



Technischer Bericht

DRUCKLUFTSCHAUM (DLS)

Oktober 2010

Der vorliegende Technische Bericht wurde vom Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenabwehr“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der vfd/b unter Mitwirkung weiterer, externer Brandschutzexperten erarbeitet. Er befasst sich mit der Erzeugung, mit der Wirkungsweise und mit der Anwendung von Druckluftschäum (DLS), auch CAF (Compressed-Air-Foam) genannt, zum Löschen.

Initiiert wurde dieser Bericht unter anderem durch einen tragischen Unfall im Dezember 2005, der bezüglich der Sicherheit des eingesetzten Schlauchmaterials bei Verwendung von DLS im Innenangriff Bedenken auslöste.

Um dem Sicherheitsbedürfnis der Anwender Genüge zu tun, erhielt die Forschungsstelle für Brandschutztechnik vom AFKzV den Auftrag, die thermische Belastbarkeit von DLS führenden Feuerwehrschräuchen zu untersuchen. Von der vfd/b erhielt sie den Folgeauftrag, auch höherwertige Schläuche in diese Untersuchung einzubeziehen.

Feuerwehren der Bundesländer Bayern, Berlin und Hessen, unterstützt durch das bayerische Innenministerium und den GUVV Bayern, erarbeiteten eine vergleichende Risikoanalyse basierend auf dem Stand der Technik und unter Einbeziehung der vorliegenden Forschungsergebnisse, in der festgestellt wird, dass beim Löschen mit DLS für die Einsatzkräfte kein erhöhtes Gefährdungspotential besteht.

Der TWB legt in diesem Bericht dar, dass das DLS-Löschverfahren eine angemessene und erfolgversprechende Methode ist, um Brände im Außen- und im Innenangriff zu bekämpfen – besonders wenn sie problematisches Brandgut enthalten. Der Bericht zeigt, dass das DLS-Löschverfahren unter den üblichen Einsatzbedingungen sicher ist.

Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenabwehr“ (BG)
des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates
der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
Postfach 1231, 48338 Altenberge

Hinweis:

Bei der Erstellung des vorliegenden Technischen Berichtes wurden hinsichtlich der zu erwartenden Einsatzszenarien weder die äußerst seltenen Ereignisse mit außerordentlichem Ausmaß „worst case“ noch lediglich die häufigen Einsätze mit sehr geringem Ausmaß „simplest case“ berücksichtigt.

Dementsprechend werden in diesem Technischen Bericht die Risiken im praktischen Feuerwehreinsatz unter normalerweise zu erwartender Eintrittswahrscheinlichkeit betrachtet.

Haftungsausschluss: Dieses Dokument wurde von den Experten der vfdb sorgfältig erarbeitet und **soll vom Präsidium der vfdb verabschiedet werden**. Der Anwender muss die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung und die Eignung für seinen Fall in eigener Verantwortung prüfen. Eine Haftung der vfdb und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

Vertragsbedingungen: Die vfdb verweist auf die Notwendigkeit, bei Vertragsabschlüssen unter Bezug auf vfdb-Dokumente die konkreten Leistungen gesondert zu vereinbaren. Die vfdb übernimmt keinerlei Regressansprüche, insbesondere auch nicht aus unklarer Vertragsgestaltung.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	5
2.	Druckluftschäum	6
2.1	Historische Entwicklung	6
2.2	Nomenklatur und technische Anforderungen	8
2.3	Löschwirkung	10
2.4	Vor- und Nachteile der Druckluftschäum-Technik	14
2.5	Hinweise für den Anwender – Applikationsraten	18
2.6	Brandrauchkühlung zur Bekämpfung von Flash-over und Back-draft	20
3.	Anforderungen an Schaummittel	22
4.	Risikobetrachtungen	23
4.1	Die Ergebnisse der Schlauchuntersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB)	23
4.1.1	Die Versuchsaufträge an die FFB und die Versuchsvorbereitung.....	23
4.1.2	Die Ergebnisse der Schlauchuntersuchungen an der FFB zu Schläuchen der Klasse 1	25
4.1.3	Die Ergebnisse der Schlauchuntersuchungen mit Schläuchen der Klassen 2 und 3 sowie die Reaktion von Schläuchen auf zusätzliche thermische Beanspruchung durch Kontakt mit heißen Flächen	27
4.2	Gefährdungsbeurteilung Druckluftschäum	29
4.2.1	Bedienungssicherheit	29
4.2.2	Ausfall der Druckzumischanlage oder der Druckluftschäumenanlage	30
4.2.3	Ausfall der Feuerlöschkreiselpumpe	31
4.2.4	Versagen der Schlaucheinbindung	31
4.2.5	Versagen des Verteilers	32
4.2.6	Arbeiten mit Schläuchen	32
4.2.7	Ungewolltes Öffnen der Schlauchkupplungen	33
4.2.8	Arbeiten mit Strahlrohren	34
4.2.9	Innere Druckstöße	34
4.2.10	Unterschreiten der erforderlichen Applikationsrate	35
4.2.11	Überschreiten der erforderlichen Applikationsrate	36
4.2.12	Mechanische Einwirkung von außen	36
4.2.13	Versagen der Schlauchleitung infolge thermischer und mechanischer Überbelastung	37
4.2.14	Extrem hohe Brandlast	38
4.2.15	Hohlräume im Brandbereich	38
4.2.16	Elektrische Anlagen	39
4.2.17	Brennbare Flüssigkeiten	39
4.2.18	Metallbrände	40
5.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für den Feuerwehreinsatz	40
6.	Literatur- und Quellenverzeichnis	45
7.	Verzeichnis der Tabellen und Bilder	50
8.	Anhang Schlauchuntersuchungen an der FFB	71

Tabelle 1: Zusammenstellung und Erläuterung der verwendeten Abkürzungen und Fachausdrücke

Zeichen	Erläuterung	Maß
	konventioneller Schaum = Verschäumen von Löschmittel (produziert mit Z-Zumischer oder DZA) im Luftschaumrohr	
	Löschmittel = Gemisch aus Löschwasser und Schaummittel zum Löschen von Bränden der Klasse A	[L]
	Löschmittel-Nennförderstrom = \dot{V}_{LM} bei Anlagen-Nenndruck	[L/min]
	Nass-Schaum = Schaum mit $4 \leq E \leq 11$	
	Trocken-Schaum = Schaum mit $11 < E$	
	Verschäumungszahl = Expansionsverhältnis (sh. unten)	
	Volumenverhältnis Luft/Löschmittel = $V_{Luft} / V_{LM} = E - 1$	
	Zumischrate = Anteil des Schaummittels im Löschwasser	[%]
D_i	Schlauch-Innendurchmesser	[mm]
DLS	Druckluftschaum (-anlage)	
DZA	Druckzumisanlage	
E	Expansionsverhältnis = Verschäumungszahl = $V_{Schaum} / V_{LM} = (V_{Luft} + V_{LM}) / V_{LM} = V_{Luft} / V_{LM} + 1$	
E_p	Expansionsverhältnis unter Druck = $(E - 1 + p) / p$	
MAR	minimale Applikationsrate = erforderliche Löschmittelaufgabe je Flächen- und Zeiteinheit	[L/m ² ·min]
p_{fi}	<i>absoluter</i> Löschmittel-Förderdruck bei offenem Strahlrohr, gemessen am Ausgang des DLS-Aggregates	[bar]
$p_{i,berst}$	Berst-Innendruck, <i>absolut</i>	[bar]
p_{schl}	<i>absoluter</i> Löschmittel-Druck bei geschlossenem Strahlrohr, gemessen am Ausgang des DLS-Aggregates	[bar]
s	Schlauch-Wandstärke (Gewebe)	[mm]
σ_{Bruch}	Bruchspannung	[N/mm ²]
t	Versuchszeit	[min]
$t_{50\%}$	Entwässerungs-Halbzeit – die Zeit, in der die Hälfte des im Schaum gebundenen Wassers bzw. Löschmittels ausfällt	[min]
ϑ_{Mat}	Materialtemperatur	[°C]
V_{LM}	Volumen des im Schaum gebundenen Löschmittels	[L]
V_{Luft}	Volumen der im Schaum gebundenen Luft im Normzustand	[L]
V_{Schaum}	$V_{Luft} + V_{LM}$	[L]
\dot{V}_L	Luft-Förderstrom bezogen auf den Normzustand	[L/min]
\dot{V}_{LM}	Löschmittel-Förderstrom	[L/min]
$\dot{V}_{Schaum,p}$	Schaum-Volumenstrom unter Betriebsdruck, <i>absolut</i>	[L/min]

1. Einleitung

Das Druckluftschäum-Löschverfahren führt immer wieder zu kontroversen Diskussionen. Die Verbreitung des Systems in Deutschland ist regional sehr verschieden. Aufgrund eines tragischen Unfalls in Tübingen im Jahre 2005, bei dem ein mit Druckluftschäum gefüllter Feuerwehr-Druckschlauch platzte, wurde die Diskussion zusätzlich angeregt. Die Untersuchungskommission stellte keinen ursächlichen Zusammenhang zwischen dem Unfall und dem Löschverfahren fest und sieht keinen Grund auf den Einsatz von DLS zu verzichten. Dennoch bestehen Fragen bezüglich der Temperatur- und Druckfestigkeit von Feuerwehr-Druckschläuchen.

Eine umfassende Bewertung des DLS- Löschverfahrens ist bisher nicht erfolgt. Deshalb hat sich das Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenabwehr“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) zum Ziel gesetzt,

- die seit 1997 in der Praxis gewonnenen Erfahrungen,
- die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen,
- eine vergleichende Risikoanalyse und
- die sachgerechte Anwendung von DLS

zusammenfassend darzustellen. Dieser Technische Bericht soll dazu beitragen, der Auseinandersetzung mit dem System Druckluftschäum eine tragfähige Grundlage zu schaffen und Fehlanwendungen zu vermeiden. Die vfdb hat die Erstellung dieses Technischen Berichtes unterstützt und zusätzliche Mittel aus der Wirtschaft eingeworben.

Wesentliche Grundlagen dieses Berichtes sind

- der Forschungsbericht Nr. 150 „Untersuchungen der Haltbarkeit von Druckluftschäum führenden Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden“ der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) an der Universität Karlsruhe [2],
- die Ergebnisse der durch den TWB in Auftrag gegebenen weiteren Untersuchungen von höherwertigen Feuerwehrschräuchen mit DLS und Wasser auch bei Wärmeübertragung durch Berührung und
- die von Feuerwehren der Bundesländer Bayern, Berlin und Hessen mit Unterstützung des bayerischen Staatsministeriums des Inneren und des bayerischen Gemeindeunfallversicherungsverbandes erstellte, vergleichende Gefährdungsbeurteilung für Wasser, Wasser /Schäummittel-Gemisch und Druckluftschäum bei der Löschmittelaufbringung [3].

Nachdem mit der DIN 14430 „Druckzumischanlagen und Druckluftschaumanlagen“ [4] die Druckluftschäum-Erzeugung normiert wurde, klammerte die DIN 14811 „Feuerlöschschläuche“ in der Fassung vom Juli 2007 [5] den Betrieb der gebräuchlichen Feuerlöschschläuche mit Druckluftschäum aus. Eine derzeit in Bearbeitung befindliche Neufassung sieht aber eine Korrektur dieses, für den Anwender unbefriedigenden Zustands, vor. Daher kommt dem vorliegenden Technischen Bericht besondere Bedeutung zu.

Angesichts der komplexen Materie und der bei einigen Sachverhalten andauernden Diskussion und Entwicklung kann dieser Technischen Berichte noch nicht allen Erwartungen gerecht werden. Konkrete Anwendungen der beschriebenen Methoden werden hier und da Lücken, im Einzelfall auch Widersprüche sichtbar werden lassen, die zeitnah aufgefüllt beziehungsweise aufgelöst werden sollen.

Deshalb sind alle Leser dieses Technischen Berichtes wieder herzlich eingeladen, ihre Kommentare zur Anwendbarkeit von DLS, zu entdeckten Fehlern und zu offenen Fragen an die Homepage des Referates 5 des TWB der vfdB zu richten.

2. Druckluftschäum

2.1 Historische Entwicklung

Mit zunehmender Verwendung von Mineralölprodukten entstand auch die Notwendigkeit, ein wirksames Verfahren zum Löschen von Bränden dieser Produkte zu entwickeln, denn Wasser ist schwerer als viele brennbare Flüssigkeiten und versinkt ohne Löschwirkung. Es ist deshalb zum Löschen von Klasse- B- Bränden ungeeignet. Auch zum Löschen von Klasse- A- Bränden ist es ungeeignet, wenn sie Kunststoffartikel oder Autoreifen enthalten, die sich wegen ihrer wasserabweisenden (hydrophoben) Oberfläche vom Wasser nicht benetzen lassen [6].

Die Entwicklung der Schaumlöschgeräte begann im Jahr 1877. Bedeutsam ist die damalige Erkenntnis, dass durch hinzufügen organischer Substanzen (insbesondere aus der Seifenproduktion) zum Löschwasser eine erstens schwimmfähige, unbrennbare Schicht mit geringem Volumengewicht entsteht, die zweitens auf wasserabstoßenden Oberflächen nicht abperlt. Bei der Reaktion von Aluminiumsulfat mit Natriumhydrogencarbonat entstand Kohlendioxidgas, das mit dem Wasser/Kohlenwasserstoff-Gemisch einen zähflüssigen, feinblasigen Schäum mit hoher

Entwässerungs-Halbzeit erzeugte, der in der Lage war, die brennende Flüssigkeit vom Luftsauerstoff zu trennen und oberflächlich zu kühlen [7].

Der hohe Aufwand und die damit verbundenen Kosten führten 1923 zu einer neuen Entwicklung, bei der als Füllgas die Umgebungsluft verwendet wurde. Damit war die Grundlage für das Luftschaumverfahren gelegt. Eine lebhafte Diskussion entstand darüber, ob die in den Schaumblasen eingeschlossene Luft den Brand anfachen würde. Weltweite Verwendung fand das 1932 entwickelte „Komet“- Luftschaumrohr: Dem Löschwasser wird über einen nach dem Unterdruckprinzip arbeitenden Zumi-scher ein Schaummittel zugesetzt; am Luftschaumrohr wird nach dem gleichen Prin-zip Umgebungsluft in das Wasser/Schaummittel-Gemisch gesaugt und mit ihm ver-wirbelt, wodurch der Löschschaum erzeugt wird [8].

Anfang der 20-er Jahre wurde in Dänemark ein Kompressor/Luftschaum-Aggregat entwickelt. Dieses bestand aus einer Kreiselpumpe, einem Kompressor und einer rotierenden Schaumpeitsche: Die Kreiselpumpe fördert das Wasser, ein Schaummittel reduziert seine Oberflächenspannung, der Kompressor fördert Druckluft in das Wasser/Schaummittel-Gemisch und die rotierende Peitsche sorgt für ausreichende Verwirbelung zur Erzeugung von Schaumblasen. Der Fertigschaum kann bereits am Systemausgang abgenommen werden. Heutige Systeme zur Schaumproduktion sind unter der Bezeichnung „Druckluftschaum-Anlage“ (DLS) oder „CAFS“ (Compressed-Air-Foam-System) bekannt und gewinnen in Europa seit 1997 wieder an Bedeutung.

Die Vorbereitungen zum 2. Weltkrieg führten zu einer Typenreduzierung bei den Fahrzeugen und ebenso bei der Löschtechnik. Die Vorgaben für die Löschtechnik waren: einheitlich, einfach und große Stückzahlen. Deshalb ist es verständlich, dass das technisch einfache Luftschaumrohr den Vorzug erhielt und nicht das aufwendige und teure Druckluftschaum-Verfahren.

In Großbritannien und Deutschland setzte man die Druckluftschaum-Technik verein-zelt auf Schiffen und Lokomotiven ein. Ab 1930 verwendete die British Royal Navy und die US Navy Druckluftschaum probeweise zur Bekämpfung von Flüssigkeits-bränden.

Ab der Mitte der 70-er Jahre kam diese Technik in den USA bei der Waldbrandbe-kämpfung zur Anwendung [9]. Verschiedentlich besteht die Auffassung, dass in den USA Druckluftschaumsysteme nicht zur Gebäudebrandbekämpfung, sondern nur für die Wald- und Flächenbrandbekämpfung herangezogen werden. Dies ist nur teilwei-

se richtig, weil es dort zwar viele Systeme ausschließlich für diesen Einsatzzweck gibt. Es gibt aber auch eine große Anzahl von Anlagen in Standard-Löschfahrzeugen der kommunalen Feuerwehren, welche für den Innenangriff verwendet werden.

Verbesserte Schaummittel, die Entwicklung der Druckzumischanlagen und Fortschritte bei der Mess-, Steuer- und Regeltechnik ermöglichten es, ab etwa 1990 Druckluftschaumanlagen zu bauen, die sicher, zuverlässig und ohne ständiges Eingreifen des Bedienenden funktionierten. Die Technik sorgte nun dafür, dass z.B. die Ausgangsdrücke der Feuerlöschkreiselpumpe und des Druckluftkompressors konstant gehalten werden konnten und unerwünschte Betriebszustände vermieden werden.

- 1920: Entwicklung des ersten Kompressor-Luftschäum-Aggregats.
- 1930: Die British Royal Navy testet Schaummittel und verschäumt diese mit Druckluft.
- 1934: In Deutschland produziert die Firma Flader Tragkraftspritzen TS 8/8 mit Druckluftschäum-Technik.
- 1940: Die US Navy setzt einige Druckluftschäumenanlagen zur Flüssigkeitsbrand-Bekämpfung ein.
- 1950: In Italien baut die Firma Bergomi Druckluftschäum-Löschanlagen.
- 1970: Der Texas-Forest-Service setzt Druckluftschäum zur Waldbrandbekämpfung ein.
- 1990: In den USA werden Druckluftschäumenanlagen zur Gebäudebrandbekämpfung eingesetzt.
- 1997: Druckluftschäumenanlagen werden in Europa wieder zur Brandbekämpfung verwendet.

2.2 Nomenklatur und technische Anforderungen

Die korrekte Bezeichnung einer Druckzumischanlage wird in DIN 14430 [4] geregelt. So bedeutet beispielsweise die Bezeichnung

„Druckzumischanlage DIN 14430 – DZA 4 / 0,5–3“

dass es sich hier um eine Druckzumischanlage nach Norm mit einem Nennförderstrom von 400 L/min und einem Schaummittel-Zumischbereich von 0,5 Vol.-% bis 3 Vol.-% handelt. In Tabelle 2 sind die nach Norm klassifizierten DZA-Größenordnungen zusammengestellt. Außer dieser Klassifizierung enthält die Norm in An-

hang B noch ein Musterdiagramm, in dem der Arbeitsbereich einer DZA (Zumischrate in Abhängigkeit von den Löschmittel- und Schaummittel-Volumenströmen) dargestellt ist.

Auch die korrekte Bezeichnung einer Druckluftschaumanlage wird in DIN 14430 [4] geregelt. Beispielsweise bedeutet die Bezeichnung

„Druckluftschaumanlage DIN 14430 – DLS 2.400 / 800“

dass es sich hier um eine Druckluftschaumanlage nach Norm handelt – mit einem Luft-Nennförderstrom von 2.400 L/min und einem maximalen Förderstrom von 800 L/min des Wasser/Schaummittel-Gemisches. In Tabelle 3 sind die nach Norm klassifizierten DLS- Größenordnungen zusammengestellt. In Anhang C enthält die Norm ein Musterdiagramm, in dem der Arbeitsbereich einer DLS (Verschäumungszahl in Abhängigkeit von den Löschmittel- und Luft-Volumenströmen) dargestellt ist.

Nach DIN 14430 [4] besteht eine Druckluftschaumanlage¹⁾ aus folgenden Komponenten (sh. Bild 1):

1. Eine Feuerlöschkreiselpumpe nach DIN EN 1028 [10] verbunden mit einem Löschwasserbehälter.
2. Eine Druckzumisanlage (DZA) verbunden mit einem Schaummittel-Behälter. Der Arbeitsbereich der DZA liegt üblicherweise bei einer Zumischrate von 0,3 Vol.-% bis 1 Vol.-% für die Brandklasse A nach DIN EN 2 [11] und 1 Vol.-% bis 3 Vol.-% für die Brandklasse B.
3. Ein Druckluftkompressor.

