden Anteile in der Zusammensetzung des Schaummittels; seine Dichte ρ_{SM} beträgt $1,03\,$ kg/L;

- also kann nach der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Wägung des Schaumes (m_S = 12,453 kg) die Verschäumungszahl entsprechend Gleichung
 (10) berechnet werden: E = 5,16;
- die Werte der Wasserausgangs- und der DLS-Systemdruckanzeigen standen nahezu konstant bei 5 bar, im Schlauch herrscht dann nach Gleichung (13) die Verschäumung $E_p = 1,83$.

Der Volumenstrom des Wassers im DLS-Aggregat und der des Schaumes, wie er zum Löschen verwendet wurde, können unter den gegebenen Versuchsbedingungen nur als Mittelwerte über die in diesem Versuch erforderliche Löschzeit angegeben werden:

• $\dot{V}_W = 11,14 \text{ L/min}$ als Mittelwert über 24½ Minuten;

•
$$\mathbf{V}_{S} = \mathbf{V}_{W} \cdot \mathbf{E} / \mathbf{t} = 57.5 \, \text{L/min};$$
 (14)

Der Inhalt eines C-Schlauches mit dem Innendurchmesser,

$$D_1 = 52 \text{ mm}$$
 (15)

dem Strömungsquerschnitt

$$A_1 = B \cdot 52^2 / 4 \text{ mm}^2$$
 (16)

und dem spezifischen Volumen

$$V_{1} = B \cdot 52^{2} \cdot 1000 / 4 \cdot 10^{6} \quad L/m = 2,12 \quad L/m$$
 (17)

hat pro laufendem Meter unter Betriebsdruck und bei noch geschlossenem Strahlrohr folgendes Gewicht, wenn er mit Wasser gefüllt ist,

$$m'_W = 2.12 \text{ kg/m}$$
 (18)

und wenn er mit Schaum gefüllt ist:

$$m'_{S,p} = m'_{W} / E_{p}$$
 (19)

Das Gewicht des spezifischen Schlauchinhaltes beträgt 1,16 kg/m, also näherungsweise die Hälfte des Gewichtes von reinem Wasser.

Der vorstehend beschriebene Schaum wurde nahezu während der gesamten Löschdauer eingesetzt. In der kurzen Zeitspanne 2 Minuten nach Löschbeginn wurde laut Aus-

sage des Maschinisten mit "feuchtem Schaum" gelöscht. Auf Grund der gewogenen Schaum-Masse (12,906 kg) herrschte folgende Verschäumung:

- E = 4.98;
- die Werte der Wasserausgangs- und der DLS-Systemdruckanzeigen standen nahezu konstant bei 7 bar: $E_p = 1,57$;
- das Gewicht des spezifischen Schlauchinhaltes beträgt 1,35 kg/m, also wegen des höheren Arbeitsdruckes näherungsweise zwei Drittel des Gewichtes von reinem Wasser.

Wie diese Werte zeigen, wurde in Wirklichkeit nicht die Verschäumung variiert (und E≈5 steht auch nicht für "trocken"), sondern lediglich der Systemdruck erhöht. Dies belegt einerseits, daß professionelle Anwender dem physikalischen Unterschied zwischen verschiedenen Schaumqualitäten keine gesteigerte Bedeutung beimessen, und andererseits, daß der bei diesem Versuch zweifellos vorhandene Löscherfolg primär dem Können des Strahlrohrführers [5, 6] zu verdanken ist – weniger der Qualität des verwendeten Löschmittels.

Während des Löschens wurden insgesamt 273 L Wasser und die o.a. Menge Schaummittel ausgebracht. Dieser Betrag kennzeichnet sicher noch nicht den optimalen Einsatz dieses Löschverfahrens. Die deutliche Verringerung gegenüber den zuvor durchgeführten Versuchen (722 L bzw. 410 L) zeigt jedoch, wie wichtig die systembezogene Ausbildung der Feuerwehrleute ist, wenn sie das DLS-Verfahren mit Erfolg einsetzen wollen. Der vergleichsweise langsame Abfall der Brandraum-Temperaturen und die Aufzeichnungen der Videokamera am Löschfahrzeug belegen allerdings, daß in diesem Versuch primär das Ziel angestrebt wurde, möglichst wenig Löschwasser zu verbrauchen.

Von diesen 273 L Wasser wurden, wie Bild 6 zu entnehmen ist, knapp 34 L von den Brandrückständen aufgesogen. Die Tatsache, daß während des gesamten Versuches in der Wanne unter dem Versuchsstand kein Löschmittel aufgefangen wurde, bedeutet, daß insgesamt 239 L Wasser verdampften.

Das hier verwendete Schaummittel ist in die Wassergefährdungs-Klasse 2 eingeordnet, das heißt, daß Löschwasser-Rückhaltesysteme erst erforderlich würden, wenn mehr als 10t davon anfallen. Da während dieses Versuches kein durchgetropftes Löschmittel aufgefangen wurde, kann vermutlich beim Einsatz dieses Löschverfahrens grundsätzlich auf Löschwasser-Rückhaltemaßnahmen verzichtet werden [35].

Die Möglichkeit, auf Löschwasser-Rückhaltemaßnahmen zu verzichten, könnte neben den Vorgaben durch das Brandgut noch eindeutiger belegt werden, wenn das Schaummittel nicht in die Wassergefährdungs-Klasse 2, sondern in WGK 1 einzuordnen wäre. Der Grenzwert für die Lagerkapazität verzehnfacht sich dann und für das Rückhalte-Volumen sind nur zwei Drittel des bei der Wassergefährdungs-Klasse 2 vorgeschriebenen Volumens erforderlich. Da die beiden deklarierten Bestandteile dieses Schaummittels in WGK 0···1 eingestuft sind [2, 60···62], wird die Einordnung in die höhere WGK 2 von den nicht deklarierten Tensiden verursacht.

4. BEWERTUNG DES DLS-LÖSCHVERFAHRENS UND VERGLEICH MIT FRÜHEREN LÖSCHVERSUCHEN AN DER FFB

4.1 Physikalische Eigenschaften

Die Qualität des Druckluftschaumes wird nicht nur durch die Verschäumung unter Druck und die intensive Durchmischung in der Mischkammer sichergestellt, sondern auch dadurch, daß diese Mischung in gleichbleibender Konsistenz durch die Schläuche gefördert wird, deren innere Rauhigkeit die Homogenität des Schaumes bis zum Strahlrohr bewahrt [9, 52]. Durch die Verschäumung im Förderaggregat – mit sauberer Luft von außerhalb der Brandstelle – wird darüber hinaus verhindert, daß brandrauch-verschmutzte Luft den Schaum zusammenfallen läßt [24, 37].

Auch mit der beim DLS-Verfahren möglichen niedrigeren Schaummittel-Konzentration (nominell 0,3…1%) werden wegen der schon bei 0,1% beginnenden Herabsetzung der Oberflächenspannung auf 35% des Wertes von reinem Wasser (schon nahe beim

Minimalwert von 31% für 1%-ige Schaummittel-Konzentration [4···6, 9, 14]) Schaumbläschen produziert, deren vergrößerte Oberfläche den Wärmeübergang von der Brandraum-Atmosphäre auf das Löschmittel verbessert. Gleichzeitig verbessert das gesteigerte Benetzungs- und Eindringvermögen in das Brandgut den Wärmeübergang vom Brandgut auf das Löschmittel.

Die Homogenität des mit dem DLS-Verfahren produzierten Schaumes ist eindeutig höher als die von herkömmlich erzeugtem Schaum,

- zum einen weil die Öffnungs- und Schließvorgänge am Strahlrohr nicht in dem Maße auf den elektronisch geregelten Wasser/Schaummittel/Luft-Mischprozeß zurückwirken, wie das beim hydraulisch/ pneumatisch gesteuerten der Fall ist und
- zum anderen wirkt sich die DLS-Förderung durch die Schläuche ausgleichend auf die Bläschengröße des Schaumes aus ein Effekt, der
 beim herkömmlichen Verschäumungsverfahren nicht gegeben ist, da
 dort der Schaum im Zeitpunkt des Entstehens ja schon ausgeworfen
 wird.

Grundsätzlich hängen die Haltbarkeit des Schaumes (gemessen als Entwässerungshalbzeit, das heißt, die Zeit, in der die Hälfte der Schaummittel-Lösung wieder abgeschieden wird) und damit seine Haftfähigkeit im wesentlichen von der Verschäumungszahl und nach den an der FFB gemachten Erfahrungen nur in geringerem Umfang vom verwendeten Schaummittel und von dessen Konzentration im Wasser ab. Wie von Anwenderseite betont wird, trägt die mit dem DLS-Herstellungsverfahren erreichbare Homogenität des Schaumes wesentlich zu seiner Haltbarkeit und Haftfähigkeit bei [9, 14, 16, 19, 20, 56].

Die Haltbarkeit von Klasse-A-Schäumen (um so höher, je höher die Verschäumungszahl) sollte nicht zu hoch sein, weil die Hauptlöschwirkung auf der Verdampfung des im Schaum enthaltenen Wassers beruht — ein Effekt, der von den DLS-Herstellern ursprünglich offenbar unterschiedlich eingeschätzt wurde: Während der eine zu Beginn des Löschens "nassen" Schaum und für die Nachlösch-Arbeiten "trockenen" empfahl,

lauteten die Anweisungen des anderen Herstellers genau umgekehrt "erst trocken dann $na\beta$ ". — Heute arbeiten alle DLS-Aggregate mit einer (nominellen) Verschäumungszahl von $E \approx 7$.

4.2 Die Löscheffizienz von Druckluftschaum

Die DLS-Hersteller messen die Effizienz ihres Verfahrens gegenüber anderen Löschmethoden, indem sie den wirksamen Anteil des insgesamt zum Löschen eingesetzten Wassers als Vergleichsgröße benutzen [11, 14, 58]. In Bild 10 werden die wirksamen Löschwassermengen als Verhältnis des verdampften Anteils zur insgesamt ausgebrachten Menge bei verschiedenen Löschverfahren miteinander verglichen. Der zu 100 % fehlende Rest entspricht dem im Brandschutt gebundenen und dem durchgelaufenen Wasser. Die Verschäumungs-Befürworter vergleichen in dieser Graphik die Effizienz von Schaum (24 %) und besonders die von DLS (52 %) mit der von reinem Wasser aus einem C-Rohr (5 %), aus einem Hohlstrahlrohr (12 %) oder unter Hochdruck (16 %). DLS sei demnach als Löschmittel zehnmal so wirkungsvoll wie Wasser aus einem C-Rohr.

Diese betont positive Bewertung des Druckluftschaumes gegenüber den vier anderen Löschverfahren beruht im wesentlichen auf einer Fehlinterpretation der Salem-Tests [18], die in Wirklichkeit nur zeigen [5], daß auf brennendem Stroh bei unprofessioneller Handhabung vom Löschmittel "Wasser" mehr ungenutzt verloren geht als vom Schaum oder von einer Tensid-Lösung. Die Unterstellung, dort sei tatsächlich der Löschmittel-Verbrauch ermittelt worden, führt zu der weitverbreiteten Behauptung, die Löschwirkung einer Tensid-Lösung sei doppelt so gut wie die von reinem Wasser – die von DLS gar sechsmal so gut [5, 6, 14, 20, 34, 40, 49, 53, 55]. Und obwohl in dem Originalbericht über jene Versuche betont wird, daß bei jedem Verfahren die eigentliche Löscharbeit vom Wasser geleistet wird [18, 20], findet sich immer wieder die Folgerung, mit Tensid-Lösung lasse sich die Hälfte und mit DLS sogar 5/6 des ansonsten erforderlichen Löschwassers einsparen. Wenn man dann noch in Rechnung stellt, daß durch das Verschäumen die 7-fache Löschmittelmenge zur Verfügung steht... (sh. Kapitel 2.4, letzter Absatz)

Werden Versuche, die früher an der FFB durchgeführt worden waren, in den Effizienz-Vergleich der DLS-Hersteller mit einbezogen (die Balken rechts im Diagramm), so relativiert dies das Hersteller-Diagramm ganz erheblich: Diese Balken haben durchweg höhere Werte als die entsprechenden linken. Die Größenunterschiede innerhalb dieser Balken zeigen zum einen, daß das Löschmittel "Schaum" tatsächlich über die in Kapitel 2.4 beschriebenen physikalischen Vorzüge verfügt. Daß diese Größenunterschiede, relativ betrachtet, rechts wesentlich geringer sind als links, verdeutlicht aber andererseits – wie schon in Kapitel 3.2 betont –, welche Bedeutung dem Strahlrohrführer zukommt.