Für den Betrieb des Druckluftkompressors werden zusätzliche Sicherheitsanforderungen vorgeschrieben:

1. Die Schaltheftungen sind zu minimieren und die Stellteile ablaufbezogen so anzuordnen, dass Fehlbedienungen vermieden werden können.
2. Druckluft darf erst zugeführt werden, wenn eine ausreichende Menge an Schaummittel beigemischt ist und der Wasserdruck am Eingang zur Mischkammer mindestens 1 bar Überdruck erreicht hat.

¹⁾ noch detaillierter werden diese Anlagen von der NFPA beschrieben [11a]

3. Wenn bei einer DLS der Druckluftteil ausfällt, muss die DZA noch genutzt werden können. Im Falle des Ausfalls der DZA muss die reine Wasserabgabe uneingeschränkt möglich sein.
4. Die Unterbrechung der Schaummittel-Zufuhr sowie die Unterschreitung des geforderten Wasserdrucks am Eingang zur Mischkammer führen zu einer Zwangsabschaltung der Druckluftzufuhr.
5. Am Ausgangsquerschnitt darf es beim Ein- und Ausschalten der Anlage zu keinen Druckluftimpulsen kommen.
6. Der maximale Druck an den Festkupplungen darf 10 bar nicht überschreiten.

Darüber hinaus gelten folgende Leistungsanforderungen:

7. Der Dauerbetrieb der Anlage muss bei Nennförderstrom und bei der vom Hersteller angegebenen maximalen Zumischrate mindestens 6 Stunden möglich sein.
8. Das Zuschalten der Anlage ist bei laufender Feuerlöschkreiselpumpe ohne Unterbrechung der Wasserförderung zu ermöglichen.
9. Die ungewollte Vermischung von Schaummitteln aus unterschiedlichen Behältern ist zu verhindern. Die von verschiedenen Schaummitteln durchströmten Leitungen müssen mit Wasser gespült werden können.

2.3 Löschwirkung

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 [12].

Um den Löscherfolg möglichst schnell und mit möglichst wenig Wasser zu erzielen, wurden dessen chemische oder physikalische Eigenschaften – zu *Forschungszwecken, nur teilweise im praktischen Einsatz* – mit Hilfe von Zusätzen verbessert [13]:

1. Im Löschwasser gelöste Salze kristallisieren beim Verdampfen aus und wirken dann wie in Trockenlöschpulvern oder in Flammenschutzmitteln als

fein verteilte Inhibitoren, die die freien Radikale in der Verbrennung binden und so die Verbrennungs-Kettenreaktion unterbrechen.

— Wegen der Umweltbelastung und der Korrosionsgefahr für die Löschgeräte können Salze nicht als sinnvolle Löschwasser-Zusätze angesehen werden.

2. Quellkörper im Löschwasser erhöhen seine Viskosität 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.
— Wegen der Unfallgefahr auf dem mit schlüpfrigem Quellkörpergemisch bedeckten Boden bei der Brandbekämpfung in Gebäuden und wegen der Gefahr, die Löschgeräte zu verstopfen, können Quellkörper nicht als optimale Löschwasserzusätze angesehen werden. Als Sonderanwendung z.B. in der Waldbrandbekämpfung haben sie sich jedoch seit Jahren bewährt.
3. 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. Die dadurch vergrößerte Kontaktfläche zwischen Brandgut und Löschwasser verbessert ebenfalls den Wärmeübergang.
4. Mit Luft können Wasser-Tensid-Gemische zu einer je nach Herstellungsverfahren mehr oder weniger homogenen Wasser/Luft-Dispersion verschäumt werden, wodurch der Löscherfolg auf vierfache Weise verbessert wird:
 - Der Schaum haftet an abschüssigen Flächen ähnlich wie ein Quellkörper/Wasser-Gemisch und erhöht damit die Kontaktdauer zwischen Brandgut und Löschmittel,
 - die bessere Benetzung vergrößert die Kontaktfläche und steigert den Wärmeübergang zwischen Brandgut und Löschmittel und
 - das gegenüber Wasser gesteigerte Oberflächen/Volumen-Verhältnis verbessert ebenfalls den Wärmeübergang zwischen Brandgut und Löschmittel.
 - Zusätzlich vermag der Schaum, die brennende Oberfläche vom Luftsauerstoff zu trennen (= Hauptlöscheffekt bei Bränden der Klasse B),

die aufsteigenden, brennbaren Gase zurückzuhalten und durch Abscheiden seines Wasseranteils zu kühlen.

Grundsätzlich eröffnet Schaum die Möglichkeit, Brände mit hohem Kunststoffanteil im Brandgut – selbst Autoreifen-Brände – zu beherrschen, die mit Wasser nur schwer oder gar nicht gelöscht werden können. Auch bei Bränden von Strohballen oder ähnlichem Material steigern die oleophilen Eigenschaften moderner Tenside in Klasse- A-Schaummitteln die Benetzungsfähigkeit.

Zur Schaumerzeugung stehen der Feuerwehr zwei Systeme zur Verfügung: Das konventionelle, ursprünglich zum Löschen von Flüssigkeitsbränden entwickelte Luftschaumverfahren und das von vornherein *auch* für Brände der Klasse A konzipierte Druckluftschaum-Verfahren.

Im Wesentlichen unterscheiden sich diese Verfahren durch die Volumenverhältnisse der im Schaum enthaltenen Luft- und Löschmittelanteile. Bei konventionell erzeugtem Schaum liegt das Verhältnis des Schaum- zum Löschmittelvolumen bei

- unter 20 (Schwerschaum zum *Kühlen* und Abdecken von brennenden Flüssigkeiten und Feststoffen),
- 20 bis 200 (Mittelschaum zum *Abdecken* und Kühlen und für den vorbeugenden Schutz der Brandumgebung) oder bei
- über 200 (Leichtschaum um Keller, Container oder Schiffsladeräume zu fluten und dort den Sauerstoff zu verdrängen und zum Abdecken mit geringer Kühlleistung) [14].

Bei Druckluftschaum liegen die Verschäumungszahlen (Definition sh. Tabelle 1) zwischen 4 und etwa 20. Bis $E = 11$ handelt es sich um Nass-Schaum (zum Löschen), darüber um Trocken-Schaum (zum Schutz von Objekten gegen Brandeinwirkungen). Beide Schaumarten liegen also im Schwerschaumbereich. Verglichen mit konventionellem Schaum enthält besonders der Nass-Schaum einen hohen Wasseranteil, da seine Wirkung bei Feststoffbränden primär auf dem *Kühlen*, nicht auf dem Abdecken beruht. DLS ($E = 4$) besitzt deshalb eine gegenüber Luftschaum ($E \approx 15$) deutlich gesteigerte Löschwirkung.

Darüber hinaus unterscheiden sich beiden Schaumarten noch durch die Schaumblasenstruktur. Der Druckluftschaum ist gekennzeichnet durch kleine homogene Schaumblasen. An senkrechten Wänden beträgt die Schichthöhe des nassen DLS etwa 5 mm. Diese wässrige Dispersion ist fließfähig. — Die

Schichthöhe des trockenen DLS beträgt hier etwa 15 mm. Die Fließfähigkeit von trockenem DLS (z.B. $E \approx 15$) ist stark reduziert, weil mit der intensiven Durchmischung von Löschmittel und Luft im DLS- Aggregat eine sehr homogene Konsistenz und kleinblasige Struktur des Schaums erzielt wird.

Beim Luftschaumverfahren haben die Schaumblasen unterschiedliche Größen. Die Schichthöhe von Schwerschaum an senkrechten Wänden beträgt etwa 10 mm.

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht darin, dass dem Löschmittel beim Luftschaumverfahren am Strahlrohr Energie entzogen wird, während es beim Druckluftschaum-Verfahren durch den Kompressor zusätzliche Energie erhält, um das um den Luftanteil vergrößerte Volumen zu fördern. Die dadurch verursachte hohe Fließgeschwindigkeit des Druckluftschaums in der Mündung eines Rundstrahlrohres ergibt Wurfweiten, die jene von konventionell erzeugtem Schaum deutlich übertreffen (sh. Kap. 2.4).

Beim gleichen Mündungsdurchmesser reicht der DLS- Strahl sogar weiter als ein Wasservollstrahl: Wird der gleiche Löschmittel-Volumenstrom im DLS und im Wasser führenden Schlauch angenommen, dann errechnet sich für den reibungsfreien Fall eine zweimal größere Reichweite des DLS- als des Wasserstrahles [12]. In der Praxis werden mit DLS je nach eingesetztem Strahlrohr Reichweitensteigerungen von 30...80 % gegenüber Wasser erzielt (sh. Tabelle 4).

Bei der Brandbekämpfung mit Wasser (mit oder ohne Netzmittelzusätze) hat der Sprühstrahl die größte Wirkung. Um einen optimalen Wärmeübergang zwischen Brandgut und Löschmittel zu erreichen, sollten die Tropfendurchmesser 0,1...1 mm betragen [25]. Allerdings ist die Reichweite des Sprühstrahls begrenzt und ein erheblicher Anteil verdampft schon in den heißen Brandgasen — kühlt also nur die Atmosphäre um den Brandherd, weil der mangels Wurfweite/Durchschlagskraft selbst nicht erreicht wird. Andere Wassertröpfchen treffen auf das Brandgut und verdampfen beim Wegrollen (Herdplatteneffekt).

Demgegenüber besteht der Vorteil des Vollstrahls in seiner großen Wurfweite und seiner Auftreffwucht [46]. Doch sind die Tropfendurchmesser beim Vollstrahl deutlich größer und damit verschlechtert sich der Wärmeübergang. Wasserschäden sind dann die Folge

Der Druckluftschaum wird vorzugsweise im Vollstrahl ausgebracht. So verliert er beim Durchdringen der Flammenzone nur geringfügig an Masse. Wegen der hohen

Austrittsgeschwindigkeit in der Strahlrohrmündung regnet der DLS- Strahl vor dem Erreichen des Brandherdes weniger ab als der Luftschaum-Strahl.

Mit seiner Wurfweite erreicht er den Brandherd und kühlt die Oberfläche des Brandgutes. Das im Schaum enthaltene Löschmittel dringt in das Material ein und beendet den Verbrennungsprozess. Das Oberflächen/ Volumen- Verhältnis des Schaums begründet eine mindestens ebenso gute Kühlwirkung wie ein „optimaler“ Sprühstrahl.

Wichtig ist,

- dass DLS bei Einhaltung der erforderlichen Applikationsrate *die gleiche Kühlwirkung* hat wie Wasser – somit ist in dieser Hinsicht der Einsatz von DLS gerechtfertigt;
 - dass DLS ebenso wie Löschwasser mit Netzmittel *besser in Hohlräume eindringt* als Wasser – somit ist in dieser Hinsicht der Einsatz von DLS ebenfalls gerechtfertigt – und
 - dass DLS, bei der Brandklasse A eingesetzt, vorrangig eine kühlende Löschwirkung hat.
- ⇒ Ziel des DLS- Löschverfahrens ist es, über die bereits mit konventionellem Löschschaum zu erzielenden Vorteile hinaus den Löscherfolg weiter zu verbessern, überflüssigen Wasserverbrauch beim Löschen zu mindern und die mit dem Löschen verbundenen Wasserschäden zu verringern. Wegen der sperrigen Schaumstrahlrohre bei der konventionellen Schaumerzeugung sind wirkungsvolle Löscheinsätze im Innenangriff erst mit DLS möglich.

2.4 Vor- und Nachteile der Druckluftschaum-Technik

Die Brandbekämpfung mit Hilfe der Druckluftschaum-Technik zeichnet sich auch durch folgende Vorteile aus (sh. auch Tabelle 4):

1. Die Druckluftschaum-Löschtechnik baut auf den in DIN 14430 beschriebenen DZA auf, schließt also die Vorteile dieser Technik ein.

2. Der Schaum für die Brandbekämpfung steht bei Verwendung einer DZA ohne Verzögerung unmittelbar am Strahlrohr zur Verfügung. Das Bereitstellen und der Aufbau von Geräten zur Schaumerzeugung entfallen. Wegen der im Vergleich zum Z- Zumischer geringeren Schaummitteldosierung sind deutlich längere Einsatzzeiten möglich
3. Die Zumischung von Schaummittel und Luft erfolgt im Löschfahrzeug, die Schaumqualität kann also durch kontaminierte Luft nicht beeinträchtigt werden.
4. Die in den meisten Fällen zügige und nachhaltige Löschwirkung verbessert in kurzer Zeit die Sichtverhältnisse – insbesondere in geschlossenen Räumen. Die Dampfbildung in diesen Räumen führt zur Verdünnung der Rauchgase. Können ausreichend Oberflächen mit der Dispersion erreicht werden, kommt es zu einem schlagartigen Löscheffekt (flame knock down) .Das Eindringvermögen des Löschmittels in die Oberflächenstrukturen führt zu einem nachhaltigen Löscheffekt [9, 47].
5. Die Sichtbarkeit des aufgetragenen Löschmittels trägt dazu bei, den Löscherfolg zu steigern, da der Strahlrohrführer in die Lage versetzt wird, das Löschmittel optimal zielgerichtet aufzubringen. Dies erleichtert auch die Ausbildung und ist, wie bei jedem anderen Löschverfahren auch – die wichtigste Voraussetzung für erfolgreiches Löschen darstellt [15].
6. Die, im Gegensatz zur konventionellen Schaumerzeugung, mit DLS-Aggregaten mögliche Intervall-Löschmethode (takten, sh. Kap. 2.6) erlaubt es, den Vorteil der Sichtbarkeit dieses Löschmittels zu nutzen, das heißt, Löschmittel zu sparen, Wasserschäden zu verringern und Schäden durch Ausschwemmen von Brand- und Lösch-Reaktionsprodukten in die Umgebung zu reduzieren.
7. Im Innenangriff können mit dem DLS- Löschverfahren Wasserschäden nahezu vermieden werden. Unverdampftes, durchtropfendes Löschwasser fällt praktisch nicht an – weder bei den an der FFB unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführten Brand- und Löschversuchen noch in der Praxis. Weil nur ein geringer Teil des nassen Druckluftschaums abfließt, verbleibt auf dem Brandgut – auch auf abschüssigen Flächen – eine ausreichende Menge Löschmittel, um löschwirksam zu benetzen und zu kühlen [2, 12].

8. 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. Die niedrige Schaummittel-Dosierung mit Hilfe der DZA verringert die Umweltbelastung durch ablaufendes Löschmittel. Der beschleunigte Löscherfolg verringert die viel schwerer wiegende Umweltbelastung durch die Schadstoff-Emission des Brandes selbst.
9. In den Druckschläuchen befinden sich Wasser und Druckluft. Je höher der Druckluftanteil desto geringer ist das Gewicht der zu bewegenden Schläuche. Nass-Druckluftschaum ($E \approx 4$; $p_{fl} \approx 7 \text{ bar}$; $E_p \approx 1,43$) hat einen Druckluftanteil von etwa 30 Vol.-% in den Schläuchen, was bei einem C42-Schlauch im Vergleich zu einem Schlauch mit Wasser einer Gewichtsersparnis von etwa 25 % entspricht (sh. Tabellen 4 und 5).
10. Wegen des im Vergleich zur konventionellen Schaumerzeugung mit VENTURI- Zumischer und Schaumrohr vernachlässigbaren Druckverlustes bei der DLS- Erzeugung und wegen des auch im Vergleich zum Einsatz einer DZA geringeren Gewichtes ist die Förderhöhe von DLS beim gleichen Druck deutlich höher, als die von konventionellem Schaum [16, 16a].
11. Der hohe Volumenstrom bewirkt eine – insbesondere in großen Hallen oder im Außeneinsatz relevante – deutliche Steigerung der Wurfweite. Dies stellt einen erheblichen Sicherheitsgewinn für die Feuerwehr durch Reduzierung der auf die Einsatzkräfte wirkenden Strahlungswärme dar, und ermöglicht es, aufsteigende Brandrauchströme besser zu durchdringen.
12. Bei der Flüssigkeitsbrand-Bekämpfung stellt die hohe Reichweite des DLS- Strahles nicht nur einen Sicherheitsgewinn dar, sondern erlaubt es, neben dem Löschvorgang auch heiße Oberflächen mit dem Druckluftschaum zu kühlen. Bleibt die Dispersion z. B. an den Anlagen haften, ist dies ein sichtbarer Hinweis auf eine erfolgreiche Kühlung unter 100°C.
13. Wie jüngste Untersuchungen im großen Maßstab (Brandrauchvolumen $\approx 110 \text{ m}^3$, Temperaturbereich 200...500°C) gezeigt haben [21], erweist sich das DLS- Verfahren bei der Brandrauch- und Bauteilkühlung als besonders effizient und sicher: Bei vergleichbaren Mengen einge-

brachten Löschmittels erzielt Druckluftschäum auch im Vollstrahl Temperatursenkungen (-75°C), die im Mittel doppelt so groß sind wie die mit Wasser bewirkten (-36°C). Vorteilhaft ist darüber hinaus, dass diese relativ hohen Temperaturdifferenzen vorzugsweise in den Raumpartien mit den höchsten Brandrauchtemperaturen ($\approx 500^{\circ}\text{C}$) auftreten.

14. Das Druckluftschäum-System ist mit allen zur Brandbekämpfung verwendeten Einsatzmitteln (Werfer, Ringmonitore...) kompatibel, sofern die richtigen Größenordnungen miteinander kombiniert werden (z.B. für DLS 2.400/800 Hohlstrahlrohre mit mindestens 300 L/min oder Rundstrahlrohre mit einem Mündungsdurchmesser von mindestens 19 mm). Bei der Verwendung von Strahlrohren mit zu geringem Düsenquerschnitt treten bei der Löschmittelabgabe Probleme auf: Der ungenügende Löschmittel-Volumenstrom hat eine zu geringe Applikationsrate und eine zu geringe Wurfweite zur Folge. Die ordnungsgemäße Erzeugung von Druckluftschäum ist nicht möglich.
15. Unter Berücksichtigung von Punkt 14 ist grundsätzlich keine Änderung der Löschtaktik beziehungsweise Löschmethode erforderlich.

Demgegenüber besteht der Nachteil der Druckluftschäum-Technik in den vergleichsweise hohen Anschaffungskosten:

Ausgehend von der Tatsache, dass Druckzumischanlagen (die alleine Mehrkosten zusätzlich zum Preis der Kreiselpumpe... von etwa 5.000 bis 20.000 Euro verursachen) inzwischen als akzeptiertes Aggregat bei der Löschmittelförderung anzusehen sind, weil sie die Nachteile des konventionellen Z- Zumischers – den Druckverlust in der VENTURI-Düse und die mangelhafte Einstellung der Zumischrate – eliminieren, muss derzeit, wenn das Löschmittel-Fördersystem auf DLS aufgerüstet werden soll, je nach Größe der Anlage mit weiteren Zusatzkosten für den Kompressor und die Regel- und Steuerungstechnik in Höhe von 10.000 bis 30.000 Euro gerechnet werden.

Nachteile bei der Handhabung oder der Löscheffizienz konnten nicht nachgewiesen werden. Insbesondere gilt dies für die Behauptung, DLS führende Feuerweherschläuche würden vom Einbindestutzen rutschen. Nachprüfungen ergaben, dass dies, in Einzelfällen, auf die mangelhafte Ausführung der Einbindung zurückzuführen war. Bei korrekter Einbindung verhalten sich DLS gefüllte Schläuche identisch mit Wasser bzw.

WS- Gemisch gefüllten Schläuchen. Daher wurde der Einspruch nach Beratung im Normungsausschuss zurückgewiesen.

2.5 Hinweise für den Anwender – Applikationsraten

Ein gut ausgebildeter Strahlrohrführer kann das Druckluftschaum-System effizient und genauso sicher wie ein mit Wasser arbeitendes System nutzen.

1. Entscheidend für die Sicherheit der Anwender ist es – generell und zunächst unabhängig vom Löschverfahren –, die Gefahren an der Einsatzstelle rechtzeitig zu erkennen.
2. Entscheidend für den Löscherfolg ist es, dass der *Löschmittelanteil* im Schaumförderstrom ausreichend bemessen ist (sh. Tabelle 3, 3. Spalte, bzw. Tabelle 5, 2. Zeile). Bei großen Räumen (schon ab 50 m², z.B. Industrie- und Gewerbebau) wird hierfür eine Applikationsrate von 4 L/min·m² (bei besonders hoher Brandlast: 6 L/min·m²) für erforderlich gehalten – bei Räumen unter 50 m² sollte ein Wasservolumenstrom von 150···200 L/min jedoch nicht unterschritten werden [12, 19].
3. Die Brandbekämpfung ist nur mit nassem Druckluftschaum durchzuführen: $4 \leq E \leq 6$!
4. Ein zur Bekämpfung von großen Gebäude- oder Industriebränden geeignetes DLS- Löschfahrzeug sollte mindestens mit einer „DLS 2.400 / 800“ ausgerüstet sein.
5. Für die zur Bekämpfung von Großbränden erforderliche Eindringtiefe des Löschmittelstrahles eignen sich Hohlstrahlrohre, die eine Einstellmöglichkeit von 800 L/min und mehr ermöglichen. Für $E = 4$ (entspricht $E_p = 1,43$ bei $p_{fl} = 7$ bar) ergibt dies einen Löschmittelstrom von > 560 L/min, ausreichend für einen 140-m²-Brand oder einen 100-m²-Brand mit erhöhter Brandlast. Im Vollstrahl erzielen *diese* Strahlrohre Wurfweiten von bis zu 50 m. Die Wärmestrahlung bei Großbränden erfordert diese Distanz. Aus Sicherheitsgründen sind fest angebaute Stützkrümmer vorzusehen.
6. Ist das Umsetzen von Rohren mit B-Schläuchen aus taktischen Gründen erforderlich, so ist dies durch kurzfristiges Umschalten der Druckluftschäumenanlage auf „Trocken“ möglich. Der Wasseranteil in

den Schläuchen beträgt dann weniger als 40 Vol.-% (wenn $E = 15$, $p_{\text{schl}} = 9 \text{ bar}$, $E_p = 2,56$). Die Brandbekämpfung wird anschließend in Stellung „Nass“ fortgesetzt.

7. Hohlstrahlrohre mit einem Löschmittelstrom $> 560 \text{ L/min}$ sind nur so lange zu verwenden, bis sich die Intensität des Großbrandes verringert hat. Danach sind Hohlstrahlrohre mit geringerem Durchfluss vorzunehmen (z.B. $\dot{V}_{\text{Schaum,p}} \approx 330 \text{ L/min}$, entspricht $\dot{V}_{\text{LM}} \approx 230 \text{ L/min}$ bei $E = 4$ und $p_{\text{fil}} = 7 \text{ bar}$). Nur diese kleineren Rohre gewähren die für die Brandbekämpfung im Nahbereich erforderliche Mobilität.
8. Beim Einsatz von Rundstrahl- anstelle von Hohlstrahlrohren ist im Innenangriff zu beachten, dass, wenn – wie in DIN 14430 vorgeschrieben – bei Ausfall des Kompressors der Löschangriff nur noch mit Wasser fortgesetzt wird, sich dessen Wurfweite fast auf die Hälfte des mit DLS zuvor erzielten Wertes reduziert, was eine erhebliche Gefährdung des Feuerwehrmannes (SB) darstellen kann. Deshalb sind Hohlstrahlrohre vorzuziehen, weil mit ihnen dieser Effekt wenigstens teilweise kompensiert werden kann.
9. In Tabelle 5 ist beispielhaft zusammengestellt, welche Löschmittel-Volumenströme in einem C42-Schlauch erzielt werden können, wenn der Arbeitsdruck variiert wird. Die Messwerte wurden bei der Einstellung $\dot{V} = 360 \text{ L/min}$ am Hohlstrahlrohr ermittelt. Das entspricht näherungsweise dem Schaumvolumenstrom unter Druck – die genauen Werte stehen in Zeile 4 der Tabelle 5. Es zeigt sich, dass der Mindest-Löschmittelstrom von 200 L/min (sh. Pkt. 2) bei einem Druck von $6 \cdots 7 \text{ bar}$ erreicht wird. Die tatsächlich produzierte Schaumqualität liegt dann nahe beim gewählten Expansionsverhältnis. Das Gewicht eines solchen DLS- Schlauches ist um $6 \cdots 7 \text{ kg}$ geringer als ein entsprechender Schlauch mit Wasserfüllung. Werden größere Löschmittel-Volumenströme benötigt (weil die Brandfläche größer ist als 50 m^2), so sind entsprechend größere Einstellungen am Strahlrohr zu wählen, bzw. Strahlrohre mit höherer Applikationsrate einzusetzen. Im Gegensatz zu Feststoffbränden lassen sich größere Flüssigkeitsbrände wirkungsvoll nur mit besonderen Schaummitteln (z.B. AFFF, AFFF/AR...) und nur „indirekt“ bekämpfen: Das heißt, die Strahlrohrführer müssen unbedingt darauf achten, dass der Druckluftschaum-Strahl nicht direkt in die brennende Flüssigkeit gerichtet wird, sondern – ebenso wie Schaum aus einem konventionellen Schaumrohr – durch Abprallen, Ab-

regnen oder Reflektieren drucklos auf die Brandfläche aufgetragen wird. Die Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden ist, unabhängig vom Löschverfahren, unbedingt realitätsnah zu üben.

10. Trockener Druckluftschaum hat einen geringeren Wasseranteil. Dies wirkt sich auf das Wärmebindungs-Vermögen und die Wurfweite des Löschmittelstrahles aus. Trockener Druckluftschaum kann für Nachlöscharbeiten und zur Vorbeugung (z.B.: Einschäumen eines verunfallten Tankzuges mit brennbaren Flüssigkeiten) eingesetzt werden. Zur Abgabe des trockenen Druckluftschaums eignen sich besonders Rundstrahldüsen ohne innere Einbauten.
11. Eine eventuell auftretende Phasentrennung – Luftblasen in der oberen Schlauchhälfte, Löschmittel in der unteren – bei geschlossenem Strahlrohr ist unproblematisch, denn eine erneute Löschmittelabgabe stellt die Druckluftschaum-Erzeugung in der vorgewählten Qualität innerhalb weniger Sekunden wieder her (bei horizontal verlegtem Schlauch < 1 sec [2]).

2.6 Brandrauchkühlung zur Bekämpfung von Flashover und Backdraft

Der Flashover (Feuerübersprung) mit anschließendem Vollbrand im gesamten Raum zählt zu den gefährlichsten Situationen bei der Brandbekämpfung. Die physikalische Voraussetzung hierfür ist: Hohe Temperaturen in der Rauchschiicht über einem geschlossenen Brand, die dazu führen, dass alles benachbarte Gut Pyrolysegase emittiert, die schlagartig gezündet werden [12].

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 Rauchschiicht über die obere Zündgrenze. Flammzungen an der Grenzschicht Rauch/Luft zeigen, wo zündfähige Konzentrations-Verhältnisse bestehen.

Werden insgesamt wieder zündfähige Verhältnisse erlangt – beispielsweise weil der Brandrauch ein ausgedehntes oder verschachteltes Bauwerk durchströmt, weil ein Fenster bricht oder beim Öffnen einer Tür –, so können sich diese brennbaren Gase mit einer Stichflamme in den Nachbarräum ausbreiten, oder die zusätzliche Frischluftzufuhr kann bei guter Verwirbelung im Raum selbst oder dort, wo Rauch und

Sauerstoff aufeinandertreffen, einen Backdraft (Durchzündung im Brandrauch) mit Druckwelle auslösen.

Brandrauchkühlung ist eine Methode zur Unterdrückung sowohl eines Flashover als auch eines Backdraft. Dazu wird die Tür zum Brandraum kurz geöffnet und Löschmittel in die heiße Gasschicht gesprüht. Ziel ist es, die brennbaren Gase unter die Zündtemperatur zu kühlen und den Raum im Wirkungsbereich des Strahlrohres zu „inertisieren“. Die möglichen Applikationsraten richten sich nach den im vorigen Kapitel genannten Werten für die sich anschließende, eigentliche Brandbekämpfung. Während der Brandrauchkühlung werden jedoch mit jedem einzelnen Strahl nur geringe Löschmittelmengen eingebracht, um keine übermäßige Dampfbildung zu provozieren [12, 20]. Der Sprühstrahl wird im Abstand weniger Sekunden getaktet, um die Dampfbildung zu begrenzen.

Nach der ersten Applikation wird die Tür sofort wieder geschlossen. Nach einer kurzen Wartezeit kann dann die Tür wieder geöffnet werden. Hat die starke Rauchentwicklung abgenommen oder ist der Flashover eingetreten, kann mit der Brandbekämpfung begonnen werden. Ansonsten ist die Prozedur so lange zu wiederholen, bis der Raum gefahrlos betreten werden kann. Diese Methode kann auch mit Druckluftschaum angewendet werden, unter der Bedingung, dass die Applikationsraten WS- Gemisch, wie nach üblichen Methoden ermittelt, eingehalten werden.

Bei der Bauteilkühlung soll Druckluftschaum mit moderaten Bewegungen des Strahlrohres auf die heißen Oberflächen gebracht werden. Dadurch kann die Brandrauchtemperatur auch auf direktem Wege unter die Zündtemperatur gesenkt werden. Die Applikationsrate (sh. Kap. 2.5) muss allerdings auch hierbei der Raumgröße angemessen sein. Diese Methode hat sich in der Praxis gegenüber dem „Takten“ als vorteilhafter erwiesen.

Die kleinste der in Tabelle 3 genannten Druckluftschäumen ist in der Lage, 1.200 L Luft pro Minute zu fördern. Bei $E \approx 4$ transportiert dieser Luftvolumenstrom also 400 L Wasser – ausreichend für einen bis zu 100 m² großen Brand. Wird bei $p_{fl} \approx 7$ bar am Hohlstrahlrohr nur ein Volumenstrom von 360 L/min eingestellt, dann beträgt der Wasseranteil noch etwa 230 L/min (sh. Tabelle 5) und liegt über dem in Kapitel 2.5 geforderten Mindestwert.

Durch die Haftwirkung des Druckluftschlums lässt sich eine nachhaltige Kühl- und Löschwirkung an heißen Oberflächen erreichen, so dass die mit Schaum beaufschlagten Bauteile zur Kühlung des Brandrauches beitragen können [21]. Auch der

Pyrolyseprozess bei brennbaren Stoffen wird entsprechend reduziert. Die vollzogene Kühlung ist für die Einsatzkräfte einfach durch die weiße Oberfläche (Temperatur < 100 °C) erkennbar.

Es ist unbedingt darauf zu achten, dass der Löschmittelstrahl nicht konzentriert auf Stellen hoher Wärmekapazität (z.B. massive Zimmerdecke) gerichtet wird: Durch die forcierte Dampfbildung würden sonst die im Raum befindlichen brennbaren Gase durch Türen und Fenster nach außen gedrückt und können dort neue Brände verursachen [12]. Dieser taktische Fehler lässt sich vermeiden, wenn zunächst – vom eigenen Standort aus beginnend – der Löschmittelstrahl möglichst gleichmäßig im Raum verteilt und die gewünschte Abkühlung der Atmosphäre bzw. der Bauteile herbeigeführt wird. Dann ist der Brandherd gezielt anzugehen.

3. Anforderungen an Schaummittel

Als Grundlage für die Qualitätsanforderungen an alle Schaummittel – egal ob im konventionellen oder im DLS- Verfahren eingesetzt – gilt die vfdB- Richtlinie „Anforderungen an Feuerlöschgeräte und Löschmittel“ [22].

Grundsätzlich lassen sich alle bekannten Arten von Schaummitteln für das DLS-Verfahren verwenden. Am häufigsten kommt beim DLS- Verfahren zum Löschen von Bränden der Brandklasse A nach DIN EN 2 [11] ein hochkonzentriertes „Class-A-Schaummittel“ zum Einsatz. In selteneren Fällen, insbesondere bei Flüssigkeitsbränden, werden Wasserfilm bildende (AFFF) oder alkoholbeständige Wasserfilm bildende Produkte (AFFF/AR) eingesetzt. Bei den AFFF- Produkten gibt es bezüglich der Umweltverträglichkeit Bedenken. Allerdings existieren gerade wegen des hervorragenden Löschvermögens bei der Flüssigkeitsbrand-Bekämpfung derzeit noch keine Alternativen. Aus Gründen des Umweltschutzes ist auf die Verwendung von AFFF bei Feststoffbränden zu verzichten.

Der Vorteil hochkonzentrierter Produkte liegt in der Platz- und Gewichtersparnis. Die üblicherweise verwendeten Zumischeinrichtungen für das DLS- Verfahren lassen eine Zumischrate 0,3 Vol.-% bis 1 Vol.-% zu. Netzmittellösungen werden mit einer Zumischrate von 0,1 Vol.-% bis 0,5 Vol.-% erzeugt. Grundvoraussetzung für die wirtschaftliche und sichere Dosierung hochkonzentrierter Schaummittel sind exakt arbeitende Zumisysteme. Im Unterschied zum alten Z- Zumisystem sind moderne DZA hierzu in der Lage.

Voraussetzung für die Zulassung von Schaummitteln ist, dass ihre Eignung und ihre Eigenschaften von einer anerkannten, für das Typprüfungsverfahren zertifizierten, unabhängigen Prüfstelle geprüft wurden. Prüfgrundlage der chemisch-physikalischen Anforderungen ist DIN EN 1568 1...4 [14].

Da bei einem Schaumeinsatz – unabhängig vom angewandten Verfahren zur Löschschaum-Erzeugung – nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Einsatzkräfte mit dem Konzentrat, dem Schaum, dem beim Einsatz entstehenden Aerosol oder der Lösung in Kontakt kommen, und dass der Schaum beziehungsweise die Lösung in die Umwelt gelangen, ist eine umfangreiche ökotoxikologische und brandhygienische Beurteilung durch ein entsprechendes, für diese Untersuchungen zertifiziertes Hygiene-Institut erforderlich.

Hochkonzentrierte Mehrbereichs-Schaummittel, die vor allem unter der Bezeichnung „Class-A-Schaummittel“ bekannt sind, verursachen keine nennenswerten Umweltschäden. Die meisten dieser Schaummittel sind biologisch sehr gut abbaubar. Details können den Sicherheitsdatenblättern der Hersteller entnommen werden [23].

4. Risikobetrachtungen

4.1 Die Ergebnisse der Schlauchuntersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB)

4.1.1 Die Versuchsaufträge an die FFB und die Versuchsvorbereitung

Aufgrund eines tragischen Unfalls in Tübingen im Jahre 2005, bei dem ein mit Druckluftschaum gefüllter Feuerwehr-Druckschlauch platzte, ergaben sich Fragen bezüglich der Temperaturbeständigkeit von Feuerwehr-Druckschläuchen.

Deshalb wurde die Forschungsstelle für Brandschutztechnik vom Ausschuss „Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung“ (AFKzV) des Arbeitskreises V der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder beauftragt, die Haltbarkeit von Druckluftschaum führenden Schläuchen unter Temperaturbeaufschlagung zu untersuchen.

Hierfür wurde ein Versuchsstand konstruiert, der quasi den „Tübinger Treppenabsatz“ abbildet, indem die Prüfstücke großflächig und andauernd erwärmt werden können. Im Gegensatz hierzu beschränken sich bislang genormte Verfahren auf kurzfristige

und punktförmige Erwärmung. Um die Haltbarkeit von Klasse-1-Schläuchen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur zu testen, wurden insgesamt 90 Einzelversuche durchgeführt [2].

Zur Veranschaulichung des physikalischen Grundes für das Versagen von erwärmten Schläuchen unter Druck war vom untersuchten Schlauchmaterial der Klasse 1 nach DIN 14811 der Bruchfestigkeits-Temperatur-Zusammenhang des tragenden Polyestergewebes experimentell in einer Zusatzuntersuchung bestimmt worden: Im Versagenszeitpunkt fällt die infolge der Erwärmung geminderte Bruchfestigkeit – genauer die dieser zuzuordnende maximale Spannung σ_{Bruch} – unter die durch den Arbeitsdruck (bzw. den Druck bei geschlossenem Strahlrohr) verursachte Tangentialspannung im Gewebe.

Von der vfdB wurde die FFB beauftragt, entsprechende Untersuchungen mit Schläuchen der Klasse 2 und 3 durchzuführen, und zu prüfen, welche Standzeitsteigerungen mit diesen Qualitäten zu erzielen sind. Darüber hinaus sollte geprüft werden, wie die Schläuche auf eine zusätzliche thermische Beanspruchung durch Kontakt mit einer heißen Fläche reagieren.

In Abstimmung mit den Anwendern und ihren Berufsverbänden war zu klären, welchen Beanspruchungen Feuerwehr-Druckschläuche im Einsatz ausgesetzt sein können:

1. Welche maximalen Umgebungstemperaturen sind zu berücksichtigen?
2. Wie heiß kann der Boden im gelöschten Brandraum noch sein, wenn in den nächsten, dahinter liegenden vorgegangen wird?
3. Wie hoch ist der maximale Druck, der je nach Löschverfahren im Schlauch auftreten kann?
4. Wie lange müssen Feuerwehrschräuche diesen Belastungen standhalten?

4.1.2 Die Ergebnisse der Schlauchuntersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) zu Schläuchen der Klasse 1

Bei erheblicher Überschreitung der vom Hersteller zugelassenen Maximaltemperatur von 80°C um 190 ...400°C zeigen die Versuchsergebnisse, dass mit DLS gefüllte Schläuche bei stehendem Löschmittel (Strahlrohr geschlossen) empfindlicher reagieren als mit Wasser gefüllte Schläuche. Sowohl mit Wasser als auch mit DLS gefüllte Schläuche bleiben jedoch intakt, solange die Löschmittel fließen. Selbst bei einer Ofentemperatur von 500°C versagt der Schlauch bei fließendem DLS nicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei korrekter Anwendung des DLS- Löschverfahrens dieselben Applikationsraten auszubringen sind wie beim Löschen mit Wasser. Die geringere Wärmeleitfähigkeit des Schaums und seine geringere Wärmekapazität haben also keinen Einfluss auf die Haltbarkeit des Schlauches — ausschlaggebend ist, dass in gleichen Zeiten sowohl durch den Wasser, als auch durch den DLS führenden Schlauch dieselben „Wärmeaufnahmekapazitäten“ fließen. Sobald jedoch das Strahlrohr geschlossen wird, und sobald – insbesondere bei höheren Temperaturen – der Schaum zerfällt, macht sich an der Schlauchoberseite die geringere Wärmekapazität der dort angesammelten Luft bemerkbar.

Auch bei stehendem Löschmittel versagen die Schläuche nicht, solange die Umgebungstemperatur unter 250°C bleibt (= Schmelztemperatur von Polyester), selbst wenn die Schläuche nur Luft enthalten. Es bleibt weiterführenden Untersuchungen vorbehalten festzustellen, über welchen Zeitraum derartige Temperatur-Niveaus (200°C bzw. 250°C) für den Aufenthalt von Einsatzkräften relevant sind. Es bestehen berechtigte Zweifel, ob innerhalb realistischer Zeiträume und unter realistischen Einsatzbedingungen dieses Temperatur-Niveau für eine Risikobewertung anzusetzen ist, da bereits wesentlich früher die von der Einsatzkraft getragene PSA versagen dürfte. Für weitere Bewertungen von max. zu berücksichtigenden Temperaturen und der max. zu berücksichtigenden Aufenthaltszeit, kann der Forschungsbericht Nr. 161 der FFB herangezogen werden.

Bei Temperaturen von 270°C und darüber wurden jedoch deutliche Standzeit-Unterschiede ermittelt: Während Schläuche mit DLS- Inhalt in einer 270; 300; 400°C warmen Umgebung 35; 8...13; 2 min nach dem Schließen des Strahlrohres versagten, platzten Wasser führende Schläuche bei 400°C erst nach 48 min — beim versuchsbedingtem Druck von nur 7 bar und ohne Berücksichtigung einer „waterhammer“- Druckspitze (sh. Kap. 4.2.9). Ab 500°C unterscheidet sich die Standzeit

des Wasserschlauches mit geschlossenem Strahlrohr nicht mehr wesentlich von der des DLS- Schlauches: Sie liegen beide im Bereich von 1...2½ Minuten.

Aus den an der FFB durchgeführten Experimenten können für die Verwendung von DLS im Innenangriff folgende Einsatzhinweise abgeleitet werden:

1. Es darf nur Schaum mit niedriger Verschäumungszahl ($4 \leq E \leq 6$) verwendet werden;
2. während des Löscheinsatzes darf das Strahlrohr nicht länger als 10 Minuten geschlossen bleiben und
3. auch beim Vorrücken – wenn der Schlauch hoher Wärmebeaufschlagung ($>250^{\circ}\text{C}$) ausgesetzt werden könnte, soll in regelmäßigen Abständen Löschmittel abgegeben werden. Dies ergibt sich aber in der Praxis meist ohnehin, da solche Temperaturen mit einer Löschmittelabgabe zur Brandbekämpfung einhergehen.