Die Versuche belegen, daß bei versierter Handhabung des Strahlrohres ähnliche und bessere Werte erreicht werden können, — auch wenn als Löschmittel nur schlichtes Wasser aus einem C- oder D-Mehrzweckstrahlrohr eingesetzt wird (44 % bzw. 67 % [7]). Ein besonders sparsamer Umgang mit dem Löschwasser ist bei einem Zusatz von 0,5 % Quellkörper (66 % [1]) oder von 20 % Diammonium-Hydrogen-Phosphat zu erzielen (82 % [8]). Die höchste bislang an der FFB erreichte Effizienz wird – zur Ehrenrettung der DLS-Befürworter – von dem Balken ganz rechts im Diagramm wiedergegeben: 88 % im Versuch HZ 1.

Der Erfolg der in den Balkendiagrammen miteinander verglichenen Löschverfahren setzt sich zusammen aus den physikalischen Möglichkeiten dieser Löschverfahren

- kühlen,
- Sauerstoffzufuhr unterbinden,
- inhibieren

und – das kann gar nicht deutlich genug herausgestellt werden – der Fertigkeit beziehungsweise Routine der Feuerwehr bei der Handhabung des Löschgerätes.

Der Löscheffekt "inhibieren" [2, 63] spielt beim Schaumlöschen keine Rolle, denn auch der *Druck*luftschaum wird mit einem Förderdruck ausgeworfen, der deutlich unter jenem von Hochdrucksprüh-Löschanlagen liegt, bei denen dieser Effekt beobachtet worden sein soll [64···66]. Wenn Flammen in der Rauchgaszone verlöschen, so ist dies in

Wirklichkeit darauf zurückzuführen, daß die brennbaren Gase dort unter ihre Zündtemperatur abgekühlt werden.

Bei Bränden mit geschlossener Brandgut-Oberfläche, also vorzugsweise bei Flüssigkeitsbränden, zeigt das Löschmittel "Schaum" seine Überlegenheit durch die Fähigkeit, flächig, deckend ausgebracht, das Brandgut vom Luftsauerstoff zu trennen. Der Erfolg wasserhaltiger Löschmittel, also auch des Löschschaumes, wenn bei zerklüfteter Brandgut-Oberfläche kein Isolationseffekt zu erzielen ist, beruht im wesentlichen auf der Löschwirkung "kühlen" durch die beim Verdampfen des Wassers aufgenommene, dem Brand entzogene Energie.

Tabelle 5 zeigt die Zusammenstellung der bisher an der FFB durchgeführten DLS-Versuche und zweier früherer Löschversuche der FFB – ebenfalls im Realmaßstab – mit Wasser und mit Quellkörper-Beimischung zum Löschwasser [1] und die inzwischen mit diesen Verfahren erreichte Effizienz. Bei einem effizienten Löschverfahren soll – bezogen auf die eingesetzte Menge des Löschwassers – dem Brand möglichst viel Energie entzogen werden. Dies ist der Fall, wenn der Quotient (sh. Zeile 7) aus den Werten in Zeile 6 und jenen in Zeile 4 möglichst groß ist. Das zuvor angesprochene Balkendiagramm (Bild 10) beruht auf dieser Quotientenbildung.

Da dieser Quotient jedoch nicht nur durch die Verringerung des durchgetropften und des gebundenen Anteils (Zeile 5) gesteigert werden kann, sondern auch durch die ineffektive Erhöhung des verdampften (sh. Versuche HZ 1 und HZ 2), eignet sich nach Ansicht der FFB das Kriterium "löschwirksamer Anteil" nur bedingt zur Beurteilung des Löscherfolges. Die FFB zieht es deshalb vor, sich zur Beurteilung der Löschwirksamkeit auf den Gesamt-Löschwasserverbrauch in Zeile 4 zu stützen.

In der letzten Zeile der Tabelle wird der Gesamt-Löschwasserverbrauch der einzelnen Brand- und Löschversuche ins Verhältnis gesetzt zum Gesamtverbrauch des bislang erfolgreichsten Löschversuchs mit Wasser, bei dem 260 L (dunkel unterlegtes Feld) benötigt wurden. Die Werte in dieser Zeile zeigen, wie weit ungeübte Feuerwehrleute (SCH 1) von diesem Bestwert noch entfernt sind und wie nahe ein gut geschulter Feuerwehrmann

dieser Marke kommen kann — und zwar nicht nur wenn ohne Rücksicht auf die Löschdauer prioritär das Ziel "Wasser sparen" verfolgt wird (HZ 1), sondern auch bei zügigem Vorgehen (HZ 2), so wie das bei der Berufsfeuerwehr üblich ist.

Wenn der professionelle Strahlrohrführer, der diese ausgezeichneten Werte erzielt hat, weil er nur zwischen 34 L und 49 L als Schadenswasser vergeudete, nun noch auf den "indirekten Löschangriff" (sh. Kapitel 6) verzichten würde, dann ließe sich der verdampfte Anteil halbieren, denn sowohl frühere Versuche an der FFB (u.a. Versuch 2 und Versuch 3 [1]) als auch Versuch SCH 3 zeigen, daß eine im Vollbrand stehende Brandlast der hier verwendeten Größenordnung (≈740 kg) mit etwa 100 L verdampften Löschwassers soweit gekühlt werden kann, daß Rückzündungen nicht mehr auftreten. Da in allen hier besprochenen Versuchen annähernd dieselbe Wärmemenge abzuführen war, waren verdampfte Löschwassermengen über 100 L zum Kühlen der Brandlast und der Brandraum-Atmosphäre nicht erforderlich – sie verpufften größtenteils wirkungslos – im Einzelfall auch spektakulär (wie im letzten Kapitel dargelegt wird). — Das Effizienzkriterium "wirksamer Anteil" betrüge dann zwar nicht mehr beeindruckende 85 % oder gar 88 %, sondern "nur" noch 67 % beziehungsweise 75 %. Der Gesamt-Löschwasserverbrauch würde dafür aber auf 134L respektive 149L sinken und würde somit den geringsten aller bislang erreichten Werte, jenen mit Quellkörper-Beimischung im Löschwasser, unterbieten. Dieses Beispiel zeigt, weshalb die FFB es vorzieht, den Löscherfolg am Gesamtverbrauch zu messen.

5. BEWERTUNG DER HERSTELLERANGABEN BEZÜGLICH DER DLS-QUALITÄTEN

5.1 "schneller gelöscht, weniger Wasser"

Wie aus der Spalte "Mittelwert" in Tabelle 5 zu erkennen ist (der Ausreißer SCH 1 und bei der Versuchsdauer auch HZ 1 wird bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt), bewegte sich der für das Löschen mit DLS erforderliche Zeitaufwand bis zum Kommando "Feuer aus" in ähnlicher Größenordnung wie bei anderen Löschverfahren.

Die insgesamt zum Löschen unserer Zimmerbrände aufgewendete Wassermenge lag etwa in der Größenordnung klassischer Löschmethoden — 30 % über dem günstigsten mit Wasser erzielten Wert. Nur einmal wurde ein früherer Minimalwert erreicht — allerdings mit einem Maximum an Löschzeit. In den zurückliegenden Löschversuchen der FFB mit reinem Wasser wurden bei Bränden vergleichbarer Größe 260···1000 L verbraucht – je nach Geschicktlichkeit des Strahlrohrführers. Wurden damals dem Wasser Quellkörper zugesetzt, so konnte der Löschmittelbedarf bis auf 160 L reduziert werden (sh. Tabelle 5).

Bei 5 Versuchen wurde nur einmal durchgetropftes Wasser (10 L) aufgefangen. Wasserschäden wurden also eindeutig minimiert. Gleichartige Erfahrungen konnten sowohl Berufs- als auch Freiwillige Feuerwehren bei ihren praktischen Einsätzen sammeln [3, 5, 9, 18····22, 25, 32, 35, 49, 57].

Für unangemessen und physikalisch unsinnig hält die Forschungsstelle für Brandschutztechnik die Bewertung des Löscherfolges nach erforderlicher Löschmittelmenge, Löschzeit *und* sogenanntem Löschaufwand beziehungsweise -arbeit [4, 5], denn unter vergleichbaren Bedingungen ist die eingesetzte Löschmittelmenge der Löschzeit proportional — in den gerne zitierten Salem-Tests wurde sie sogar auf diese Weise berechnet [18]: Löschzeit multipliziert mit dem Löschmittel-Volumenstrom. Also reicht eines dieser beiden Kriterien zur Beurteilung des Löscherfolges. Die Multiplikation der beiden miteinander quadriert die Differenz zwischen verschiedenen Versuchsergebnissen, um die Bedeutung des ermittelten Unterschiedes zu steigern.

5.2 "geringe Schaummittel-Konzentration"

Die Leistungsfähigkeit herkömmlicher Zumischer mit VENTURI-Düse wird sowohl vom Wasser-Volumenstrom als auch Schaummittel-Konzentrationsbereich beschränkt. Darüber hinaus muß – wegen der für die Funktion erforderlichen Druckdifferenz – die Schaumproduktion beim konventionellen Verschäumungsverfahren kontinuierlich erfolgen, das heißt, kurze, sparsame Schaumstöße wie mit DLS sind hier nicht möglich. Diese

Zumischer verursachen hohe Druckverluste (30····40 % [10]) und funktionieren nur, solange der Gegendruck (statischer und/oder Reibung im Schlauch) 2 bar nicht überschreitet [4, 5, 23, 33]. Wenn bei der Schaumförderung Höhenunterschiede von mehreren Stockwerken oder weite Strecken wie bei Waldbränden überwunden werden müssen, wird durch den gesteigerten Gegendruck die wirksame Druckdifferenz in der VENTURI-Düse so klein, daß die Zumischung unterbleibt. Verglichen damit sind Blasentank-Zumischer zwar besser zu regeln und arbeiten mit geringerem Druckverlust [4, 10, 30], doch läßt sich bei diesen der Schaummittel-Vorrat – und damit der tatsächliche Verbrauch – nicht kontrollieren [23].

Wegen der vom Löschmittelstrom unabhängigen Arbeitsweise der Druckzumischanlage für DLS-Schaummittel und weil diese ihre Wirkung schon in geringerer Konzentration als die bislang gebräuchlichen Tenside entfalten, ist eine deutliche Reduzierung der Schaummittel-Abgabe zu erreichen. Zwar werden die propagierten niedrigen Schaummittel-Konzentrationen erst im Dauerbetrieb erreicht – im Einzelfall können sie bis zum 8-fachen darüber liegen (sh. Kapitel 3.10 und Tabelle 4, Versuch HZ 2 und Messungen bei Einsätzen in der Feuerwehrpraxis [19, 56, 57]). Doch ist unter dem Gesichtspunkt der Umweltbelastung die Abweichung vom prozentualen Sollwert von eher nachrangiger Bedeutung, denn – absolut betrachtet – werden nur geringe Mengen von Schaummitteln ausgebracht, weil das mit DLS vorzugsweise anzuwendende Intervall-Löschverfahren insgesamt einen sparsamen Einsatz des Löschmittels erlaubt. Darüber hinaus kann das Löschmittel "DLS" so dosiert eingesetzt werden, daß – wie die Versuche der FFB gezeigt haben – kein überschüssiges, tensidhaltiges Löschwasser die Umwelt schädigt [4, 14, 19, 22, 32].

In der Umweltbelastungs-Bilanz spielen die Verbrennungsprodukte – beispielsweise wenn die heute weitverbreiteten Kunststoffe in den Brand involviert sind – oder vom Löschwasser ausgespülte Chemikalien eine weitaus gravierendere Rolle als einige Kanister Tensidzusatz. Dies gilt ganz besonders dann, wenn dieser Zusatz dazu beiträgt, den Brand wirkungsvoller, sprich schneller zu bekämpfen, so daß insgesamt weniger umweltschädliche Brandprodukte emittiert werden [3, 5, 9, 11, 14, 21, 25, 26, 35].

5.3 "Schaumerzeugung mit weniger Wasser"

Für die Erzeugung einer bestimmten Schaummenge benötigt das DLS-Verfahren nicht weniger Wasser als das herkömmliche Verschäumungsverfahren, sondern mehr, denn die für die Volumeneinheit Löschschaum erforderliche Wassermenge richtet sich nicht nach dem Verschäumungsprinzip, sondern ausschließlich nach der angestrebten Verschäumungszahl, die als Verhältnis von Schaum- zu Wasser-Volumen (wenn das geringe Volumen des Schaummittel-Anteils vernachlässigt wird) definiert ist, also dem Kehrwert der Schaumdichte entspricht.

Bei der herkömmlichen Verschäumung können je nach verwendetem Schaumrohr Verschäumungszahlen E von unter 20 bis über 200 (Schwer-, Mittel-, Leichtschaum) eingestellt werden. Die DLS-Aggregate produzieren mit E=5···20 (Naß- bis Trockenschaum) quasi einen schweren Schwerschaum, einen Schaum also mit hohem Wassergehalt, der in erster Linie zum Löschen von Bränden der Klasse A vorgesehen ist und nicht zum Abdecken von brennenden Flüssigkeitsspiegeln. Deshalb muß, um den primären Löscheffekt "kühlen" sicherzustellen, der Klasse-A-Schaum mehr Wasser enthalten als der isolierende Klasse-B-Schaum. Nur wenn der Druckluftschaum dem vorbeugenden Schutz der Brandumgebung dienen soll, sind Verschäumungszahlen über 20 – um die Haftfähigkeit und Haltbarkeit zu steigern – zu rechtfertigen [14, 16, 32, 56].

5.4 "weniger Wasserdampf, bessere Sicht"

Immer wieder wird hervorgehoben, daß mit DLS die Brandbekämpfung unter besseren Sichtbedingungen erfolge, weil weniger Dampf entwickelt werde [10, 14, 18····20, 31, 56]. So wird dieses "Phänomen" bei den Salem-Tests beispielsweise damit erklärt, "daß wegen des geringeren Wassergehaltes des Druckluftschaumes fast kein Dampf gebildet und die Rauchbildung aus dem Brandgut sehr schnell unterdrückt wurde" [5]. Oder der behauptete Effekt wird mit der höheren Durchschlagskraft des DLS-Strahles begründet, weil "der Schaum die heißen Schichten besser (schneller) als Wasser durchdringt" [9, 42], oder damit daß das Löschmittel besser in das Brandgut eindringt und dort verbleibt [20].

Erstens stimmt (sh.ob.) die Behauptung über den Wassergehalt nicht und zweitens ist dieser Interpretation auch deshalb zu widersprechen, weil zur Abfuhr einer gewissen Wärmemenge aus einem Brandraum – hier die Temperatur-Differenz zwischen 538°C und 100°C multipliziert mit dem Gasvolumen und seiner spezifischen Wärme – bei jedem richtig angewendeten Löschverfahren immer die gleiche Menge verdampfenden Wassers erforderlich ist – egal ob es als bloßes Wasser, als "Class-A-Foam" oder als Schaum (die drei Löschmittel in Salem) eingebracht wird⁶). Bei optimaler Dosierung entsteht bei keinem Löschverfahren übersättigter Dampf, so daß die Sicht auch vom Wasserdampf nicht beeinträchtigt werden kann.

Was dem Einsatz von DLS optische Vorteile verschafft, ist nicht die geringere Dampfproduktion, sondern die leuchtend weiße Farbe dieses Löschmittels in der schmutzig-grauen Umgebung der Brandraum-Atmosphäre [3, 68].

5.5 "größere Wurfweite"

Der DLS-Strahl erzielt eine deutlich größere Reichweite – entscheidender Sicherheitsgewinn für die Einsatzkräfte! – nicht nur im Vergleich zum herkömmlichen Schaum [11, 12, 14], bei dessen Erzeugung für das Ansaugen des Schaummittels und der Luft sowohl im Zumischer als auch im Schaumrohr erhebliche Anteile der von der Kreiselpumpe aufgebrachten kinetischen und Druck-Energie als Verluste abgezogen werden müssen (Wurfweite beim Mittelschaum schon so weit beeinträchtigt, daß der Schaum eigentlich nur noch zum Fluten eingesetzt werden kann; beim Leichtschaum ist für den Schaumtransport sogar ein Zusatzgebläse erforderlich [9, 23]), sondern auch im Vergleich mit einem Wasser-Vollstrahl. Anschaulich aber physikalisch nicht ganz korrekt wird dies in der Fachliteratur häufig mit dem hohen Energie-Niveau der DLS-Produktion begründet [9, 11, 14, 16, 19, 20, 23, 25].

⁶) Auch zwei unabhängig voneinander durchgeführte Löschversuche an im Vollbrand stehenden Gartenhütten zeigen, daß vergleichbare Brandlasten vergleichbare Löschwassermengen erfordern (72 L bzw. 81 L), unabhängig vom Löschverfahren aber nicht von den Fähigkeiten des Strahlrohrführers [19, 67].

Im reibungsfreien Fall hängt die Wurfweite 1 jedoch ausschließlich vom Anstellwinkel α und von der Anfangsgeschwindigkeit c_0 ab:

$$1 = c_0^2 \cdot \sin 2\alpha / g; \quad l_{\text{max}} = c_0^2 / g \tag{20}$$

Sie hängt also weder von der Masse noch von der Dichte des ausgebrachten Löschmittels ab (falsch in [52]). Für $\alpha = 45^{\circ}$ erreicht sie ihren Höchstwert.

Die Strömungsgeschwindigkeit im Mundstück eines Strahlrohres (Vollstrahl) wird – der Kontinuitätsgleichung

$$\dot{m}_{Fl} = \rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 \tag{21}$$

gehorchend –, mit $\rho_1 = \rho_2$, vom Querschnittsverhältnis Schlauch / Mündung bestimmt:

$$c_2 = (D_1/D_2)^2 \cdot c_1 = c_0$$
 (22)

Der von einem DLS üblicher Qualität ($E \approx 7$, $p \approx 5 \cdots 8$ bar) transportierte Wasseranteil liegt nach bisher gesammelten Erfahrungen in der Praxis [68] bei etwa 65 % dessen, was ein reiner Wasserstrahl auswirft und nicht nur bei 50 % [3]. Der Schaum-Volumenstrom setzt sich also zusammen aus *diesem* Wasser- und einem entsprechenden Luft-Volumenstrom:

$$\dot{V}_{S,p} = 0.65 \ \dot{V}_W + \dot{V}_{L,p} \tag{23}$$

$$\dot{\mathbf{V}}_{\mathrm{L,p}} = 0.65 \, \dot{\mathbf{V}}_{\mathrm{W}} \cdot \mathbf{E} \tag{24}$$

$$E_p = 2.2$$
 für $E = 7$ und $p = 5$ bar (25)

$$V_{S,p} = 0.65 V_W \cdot E_p = 1.43 V_W$$
 (26)

In einem Schlauch gleichen Querschnitts fließt dieser Schaum-Volumenstrom um denselben Faktor 1,43 schneller als der Wasser-Volumenstrom und wird beispielsweise in der 12 mm–Mündung eines C-Mehrzweckstrahlrohrs auf

$$c_{S2} = (52/12)^2 \cdot 1,43 \cdot c_{W1} \quad \text{mit} \quad c_{W1} \approx 3 \text{ m/sec}$$
 (27)

$$c_{S2} \approx 80 \text{ m/sec} \tag{28}$$

beschleunigt.

In die Berechnung der DLS-Wurfweite – verglichen mit dem Wasserstrahl (Gleichung 20) – geht der Faktor Schaum-/Wasser-Strömungsgeschwindigkeit quadratisch ein, was eine Steigerung der Reichweite des DLS-Strahles auf etwa das Doppelte des Wasserstrahles zur Folge hat. Dies wird mit dem von der BF Ingolstadt photographierten Reichweiten-Vergleich (Bild 11 [19]) eindrucksvoll vor Augen geführt.

Zwar ist derselbe Faktor – ebenfalls quadratisch – in der Berechnung des Impulses des Löschmittelstrahls enthalten,

$$m_S \cdot c_{2S} / m_W \cdot c_{2W} = V_{S,p} \cdot c_{2S} / E_p \cdot V_W \cdot \rho_W \cdot c_{2W} = 1,43^2 / 2,2 \approx 1$$
 (29)

doch wird er durch die geringere Dichte des Druckluftschaumes soweit kompensiert, daß eine im praktischen Einsatz empfundene Zunahme der Rückstoßkräfte am Strahlrohr [3, 19, 42] bei diesen Betriebsbedingungen nicht auftreten kann.

Bei gleicher Verschäumung, jedoch zunehmendem Druck vor dem Strahlrohr (z.B. p = 8 bar) verringert sich der Reichweiten-Vorteil des DLS gegenüber Wasser von $100\,\%$ auf etwa $30\,\%$, denn E_p fällt dann auf 1,75 und die Schaum-Strömungsgeschwindigkeit beträgt nur noch das 1,14-fache der Strömungsgeschwindigkeit des reinen Wasserstrahls. Der Rückstoß am Strahlrohr liegt dann bei 3/4 der Größenordnung von Wasser.

Weitere physikalische Effekte auf die Strömungsgeschwindigkeit in der Strahlrohrmündung (z.B. wegen der geringeren Dichte des Schaumes ist die auf der BERNOULLI-Gleichung beruhende Beschleunigung des Strahles größer als bei Wasser) können vernachlässigt werden. Im wesentlichen wird der Reichweitengewinn durch den höheren Volumenstrom des Schaumes verursacht. Auch Reibungseinflüsse der Luft können bei dieser groben Abschätzung unberücksichtigt bleiben, da sie beide Löschmittelstrahlen in etwa gleichem Maße tangieren.

Die höhere kinetische Energie des DLS-Strahles befähigt ihn auch, die aufsteigende Rauchgasströmung besser zu durchdringen und den Brandherd eher zu erreichen als konventionell erzeugter Schaum, der leicht vom Auftrieb mitgerissen wird [19···21, 28, 31, 36, 42, 50].

5.6 "leichter zu handhaben"

Das DLS-Verfahren ist in der Tat leichter zu handhaben, nicht nur weil weder Mischaggregat noch Schaummittel dem Strahlrohrführer hinterhergetragen werden müssen, sondern auch weil das Schlauchgewicht geringer ist − zwar nicht so gering wie weit verbreitete Berechnungen suggerieren, bei denen sowohl vergessen wurde, das Eigengewicht des Schlauches zu berücksichtigen, als auch den *Druck*, mit dem das *Druck*luftschaum-Verfahren arbeitet, und dessen Auswirkung auf die Dichte des im Schlauch transportierten Schaumes [3, 5, 10, 42, 69, 70]. Aber immerhin wiegt der laufende Meter eines DLS-gefüllten Schlauches (E≈7, p≈5····8 bar) 50····40 % weniger als ein mit Wasser gefüllter, was die Beweglichkeit der Feuerwehr − insbesondere auf Leitern − spürbar verbessert [19].

Die Handhabung der Feuerwehr-Schläuche wird durch ihr geringeres Gewicht erleichtert, auch wenn, um der Gefahr des Knickens zu begegnen, die Schläuche sorgfältiger verlegt werden müssen, weil – auch bei gleichem Arbeitsdruck und im Gegensatz zu Wasser – das Medium Schaum nicht inkompressibel ist.

Zwar besteht die für Druckluftschaum hervorgehobene Möglichkeit, ihn in Trokkensteigleitungen einzuspeisen, für alle anderen flüssigen Löschmittel auch. Doch wegen des Gewichtsvorteils im Vergleich zu Wasser wird ein wesentlich geringerer Teil der Pumpenleistung zur Überwindung der geodätischen Höhe⁷) benötigt, das heißt, der verbleibende, höhere Leistungsrest steht als Druck an der Strahlrohrmündung zur Verfügung [25, 71].