Im Rahmen der Untersuchungen konnte nicht geklärt werden konnte, welche Bedingungen im Innenangriff relevant und für die abschließende Bewertung einer Gefährdung beim Einsatz heranzuziehen sind.

Dagegen konnte geklärt werden, welchen Druck- und thermischen Belastungen DLS führende Feuerwehrschräuche der Klasse 1 nach DIN 14811 ausgesetzt werden dürfen: Bei Wärmeübertragung nur durch Konvektion und Strahlung hält der Schlauch mit geschlossenem Strahlrohr – bei dem in diesen Experimenten herrschenden Druck von $\leq 6,7$ bar – in einer 275°C warmen Umgebung etwa 30 Minuten.

Die vorab beschriebenen Ergebnisse basieren auf dem Forschungsbericht 150 der FFB. [2]

4.1.3 Die Ergebnisse der Schlauchuntersuchungen mit Schläuchen der Klassen 2 und 3 sowie die Reaktion von Schläuchen auf zusätzliche thermische Beanspruchung durch Kontakt mit heißen Flächen

Bruchfestigkeit von höherwertigen Feuerwehrschräuchen

Die Festigkeitswerte von Klasse 2 Schläuchen liegen auf ähnlichem Niveau wie die von Klasse 1, weil sie den gleichen Gewebeaufbau enthalten wie jene. Wegen des lockereren Gewebes der Klasse-3-Schläuche – um im Prozess der Schlauchherstellung das Extrudieren der Kunststoffbeschichtung vom Schlauchinneren durch das Polyestergeritter nach außen zu ermöglichen – liegt deren Festigkeit im unteren Temperaturbereich (bis 150 °C) deutlich unter der von Klasse 1 oder 2. Schläuche mit dem Gewebe aus p-Aramid (zwar Klasse 3 zuzuordnen, aber mit deutlich anderem Gewebeaufbau) lassen die höchsten Drücke zu.

Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung sowie durch Leitung

Für alle Versuche wurde eine Ofentemperatur von 275°C gewählt, weil einerseits nach den vorliegenden Erfahrungen erst über 250°C mit Schlauchversagen zu rechnen ist und weil andererseits nach Ansicht von Feuerwehrleuten ein Druckschlauch keiner höheren Temperatur ausgesetzt wird [27]. Bei den Versuchen mit Wärmeübertragung auch durch Kontakt mit einem „heißen Boden“ wurde nach der 5-minütigen Versuchs-Anfangsphase mit fließendem Löschmittel und bei nahezu konstanten Temperaturen die 450°C warme Platte von unten gegen den Schlauch gedrückt

Die Ergebnisse für die Haltbarkeit von Feuerwehr-Druckschläuchen in 275°C warmer Umgebung (siehe auch Tabelle 9) dürfen deshalb nur als Zusammenstellung der beschriebenen Versuche –

und zwar mit den genannten Versuchsparametern (u.a. Förderdruck), auf deren weitere Variation im Rahmen dieser Untersuchungen verzichtet werden musste,

– verstanden werden, nicht als Hinweis für den praktischen Feuerwehreinsatz:

1. Ohne Kontakt mit heißem Brandschutt halten *Wasser und DLS* führende Schläuche aller drei Klassen mindestens 30 Minuten lang, auch wenn in dieser Zeit das Strahlrohr geschlossen bleibt. Jede Löschmittelabgabe verlängert die o.g. Zeit. (ermittelt im Forschungsbericht 150 für Klasse 1 und gilt deshalb auch für höherwertige).
2. Ohne Kontakt mit heißem Brandschutt halten *Wasser* führende Schläuche aller drei Klassen, wenn das Strahlrohr länger als 30 Minuten geschlossen bleibt (ermittelt im Forschungsbericht 150 für Klasse 1 und gilt deshalb auch für höherwertige). Mit *DLS* halten nur Schläuche der

Klasse 2 – im Mittel 110 Minuten (ermittelt für den vorliegenden TB der vfdb).

3. Auf heißem Brandschutt halten *DLS* führende Schläuche aller drei Klassen, solange das Löschmittel fließt (ermittelt für den vorliegenden TB der vfdb). Für *Wasser* gilt dies nur in Schläuchen der Klasse 3 (folgt aus Pkt. 5).
4. Sowohl mit *DLS* als auch mit *Wasser* halten auf heißem Brandschutt nur Schläuche der Klasse 3, wenn das Strahlrohr kürzer als 5 Minuten geschlossen bleibt (für *DLS* ermittelt im vorliegenden TB der vfdb, für *Wasser* wegen Pkt. 3 für Klasse 1 und 2 bzw. Pkt. 5 für Klasse 3).
5. Wenn das Strahlrohr länger als 5 Minuten geschlossen bleibt, halten auf heißem Brandschutt nur noch *Wasser* führende Schläuche der Klasse 3 (für *DLS* und *Wasser* ermittelt im vorliegenden TB der vfdb, für Klasse 1 und 2 bei *Wasser* wegen Pkt. 3, für Klasse 1 und 2 bei *DLS* wegen Pkt. 4).

Jedoch werden Feuerweherschläuche in der Regel keiner Umgebungstemperatur von über 250°C ausgesetzt. Dies würde weit über der vom Schlauchhersteller angegebenen Maximaltemperatur liegen. Wie in Anhang Pkt.1 dargelegt, wurde dieses hohe Temperatur-Niveau nur gewählt, um überhaupt Standzeit-Unterschiede messtechnisch mit hinreichender Aussagesicherheit erfassen zu können.

4.2 Gefährdungsbeurteilung Druckluftschäum

Die vergleichende Risikoanalyse für die Verwendung von unbehandeltem Wasser, Wasser/Schaummittel-Gemisch oder Druckluftschäum als Löschmittel bei der Brandbekämpfung bewertet für gängige Situationen und übliches Material das Risiko der persönlichen Gefährdung von Feuerwehrkräften beim Einsatz in Gebäuden [3]. Die Kombination aus Schadensausmaß (keine ... tödliche Folgen) und Schadenswahrscheinlichkeit (praktisch unmöglich ... häufig) ergibt die Einstufung des Gefährdungsrisikos und die zu ergreifenden Schutzmaßnahmen:

„gering“: Organisatorische und personenbezogene Maßnahmen reichen aus, um das Risiko zu eliminieren.

- „mittelgroß“: Maßnahmen mit normaler Schutzwirkung sind erforderlich, um das Risiko auszuschließen.
- „hoch“: Maßnahmen mit erhöhter Schutzwirkung sind dringend geboten, um das Risiko zu vermeiden.

Den in dieser Risikoanalyse bewerteten 18 Einzelaspekten der Brandbekämpfung werden durchweg „geringe“ bis „mittelgroße“ Gefährdungspotentiale zugeordnet. Jedoch kann ein „hohes“ Gefahrenrisiko für die Einsatzkräfte auftreten, wenn zum Löschmittelausfall infolge des Versagens der Feuerlöschkreiselpumpe, der Schlauchbindung oder des Schlauches wegen thermisch/mechanischer Überbelastung oder innerer Druckstöße *weitere* Gefahrenmomente hinzukommen.

Ein Unterschied in der Bewertung des Risikopotentials wird in Kapitel 4.2.9 bei den inneren Druckstößen ausgemacht. Wasser und Wasser/Schaummittel-Gemisch können mit „hohem“ Risiko verbunden sein – DLS ist in dieser Hinsicht mit deutlich reduziertem Risiko verbunden. Bei extrem hoher Brandlast wird dem Löschmittel Wasser in Kapitel 4.2.14 der Risikofaktor „hoch“ zugeschrieben, während er für Wasser/Schaummittel-Gemisch und für DLS lediglich „mittelgroß“ lautet.

Im Einzelnen ergeben sich die folgenden Bewertungen:

4.2.1 Bedienungssicherheit

Bei vielen Feuerwehren wird die Funktion des Löschfahrzeugmaschinisten unter mehreren Feuerwehrangehörigen häufig durchgewechselt. Die Einsatzhäufigkeit und die damit verbundene Routine des Einzelnen sind damit als gering einzustufen. Je weniger mit der Feuerlöschkreiselpumpe (FP) gearbeitet wird, desto notwendiger ist folglich eine möglichst einfache Bedienung. Ein Schalter für das Einschalten der FP und ein Schalter für die Drehzahl sind ausreichend. Je komplizierter der Schaltvorgang und je umfangreicher die Anzahl der möglichen Optionen, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines Bedienungsfehlers. Ein ungeübter Maschinist, der nebenbei auch andere Tätigkeiten während des Einsatzes auszuführen hat – wie beispielsweise die Überwachung der Einsatzzeiten der Atemschutzgeräteträger im Innenangriff – ist bei unübersichtlichen und komplizierten Schalthandlungen schnell überfordert.

Die Bedienungssicherheit der Feuerlöschkreiselpumpe ist eng verknüpft mit einem einfachen Aufbau der Bedienelemente. Dies gilt insbesondere, wenn die Löschtech-

nik um eine Druckzumisanlage (DZA) oder eine Druckluftschaumanlage (DLS) erweitert wird. Die DZA und die DLS erfordern beide einen erheblichen Aufwand an Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Deshalb ist bei der Beschaffung derartiger Anlagen besonders auf eine einfache Bedienung zu achten.

Auch die DZA und die DLS müssen mit *einem* Schaltvorgang in Betrieb genommen werden können (sh. Kap. 2.2). Das bedeutet, dass z. B. mit einem Drehschalter zuerst die FP, danach die DZA und dann die DLS aktiviert werden. Auch hier ist die Höhe des Pumpenausgangsdrucks nur noch über die Drehzahl zu regeln.

Bei Beginn einer Löschmaßnahme muss bei der DLS automatisch immer die Betriebsstellung „Nass“ geschaltet sein. Die Wahrscheinlichkeit einer Fehlbedienung ist gering, wenn bautechnisch das Löschsystem mit einem Handgriff zu schalten ist. Vorhandene Fahrzeuge sollten entsprechend umgerüstet werden.

Das Risiko bei den drei oben genannten Löschverfahren ist im Hinblick auf die Bedienungssicherheit als „gering“ einzustufen. Ein regelmäßiger Probetrieb ist den betreffenden Maschinisten, z. B. bei der Fahrzeugübernahme zu ermöglichen.

- ⇒ Der Einbau zusätzlicher Komponenten (DZA, DLS) wirkt sich nicht negativ auf die Bedienungssicherheit aus, vorausgesetzt der Einschaltvorgang kann mit einem Handgriff erfolgen.

4.2.2 Ausfall der Druckzumisanlage oder der Druckluftschaumanlage

Der Ausfall der einzelnen Komponenten hat keine Unterbrechung des Wasservolumenstromes zur Folge. Das Ereignis kann als sehr selten bezeichnet werden und hat für die Einsatzkräfte keine negativen Folgen, da in beiden Fällen das Löschmittel Wasser weiter gefördert werden kann. Bei Verwendung eines ausreichend dimensionierten Hohlstrahlrohres (sh. Kap. 2.5) lautet die Risikobewertung also „gering“.

Fällt die Druckluftschaumanlage aus, hat dies keinen Einfluss auf die DZA. Umgekehrt bewirkt ein Ausfall der DZA auch eine Unterbrechung der Druckluftförderung. Diese Sicherheitseinrichtung ist erforderlich, um zu verhindern, dass Druckluft in die Förderleitung gelangt, wenn kein Schaummittel gefördert wird, was erhebliche Druckschwankungen bei der Abgabe des Löschwassers zur Folge hätte.

- ⇒ Der Ausfall der DZA oder der DLS hat keine negativen Auswirkungen auf die Sicherheit der Einsatzkräfte.

4.2.3 Ausfall der Feuerlöschkreiselpumpe

Der Ausfall der FP unterbricht den Wasservolumenstrom und stellt – unabhängig vom Löschverfahren – für die Einsatzkräfte ein „hohes“ Risiko dar: Es besteht Lebensgefahr, wenn sich der im Innenangriff arbeitende Trupp nicht umgehend zurückzieht. Setzt man jedoch regelmäßigen Betrieb, Wartung und Überprüfung der FP voraus, dann ist ein Ausfall eher unwahrscheinlich.

⇒ Beim Ausfall der FP ist unverzüglich auf ein weiteres Löschfahrzeug zurückzugreifen, bzw. dies nachzufordern. (vfdb Richtlinie)

4.2.4 Versagen der Schlaucheinbindung

Erfolgt die Einbindung nach den anerkannten Regeln der Technik, ist das Abrutschen der Schlaucheinbindung eher unwahrscheinlich. Weil von den Herstellern jedoch vor der Auslieferung ihrer Produkte keine Arbeitsdruckprüfung nach DIN 14811 durchgeführt wird, sollte dies – zur Risikominimierung – vom Anwender selbst vor der ersten Inbetriebnahme, direkt nach Wareneingang, nachgeholt werden. Wenn diese Vorsichtsmaßnahme außer acht gelassen wird, dann ist, obwohl die Eintrittswahrscheinlichkeit auf selten gestuft wurde, das Risiko dennoch „hoch“ – gleich hoch für alle drei untersuchten Löschmittel.

Es ist auch bei DLS führenden Schläuchen nicht höher als bei Schläuchen, die Schaummittel-Lösungen enthalten (nach Z- Zumischer oder DZA), denn DLS enthält genau die gleichen Tenside. Es besteht – im Gegenteil – bei der Verwendung von DLS eine geringere Versagenswahrscheinlichkeit der Schlaucheinbindung, weil die möglichen anlagentechnischen Drücke hier auf 10 bar [4] begrenzt sind, während bei Wasser und bei DZA deutlich höhere Drücke auftreten können [5, 29]. Die Neufassung der DIN 14811 berücksichtigt das gestiegene Druckniveau moderner Feuerlöschkreiselpumpen und die Möglichkeit von Druckstößen beim Takten mit Strahlrohren, indem sie höhere Anforderungen an den Einband der Schläuche stellt.

Die persönlichen Schutzausrüstung (PSA) verhindert im Ereignisfall schwere bleibende Schäden. Die Unterbrechung der Löschmittelförderung lässt sich durch das Bereitstellen von Ersatzmaterial schnell überbrücken. Dies ist ohnehin erforderlich, da noch andere Versagensgründe für das Schlauchmaterial existieren: Undichtigkeiten durch mechanische und/oder thermische Beschädigungen.

- ⇒ Die Schläuche sind vor dem ersten Gebrauch zu prüfen, insbesondere dann, wenn die Schlaucheinbindung erneuert wurde. An der Einsatzstelle sind immer ausreichend Schläuche für den sofortigen Ersatz defekter Schläuche vorzuhalten.

4.2.5 Versagen des Verteilers

Das Versagen des Verteilers ist unwahrscheinlich. Ungewolltes Austreten von Löschmittel wäre dann die Folge. Ein Unterschied zwischen den einzelnen Löschverfahren besteht diesbezüglich nicht. Eine Gefährdung der Einsatzkräfte ist weitgehend auszuschließen, da das Versagen des Verteilers durch eine regelmäßige Sicht- und Funktionsprüfung verhindert werden kann – Risikofaktor also „gering“. Das Tragen der PSA wird vorausgesetzt. Wird der Löschmittelvolumenstrom durch einen defekten Verteiler unterbrochen oder kann dieser nicht geöffnet werden, ist dieser Verteiler auszutauschen.

- ⇒ Die Löschfahrzeuge verfügen nach Norm über einen zweiten Verteiler. Damit ist der sofortige Austausch eines defekten Verteilers möglich.

4.2.6 Arbeiten mit Schläuchen

Das Stolpern, Rutschen und Stürzen über ausgelegtes Schlauchmaterial gehört zu den häufigsten Unfallursachen beim Feuerwehreinsatz [36]. Die Eintrittshäufigkeit steigt mit der Zahl der ausgelegten Schläuche. Ob die Verwendung signalfarbener Schläuche das Risiko – hier „mittelgroß“ – von Stolperunfällen im Innenangriff bei starker Rauchentwicklung (Sicht gegen null) reduziert, wird von den Feuerwehr-Unfallkassen gegenwärtig untersucht.

Allerdings ist das Risiko, über Schläuche zu stolpern, bei den hier analysierten Löschverfahren nicht identisch, denn die Unfallgefahr steigt mit der zunehmenden physischen Belastung an der Einsatzstelle. Die Beweglichkeit der Einsatzkräfte ist besonders in engen Treppenträumen, Kellerräumen oder in Industrieanlagen stark eingeschränkt. Die mit Druckluftschaum gefüllten Schläuche haben wegen des Druckluftanteils im Vergleich zu den mit Wasser beziehungsweise Wasser und Schaummittel gefüllten Schläuchen ein um mindestens 25 % geringeres Gewicht.

Die Flexibilität der Einsatzkräfte beim Umgang mit Schlauchmaterial ist bei der Anwendung von Druckluftschaum dadurch deutlich verbessert und ein Stellungswechsel lässt sich einfacher durchführen.

Stehen die Schläuche unter Arbeitsdruck, so ist die Gefahr des Abknickens, Verklemmens oder Hängenbleibens bei den drei Löschverfahren gleich. Zu beachten ist, dass die Schläuche möglichst drallfrei auszulegen sind. Strahlrohre sind zu Beginn der Löscharbeiten vollständig zu öffnen, damit die Luft aus den Schläuchen entweichen kann. Der Ausgangsdruck der FP sollte dabei > 5 bar betragen.

Die Schaumhöhe bei nassem Druckluftschaum beträgt etwa 5 mm, bei trockenem Druckluftschaum etwa 15 mm. Wird Druckluftschaum sinnvoll und zweckmäßig verwendet, so wird sich nur eine geringe Schaumschicht auf dem Boden ablagern. Die Höhe dieser Schicht führt hierbei nicht zur Verdeckung von Stolperfallen. Dagegen können bei konventionellem Schwer- oder Mittelschaum Schaumhöhen von 50...200 mm durchaus das sichere Begehen der Einsatzstelle erschweren.

⇒ Das Arbeiten mit Druckluftschaum führenden Schläuchen reduziert deutlich die physische Belastung der Einsatzkräfte.

4.2.7 Ungewolltes Öffnen der Schlauchkupplungen

Bei korrektem Anschluss der Kupplungsteile – Knaggen bis zum Anschlag durchgekuppelt – und bei drallfreier Verlegung des Schlauchmaterials ist diese Gefährdung unwahrscheinlich. Allerdings lässt sich in der Hektik eines Einsatzes das ungewollte Öffnen der Schlauchkupplungen nicht immer vermeiden. In den meisten Fällen tritt der Effekt dann bereits beim Hochfahren der FP auf – behaftet mit einem für alle drei Löschverfahren gleichen „mittelgroßen“ Risiko durch das schlagende Schlauchende. Die ungewollte Unterbrechung der Löschmittelförderung lässt sich durch Wiederholen des Kuppelvorgangs beheben.

Auch hier beträgt der Systemdruck bei der Anwendung von Druckluftschaum maximal 10 bar (lt. DIN 14430), während die anlagentechnischen Drücke bei der Wasser oder Wasser/ Schaummittel-Anwendung diesen Wert deutlich übersteigen können. Keinesfalls dürfen schlagende Teile gehalten werden. Auf jeden Fall ist eine geeignete Deckung aufzusuchen. Die Zeitdauer, die für das Entspannen der teilweise mit Druckluft gefüllten Schlauchleitungen erforderlich ist, kann bei einer üblichen Brandstelleneinrichtung von zwei B-Schläuchen à 20 Meter und sechs C-Schläuchen à 15 Meter vernachlässigt werden.

⇒ Das Wissen um die Gefährdungen sowie das Tragen der PSA ist die Voraussetzung für den sicheren Umgang mit Schlauchkupplungen.

4.2.8 Arbeiten mit Strahlrohren

Die Gefährdung durch Strahlrohre – Mehrzweckstrahlrohre oder Hohlstrahlrohre – ist für Einsatzkräfte selten. Das für alle drei Löschverfahren gleiche „mittelgroße“ Risiko kann insbesondere dann reduziert werden, wenn nicht versucht wird, ein schlagendes Strahlrohr aufzunehmen. Die Rückstoßkräfte des Wasservolumenstroms sind entweder durch ausreichend Personal am Strahlrohr oder durch Stützkrümmer aufzunehmen.

Auch hier ist festzustellen, dass die Anwendung von Druckluftschaum die anlagentechnischen Drücke auf 10 bar begrenzt und dass der Druckluftanteil in den Schläuchen die Rückstoßkräfte reduziert, ohne dadurch die Wurfweite des Löschmittelstrahles zu verringern (sh. Kap. 2.3). Das langsame Öffnen und Schließen der Strahlrohre sowie das gefühlvolle „Hochfahren“ der FP sollte unbedingt Bestandteil der Aus- und Weiterbildung sein.

⇒ Das Tragen der PSA sowie die Kenntnis der möglichen Gefährdung reduzieren das Risiko erheblich. Die Belastung der Haltemannschaft ist bei der Verwendung von Druckluftschaum geringer.

4.2.9 Innere Druckstöße

Das schlagartige Schließen von Strahlrohren – dazu zählt auch das sogenannte Takten des Löschmittelstrahles (im Sekundenrhythmus, sh. Kap. 2.6) – führt zu Druckstößen in der gesamten wasserführenden Anlage, wobei eine Abhängigkeit vom Ventilquerschnitt des Strahlrohres besteht. Bei Ventil- und Schlauchquerschnitten über 2,5" (entspricht > 63,5 mm) wird von einem erhöhten Risiko ausgegangen. In der nordamerikanischen Literatur wird dieses Phänomen als „water-hammer“ bezeichnet, NFPA 1901 sieht hierzu Sicherheitsmaßnahmen vor.

Nur durch langsames Öffnen und Schließen der Ventile (> 3 sec für den Schaltvorgang) lässt sich eine Schädigung der Anlage ausschließen. Sollten Teile der Anlage – FP, Schlauchmaterial, Strahlrohr – beschädigt werden, kann dies zur Unterbrechung des Förderstromes führen, was im Innenangriff gefährliche Folgen haben würde. Obwohl in Deutschland bislang kaum Schäden durch das schnelle Unterbrechen

des Förderstromes bekannt geworden sind, muss das Risiko für die Löschmittel Wasser und Wasser/Schaummittel-Gemisch mit „hoch“ bewertet werden, wenn sich der vom Löschmittelausfall betroffene Trupp nicht sofort zurückzieht.

In Druckluftschäum fördernden Anlagen und Leitungen können Druckstöße wie in Wasserleitungen wegen des kompressiblen Luftanteils nicht auftreten [29]. Sie sind diesbezüglich mit keinem Risiko behaftet.

- ⇒ Druckstöße in der Anlage sind beim üblichen Gebrauch nicht relevant. Allerdings ist das Takten mit Wasser am Strahlrohr nicht als unkritisch zu betrachten. Bei der Verwendung von Druckluftschäum werden Druckspitzen vermieden.

4.2.10 Unterschreiten der erforderlichen Applikationsrate

Für das Löschen brennbarer Flüssigkeiten mit Schaum haben die Hersteller der Schaummittel Applikationsraten [L/min·m²] angegeben. Werden diese Mindestwerte unterschritten, sinkt die Wahrscheinlichkeit eines Löscherfolges. Auch für brennbare feste Stoffe existieren Erfahrungswerte bezüglich der erforderlichen Applikationsraten (sh. Kap. 2.5).

Schon bei der Bekämpfung eines kleinen Brandes im Innenangriff (< 50 m²) sollte den Einsatzkräften ein Wasservolumenstrom von mindestens 200 L/min zur Verfügung stehen. Redaktionelle Anmerkung: Der Schaum- und Volumenstrom ist irreführend, der Flüssigkeitsvolumenstrom ist relevant und bereits genannt. Dieser Volumenstrom könnte zwar von einer „DLS 1.200“ geliefert werden (sh. Tabelle 3), doch sollte – weil sich immer die Notwendigkeit ergeben kann, ein weiteres Strahlrohr (möglicherweise ein B-Rohr für zusätzliche Löschmaßnahmen von außen) einsetzen zu müssen – grundsätzlich nicht mit DLS- Aggregaten kleiner als „DLS 2.400/800“ gearbeitet werden. Dazu sind entsprechend leistungsfähige Hohlstrahlrohre zu verwenden. Die Risikobewertung lautet für alle drei Löschmethoden „gering“.

- ⇒ Das Unterschreiten der minimalen Applikationsrate sollte durch die Bereitstellung geeigneter Hohlstrahlrohre vermieden werden. Ansonsten wird sich das Feuer unkontrolliert ausbreiten. Kann die erforderliche Applikationsrate auch durch die Vornahme von mehreren Hohlstrahlrohren nicht erreicht werden, dann ist rechtzeitig der Rückzug anzutreten.

4.2.11 Überschreiten der erforderlichen Applikationsrate

Dieses Problem tritt insbesondere bei Industriebränden auf. Bei den üblichen Gebäudebränden ist eine Überschreitung der Applikationsrate durch einzelne Strahlrohre eher unwahrscheinlich. Befinden sich Reifen oder Kunststoffe im Brandabschnitt, dann wird häufig versucht, mit großen Wasservolumenströmen den Brand einzudämmen, weil diese Stoffe mit unbehandeltem Wasser – die Oberflächenspannung ist zu hoch – nicht ausreichend benetzt werden können. So kommt es zu einem Löschmittelüberschuss. Umweltschäden sind dann möglich, aber auch die Überlastung von Bauteilen ist nicht auszuschließen.

Werden dem Löschwasser Schaummittel zugemischt, dann wird das Eindringvermögen des Löschmittels in die Brandgutoberfläche oder in zu Ballen gepresstes Brandgut deutlich verbessert. Ein Löscherfolg ist eher wahrscheinlich und geringere Wasserschäden sind zu erwarten.

Wird (Druckluft-)Schaum eingesetzt, so gelingt es zusätzlich, die wirksame Oberfläche des Löschmittels Wasser zu vergrößern und dieses auch auf abschüssigen Flächen des Brandgutes zu halten. Das Zeitintervall für einen effektiven Wärmeübergang wird dadurch vergrößert und der Löscherfolg wird sich noch schneller als bei einem Netzmitteleinsatz einstellen. Ein Wasserschaden ist hier vernachlässigbar. Unabhängig vom Löschmittel wird das Risiko deshalb als „gering“ eingestuft.

- ⇒ Bei Problembänden, insbesondere bei Industriebränden, steigt ohne Schaummittel-Zumischung die Gefahr, dass der Brand nicht zu beherrschen ist, und dass die Gebäudestatik überlastet wird. Negative Folgen für die Einsatzkräfte sind in der Regel auszuschließen, weil dann kein Innenangriff mehr stattfindet.

4.2.12 Mechanische Einwirkung von außen

An Einsatzstellen kann es vorkommen, dass Druckschläuche durch scharfe Kanten oder durch raue Oberflächen – geteerte und gesplittete Flächen – beschädigt werden. Dies tritt unabhängig vom Schlauchinhalt auf. Eine vollkommene Durchtrennung der Schläuche ist dabei unwahrscheinlich. Die Unterbrechung der Löschmittelförderung lässt sich durch bereitgestelltes Ersatzmaterial schnell überbrücken.

Im Einzelfall kann die Beschädigung des Schlauchmaterials in Form einer Kleinleckage eine gewisse Zeit toleriert werden. Negative Folgen sind für das Einsatz-

personal nicht zu erwarten – der Risikofaktor lautet also „gering“. Notfalls ist der Rückzug anzutreten und die Brandbekämpfung mit Ersatzmaterial wieder aufzunehmen.

- ⇒ An der Einsatzstelle sind immer ausreichend Schläuche für den sofortigen Ersatz defekter Schläuche vorzuhalten. Schläuche sind bei jeder Reinigung der Gebrauchsdruckprüfung zu unterziehen.

4.2.13 Versagen der Schlauchleitung infolge thermischer und mechanischer Überbelastung

Dieser Versagensgrund kommt in der Einsatzpraxis selten vor. Voraussetzung dafür wäre, dass ein am Boden verlegter Schlauch mit stark erwärmtem Material, beispielsweise Glut, in Kontakt gerät. Es entsteht eine lokale Perforation des Schlauchgewebes mit vergleichbaren Folgen wie bei einer mechanischen Beschädigung.

Wird ein Druckschlauch einer erhöhten Wärmestrahlung ausgesetzt, z. B. infolge zu geringen Abstandes zu einem brennenden Objekt, kann dies zum Platzen des Druckschlauches führen. Sowohl die Höhe der hierfür erforderlichen Temperatur als auch die Zeitdauer, die zum Versagen des Schlauches führen können, stellen nicht nur eine Überlastung der Ausrüstung dar, sondern liegen auch deutlich außerhalb der Einsatzgrenzen für die Einsatzkräfte [2, 27].

Dieses Szenario ist für die Einsatzkräfte nur dann lebensgefährlich, wenn die thermische (und gleichzeitig mechanische!) Überlastung des Schlauches auf dem für den Rückzug vorgesehenen Weg erfolgt. Deshalb ist es wichtig, die Gefahren der Einsatzstelle zu erkennen und rechtzeitig vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen. Ist dies nicht der Fall, dann muss das Risiko mit „hoch“ bewertet werden.

- ⇒ Der Versagensgrund „thermische Überbelastung des Schlauchmaterials“ hat nur dann schwerwiegende Folgen, wenn andere ungünstige Umstände (unbemerkt Wiederaufflammen vermeintlich gelöschten Brandgutes auf dem Rückzugsweg, leer geatmeter PA, kein Sicherungstrupp in der Nähe,... [1]) hinzukommen.

4.2.14 Extrem hohe Brandlast

Brennende Holzstapel, Reifenhalden oder Heulager stellen die Grenzen der Brandbekämpfung dar. Eine mächtige Glutschicht kann durch Oberflächenbenetzung alleine nicht gelöscht werden. Dies gilt unabhängig vom Löschverfahren. Lediglich das Zeitintervall bis zum Wiederaufflammen ist bei der Druckluftschäum-Brandbekämpfung erfahrungsgemäß am längsten.

Entscheidend für die Sicherheit der Einsatzkräfte ist das Erkennen der Lage, z. B. ständig wiederkehrendes Aufflammen eines vermeintlich gelöschten Bereiches. Die Erhöhung der Applikationsrate ist hierbei nicht immer hilfreich. Gerade bei Wasser könnte dies zur Überlastung von Bauteilen führen. Eine sinnvolle Maßnahmen stellt statt dessen das Freilegen, Ausräumen und/oder auch in die Tiefe gehen dar, damit das Löschmittel an die entscheidenden Stellen vordringen kann.

- ⇒ Wird die Gefährdung durch extrem hohe Brandlasten nicht erkannt, besteht insbesondere mit Wasser das hohe Risiko, die Gebäudestatik zu überlasten. Mit Wasser/Schaummittel-Gemisch beziehungsweise DLS sinkt dieses Risiko auf „mittelgroß“.

4.2.15 Hohlräume im Brandbereich

Bei allen Bränden, bei denen von Temperaturen $> 800^{\circ}\text{C}$ auszugehen ist, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass auch verdeckte Hohlräume vom Feuer erfasst sind. Diese sind in geeigneter Weise (schaffen von Sondierungsöffnungen) und unter Selbstschutz zu kontrollieren. Die Hohlraumproblematik besteht unabhängig vom Löschverfahren und birgt ein für die drei bewerteten Löschmittel gleiches „geringes“ Risiko. Ohne Öffnungen kann kein Löschmittel eindringen. Die Fließfähigkeit ist auch bei nassem Druckluftschäum gegeben. — Gegenüber Wasser begünstigt darüber hinaus die wesentlich reduzierte Oberflächenspannung sowohl von Wasser/Schaummittel-Gemisch als auch von DLS das Eindringen in enge Zwischenräume.

- ⇒ Organisatorisch gehören zur Bekämpfung von Bränden in Hohlräumen ausreichend langes Verweilen an der Einsatzstelle und die Brandnachschau.

4.2.16 Elektrische Anlagen

Der Löscheinsatz in elektrischen Anlagen ist auch bei der Anwendung von Löschschaum, das heißt, auch bei Druckluftschaum bis zu einer elektrischen Spannung von 1.000 Volt unter Beachtung der Mindestabstände gem. VDE 0132 unbedenklich [37, 38]. Wegen der schlechten Sichtbedingungen bei einem Innenangriff ist das Risiko, unter Spannung stehende Teile zu berühren, deutlich höher zu bewerten als die Gefahr, mit der elektrischen Spannung über den Löschmittelstrahl in Kontakt zu kommen.

⇒ Die Festlegungen in VDE 0132 wären aufgrund Erfahrungen aus der Praxis dringend zu überarbeiten.

4.2.17 Brennbare Flüssigkeiten

Zu den brennbaren Flüssigkeiten zählen auch unter Wärmeeinwirkung verflüssigte Stoffe wie beispielsweise Thermoplaste, die mit Wasser heftig reagieren können. Alle Lösungsverfahren für brennbare Flüssigkeiten erfordern ein intensives Training. Das Risiko wird als „mittelgroß“ bewertet.

Gefahrloser ist die indirekte Brandbekämpfung. Das Löschmittel ist möglichst ohne Druck auf die brennende Flüssigkeitsoberfläche aufzutragen, ohne dabei den Sicherheitsabstand zu verringern. Bei ungenügender Kühlung stark erwärmter fester Stoffe in der Nähe von brennbaren Flüssigkeiten besteht die Gefahr einer Rückzündung. Ausreichende Kühlung und möglichst lückenlose Beschäumung der brennenden Flüssigkeitsoberfläche erfordern ein hohes Maß an Flexibilität. Diese Beweglichkeit der Einsatzkräfte ist nur mit C-Schläuchen möglich. Das Druckluftschaum-Verfahren ist hier wegen der geringeren Schlauchgewichte im Vorteil.

⇒ Ohne Zusatzausbildung für die Flüssigkeitsbrand-Bekämpfung besteht auch bei der Brandbekämpfung mit Schaum die Gefahr, den Sicherheitsabstand zu unterschreiten und Rückzündungen nicht zu verhindern.

4.2.18 Metallbrände

Die Gefahr von Metallbränden besteht im Wesentlichen im industriellen Bereich. Die Bekämpfung mit Wasser scheidet dabei bis auf wenige Ausnahmen – Motorbrand im PKW – aus. Zusätzlich zu den bekannten Metallbrand-Löschmitteln (Grauguss-Späne, trockener Sand, Metallbrandpulver) kann auch Druckluftschaum eingesetzt werden.

Mit *nassem* Druckluftschaum besteht zunächst die Möglichkeit, die an das brennende Metall angrenzenden Sekundärbrände zu löschen und die Umgebung vor der Wärmestrahlung und der Kontaktwärme zu schützen. *Trockener* Druckluftschaum wird dann vor dem brennenden Metall auf den Boden gebracht. Damit wird dem Schaumstrahl die Energie genommen. Dann kann diese Schaumdecke auf das brennende Metall geschoben werden. Dieser Vorgang ist bei Bedarf mehrfach zu wiederholen.

Es ist mit diesem Verfahren nicht möglich, den eigentlichen Metallbrand zu löschen! Doch kann der Brand auf diese Weise unter Kontrolle gehalten werden, bis die vorstehend genannten Löschmittel eingesetzt werden können. Das Risiko für die Einsatzkräfte ist „mittelgroß“.

- ⇒ Ohne Zusatzausbildung für die Metallbrandbekämpfung besteht auch beim Schaumeinsatz die Gefahr einer heftigen chemischen Reaktion mit dem im Schaum gebundenen Wasser.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für den Feuerwehreinsatz

Nach einem Rückblick auf die historische Entwicklung des DLS- Löschverfahrens werden die DIN 14430 und die dort definierten Sicherheits- und Leistungsanforderungen dargelegt. Die Anwendung und die Löschwirkung von DLS werden besprochen und seine wesentlichen Vorteile aufgezählt und erläutert. Die beiden wichtigsten lauten: Bessere Löschwirkung wegen geringerer Verschäumungszahl als Luftschaum und Sicherheitsgewinn infolge höherer Reichweite.

Ein eigenes Kapitel befasst sich mit den erforderlichen Applikationsraten.

In 90 Versuchen wurde die Wärme/Druck-Belastbarkeit von Feuerwehrschräuchen der Klasse 1 getestet, wobei die Wärme durch Konvektion und Strahlung übertragen

wurde. Das Untersuchungsergebnis erlaubt die folgende Schlussfolgerung: Das geschlossene Strahlrohr eines Feuerwehrschauches der Klasse 1, auf den – bis zu seinem Versagen – am Boden 275°C einwirken, kann sich nicht in den Händen eines dort eine halbe Stunde verharrenden Feuerwehrmannes (SB) befinden. Möglicherweise hat er sich zurückgezogen – dann wird aber seine Sicherheit von dem nun platzenden Schlauch auch nicht mehr gefährdet.

In 50 zusätzlichen Versuchen wurden Feuerwehrschräuche der Klassen 2 und 3 untersucht, wobei die über die Herstellergarantie (80°C) hinausgehende Wärmebelastung nur durch Strahlung und Konvektion erfolgte:

- Für Klasse-2-Schräuche wurden bei geschlossenem Strahlrohr in 275°C warmer Umgebung Standzeiten von bis zu 3 Stunden gemessen. Die Schlussfolgerung aus diesem Ergebnis lautet, dass Schräuche der Klasse 2 zu einem weiteren Sicherheitsgewinn führen und die üblichen Anforderungen im Feuerwehreinsatz deutlich über treffen. Dieser Sicherheitsgewinn bedeutet, dass Klasse-2-Schräuche im Innenangriff eingesetzt werden können, wenn dem Einsatzleiter das Risiko des Einsatzes von Klasse-1-Schräuchen zu hoch erscheint.
- Bei den angestellten Versuchen mit Wärmebeaufschlagung war die Verwendung von Klasse-3-Schräuchen mit keinem Sicherheitsgewinn für die Einsatzkräfte verbunden. Der Vorteil der schützenden Außenbeschichtung wird durch das schwächere Gewebe wieder aufgehoben.

Wird die Wärme auch noch leitend übertragen („mangelhaft“ gelöschter Brandschutt mit Temperaturen über 400°C), so liegt der Sicherheitsgewinn von Klasse 2 gegenüber Klasse 1 nach DIN 14811 im Bereich weniger Sekunden beziehungsweise Minuten — und Wasser führende Druckschräuche können sogar schneller versagen als DLS führende!

Temperaturen über 250°C treten jedoch bei Löschrmaßnahmen nur dann auf, wenn der Raum in der Erstphase der Brandbekämpfung betreten wird. Diese hohen Temperaturen wirken in Kopfhöhe der Einsatzkräfte und sind nur kurzzeitig zu erwarten. Die thermische Belastung der am Boden liegenden Druckschräuche ist deutlich geringer. Werden Druckschräuche aber höheren Temperaturen als 250°C ausgesetzt, dann besteht auch die hohe Wahrscheinlichkeit, dass brandraumtypische Temperaturen von 800···1.000°C erreicht werden, denen keine Ausrüstung – weder PSA noch Schräuche – standhält.

Aus den Versuchsergebnissen kann also geschlossen werden, dass die untersuchten Schläuche sicher sind, denn unabhängig vom Löschmittel, unabhängig vom Löschmittel-Volumenstrom und unabhängig von der Art der Wärmeübertragung (Konvektion, Strahlung oder Leitung) versagen die Schläuche bis nahe an den Schmelzpunkt des tragenden Gewebes nicht. Erst wenn dieses Temperatur-Niveau überschritten wird, sind Schlauchplatzer zu verzeichnen, weil das geschwächte Material dem Druck (p_{schl} bei DLS, p_{fl} bei Wasser) nicht mehr standhält. — Diese Erkenntnis lässt sich aus der Tatsache, dass marktgängige Schläuche den DIN-Test bestanden haben müssen, nicht ableiten, denn wie die Versuche zeigen (sh. Tabelle 7), versagen verschiedene Fabrikate auch zu verschiedenen Zeitpunkten – mit Unterschieden von 100 % und darüber!

In einer vergleichenden Risikoanalyse wird erläutert, dass der Einsatz von Druckluftschaum kein zusätzliches Risiko für die Einsatzkräfte im Innenangriff darstellt. Dies gilt auch – obwohl immer noch kolportiert – für die längst widerlegte Behauptung, DLS führende Feuerweherschläuche würden vom Einbindestutzen rutschen. Die verbesserten Bedingungen für einen effektiven Wärmeübergang und die geminderte physische Belastung infolge des geringeren Schlauchgewichts stellen eher eine Reduzierung des Gefahrenpotentials dar.