Der wesentliche Vorteil bei der Handhabung dieses Löschverfahrens, der die bei den Versuchen an der FFB erzielten Löschmittel-Einsparungen bewirkte, besteht darin, daß der weiße Schaum dem Strahlrohrführer augenfällig signalisiert, wo bereits gelöscht wurde [3, 68], das heißt, wohin der Strahl nur dann noch einmal gerichtet werden muß, wenn dort Rückzündungen stattfinden. Dieser Handhabungsvorteil des DLS-Verfahrens führt dazu, daß auch die Feuerwehr vor Ort, die – mangels Möglichkeit zur Durchführung

⁷) aber beliebig weit oder hoch [14, 22, 39] kann auch DLS nicht gefördert werden

"realer" Übungen – nicht über einen so versierten Strahlrohrführer verfügt, wie er der FFB bei der Durchführung ihrer früheren Versuche zur Seite stand, Löschergebnisse

- kurze Löschzeit,
- geringer Wasserverbrauch,
- keine zusätzlichen Wasserschäden durch überschüssiges Löschwasser

erzielen kann, wie sie mit herkömmlichen Löschverfahren nur nach langjähriger Routine erreicht werden können, das heißt, ein guter Ausbildungserfolg erfordert eben keinen "erhöhten Ausbildungsaufwand" [12, 35, 56], sondern ist mit diesem Verfahren in Wirklichkeit wesentlich schneller zu erreichen [19, 31]. Dies wird unterstrichen durch jenes in Texas, USA beschlossene Gesetz, in dem für DLS-geschützte Anlagen verringerte Versicherungsprämien vorgeschrieben werden [27] und durch die Tatsache, daß in Bayern seit 1999 die Anschaffung von DLS-Systemen öffentlich gefördert wird [34]. Grundsätzlich "muß die optimale Anwendung von Löschmitteln in der Praxis in die Ausbildung bei den Feuerwehren einbezogen werden" [72].

Der rasche Löscherfolg ohne Wasserschaden bewirkt, daß mögliche Hinweise auf die Brandursache eher erhalten bleiben als in einem länger währenden, konventionell bekämpften Brand [3, 20, 21, 52, 53].

Weitere vorteilhafte Einsatzmöglichkeiten des Druckluftschaum-Verfahrens beruhen entweder darauf, daß der Feuerwehr-Praktiker das Potential des ihm zur Verfügung stehenden Gerätes in unterschiedlichen Situation zu nutzen sucht (entfernen von Ölspuren auf der Straße, reinigen, desinfizieren in der Landwirtschaft,... mit DLS anstatt mit dem Hochdruckreiniger) oder darauf, daß Schaum unter bestimmten Umständen (z.B. mit der Löschlanze ausgebracht, um brennende Schüttgüter, Futtermittel im Silo, Heu,... zu löschen) grundsätzlich das angemessene Löschmittel ist – einerlei ob herkömmlich oder mit Druckluft produziert – ebenso wie beide Schaumarten auch einen gemeinsamen Nachteil aufweisen: Sie durchnässen die Feuerwehr-Schutzkleidung, ihre Isolierungsfähigkeit wird gemindert.

6. EINSATZTAKTIK ZU BEGINN DES LÖSCHENS

Beim ersten Löschversuch SCH 1 wurde ein extrem starker Austritt der Flammenfront durch das Fenster des Brandraums sowie durch die Tür, durch die der Löschtrupp vorging, beobachtet: Explosionsartig mit rotationssymmetrischer Pilz-Geometrie (Torus).

Bild 12 zeigt zwei Photographien vom Brandverlauf, die unmittelbar vor beziehungsweise nach dem Flash-over (8 Minuten nach der Zündung) aufgenommen wurden. Die momentane Verdunkelung der Rauchgas-Atmosphäre unter der Decke des Brandraumes wegen des nach dem Flash-over kurzfristig eintretenden Sauerstoffmangels und die daraus folgende Ruß-Anreicherung ist deutlich zu erkennen.

In Bild 13 ist eine Photo wiedergegeben⁸), das 1½ Sekunden nach Löschbeginn aufgenommen wurde: Ein explosionsartiger Flammenpilz vor dem Brandraum-Fenster, verursacht vom ersten Löschmittelstrahl gegen die über 800°C heiße Decke des Brandraumes – bei 40 % Abbrand, 17,7 Minuten nach der Zündung. Dieses Brandszenarium hat die beiden – nicht auf Wohnungsbrände spezialisierten – Feuerwehrleute bis an die Grenze ihrer Belastbarkeit strapaziert, so daß sie nach einer Viertelstunde von der Berufsfeuerwehr abgelöst werden mußten, die allerdings dann (sh. Abbrand-Kurve in Bild 4 für t>34 min) das Löschmittel sehr großzügig einsetzte.

Verursacht wurde dieser Flammenpilz durch das Befolgen der zum Zeitpunkt der Ausführung des beschriebenen Versuches noch als richtig betrachteten und in der Fachliteratur dementsprechend häufig propagierten Empfehlung, beim Löschen eines Brandes in einem Raum zuerst dessen Decke zu kühlen [5, 14, 18···22, 31, 32, 71, 73]. Die Anwendung dieser sogenannten "indirekten" Löschtaktik mag zwar in einem dünnwandigen Übungs-Container (mit ebenso dünner Decke) funktionieren, weil dort mit einem ersten Sprühstrahl tatsächlich eine effektive Kühlung der Decke und der Rauchgase darunter erreicht werden kann. Wenn jedoch die Übung auf den Einsatz in der Praxis vorbereiten soll, ist von diesem Vorgehen abzuraten, denn im Realfall findet die Feuerwehr bei ihrem

⁸) die vollständige Photosequenz aus dieser Löschphase kann – Adresse sh. letzte Seite – bei der FFB bezogen bzw. auf deren homepage verfolgt werden

Eintreffen häufig Brände vor, die sich zum einen im voll entwickelten Stadium – also nach dem Flash-over – befinden, und die sich zum anderen nicht in einem dünnschaligen Container, sondern in einer normalen Wohnung entwickelt haben.

Die wesentlich höhere Wärmekapazität der – in aller Regel in Mitteleuropa vorherrschenden – Massivbauweise bewirkt, daß das gegen die Decke gesprühte Wasser schlagartig verdampft. Das heißt, in unserem Brandversuchsraum mit Decken-Temperatur über 800°C entstehen aus den eingesprühten 3 L Löschwasser mehr als 10 m³ etwa 500°C heißen Wasserdampfes (Faktor 3000).

Diese Dampfexplosion kann nicht nur zur Verbrühung der Einsatzkräfte führen [14], sie treibt auch die etwa 800°C heißen, teilverbrannten Rauchgase und die beobachtete Flammenfront aus jeder Öffnung des Brandraumes und überträgt dadurch das Brandrisiko auf benachbarte Wohnungen.

Bei den weiteren Versuchen wurde deshalb auf das Anspritzen der Decke verzichtet: Die Flammen traten bei Löschbeginn nicht verstärkt aus dem Fenster (vergl. 4. Photo in Bild 9), sondern fielen quasi in sich zusammen. Die Empfehlung, beim Löschen von Bränden in Räumen zuerst die Decke zu kühlen, sollte also überdacht werden.

Zusammenfassend beurteilt die FFB den Einsatz des Sprühstrahls zu Beginn des Löschens in Abhängigkeit von der Brandsituation, wie in Tabelle 6 dargestellt. Je nach dem, in welcher Umgebung sich der Brand entwickelt hat, und wohin der Strahl gerichtet wird, kann sein Einsatz sinnvoll oder gefährlich sein:

- Sinnvoll ist die Rauch- und Raumkühlung in zum Brandraum benachbarten Räumen – in jedem Entwicklungsstand des eigentlichen Brandes.
- Besteht der Brandraum selbst aus Materialien mit geringer Wärmekapazität (z.B. Stahlcontainer), so kann der Sprühstrahl bis zum und auch noch kurz nach dem Flash-over zur Rauchgaskühlung unter der

Decke eingesetzt werden. Im Vollbrand-Stadium ist wegen der dann herrschenden Verbrühungsgefahr davon abzuraten.

• Ereignet sich der Brand in einem Raum mit massiver Umfassung, so besteht diese Gefahr bereits kurz nach dem Flash-over. 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 teilverbrannte, durchzündende Rauchgase (Roll-over sh. Kapitel 8) gefährdet.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von Schaum als Löschmittel wird bei Bränden der Klasse B dadurch begründet, daß das spezifische Gewicht von Wasser größer ist als das der meisten brennbaren Flüssigkeiten.

Bei Bränden der Klasse A soll die Wirksamkeit des Löschmittels "Wasser" verbessert werden, indem seine spezifische Oberfläche vergrößert, seine Oberflächenspannung verringert und seine Haftfähigkeit gesteigert wird. Die konventionelle Schaumerzeugung mit VENTURI-Zumischer und Schaumrohr ist jedoch mit folgenden Nachteilen behaftet:

- Der große Druckverlust in diesen beiden Aggregaten erlaubt nur noch eine geringe Reichweite des Löschmittelstrahls.
- Das Verfahren erfordert eine relativ hohe Schaummittel-Beimischung und eine kontinuierliche Förderung und ist deshalb nicht sparsam einzusetzen, kann also den Sichtbarkeitsvorteil des Löschmittels nicht nutzen.

- Wegen des Druckverlustes in den Schläuchen muß die Schaummittel-Zumischung nahe beim Schaumrohr erfolgen, das Verfahren wird unhandlich, Kanister müssen geschleppt werden.
- Bei hohem statischem Gegendruck funktioniert das Verfahren nicht mehr, die Förderung über eine höher als 20 m ausgefahrene Drehleiter ist nicht möglich.
- Zur Verschäumung wird Luft aus der unmittelbaren Nähe des Brandes verwendet, diese beeinträchtigt die Haltbarkeit des Schaumes.

Demgegenüber zeichnen die folgenden Vorteile das DLS-Löschverfahren aus:

- 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, aufsteigende Rauchgasströme zu durchdringen.
- Die Zumischung von Schaummittel und Luft erfolgt im LF, 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.

Zu Beginn dieses Berichtes waren "Löscherfolg optimieren", "Wasser sparen" und "Wasserschäden minimieren" als Ziele des Einsatzes des DLS-Löschverfahrens genannt

worden. In zusammenfassender Bewertung kommt die Forschungsstelle für Brandschutztechnik zu dem Schluß, daß im Inneneinsatz mit dem DLS-Löschverfahren Wasserschäden vermieden 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.

Eine gute Ausbildung des Strahlrohrführers stellt jedoch – wie bei jedem anderen Löschverfahren auch – die wichtigste Voraussetzung dar, um die vorgenannten Ziele zu erreichen. Das DLS-Verfahren ist geeignet, den Ausbildungserfolg spürbar zu verbessern.

8. ANHANG: FLASH-OVER, BACK-DRAFT, ROLL-OVER

Als *Flash-over* (Feuerübersprung) wird der Übergang von der Entwicklungs- zur Vollbrand-Phase bezeichnet — statt von der verfügbaren Brandlast wird der Brand nun von den Ventilationsbedingungen gesteuert. Die Rauchschicht über einem (Zimmer-) Brand ist dann so weit aufgeheizt (500···600°C), daß deren Wärmestrahlung benachbartes Brandgut entzündet. Dies kann auch durch direkte Wärmestrahlung vom Brandursprung erfolgen. Die hiermit verbundene hohe Pyrolysegas-Produktion verursacht Ruß-Anreicherung und O₂-Verringerung in der Rauchschicht, weshalb kurzfristig die Temperatur im Brandraum fällt.

Je nach den geometrischen Verhältnissen (Größe und Höhe des Brandraumes, Größe und Höhe der Raumöffnungen) pendelt die neutrale Zone — die Zone zwischen dem

Überdruck im Rauchgas unter der Decke und dem Unterdruck in der bodennahen Zuströmung — schneller oder langsamer um die Öffnungs-Oberkante (der Brand pulsiert):

- Liegt die neutrale Zone über der Öffnungs-Oberkante, so herrscht maximale Frischluftzufuhr, der Brand wird angefacht und produziert aufsteigende Rauchgase, der Druck in der Rauchschicht wird gesteigert, die Rauchschicht-Unterkante fällt unter die Öffnungs-Oberkante und der Rauch unter der Decke kann den Brandraum verlassen.
- Der verkleinerte Öffnungsquerschnitt für die Frischluftzufuhr verringert die Brandintensität, weniger Rauchgase werden produziert und der Druck in der Rauchschicht fällt, bis die neutrale Zone wieder über die Öffnungs-Oberkante steigt.

Bei eingeschränkter Sauerstoffzufuhr in den Brandraum wächst – trotz vorhandener Zündquellen – sowohl die Konzentration der bei der Pyrolyse produzierten brennbaren Gase als auch die von Kohlenmonoxid in der Rauchschicht über die obere Zündgrenze. Flammenzungen an der Grenzschicht Rauch/Luft zeigen, wo zündfähige Konzentrations-Verhältnisse bestehen.

Werden insgesamt wieder zündfähige Verhältnisse erlangt — beispielsweise weil das Rauchgas ein ausgedehntes oder verschachteltes Bauwerk durchströmt, beim Bersten eines Fensters oder beim Öffnen einer Tür — so können sich diese Gase mit einer Stichflamme in den Nachbarraum ausbreiten, die Feuerwehr überrollen (*Roll-over*) oder die zusätzliche Frischluftzufuhr kann bei guter Verwirbelung im Raum selbst oder dort, wo Rauchgas und Sauerstoff sich finden, eine Rauchgas-Durchzündung mit Druckwelle (*Back-draft*) auslösen.

Bei Brandräumen mit dichtschließenden Türen und Fenstern geht der Entstehungsbrand in einen Schwelbrand über und kann von alleine verlöschen, wenn Fenster und Türen nicht zerstört werden.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Seeger, Paul G. und Reiner John:
 Verringerung des Löschmittelbedarfs
 durch Zusätze zum Löschwasser,
 Technische Überwachung (TÜ),
 Band 31 (1990), Heft 5, Seite 211···219
- [2] Neumüller, Otto-Albrecht: Römpps Chemie-Lexikon, 8. Aufl., Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart 1979…88
- und Falbe, Jürgen und Manfred Regitz: Römpp Chemie-Lexikon, 9. Aufl., Thieme-Verlag, Stuttgart 1989…93
- [3] Taylor, Robert G.:
 Compressed Air Foam Systems in
 Limited Staffing Conditions,
 Executive Fire Officer Program –
 National Fire Academy, Seite 75…112,
 Morristown, New Jersey, USA,
 Dezember 1997
- [4] Pohl, Klaus Dieter et al.: Class-A-Foam, Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 49. Jahrgg. (1995), Heft 9, Seite 611…615
- [5] de Vries, Holger:
 Untersuchungen zur Optimierung der
 Bekämpfung von Feststoffbränden mit
 Wasser und Schaum im mobilen Einsatz
 der Feuerwehren,
 Dissertation D 468 an der Bergischen
 Universität GH Wuppertal (BUGHW),
 Fachbereich Sicherheitstechnik, Fachgebiet Brand- und Explosionsschutz,
 Prof. Dr. rer. nat. Hans Hölemann,
 Wuppertal, 29.8.1999
- [6] Schumann, Ulrich:
 Class-A-Foam und CAFS –
 Projektierung und Umsetzung am
 Feuerwehrfahrzeug,
 112 Magazin der Feuerwehr,
 23. Jahrgg. (1998), Heft 7,
 Seite 424…430

- [7] Fuchs, Peter:
 Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten, Teil 2,
 Forschungsbericht Nr. 31 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer Arbeitskreis V, Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten", Karlsruhe 1977
- [8] Fuchs, Peter:
 Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten, Teil 3,
 Forschungsbericht Nr. 33 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer Arbeitskreis V, Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten", Karlsruhe 1978
- [9] Colletti, Dominic J.: Class-A-Foam for Structure Firefighting, Fire Engineering, Band 145, Juli 1992, Seite 47...57
- [10] Rughase, Olaf und Holger de Vries: DLS bei Waldbrand, Feuerwehr-Magazin, 14. Jahrgg. (1997), Heft 3, Seite 58…66
- [11] anonym: LF 16/12 mit Kompressor-Luftschaumsystem, 112 – Magazin der Feuerwehr, 23. Jahrgg. (1998), Heft 1, Seite 8···12

- [12] Dunn, Michael J.:
 Full-Scale Testing of Fire Suppression
 Agents on Unshielded Fires,
 School of Engineering, University of
 Canterbury, Christchurch, Neuseeland
 Fire Engineering Research Report,
 Juni 1998, Heft 2, Seite 1…132
- [13] Madrzykowski, Daniel und David W. Stroup (ed.): Demonstration of Biodegradable, Environmentally Safe, Non-Toxic Fire Suppression Liquids, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6191, Gaithersburg, Maryland, USA, Juli 1998
- [14] Schumann, Ulrich (Produktinformation für Hale Products Europe GmbH, Feuerwehr- und Rettungssysteme):
 Können Sie dieses Feuer beherrschen?,
 Dieburg 1999
- [15] Pleß, Georg:
 Schäume und ihre Adsorptionswirkung
 bei gefährlichen Stoffen,
 Feuerwehren in Sachsen-Anhalt,
 Band 12 (2002), Heft 1, Seite 20···21
- [16] Colletti, Dominic J.:
 CAFS in Wildland Fire Fighting
 the American Experience,
 Fire Times, 5. Jahrgg.,
 August/September 2003, Seite 12
- [17] Colletti, Dominic J.:
 Questions About Class-A-Foam in
 Municipal Fire Operations,
 Hale Bulletin (1993), Heft 1, Nr. 546
- [18] Colletti, Dominic J.:

 Quantifiying the Effects of Class-AFoam in Structure Firefighting

 The Salem Tests,
 Fire Engineering, Band 146,
 Februar 1993, Seite 41…44
- [19] Braun, Ulrich:
 Erfahrungsbericht über die
 Druckluftschaum-Brandbekämpfung,
 Berufsfeuerwehr Ingolstadt,
 Seite 1…31, September 1998

- [20] Schumann, Ulrich: Im Test – Class-A-Foam und CAFS, 112 – Magazin der Feuerwehr, 23. Jahrgg. (1998), Heft 11, Seite 696···702
- [21] Blankenship, Paul L.: Foam – Should we use it?, American Fire Journal, 43. Jahrgg. (1991), Heft 7, Seite 45…47
- [22] Schott, Lothar: CAFS – ein beeindruckendes Löschverfahren, Florian Hessen (1999), Heft 7+8, Seite 33…34
- [23] Schumann, Ulrich:
 Die Erzeugung und Ausbringung von
 Löschschaum,
 FFZ Feuerwehr-Fachzeitschrift,
 Band 27 (2002), Heft 8, Seite 496…501
 und Heft 9, Seite 562…567
- [24] Pleß, Georg und Eberhard Lubosch,: Löschen mit Schaum, Haufe-Verlag, Berlin 1991
- [25] Juntune, Dan: CAFS – Concentrating on Fact and Fiction, Fire International, 23. Jahrgg., Januar 1999, Heft 166, Seite 33
- [26] de Vries, Holger et al.:

 Toxikologische Bewertung des
 Einsatzes von Class-A-Foam,
 vfdb-Zeitschrift, 50. Jahrgg. (2001),
 Heft 2, Seite 62···70
- [27] Moellenberg, Ron: CAFS – So effective it changed the rules... so we changed the laws, Fire Times, 2. Jahrgg., Suppl. Countrys. Fire Management (2000), Heft 5, Seite 38
- [28] Magrabi, S.A. et al.:
 A comparative study of drainage characteristics in AFFF and FFFP compressed air fire-fighting foams, Fire Safety Journal, Band 37 (2002), Heft 1, Seite 21...52

- [29] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. – Normenausschuß Feuerwehrwesen: Schaummittel (DIN EN 1.568-1···4), Beuth-Verlag, Berlin 2001
- [30] Total Walther GmbH (ed.):
 Neuentwicklungen von Total Walther,
 112 Magazin der Feuerwehr,
 20. Jahrgg. (1995), Nr. 12, Seite 711
- [31] Grimwood, Paul und Graham Gray: Compressed Air Foam (CAFS) in Structural Fire Fighting, Fire Times, 5. Jahrgg., August/September 2003, Seite 29…30
- [32] Raab, Wolfgang:
 Alternative Löschschaum Bericht über einen Großbrand in einer Privatklinik,
 Schadenprisma, 27. Jahrgg. (1998),
 Heft 2, Seite 12…19
- [33] Berufsfeuerwehr Ingolstadt (ed.):
 CAFS Compressed Air Foam System
 Druckluftschaum Brandbekämpfung,
 vorläufige Lehrunterlage für LF 16/12
 BF IN, Seite 1···10, Juli 2000
- [34] anonym:
 Druckluftschaumanlagen –
 Doppeljubiläum bei Ziegler,
 FFZ Feuerwehr-Fachzeitschrift,
 Band 28 (2003), Heft 5, Seite 304…305
- [35] Kappendobler, Anton:
 Erfahrungen bei Einsätzen mit CAFS im
 Landkreis Weilheim-Schongau,
 Vortrag beim Seminar für Anwender
 von Druckluftschaumanlagen,
 veranstaltet von der Berufsfeuerwehr
 Ingolstadt und vom Bayrischen
 Innenministerium im AUDIKongreßzentrum,
 Ingolstadt 11.10.2003
- [36] Kim, Andrew K.
 und Bogdan Z. Dlugogorski:
 Multipurpose Overhead Compressed Air
 Foam System and its Suppression
 Performance,
 Journal of Fire Protection Engineering,
 8. Jahrgg. (1997), Heft 3,
 Seite 133…150

- [37] Crampton, G.P. et al.:
 A New Fire Suppression Technology,
 NFPA Journal, Band 93,
 Juli/August 1999, Seite 47…51
- [38] Kim, Andrew K.:
 IRC-designed CAF fire-suppression
 system shows promise for use in aircraft
 hangars,
 Construction Innovation, 7. Jahrgg.,
 Dezember 2002, Heft 4, Seite 1···7
- [39] Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik (Produktinformation): Class-A-Foam, CAFS, Foam System, Power Foam Basic, Power Foam Pro, Giengen 2002
- [40] Schmitz GmbH, Feuerwehr- und Umwelttechnik (Produktinformation): Modernste Löschtechnik schnell, wirksam, umweltverträglich, Luckenwalde 2003
- [41] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. Normenausschuß Feuerwehrwesen:
 Druckzumischanlagen und Druckluftschaumanlagen (DIN V 14.430),
 Beuth-Verlag, Berlin 2003
- [42] Volz, Siegfried: Erfahrungen mit CAF, Feuerwehr-Magazin, Band 17 (2000), Heft 9, Seite 70···75
- [43] anonym: Metz-FGL – Löschfahrzeuge mit CAFS, FFZ – Feuerwehr-Fachzeitschrift, Band 27 (2002), Heft 5, Seite 271…272
- [44] Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik (ed.): Schaum-Wasser-Druckluft-Löschanlage von Ziegler mit neuem Antriebssystem, Brandhilfe, 49. Jahrgg. (2002), Heft 9, Seite 326
- [45] Marre, Lionel (Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik): persönliche Mitteilung 2003