Unabhängig vom angewendeten Löschverfahren – Wasser, Wasser mit Netzmittel, Druckluftschaum – gilt für den Feuerwehreinsatz:

1. Das zentrale Thema ist und bleibt die Aus- und Weiterbildung der Einsatzkräfte: Gefahren müssen erkannt und Gegenmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden.
2. Die Brandbekämpfung in Gebäuden stellt eine erhebliche Gefährdung der Einsatzkräfte dar. Die Orientierung der eingesetzten Kräfte im Gebäude muss sichergestellt sein. Dies lässt sich insbesondere durch die konsequente Verwendung einer Wärmebildkamera erreichen. Darüber hinaus sind Abluftöffnungen zu schaffen – gleichzeitig mit dem Innenangriff, um heißen Brandrauch abführen zu können. Zur raschen Ventilation des Objektes ist anschließend eine Überdruckbelüftung sinnvoll.
3. Zumindest während des Innenangriffs muss Kommunikation nach außen störungs- und unterbrechungsfrei stattfinden können. Die alleinige Abfrage des Restdruckes in den Atemluftgeräten stellt keine ausreichende Überwachung des Atemschutzeinsatzes dar — und wider-

spricht der Feuerwehr-Dienstvorschrift [39]! Auch die Position und die vorgefundene Einsatzlage des Angriffstrupps müssen zwingend nach außen mitgeteilt werden. Nur so ist es möglich, eine Notsituation rechtzeitig zu erkennen und geeignete Rettungsmaßnahmen einzuleiten.

4. Der Angriffstrupp sollte entsprechend der Lage aus mehr als zwei Einsatzkräften bestehen. Dies hat sich in der Einsatzpraxis vielfach bewährt. Bei einem Dreimann-Trupp stehen dann zwei Mann für die Brandbekämpfung und einer für Orientierung, Kommunikation und Kontrolle (innere Atemschutzüberwachung) zur Verfügung. Während einer Personenrettung ist der dritte Mann in der Lage, den Trupp mit dem Strahlrohr abzusichern. Es ist ernsthaft über die Funktion eines „safety-officer“ nachzudenken, der sich während eines Einsatzes von Atemschutzgeräteträgern voll und ganz auf deren Sicherheit konzentrieren kann und mit dem ein ständiger Informationsaustausch stattfinden soll.
5. Die Unterbrechung der Löschmittelzufuhr ist insbesondere dann für die Einsatzkräfte lebensbedrohlich, wenn gleichzeitig der Rückzugsweg blockiert ist. Deshalb ist taktisch unbedingt darauf zu achten, dass den Einsatzkräften immer eine gesicherte Rückzugsmöglichkeit zur Verfügung steht.
6. Ein Sicherheitstrupp – geschult im Notfalltraining – hat mit Ausrüstung zum sofortigen Einsatz bereitzustehen. Dazu gehört auch ausreichend Reserveschlauchmaterial. Wenn Einsatzkräfte in den oberen Geschossen eines Gebäudes arbeiten, ist ein zweiter Rettungsweg für den eingesetzten Trupp über tragbare Leitern oder über eine Drehleiter sicherzustellen.

Grundsätzlich ist die Möglichkeit der Unterbrechung der Löschmittelzufuhr an jeder Einsatzstelle gegeben:

- Ausfall des Löschwasserbehälters des Fahrzeuges oder der Hydrantenversorgung;
- Ausfall der Feuerlöschkreiselpumpe;
- Ausfall der Brandstellenleitung durch versehentliches Abstellen am Verteiler;
- mechanisch und/oder thermisch bedingte Unterbrechung der Brandstellenleitung.

Einsatztaktisch ist daher eine Unterbrechung der Löschmittelzufuhr zu Brandstellen unbedingt zu berücksichtigen. Geeignete Ersatzmaßnahmen sind zu ergreifen.

Unabhängig davon kann folgende Empfehlung gegeben werden: Wenn bei Druckschläuchen, um die Sicherheit der Einsatzkräfte zu verbessern, mechanisch und thermisch eine höhere Belastbarkeit erforderlich erscheint, sollte bei einem Innenangriff Schlauchmaterial nach DIN 14811, Klasse 2 verwendet werden. Die Gewichtserhöhung der leeren Schläuche (knapp 1 kg pro C42-15-Schlauch) wird beim Einsatz von DLS durch eine Gewichtsreduzierung von über 6 kg (E = 4; p = 7 bar) mehr als wettgemacht.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Innenministerium Baden-Württemberg, Landesbranddirektor und Unfallkommission „Tübingen“:
Bericht zum Einsatz in Tübingen, Reutlinger Straße 34/1 am 17.12.2005,
Stuttgart, 29.7.2006
- [2] Föhl, C. Axel und Jochen Schaaf:
Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschaum führenden Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden,
Forschungsbericht Nr. 150 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung,
Karlsruhe 2008
- [3] Feuerwehren der Bundesländer Bayern, Berlin und Hessen im Auftrag des Referates 5 der vfdb
(mit Unterstützung des bayerischen Staatsministeriums des Inneren und des bayerischen Gemeindeunfallversicherungsverbandes):
Gefährdungsbeurteilung beim Feuerwehreinsatz,
München 2008 (unveröffentlicht)
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW):
Druckzumischanlagen und Druckluftschäumenanlagen (DIN 14430),
Beuth-Verlag, Berlin 2008
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW):
Feuerlöschschläuche – Druckschräuchen und Einbände für Pumpen und Feuerwehrrfahrzeuge (DIN 14811),
Beuth-Verlag, Berlin, Juli 2007
- [6] Pleß, Georg und Ursula Seliger:
DSD – Brandschutz und Brandbekämpfung in Wertstofflagern,
Forschungsbericht Nr. 123,1 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V
– Ausschuss für Feuerwehrrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Heyrothsberge 2001
- [7] Rudolph, Stefan:
Das große Feuerwehr Handbuch,
ecomede-Verlag, Landsberg 1996
- [8] Treichel, Otto:
Die patentrechtliche Entwicklung der Schaumlöschtechnik,
Colloid & Polymer Science,
Band 59 (1932), Heft 1, Seite 113···114
- [9] Colletti, Dominic J.:
Class-A-Foam – Best Practice for Structure Firefighters
Lyon’s Publishing, Royersford, Pennsylvania, 1998

- [10] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW):
Feuerlöschkreiselpumpen mit Entlüftungseinrichtung (DIN EN 1028),
Beuth-Verlag, Berlin 2002
- [11] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW):
Brandklassen (DIN EN 2),
Beuth-Verlag, Berlin 2005
- [11a] National Fire Protection Association:
National Fire Codes — Standard for Low-, Medium- and High-Expansion Foam (NFPA 11)
Quincy (Massachusetts), USA 2005
- [12] Föhl, C. Axel:
Ermittlung der Anforderungen an Druckluftschaum-Systeme im Löscheinsatz,
Forschungsbericht Nr. 140 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe 2004
- [13] Seeger, Paul G. und Reiner John:
Verringerung des Löschmittelbedarfs durch Zusätze zum Löschwasser,
Technische Überwachung (TÜ), Band 31 (1990), Heft 5, Seite 211···219
- [14] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW):
Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum (Teil 1),
Leichtschaum (Teil 2), Schwerschaum (Teil 3) zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten und Schwerschaum (Teil 4) zum Aufgeben auf polare Flüssigkeiten (DIN EN 1568-1···4),
Beuth-Verlag, Berlin 2008
- [15] Riemer, Hans:
Nie mehr Löschwasserschaden! – April, April?,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 42. Jahrgg. (1988), Heft 5,
Seite 282···283
- [16] Hoppert, Manuel:
Löschmittelförderung in die Höhe von 120 m – Druckluftschaum und Wasser im Vergleich,
Vortrag beim Seminar für Anwender von Druckluftschäumenanlagen,
veranstaltet von der Berufsfeuerwehr Ingolstadt und vom bayerischen Innenministerium im AUDI-Kongresszentrum,
Ingolstadt, 11.10.2003
- [16a] Yang, Lifei:
Firefighters reach new heights,
Shanghai Daily, Vol. 008, Nr. 2211, Seite 1 und A2,
Shanghai, 20. April 2007

- [17] de Vries, Holger:
 1. Böblinger Brandbekämpfungsseminar – Brandbekämpfung mit CAFS und Class-A-Zumischung,
 am 11.11.2006 auf der Feuerwache Böblingen
http://www.feuerwehr-boeblingen.de/fileadmin/downloads/public/Brandbekaempfungsseminar_2006/Holger_de_Vries_BB_2006.pdf
- [18] Hoppert, Manuel:
 Erfahrungsbericht der Berufsfeuerwehr Offenbach am Main über das Druckluftschaum-Löschverfahren (CAFS Fa. HALE),
 Offenbach, 6.11.2003
- [19] Grimwood, Paul:
 Fire-Fighting Flow-Rate,
 London Fire Brigade, Januar 2005
<http://www.firetactics.com>
- [20] Fuchs, Martin; Andreas Demant und Rune Eriksson:
 Handhabung von Hohlstrahlrohren bei der Innenbrandbekämpfung,
 Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 63. Jahrgg. (2009), Heft 8,
 Seite 616··621
- [21] Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP), Electricité de France (EDF), Commissariat de l'Energie Atomique (CEA) et al.:
 Programme de Recherche sur l'Optimisation des Moyens Extincteurs pour la Suppression des Incendies en Structure (PROMESIS),
 Universität Poitiers, Mai 2010
- [21a] GIMAEX-Schmitz:
 One Seven of Germany – Produktinformation,
http://www.oneseven.info/download/os_video.zip
 Luckenwalde 2010
- [22] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb):
 Anforderungen an Feuerlöschgeräte und Löschmittel (Richtlinie 0502),
 Altenberge 2009
- [23] Hygiene-Institut des Ruhrgebietes:
 Abwassertechnische Prüfung und Beurteilung des Feuerlöschmittels STHAMEX-Class-A,
 Gelsenkirchen 1999
- [24] Cimander, Stefan:
 Atemschutzunfaelle.eu – live 2009
 die größte Gefahr ist fehlende Kommunikation,
 112 Magazin, 4. Jahrgg. (2009), Heft 7/8, Seite 31··35
- [25] Lemke, Handbuch Brandschutz
 57.Erg.lfg.6/01,VIII-14.1.3, Seite 4
- [26] Schröder, Hermann:
 persönliche Mitteilung, Stuttgart 2008

- [27] Hoschke, B.N.:
Spezifikation for Firefighters Clothing,
Fire Safety Journal, Band 4 (1981/1982), Seite 125...137
- [28] Comité Européen de Normalisation (CEN) – Technisches Komitee
"Ausrüstung für die Feuerwehr" (TC 192):
Feuerlöschschläuche – Druckschläuche und Einbände für Pumpen und Feuerwehrfahrzeuge (prEN 1924),
Brüssel, April 2003
- [29] Hinrichs, Behrend R.:
Untersuchung der Vor- und Nachteile des Kugelhahnes im Wasserfördersystem außerhalb des Strahlrohres im Vergleich zum Niederschraubventil,
Forschungsbericht Nr. 6 der Arbeitsgemeinschaft der Landesdienststellen für Feuerschutz in den Bundesländern (AGF), Karlsruhe 1964
- [30] Reick, Michael:
Temperaturbeständigkeit von Feuerweherschläuchen,
Vortrag auf der Tagung mit dem Landesbranddirektor in der Landesfeuerweherschule Bruchsal am 25.1.2006
- [31] GIMAEX-Schmitz Produktinformation:
Druckluftschäum-Aggregat „One Seven® OS C1-100 M“
(DLS 1.200 / DZA 2 / 0,2-2,0
nach DIN 14430),
Wilnsdorf 2009
- [32] Dr. Stamer:
Schaum gegen Feuer – Produktinformation über Schaum- und Sonderlöschmittel, hier STHAMEX-Class-A,
Hamburg 2003
- [33] Ising, Eckart (Schlauchweberei Jakob Eschbach GmbH):
Produktinformation zum Feuerweherschlauch „Eschbach-Synthetik-Polydur-Spezial, innen und außen gelb gummiert“,
Marsberg 2009
- [34] Rinke, Matthias (Schlauchfabrik Gollmer & Hummel):
Produktinformation zum Feuerweherschlauch „Progress-Spezial, innen und außen gelb gummiert“,
Straubenhardt 2009
- [35] Hasenmaier, Horst (Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik und Schlauchweberei):
Produktinformation zum Feuerweherschlauch „K2 L Silikon“,
Giengen 2009
- [36] Feuerwehr-Unfallkasse (FUK) Niedersachsen:
die-antwort-auf-die-stolperfalle-schlauch,
<http://www.fuk.de/news/archiv/>
Hannover 2005

- [37] Schubert, René und Michael Behrens:
DIN EN 15182 – Stahlrohre für die Brandbekämpfung,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 62. Jahrgg. (2008), Heft 2,
Seite 113···118
- [38] Fiebach, Jörg:
Elektrische Prüfung für Hohlstrahlrohre bis 380 Kilovolt,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung, 59. Jahrgg. (2005), Heft 2,
Seite 109···111
- [39] Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile
Verteidigung:
Feuerwehrdienstvorschrift 7 – Atemschutz,
Bodenheim, 19.9.2002
- [40] Hasenmaier, Horst (Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik und
Schlauchweberei):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „Silberfuchs K2 L“,
Giengen 2009
- [41] Hasenmaier, Horst (Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik und
Schlauchweberei):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „K3 L +“,
Giengen 2009
- [42] Ising, Eckart (Schlauchweberei Jakob Eschbach GmbH):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „Eschbach-Synthetik, rot beschichtet“,
Marsberg 2009
- [43] Hasenmaier, Horst (Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik und
Schlauchweberei):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „Pionier 500“,
Giengen 2009
- [44] Ising, Eckart (Schlauchweberei Jakob Eschbach GmbH):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „Eschbach-Synthetik-Polydur, innen und
außen rot gummiert“,
Marsberg 2009
- [45] Rinke, Matthias (Schlauchfabrik Gollmer & Hummel):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „Progress, innen und außen
rot gummiert“,
Straubenhardt 2009
- [46] Kaufhold/ Rempe
Feuerlöschmittel, 2. Auflage
2.5.1. Vollstrahl, Seite 48
- [47] Hegenbarth, Gerhard
Druckluftschäum (IV)
Feuerwehr 3/ 06 Seite 57

7. Verzeichnis der Tabellen und Bilder

Tabelle 1: Zusammenstellung und Erläuterung der verwendeten Abkürzungen und Fachausdrücke	4
Tabelle 2: Klassifizierung einer Druckzumisanlage nach DIN 14430.....	54
Tabelle 3: Klassifizierung einer Druckluftschaumanlage nach DIN 144.....	54
Tabelle 4: Löschmitteleigenschaften von Wasser und Schwertschaum	55
Tabelle 5: Volumenströme in einem C42-15-Schlauch in Abhängigkeit vom Förderdruck bei nomineller Verschäumungszahl $E = 4$, wenn am Hohlstrahlrohr ein Durchfluss von 360 L/min eingestellt wird	55
Tabelle 6: Charakteristika der untersuchten Feuerwehr-Druckschläuche	56
Tabelle 7: Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen mit stehendem DLS bei einer Umgebungstemperatur von 275°C und Wärmebeaufschlagung durch Konvektion und Strahlung.....	57
Tabelle 8: Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen mit stehendem Löschmittel bei einer Umgebungstemperatur von 275°C und bei Wärmebeaufschlagung durch Konvektion, Strahlung und Berührung mit einer 450°C warmen Platte	57
Tabelle 9: Verhalten von Feuerwehrschräuchen unter Druck- und Wärmebeaufschlagung – Versuchsergebnisse bei einer Umgebungstemperatur von 275°C	58
Bild 1: Funktionsschema einer Druckluftschaumanlage [11]	59
Bild 2: Die Bruchspannung in Feuerwehr-Druckschläuchen in Abhängigkeit von der Materialtemperatur.....	60
Bild 3: Der Berstdruck in Feuerwehr-Druckschläuchen in Abhängigkeit von der Materialtemperatur	61
Bild 4: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.1) mit DLS ($E = 6,5$) in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 6,4 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird das Strahlrohr geschlossen, 139 min danach versagt der Schlauch.....	62
Bild 5: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.6) mit DLS ($E = 6,5$) in einem Klasse-3-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,4 bar, Schließdruck = 6,3 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird das Strahlrohr geschlossen, 28 min danach versagt der Schlauch.....	63

Bild 6:	Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen (wenn nicht anders bezeichnet: Klasse 1 nach DIN 14811) mit geschlossenem Strahlrohr bei Wärmebeaufschlagung durch Konvektion und Strahlung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur	64
Bild 7:	Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.24) mit DLS (E = 6,5) in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,3 bar, Schließdruck = 4,4 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 6 sec danach versagt der Schlauch.....	65
Bild 8:	Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.31) mit DLS (E = 6,5) in einem Klasse-3-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 6,1 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 8 min danach versagt der Schlauch.....	66
Bild 9:	Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.41) mit Wasser in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, Förderstrom = 130 L/min, Arbeitsdruck ≈ 7 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, 5 sec danach versagt der Schlauch bei fließendem Löschmittel.	67
Bild 10:	Der Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei dem Versuch (Vers.50) mit Wasser in einem Klasse-1-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, Förderstrom = 130 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 5 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 18 sec danach versagt der Schlauch.....	68
Bild 11:	Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.48) mit Wasser in einem Klasse-3-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, Förderstrom = 130 L/min, Arbeitsdruck ≈ Schließdruck ≈ 7,2 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 151 min danach versagt der Schlauch.	69
Bild 12:	Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen der Klasse 1 mit geschlossenem Strahlrohr bei Wärmebeaufschlagung durch Konvektion und Strahlung – Umgebungstemperatur = 275°C – und Berührung mit einer heißen Platte in Abhängigkeit von deren Temperatur	70
Bild 13:	Schadensbild eines Klasse-2-Schlauches mit DLS in 275°C warmer Umgebung 6 Sekunden nach der Berührung mit einer 450°C warmen Platte (Vers.24)	71

Bild 14:	Schadensbild eines Klasse-3-Schlauches mit Wasser in 275°C warmer Umgebung 151 Minuten nach der Berührung mit einer 450°C warmen Platte (Vers.48)	71
Bild 15:	Der Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.2) mit DLS (E = 6,5) in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 6,4 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird das Strahlrohr geschlossen, der Schlauch versagt nicht ($\approx 2\frac{1}{2}$ Std.), obwohl nach 13 min ein	72

Tabelle 2: Klassifizierung einer Druckzumischanlage nach DIN 14430

Kurzbezeichnung	Garantiepunkt 1	Garantiepunkt 2
	Nennförderstrom [L/min]	Mindestförderstrom [L/min]
DZA 2	200	100
DZA 4	400	100
DZA 8	800	100
DZA 16	1.600	200
DZA 24	2.400	800

Anmerkung 1: Die unter „Garantiepunkt 1“ genannten Werte für den Löschmittel-Förderstrom können auch überschritten werden.

Anmerkung 2: Mit den unter „Garantiepunkt 2“ genannten Werten wird festgelegt, wann spätestens die Zumischung erfolgen muss. Damit wird sichergestellt, dass auch bei Förderströmen unterhalb des Nennförderstromes (z.B. bei der Vornahme nur eines Strahlrohres) eine ausreichende Zumischung gewährleistet ist.