- [46] Deutsches Institut für Normung (DIN)
 e.V. Normenausschuß
 Feuerwehrwesen:
 Schaummittel MehrbereichSchaummittel zur Erzeugung von
 Schwer-, Mittel- und Leichtschaum für
 Löschzwecke (DIN 14.272-2),
 Beuth-Verlag, Berlin 1990
- [47] Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. Normenausschuß Feuerwehrwesen:
 Ortsfeste Schaumlöschanlagen (DIN 14.493-100),
 Beuth-Verlag, Berlin 2002
- [48] Dr. Sthamer (Produktinformation): Schaum gegen Feuer, Hamburg, April 2003
- [49] Cavette, Chris: CAFS tops LA Foam Tests, Fire Times, 4. Jahrgg. (2002), Heft 1, Seite 6
- [50] Blankenship, Paul L.:
 CFD Catches the Fire Suppressant Foam Wave,
 American Fire Journal, 41. Jahrgg.
 (1989), Heft 5, Seite 34…35
- [51] Hammerl, Werner:
 CAFS und Class-A-Foam was ist das?,
 Brand aus, Band 109 (2001), Heft 3,
 Seite 18…22
- [52] anonym:
 The Future of Fire Fighting,
 Fire Times, 3. Jahrgg., Suppl. Countrys.
 Fire Management (2001), Heft 4,
 Seite 8...9
- [53] Hale Products Europe GmbH,
 Feuerwehr- und Rettungssysteme
 (Produktinformation):
 CAFS Infomappe, Kapitel 5: Die Beurteilung der Wirksamkeit von Class-AFoam und CAFS bei der Brandbekämpfung,
 Dieburg 1999

- [54] Hale Products Europe GmbH,
 Feuerwehr- und Rettungssysteme (ed.):
 Technische Informationen zum CAFSSchaumsystem,
 Dieburg 1999
- [55] anonym:
 Waterous a Tradition of Performance,
 Fire International, 25. Jahrgg.,
 September 2001, Heft 189, Seite 4…5
- [56] Habermaier, Frank:
 Einsatz des Compressed Air Foam
 System bei der Berufsfeuerwehr
 Augsburg, Seite 1···20, Dezember 1999
- [57] Zinke, Lothar und Eberhard Rogmann: Effektives Löschen – Schnell und sparsam, UB – Unabhängiger Brandschutz (2003), Heft 3, Seite 16…17
- [58] anonym (Produktinformation für Hale Fire Pump Company): Compressed air foam systems – making water wetter, Fire, 93. Jahrgg., Juni 2000, Heft 1140, Seite 34
- [59] Gravestock, Neil:
 Full-Scale Testing of Fire Suppression
 Agents on Shielded Fires,
 School of Engineering, University of
 Canterbury, Christchurch, Neuseeland
 Fire Engineering Research Report,
 Juni 1998, Heft 3, Seite 1…177
- [60] Kühn, Robert und Karl Birett: Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe, 10. Aufl., ecomed-Verlag, Landsberg, München 1995
- [61] Hommel, Günter et al.:
 Handbuch der gefährlichen Güter,
 18. Aufl.,
 Springer-Verlag,
 Berlin, New York,... 2004
- [62] Sorbe, Günter: Sicherheitstechnische Kenndaten – Gefahrenindex chemischer Stoffe, ecomed-Verlag, Landsberg, München 1993

- [63] Föhl, C.Axel et al.:
 Untersuchung der Löschverfahren und
 Löschmittel zur Bekämpfung von
 Bränden gefährlicher Güter Bewertung
 von Adsorptionsmaterialien für die
 quantitative Analyse von Pflanzen schutzmittel-Brandgasen mit einer
 GC/MS-Gerätekombination,
 Forschungsbericht Nr. 106 der
 Arbeitsgemeinschaft der Innen ministerien der Bundesländer
 Arbeitskreis V, Ausschuß für
 Feuerwehrangelegenheiten,
 Karlsruhe 1998
- [64] Günther, Kuno Peter:
 Revolutionärer Quantensprung beim
 Löschmittel Wasser?,
 Brandschutz / Deutsche FeuerwehrZeitung, 49. Jahrgg. (1995), Heft 8,
 Seite 534…537
- [65] Schremmer, Ulf:
 Stationäre automatische
 Wasservernebelungsanlagen –
 Grundsätze, Wirkungsweise, Gestaltung
 und Einsatzgrenzen,
 Dissertation an der Otto-von-GuerickeUniversität, Fakultät für Maschinenbau,
 Prof. Dr.-Ing. Gert Beilicke,
 Magdeburg, 27.6.1995
- [66] Schremmer, Ulf:
 Stationäre automatische
 Wasservernebelungsanlagen,
 Technische Überwachung (TÜ),
 Band 38 (1997), Heft 5, Seite 20···25
- [67] Riemer, Hans:
 Nie mehr Löschwasserschaden!
 April, April?,
 Brandschutz / Deutsche FeuerwehrZeitung, 52. Jahrgg. (1998), Heft 5,
 Seite 282…283
- [68] Braun, Ulrich (BF Ingolstadt): persönliche Mitteilung 2003
- [69] anonym:
 Foam is the Future,
 Fire Times, 2. Jahrgg., Suppl. Countrys.
 Fire Management (2000), Heft 5,
 Seite 34

- [70] Sural, Zbigniew und Andrzej Nasirowski:
 Gutachten zur Beurteilung der Löschwirksamkeit des Löschsystems One Seven bei Bränden der Klassen A und B, Wissenschaftliches Brandschutz-Forschungszentrum Jozef Tuliszkowski, Jozefow / Otwock, Polen, 15.6.2000
- [71] Hoppert, Manuel:
 Löschmittelförderung in die Höhe von
 120 m Druckluftschaum und Wasser
 im Vergleich,
 Vortrag beim Seminar für Anwender
 von Druckluftschaumanlagen,
 veranstaltet von der Berufsfeuerwehr
 Ingolstadt und vom Bayrischen
 Innenministerium im AUDIKongreßzentrum,
 Ingolstadt 11.10.2003
- [72] Schumann, Ulrich:
 Fragen und Antworten zum Thema
 Schaum bei der Brandklasse A,
 112 Magazin der Feuerwehr, Band 25
 (2000), Heft 3, Seite 176···180
- [73] Speth, Hauke et al.:
 Betriebsverhalten von Flash-overContainern,
 vfdb-Zeitschrift, 51. Jahrgg. (2002),
 Heft 2, Seite 53…58

10. TABELLEN UND BILDER

<u>Tabelle 1:</u>	Brand- und Löschversuche im 12,8 m²-Modellraum der FFB mit Wasser, Wasser/Tensid-Gemisch oder Mittelschaum [7]	60
Tabelle 2:	Brand- und Löschversuche im 12,8 m²-Modellraum der FFB mit Wasser, Schwerschaum, Wasser/Tensid-Gemisch oder Wasser/Salz-Lösung [7, 8]	61
Tabelle 3:	Brand- und Löschversuche im 12,8 m²- und im 21 m²-Modellraum der FFB mit Wasser/Salz-Lösung, Wasser/Quellkörper-Gemisch oder Wasser [1, 8]	62
Tabelle 4:	Brand- und Löschversuche im 25 m²-Modellraum der FFB mit Druckluftschaum (* mit einer Pause von 0,8 min bzw. 1,7 min zwischen Haupt- und Nachlösch-Phase)	63
Tabelle 5:	Die Löschwasser-Effizienz bei Wohnungsbränden mit etwa 740 kg Altmöbeln als Brandlast und 7 MW freigesetzter Wärme [1]	64
Tabelle 6:	Die Anwendungsgrenzen des Sprühstrahls zu Beginn des Löschens in Abhängigkeit vom Brandstadium	65
Bild 1:	Das Funktionsschema des Druckluftschaum-Löschverfahrens [39]	66
Bild 2:	Der Grundriß, die Instrumentierung und die Möblierung (z.B. Versuch SCH 3) des Brandraumes in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik	67
Bild 3:	Die Möblierung des Brandversuchsraumes – hier beispielsweise für Versuch SCH 3	68
Bild 4:	Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots \vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²– Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs SCH 1 – aufgetragen über der Versuchszeit	69
Bild 5:	Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots \vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²– Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs SCH 2 – aufgetragen über der Versuchszeit	70

Bild 6:	Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots \vartheta_{FS}(t)$ der 6 im 25 m²– Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs HZ 1 – aufgetragen über der Versuchszeit.	71
<u>Bild 7:</u>	Die Temperatur-Kurven $9_{Mu}(t)\cdots 9_{FS}(t)$ der 8 im $25m^2-$ Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve $m(t)$ während des DLS-Versuchs SCH 3 – aufgetragen über der Versuchszeit	72
Bild 8:	Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots\vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²– Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs HZ 2 – aufgetragen über der Versuchszeit.	73
Bild 9:	Charakteristische Photographien vom Brandverlauf der DLS-Versuche (z.B. Versuch SCH 2) im 25 m²–Modellraum der FFB	74
Bild 10:	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)	75
Bild 11:	Die Reichweite eines DLS- und eines Wasser-Vollstrahles bei 5 bar Arbeitsdruck und 36 mm Mündungs-Durchmesser [19]	76
Bild 12:	Charakteristische Photographien vom Brandverlauf der DLS-Versuche im 25 m²–Modellraum der FFB – unmittelbar vor und nach dem Flash-over	77
Bild 13:	Die rotationssymmetrische Flammenfront vor dem Brandraum- Fenster beim DLS-Versuchs SCH 1 – 1½ Sekunden nach dem Beginn des Löschens	78

Die in diesem Bericht nur schwarz/weiß wiedergegebenen Graphiken und Photographien – einschl. einer ppt-Sequenz vom Verlauf des ersten DLS-Löschversuchs – können gegen 5 Euro bei der Forschungsstelle (Adresse sh. Berichts-Kennblatt) auf CD in mehrfarbiger Ausführung bezogen werden.

<u>Tabelle 1:</u> Brand- und Löschversuche im 12,8 m²–Modellraum der FFB mit Wasser, Wasser/Tensid-Gemisch oder Mittelschaum [7]

Quelle		[7] Versuch 5	[7] Versuch 6	[7] Versuch 7	[7] Versuch 8	[7] Versuch 9
Brandgut		Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel
	ndgut, Masse [kg]	383	381	379	379	378
	h-over [min]	9	23	12	7	9,5
Löso	chbeginn [min]	22,8	34,1	23,9	19,2	23,6
Abb	randgeschwind. [kg/min]	11,6	12,3	12,6	11,8	11,3
Wär	mestrom \dot{Q}_{max} [kW]	2.400	2.600	2.700	2.500	2.400
Stral	hlrohr	C-MR	D-MR	C-MR	C-MR	Schaum-R.
Löso	chmittel	Wasser	Wasser	Wasser + Tensid	Wasser	Mittel- schaum
Druc	ck [bar]	5	5	5	5	./.
Dure	chfluß, max. [L/min]	100	25	100	100	400
	Abkühlung [°C]	750 ¥ 100	700 ¥ 200	800 ¥ 100	670 אַ 100	730 צו 100
မ	Dauer t _H [min]	7	7,5	6	6,6	0,62
has	Wasser, gesamt [L]	221	142	193	228	250
chp	Zusatz [%]	./.	./.	1	./.	3
tlös	Verschäumungszahl E	./.	./.	./.	./.	40
Hauptlöschphase	Wasser, geb.+durch.[L]	122	47	99	129	166
H	Wasser, verdampft [L]	99	95	94	99	84
	Wärmeentzug [kJ]	257.000	246.000	244.000	257.000	218.000
	Abkühlung [°C]	./.	200 צו 100	./.	./.	./.
_	Dauer [min]	./.	0,5	./.	./.	./.
Nachlöschen	Wasser, gesamt [L]	./.	10	./.	./.	./.
ılöse	Zusatz [%]	./.	./.	./.	./.	./.
lack	Verschäumungszahl E	./.	./.	./.	./.	./.
2	Wasser, geb.+durch.[L]	./.	3	./.	./.	./.
	Wasser, verdampft [L]	./.	7	./.	./.	./.
	Ges.versuchszeit [min]	29,8	42,1	29,9	25,8	24,2
	Löschzeit t _L [min]	7	8	6	6,6	0,62
nt	Wasser, gesamt [L]	221	152	193	228	250
Gesamt	Wasser, geb.+durch.[L]	122	50	99	129	166
Ğ	Wasser, verdampft [L]	99	102	94	99	84
	Wasser, verdampft [%]	45	67	49	43	34
	Wärmeentzug [kJ]	257.000	264.000	244.000	257.000	218.000

<u>Tabelle 2:</u> Brand- und Löschversuche im 12,8 m²-Modellraum der FFB mit Wasser, Schwerschaum, Wasser/Tensid-Gemisch oder Wasser/Salz-Lösung [7, 8]

Oug	110	[7]	[8]	[8]	[8]	[8]
Que	ne	Vers.5+8	Versuch 1	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5
Bran	Brandgut		Möbel	Möbel	Möbel	Möbel
Bran	ndgut, Masse [kg]	381	382	383	380	382
Flas	h-over [min]	8	4	14	10,5	19
Löso	chbeginn [min]	21	15,5	25,3	23,6	27,7
Abb	randgeschwind. [kg/min]	11,7	15	12,4	10,12	12,2
Wär	mestrom \dot{Q}_{max} [kW]	2.500	3.200	2.600	2.100	2.600
Stral	hlrohr	C-MR	Schaum-R.	C-MR	C-MR	D-MR
Lösc	chmittel	Wasser	Schwer- schaum	Wasser + Fluortensid	Wasser +	$(NH_4)_2SO_4$
Druc	ck [bar]	5	./.	5	5	5
Dure	chfluß, max. [L/min]	100	200	100	100	25
	Abkühlung [°C]	710 ¥ 100	730 ¥ 100	800 ¥ 100	800 ¥ 200	750 ¥ 200
e	Dauer t _H [min]	6,8	3	4	5	6
Hauptlöschphase	Wasser, gesamt [L]	224,5	170	180	115	110
chp	Zusatz [%]	./.	3,5	5	10	10
tlös	Verschäumungszahl E	./.	10	./.	./.	./.
laup	Wasser, geb.+durch.[L]	125,5	62	79	62	47
H	Wasser, verdampft [L]	99	108	101	53	63
	Wärmeentzug [kJ]	257.000	280.000	262.000	137.000	163.000
	Abkühlung [°C]	./.	./.	./.	200 צו 100	200 בי
1	Dauer [min]	./.	./.	./.	2,5	2
Nachlöschen	Wasser, gesamt [L]	./.	./.	./.	55	38
ılös	Zusatz [%]	./.	./.	./.	10	10
Vac	Verschäumungszahl E	./.	./.	./.	./.	./.
_	Wasser, geb.+durch.[L]	./.	./.	./.	31	16
	Wasser, verdampft [L]	./.	./.	./.	24	22
	Ges.versuchszeit [min]	27,8	18,5	29,3	31,1	35,7
	Löschzeit t _L [min]	6,8	3	4	7,5	8
nt .	Wasser, gesamt [L]	224,5	170	180	170	148
Gesamt	Wasser, geb.+durch.[L]	125,5	62	79	93	63
Ğ	Wasser, verdampft [L]	99	108	101	77	85
	Wasser, verdampft [%]	44	64	56	45	57
	Wärmeentzug [kJ]	257.000	280.000	262.000	200.000	220.000

<u>Tabelle 3:</u> Brand- und Löschversuche im 12,8 m²– und im 21 m²–Modellraum der FFB mit Wasser/Salz-Lösung, Wasser/Quellkörper-Gemisch oder Wasser [1, 8]

Quelle		[8]	[8]	[1]	[1]	[1]	
Que		Vers. 6+7	Versuch 8	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	
Brar	ndgut	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	
Brar	ndgut, Masse [kg]	381,5	383	370	749	756	
Flas	h-over [min]	8,75	6	7,1	7,5	6	
Löso	chbeginn [min]	23,6	19,3	18,3	16,5	21	
Abb	randgeschwind. [kg/min]	9	10,3	13,7	36,7	40,6	
Wär	mestrom \dot{Q}_{max} [kW]	1.900	2.200	2.900	7.800	8.600	
Stral	hlrohr	C-MR	C-MR	C-MR	C-MR	C-MR	
Löso	chmittel	Wasser + (NH ₄) ₂ HPO ₄	Wasser + Quellkörper	Wasser	Wasser + Quellkörper	
Druc	ck [bar]	5	5	5	5	5	
Dure	chfluß, max. [L/min]	100	100	100	100	100	
	Abkühlung [°C]	770 צ 100	100 ע 750	100 א 100	1030 בי 160	200 لا 930	
e	Dauer t _H [min]	3,75	1,7	4	2	2	
has	Wasser, gesamt [L]	123,5	57	142	140	120	
chp	Zusatz [%]	5	20	0,55	./.	0,5	
Hauptlöschphase	Verschäumungszahl E	./.	./.	./.	./.	./.	
laup	Wasser, geb.+durch.[L]	43	10	55	65	21	
H	Wasser, verdampft [L]	80,5	47	87	75	99	
	Wärmeentzug [kJ]	209.000	122.000	226.000	194.000	257.000	
	Abkühlung [°C]	./.	./.	./.	160 ¥ 75	200 🗵 100	
U	Dauer [min]	./.	./.	./.	11,5	8,5	
Nachlöschen	Wasser, gesamt [L]	./.	./.	./.	120	43	
ılös	Zusatz [%]	./.	./.	./.	./.	0,5	
Vach	Verschäumungszahl E	./.	./.	./.	./.	./.	
	Wasser, geb.+durch.[L]	./.	./.	./.	105	34	
	Wasser, verdampft [L]	./.	./.	./.	15	9	
	Ges.versuchszeit [min]	27,35	21	22,3	30	31,5	
	Löschzeit t _L [min]	3,75	1,7	4	13,5	10,5	
nt	Wasser, gesamt [L]	123,5	57	142	260	163	
Gesamt	Wasser, geb.+durch.[L]	43	10	55	170	55	
Ğ	Wasser, verdampft [L]	80,5	47	87	90	108	
	Wasser, verdampft [%]	65	82	61	35	66	
	Wärmeentzug [kJ]	209.000	122.000	226.000	233.000	280.000	

Tabelle 4: Brand- und Löschversuche im 25 m²-Modellraum der FFB mit Druckluftschaum (* mit einer Pause von 0,8 min bzw. 1,7 min zwischen Haupt- und Nachlösch-Phase)

Quelle		SCH 1	SCH 2	HZ 1	SCH 3	HZ 2
Bran	ndgut	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel	Möbel
Bran	ndgut, Masse [kg]	730	731	731	729	730
Flas	h-over [min]	8,1	14,7	4,7	9,9	6,7
Löse	chbeginn [min]	17,7	22,4	14,6	17,7	16,7
Abb	randgeschwind. [kg/min]	30,7	27,6	34,2	34,8	28,2
Wär	mestrom \dot{Q}_{max} [kW]	6.500	5.800	7.200	7.300	6.000
Stra	hlrohr			Hohlstrahl		
	chmittel schäumungszahl E	DLS 12…9	DLS 15…8	DLS 5	DLS 7	DLS 7···20
Dru	ck [bar]	7	7	5	8	5
Dur	chfluß, Schaum [L/min]	220	330	60	230	150
	Abkühlung [°C]	800 ⋈ 300	800 🗵 230	810 🗵 200	790 🗵 200	940 🗵 200
e e	Dauer t _H [min]	2,6	3,8	10,8	3,7	5,6
has	Wasser, gesamt [L]	150	235	270	145	254
Hauptlöschphase	Schaummittel [%]	0,4	0,3	1	0,3	2
tlös	Verschäumungszahl E	12	14,8	5,2	7	6,6
laup	Wasser, geb.+durch.[L]	73	100	34	72	39
H	Wasser, verdampft [L]	77	135	236	73	215
	Wärmeentzug [kJ]	200.000	350.000	612.000	189.000	557.000
	Abkühlung [°C]	300 ¥ 70	130 لا 230	200 בי 130	200 בי 140	200 בי 130
u	Dauer [min]	30,2	11,4	13,6	6,6	10
löschen	Wasser, gesamt [L]	572	175	3	197	66
ılös	Schaummittel [%]	0,4	0,3	1	0,3	2
Nachl	Verschäumungszahl E	9,5	8,6	5,2	7	20
	Wasser, geb.+durch.[L]	305	100	0	148+10	10
	Wasser, verdampft [L]	267	75	3	49	56
	Ges.versuchszeit [min]	51,3*	39,4*	39	28	32,3
	Löschzeit t _L [min]	32,8	15,2	24,4	10,3	15,6
π	Wasser, gesamt [L]	722	410	273	342	320
Gesamt	Wasser, geb.+durch.[L]	378	200	34	220+10	49
Ğ	Wasser, verdampft [L]	344	210	239	112	271
	Wasser, verdampft [%]	48	51	88	33	85
	Wärmeentzug [kJ]	892.000	544.000	619.000	290.000	702.000

<u>Tabelle 5:</u> Die Löschwasser-Effizienz bei Wohnungsbränden mit etwa 740 kg Altmöbeln als Brandlast und 7 MW freigesetzter Wärme [1]

	Versuch		2 [1]	3 [1]	SCH 1	SCH 2	HZ 1	SCH 3	HZ2	Mittel- wert
1	Löschverfahren		C-MR		DLS, Hohlstrahlrohr			nr		
2	Löschmittel, Verschäumungszahl	Е	Wasser	W+Qk	129	158	5	7	720	
3	Löschdauer	[min]	13,5	10,5	32,8	15,2	24,4	10,3	15,6	13,7
4	Gesamt-Löschwasserverbrauch	[L]	260	163	722	410	273	342	320	336
5	gebundenes u. durchgetropftes Löschw.	[L]	170	55	378	200	34	220+10	49	128
6	verdampftes Löschwasser	[L]	90	108	344	210	239	112	271	208
7	wirksamer Anteil	[%]	35	66	48	51	88	33	85	64
8	Gesamtverbrauch / 260	[%]	100	63	278	158	105	132	123	130

<u>Tabelle 6:</u> Die Anwendungsgrenzen des Sprühstrahls zu Beginn des Löschens in Abhängigkeit vom Brandstadium

	Vorraum	Dec Leichtbauweise (Übungscontainer)	Brandgut	
vor Flash-over		kühlt die Decke und die Rauchgase dort	kühlt die Decke und die Rauchgase dort unter ihre Zündtemperatur	
kurz nach Flash-over	kühlt den gesamten Vorraum und die Tür	unter ihre Zünd- temperatur kann Dampfexplosion mit Stichflamme und Verbrühungsgefahr verursachen		kühlt die Atmosphäre und beginnt den Brand zu
Vollbrand nach Flash- over bei etwa 40% Abbrand	zum Brand- raum	unter Verbrühungs- gefahr werden die Decke und die Rauchgase dort unter ihre Zünd- temperatur gekühlt	verursacht Dampf- explosion mit Stich- flamme und Verbrü- hungsgefahr	löschen

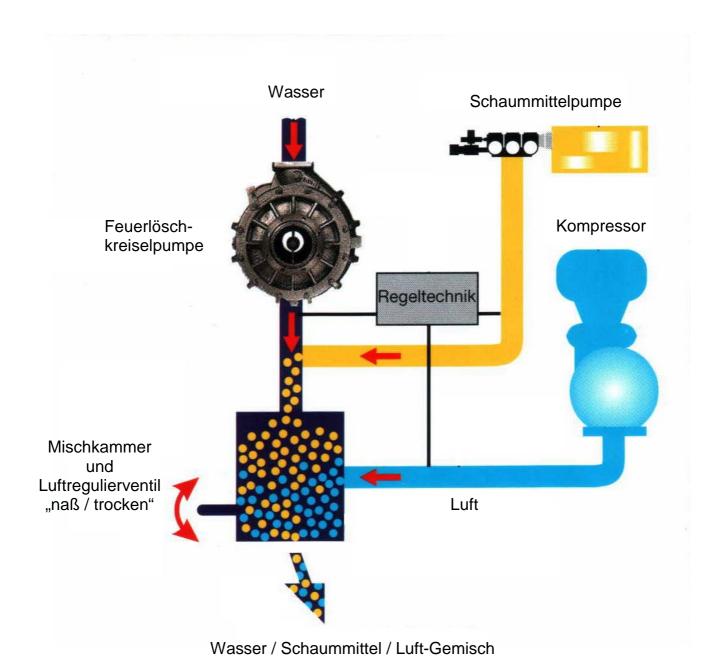


Bild 1: Das Funktionsschema des Druckluftschaum-Löschverfahrens [39]