Tabelle 3: Klassifizierung einer Druckluftschaumanlage nach DIN 14430

Kurzbezeichnung	Luft-Nennförderstrom [L/min]	Wassergehalt bei $E = 4$ [L/min]	Schaumvolumenstrom bei $p_{abs} = 7$ bar
DLS 1.200	1.200	400	570
DLS 2.400	2.400	800	1.140
DLS 4.800	4.800	1.600	2.285

Tabelle 4: Löschmitteleigenschaften von Wasser und Schwerschäum

Kriterien	Wasser	Luftsch. S4 + Z4	S4 + DZA 24	DLS 2.400 / 800	
Systemgewicht [kg]	./.	4 + 5	4 + 30	200	
max.Löschmittelstrom [L/min]	FP-Nennleistung	400	FP-Nennleistung	800	
Aufbauzeit [min]	1	2	1	1	
Schaum-Einsatzdauer [min]	./.	10	> 90	> 90	
Einfluss der Umgebungsluft	./.	vorhanden	vorhanden	keiner	
Schlauchgewichte	bekannt	wie Wasser	wie Wasser	≈25 % geringer	
Wurfweite [m] $\dot{V}_{LM} = 400 \text{ L/min}$	Hohlstrahlrohr 475 [L/min]	26	./.	./.	33
	25-mm-Rundstrahlrohr	16	./.	./.	28
	Luftschaumrohr S4	./.	20	23	./.
Förderhöhe [m] und Pumpendruck [bar]	≈120 nahe 16	≈40 nahe 16	≈120 nahe 16	160...240 bei 8...10	
Schaumqualität	./.	feinblasig	feinblasig	feinblasig	
Haffähigkeit	./.	gut	gut	gut	
Gefahr von Wasserschäden	hoch	möglich	möglich	gering	
Zusatzkosten [Euro]	./.	2.000	5.000...20.000	30.000...50.000	

Tabelle 5: Volumenströme in einem C42-15-Schlauch in Abhängigkeit vom Förderdruck bei nomineller Verschäumungszahl $E = 4$, wenn am Hohlstrahlrohr ein Durchfluss von 360 L/min eingestellt wird

Druck, absolut [bar]	5	6	7	8	9	
Wasser mit Schaummittel [L/min]	160	190	230	240	320	
Luft bei Betriebsdruck [L/min]	120	108	100	88	56	
Schaum bei Betriebsdruck [L/min]	280	298	330	328	376	
Verschäumungszahl E	bei Betriebsdruck	1,8	1,6	1,4	1,4	1,2
	bei $p = 1 \text{ bar}$	4,8	4,4	4,0	3,9	2,6
Gewichtsdifferenz Wasser – DLS [kg]	8,9	7,5	6,3	5,6	3,1	

Tabelle 6: Charakteristika der untersuchten Feuerwehr-Druckschläuche

Klasse nach DIN 14811	Kette [Fäden im Umfang]	Schuß [Fäden pro 10 cm]	Beschichtung		Fabrikat
			innen	außen	
1	Polyester 1100 dtex 604 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 325 Einzelfäden	≈ 0,8 mm TCT-Kautschuk	./.	[40]
2	Polyester 1100 dtex 726 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 300 Einzelfäden	≈ 0,8 mm TCT-Kautschuk	≈ 0,3 mm TPU	[41]
2	Polyester 1100 dtex 726 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 318 Einzelfäden	≈ 0,5 mm EPDM	≈ 0,1 mm TPU	[42]
3	Polyester 1100 dtex 492 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 270 Einzelfäden	≈ 0,6 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	≈ 1 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	[43]
3	Polyester 1100 dtex 604 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 325 Einzelfäden	≈ 0,8 mm TCT-Kautschuk	≈ 1 mm Silikon mit Glasfaser- verstärkung	[35]
3	Polyester 2200 dtex 252 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 280 Einzelfäden	≈ 0,3 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	≈ 0,8 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	[44]
3	p-Aramid 1100 dtex 504 Einzelfäden	p-Aramid 1100 dtex 280 Einzelfäden	≈ 0,3 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	≈ 0,8 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	[33]
3	Polyester 1100 dtex 492 Einzelfäden	Polyester 1100 dtex 270 Einzelfäden	≈ 0,8 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	≈ 0,9 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	[45]
3	Polyester 1100 dtex 543 Einzelfäden	Polyamid 940 dtex 300 Einzelfäden	≈ 0,8 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	≈ 1,9 mm NBR/PVC- Gummi- mischung	[34]

Tabelle 7: Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen mit stehendem DLS bei einer Umgebungstemperatur von 275°C und Wärmebeaufschlagung durch Konvektion und Strahlung

Klasse nach DIN 14811	Standzeiten [min]	
	Einzelergebnisse	gemittelt
1	Forschungsbericht 150 [2]	≈ 30
2	46; 67; 139; > 180	> 110
3	26; 27; 28; 50; 51; (> 180)	36

Tabelle 8: Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen mit stehendem Löschmittel bei einer Umgebungstemperatur von 275°C und bei Wärmebeaufschlagung durch Konvektion, Strahlung und Berührung mit einer 450°C warmen Platte

Klasse nach DIN 14811	Standzeiten	
	Löschmittel = DLS	Löschmittel = Wasser
1	5...6 sec	0
		18 sec, wenn $p_{fl} = 2,6 \text{ bar}$ $p_{schl} = 5 \text{ bar}$
2	6; 6; 6; 8 sec gemittelt: 6,5 sec	0
3	4; 5; 6; 7; 8; 8; 12; 15; 16 min gemittelt: 9 min	0,5; 1; 2,5; > 3; > 3 Std. gemittelt: > 2,2 Std.

Tabelle 9: Verhalten von Feuerwehrschräuchen unter Druck- und Wärmeebeaufschlagung – Versuchsergebnisse bei einer Umgebungstemperatur von 275°C

Schlauch liegt auf	Strahlrohr	Wasser			DLS		
		Schlauch-Klasse nach DIN 14811					
		1	2	3	1	2	3
keinem Brand-schutt	< 30 min geschlossen	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	> 30 min geschlossen	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Brand-schutt von 450°C	offen	✗	✗	✓	✓	✓	✓
	< 5 min geschlossen	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	> 5 min geschlossen	✗	✗	✓	✗	✗	✗

schwarze Signaturen stammen aus dem Forschungsbericht 150
rote Signaturen stammen aus diesem Technischen Bericht der vfdb

unter den gewählten Versuchsbedingungen (Löschmittel-Förderdruck mit Wasser im Schlauch-Prüfstück = 7 bar — mit DLS = 2,5 bar)

bedeutet ✓ daß der Schlauch hält — und ✗ daß der Schlauch versagt	Interpretationen en detail siehe Kapitel 4.1
---	--

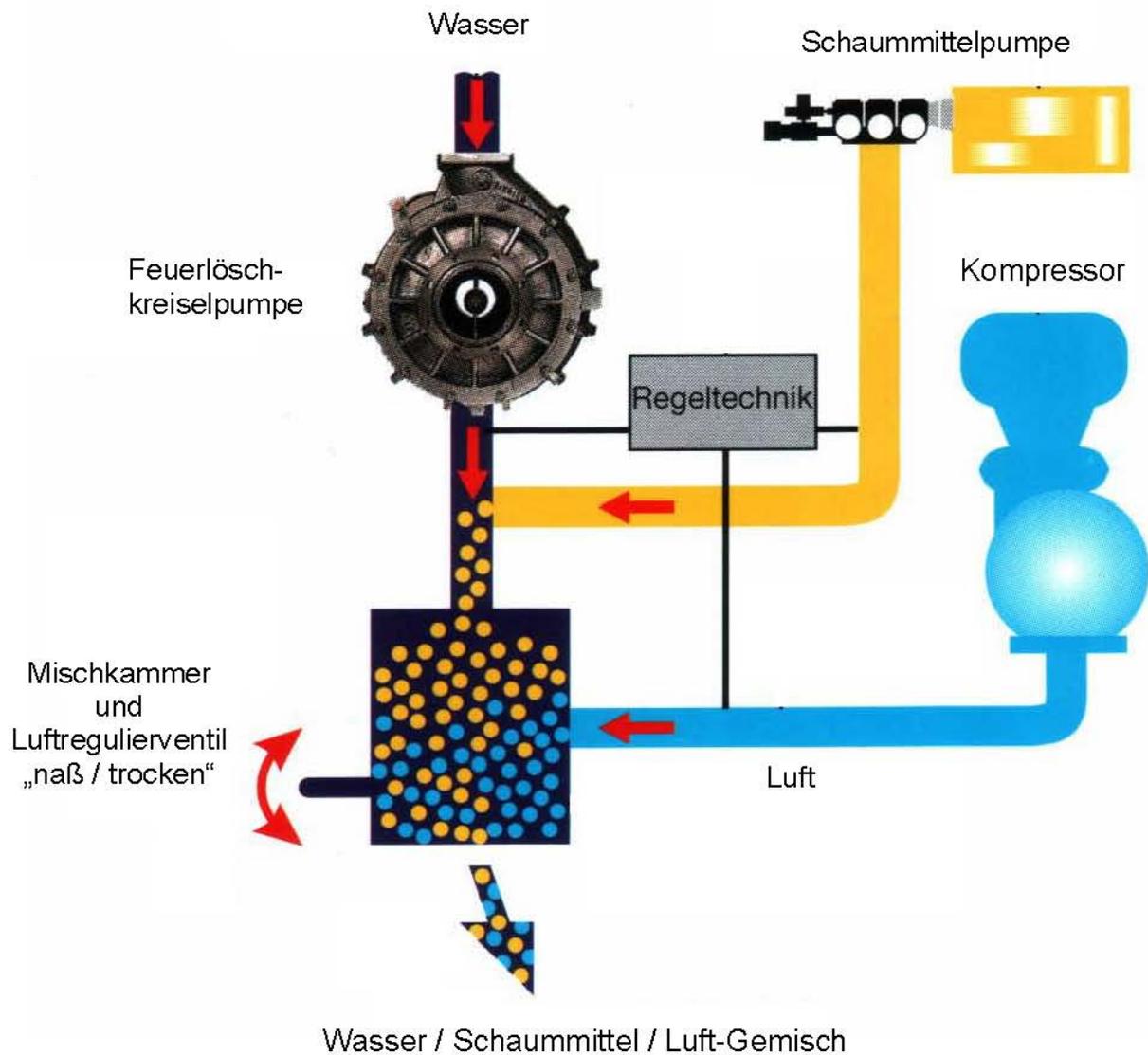


Bild 1: Funktionsschema einer Druckluftschaumanlage [11]

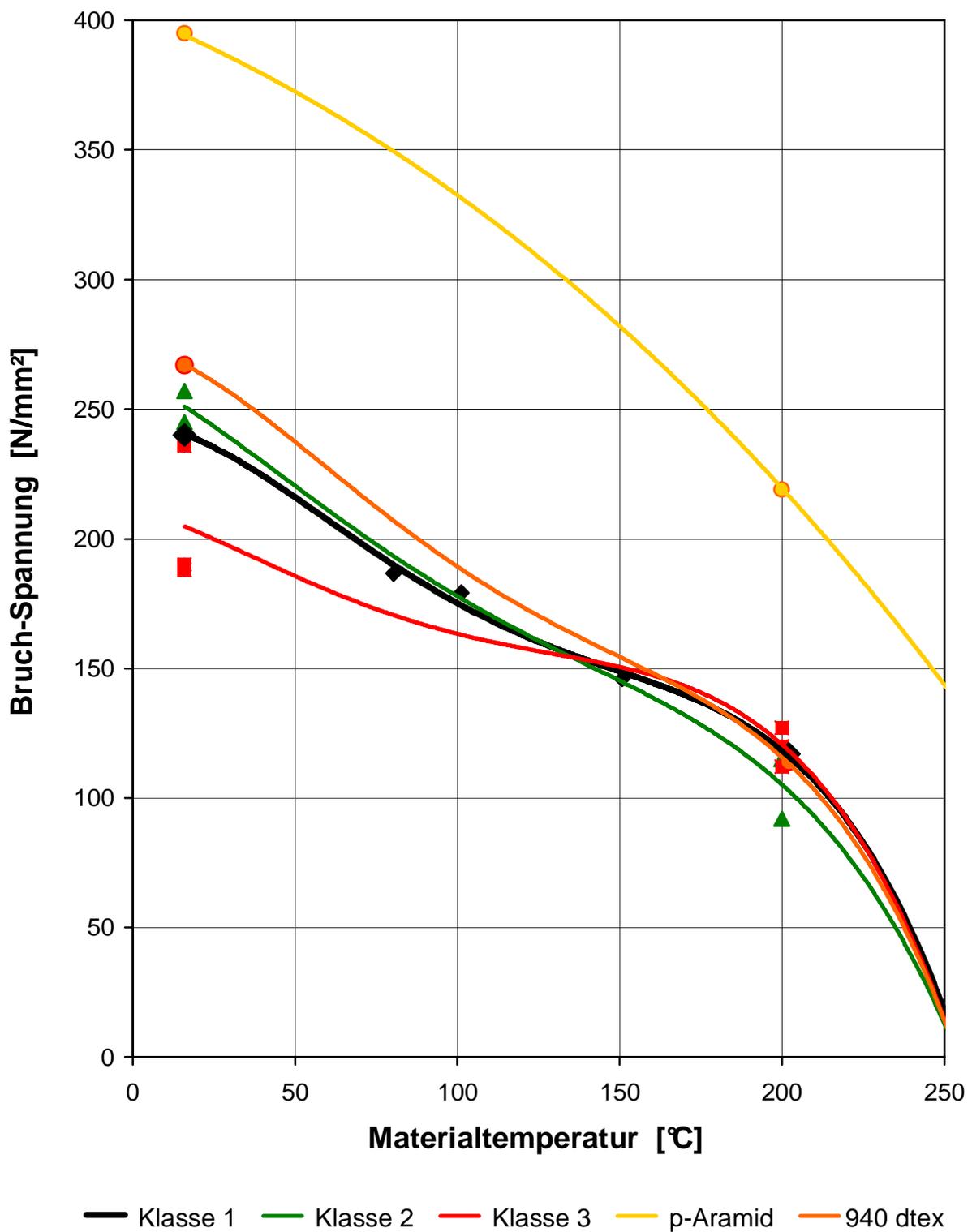


Bild 2: Die Bruchspannung in Feuerwehr-Druckschläuchen in Abhängigkeit von der Materialtemperatur

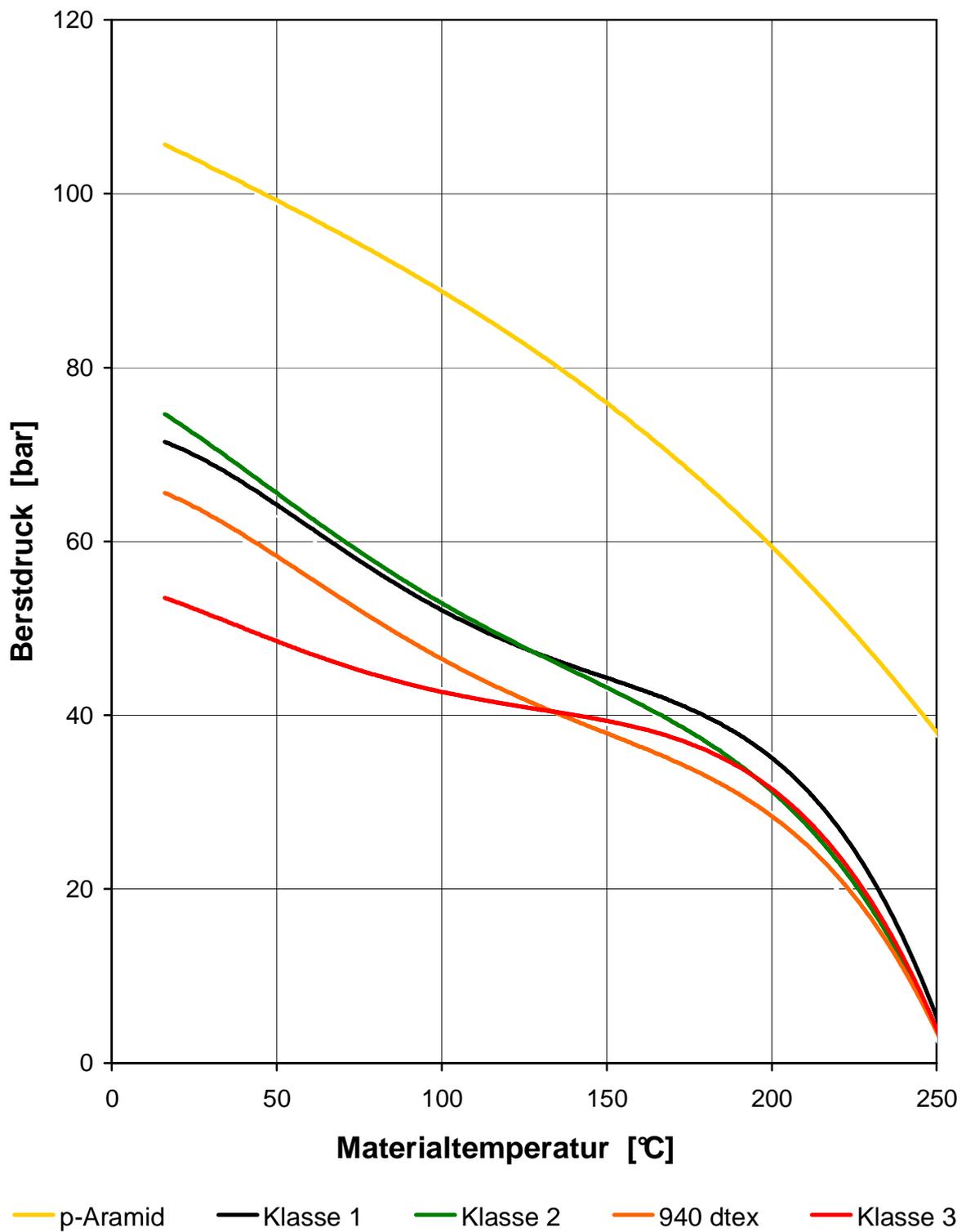


Bild 3: Der Berstdruck in Feuerwehr-Druckschläuchen in Abhängigkeit von der Materialtemperatur

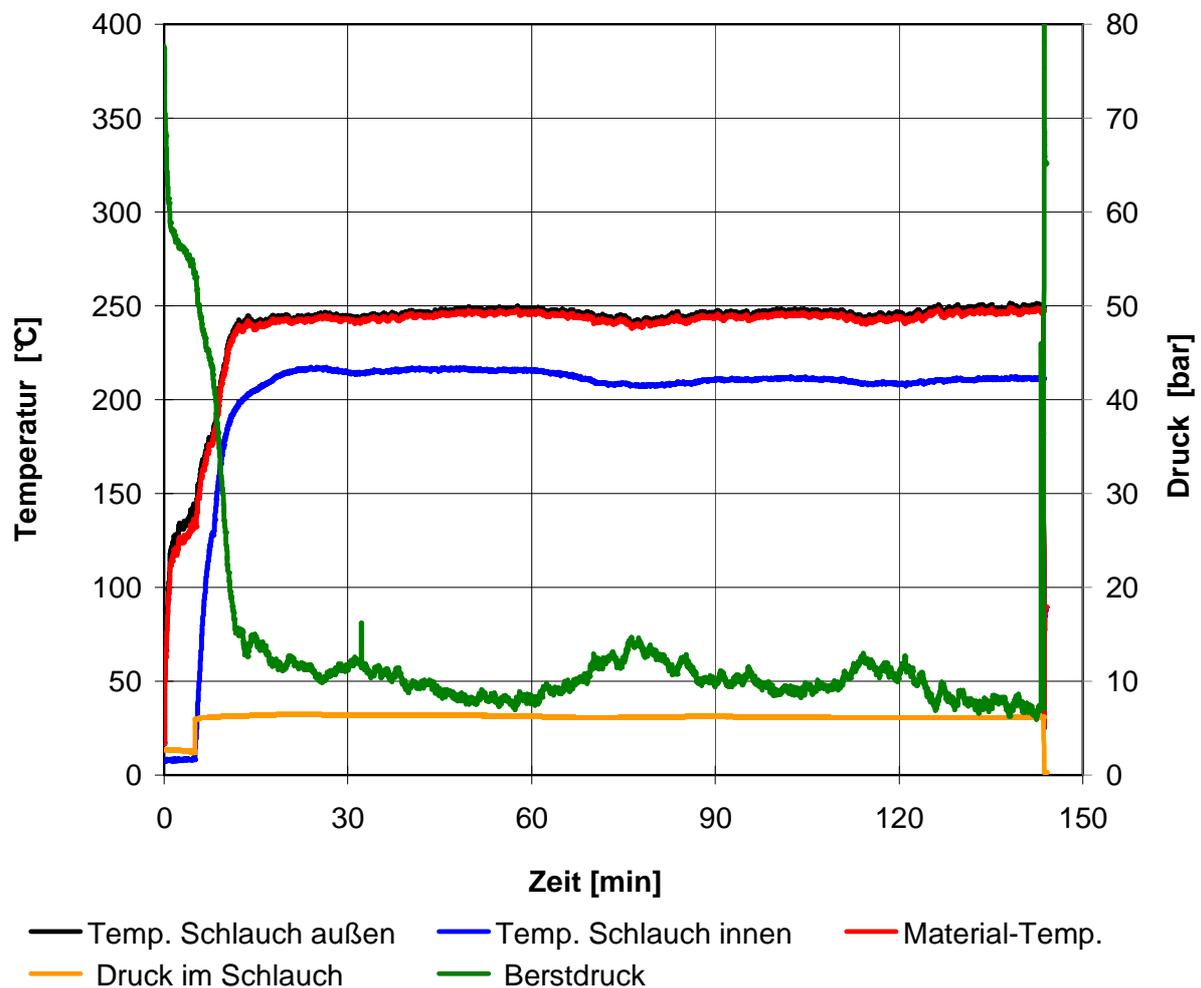


Bild 4: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.1) mit DLS ($E = 6,5$) in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 6,4 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird das Strahlrohr geschlossen, 139 min danach versagt der Schlauch.