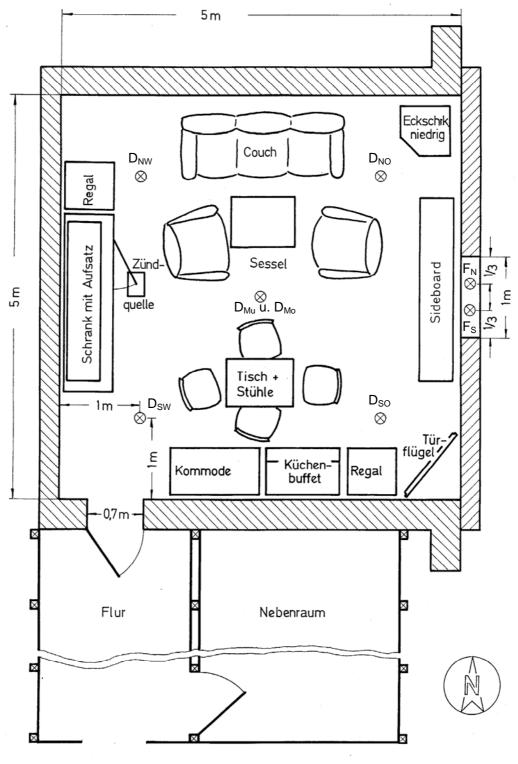


Bild 2: Der Grundriß, die Instrumentierung und die Möblierung (z.B. Versuch SCH 3) des Brandraumes in der Versuchshalle der Forschungsstelle für Brandschutztechnik





die West - Wand

die Nord - Ost - Ecke



die Süd - West - Ecke



<u>Bild 3</u>: Die Möblierung des Brandversuchsraumes – hier beispielsweise für Versuch SCH 3

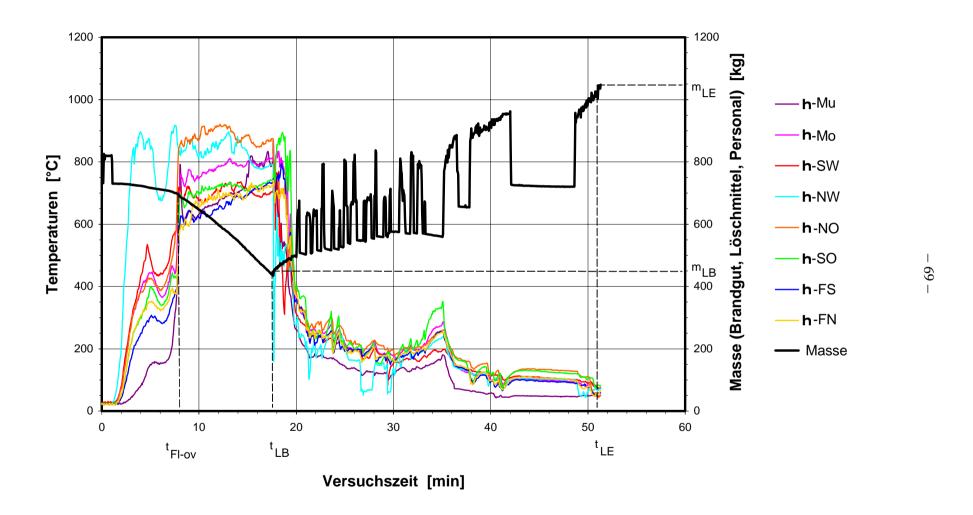
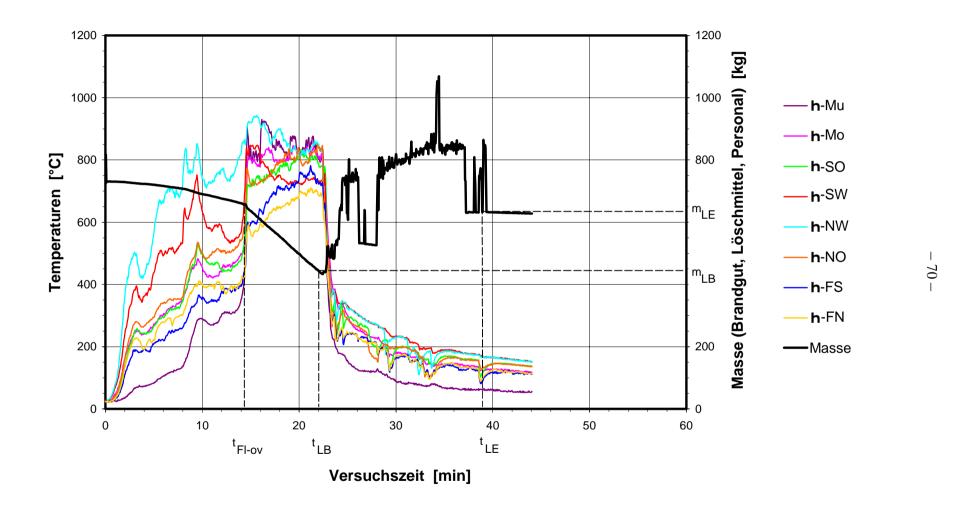
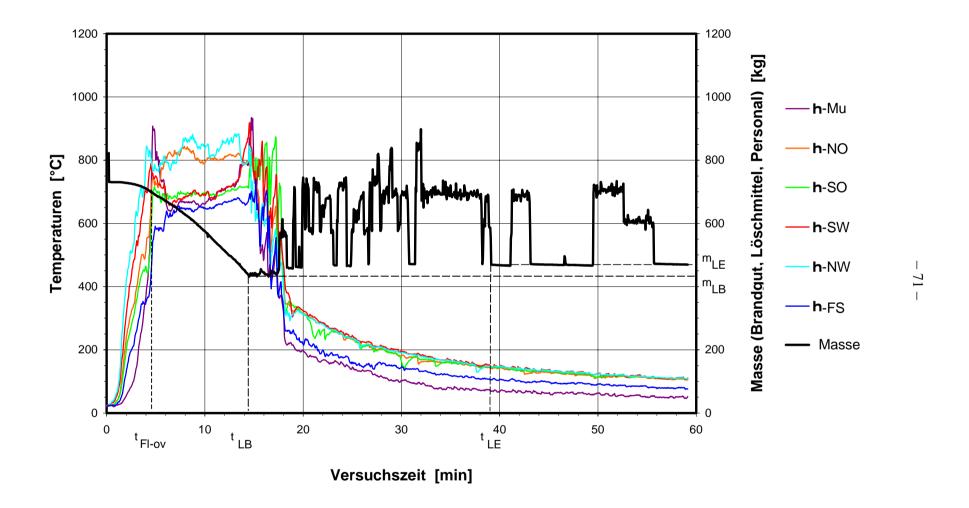


Bild 4: Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots \vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²-Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs SCH 1 – aufgetragen über der Versuchszeit



<u>Bild 5:</u> Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots \vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²-Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs SCH 2 – aufgetragen über der Versuchszeit



 $\frac{Bild \ 6:}{Die \ Temperatur-Kurven} \ \ \vartheta_{Mu}(t)\cdots\vartheta_{FS}(t) \ der \ 6 \ im \ 25 \ m^2-Modellraum \ der \ FFB \ installierten \ Thermoelemente \ und \ die \ Abbrand-Kurve \ m(t) \ während \ des \ DLS-Versuchs \ HZ \ 1 - aufgetragen \ "über \ der \ Versuchszeit$

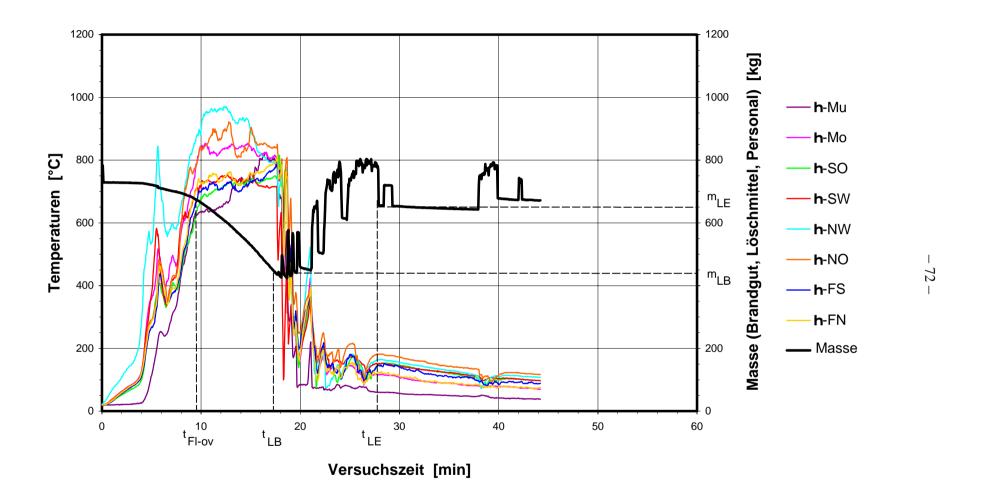
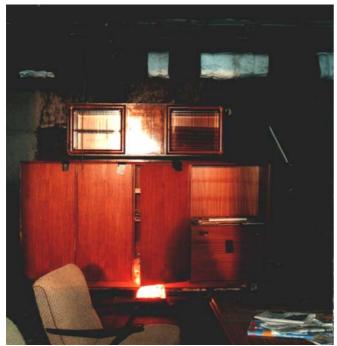


Bild 7: Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots \vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²-Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs SCH 3 – aufgetragen über der Versuchszeit

73 –

Bild 8: Die Temperatur-Kurven $\vartheta_{Mu}(t)\cdots\vartheta_{FS}(t)$ der 8 im 25 m²-Modellraum der FFB installierten Thermoelemente und die Abbrand-Kurve m(t) während des DLS-Versuchs HZ 2 – aufgetragen über der Versuchszeit





10:48 Uhr, Δt=0: Zündung

10:53 Uhr, Δt=5 min

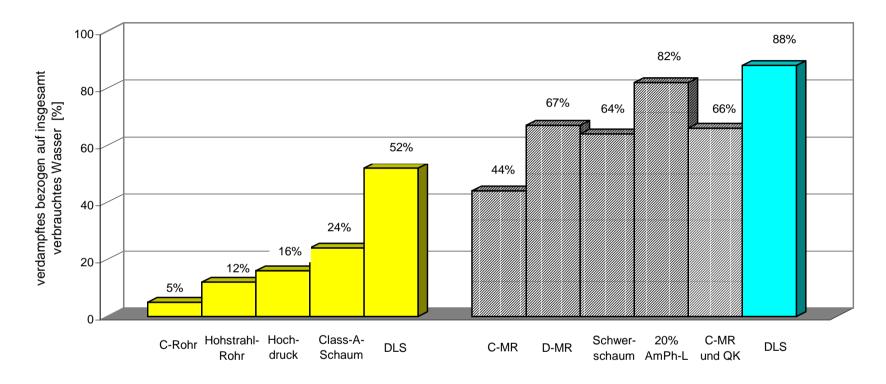


10:58 Uhr, Δt=10 min



11:10:27 Uhr, Δt=22:27 min: 3 sec nach Löschbeginn

<u>Bild 9:</u> Charakteristische Photographien vom Brandverlauf der DLS-Versuche (z.B. Versuch SCH 2) im 25 m²–Modellraum der FFB



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

<u>Bild 10:</u> 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)



<u>Bild 11:</u> Die Reichweite eines DLS- und eines Wasser-Vollstrahles bei 5 bar Arbeitsdruck und 36 mm Mündungs-Durchmesser [19]





Bild 12: Charakteristische Photographien vom Brandverlauf der DLS-Versuche im 25 m²-Modellraum der FFB – unmittelbar vor und nach dem Flash-over



Bild 13: Die rotationssymmetrische Flammenfront vor dem Brandraum-Fenster beim DLS-Versuchs SCH 1 – $1\frac{1}{2}$ Sekunden nach dem Beginn des Löschens