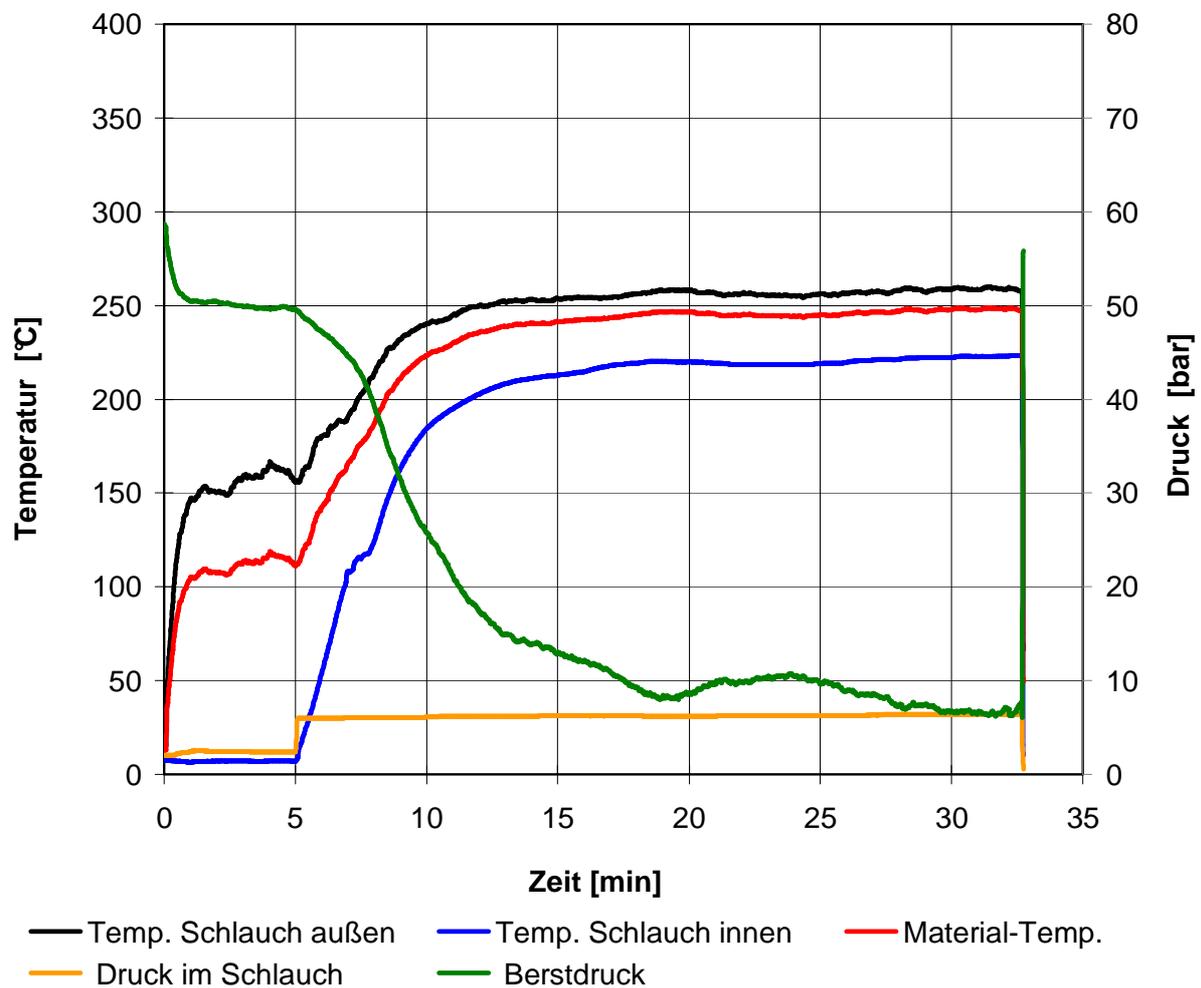


Bild 5: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.6) mit DLS ($E = 6,5$) in einem Klasse-3-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C , DLS-Förderstrom = 1040 L/min , Arbeitsdruck = $2,4 \text{ bar}$, Schließdruck = $6,3 \text{ bar}$; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird das Strahlrohr geschlossen, 28 min danach versagt der Schlauch.

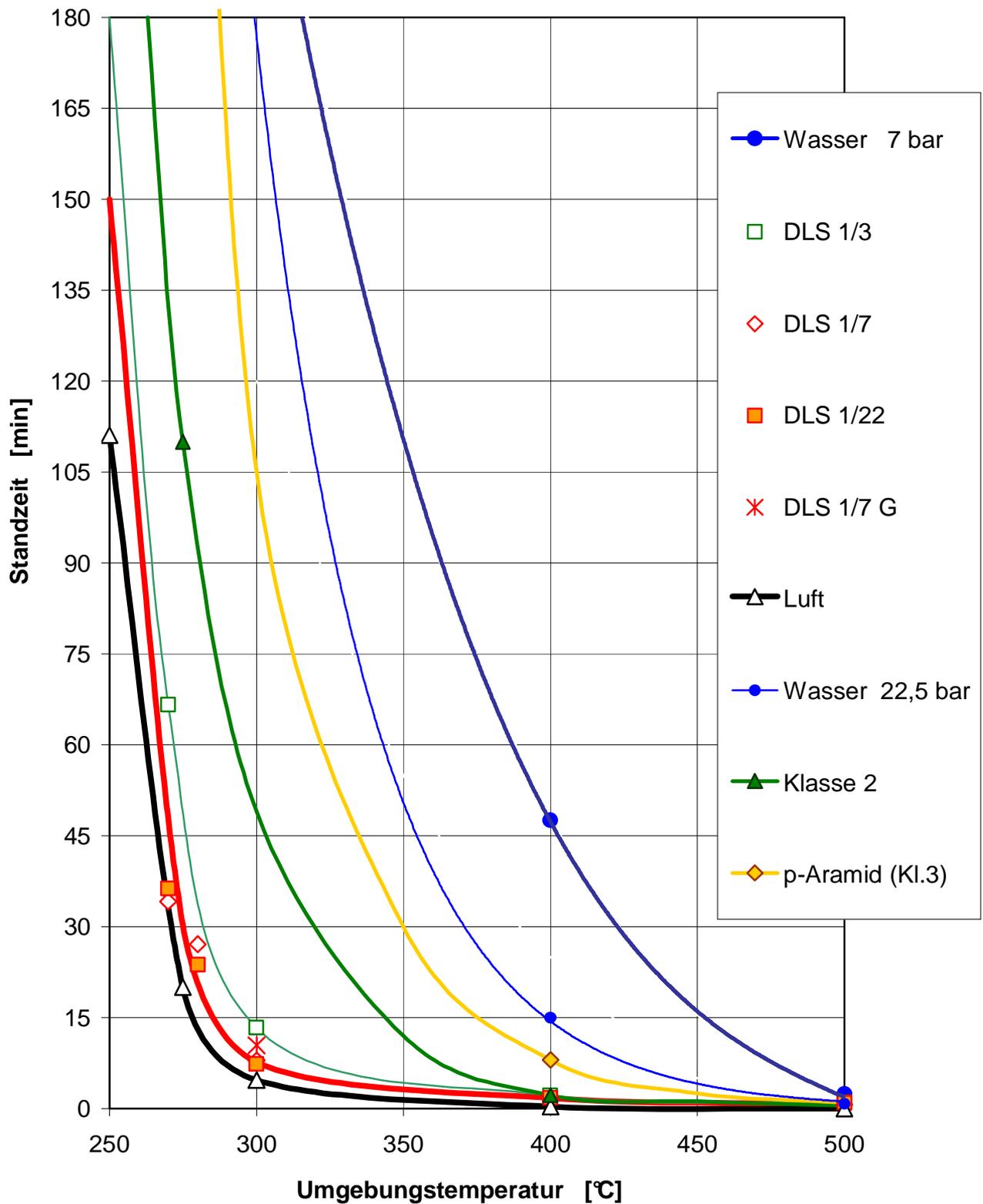


Bild 6: Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen (wenn nicht anders bezeichnet: Klasse 1 nach DIN 14811) mit geschlossenem Strahlrohr bei Wärmebeaufschlagung durch Konvektion und Strahlung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

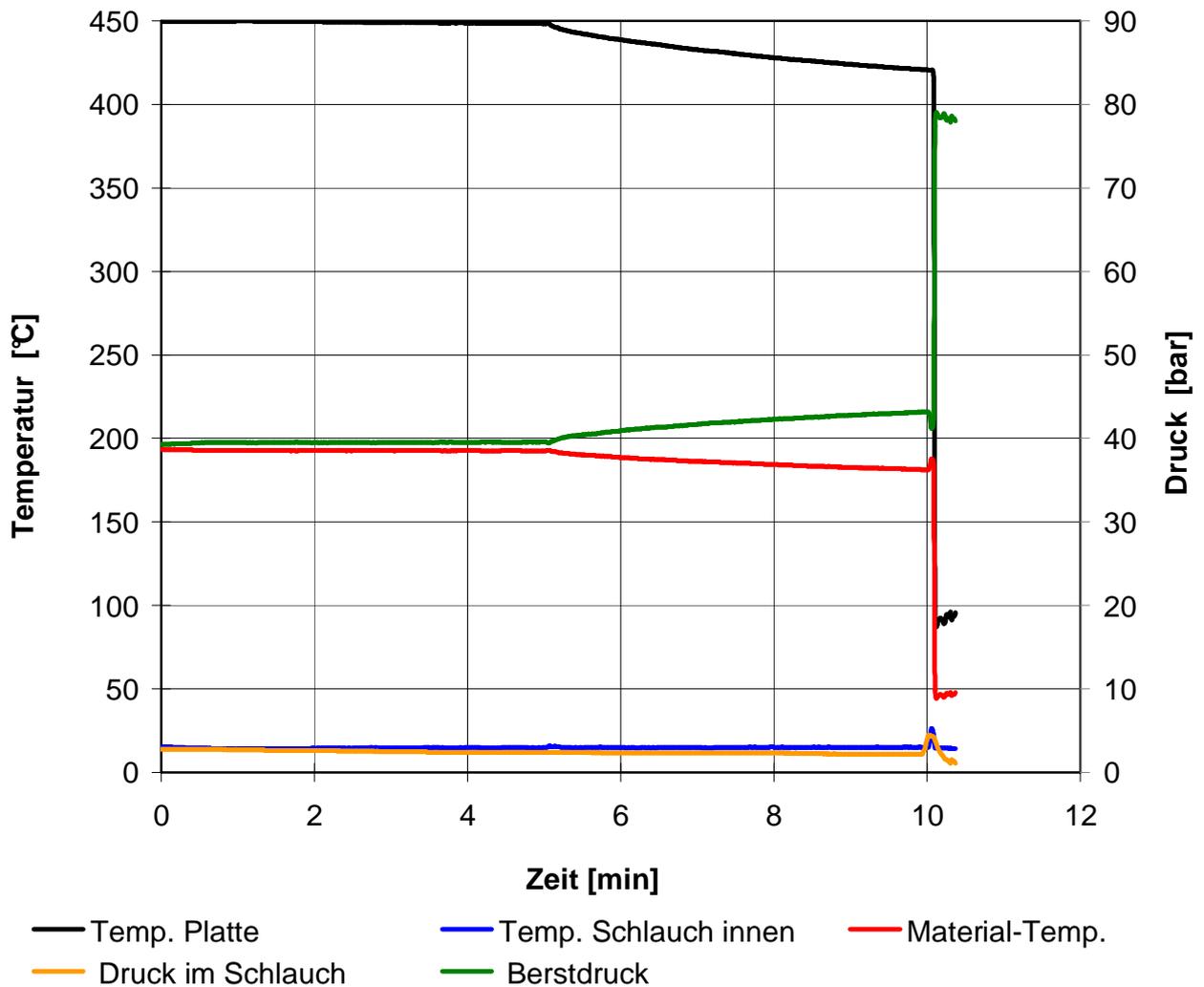


Bild 7: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.24) mit DLS (E = 6,5) in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,3 bar, Schließdruck = 4,4 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 6 sec danach versagt der Schlauch.

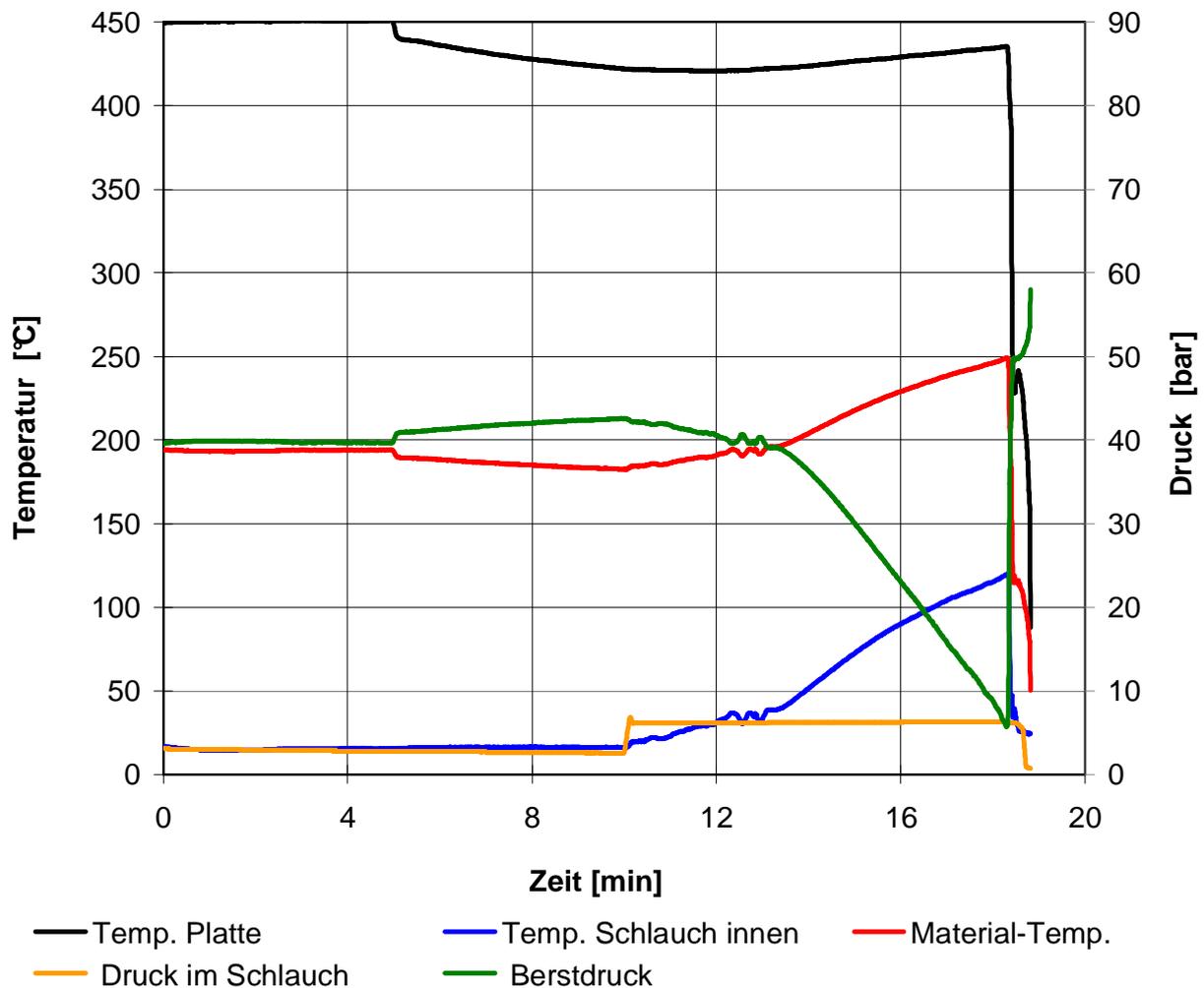


Bild 8: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.31) mit DLS ($E = 6,5$) in einem Klasse-3-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, DLS-Förderstrom = 1040 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 6,1 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 8 min danach versagt der Schlauch.

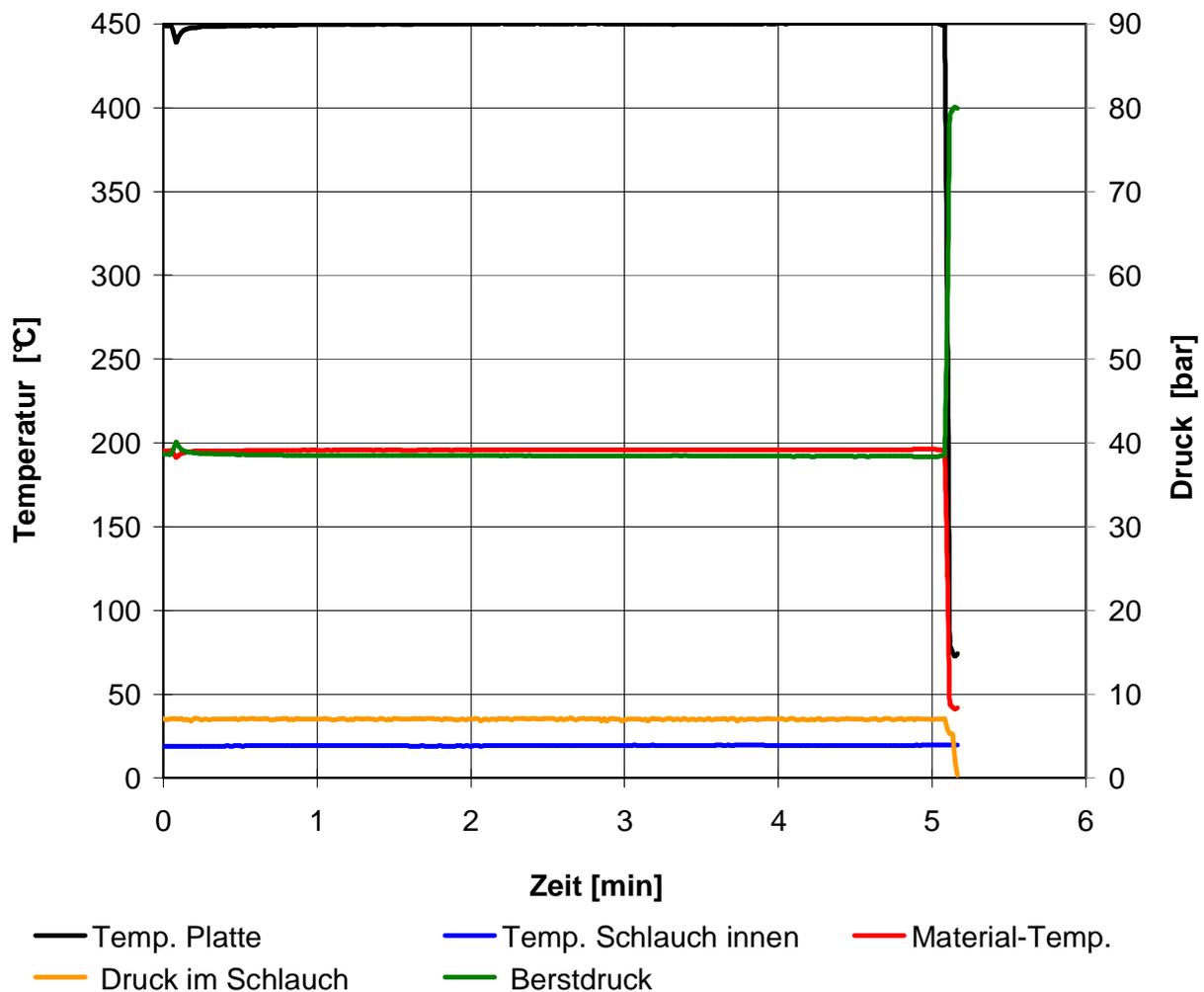


Bild 9: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.41) mit Wasser in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, Förderstrom = 130 L/min, Arbeitsdruck \approx 7 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, 5 sec danach versagt der Schlauch bei fließendem Löschmittel.

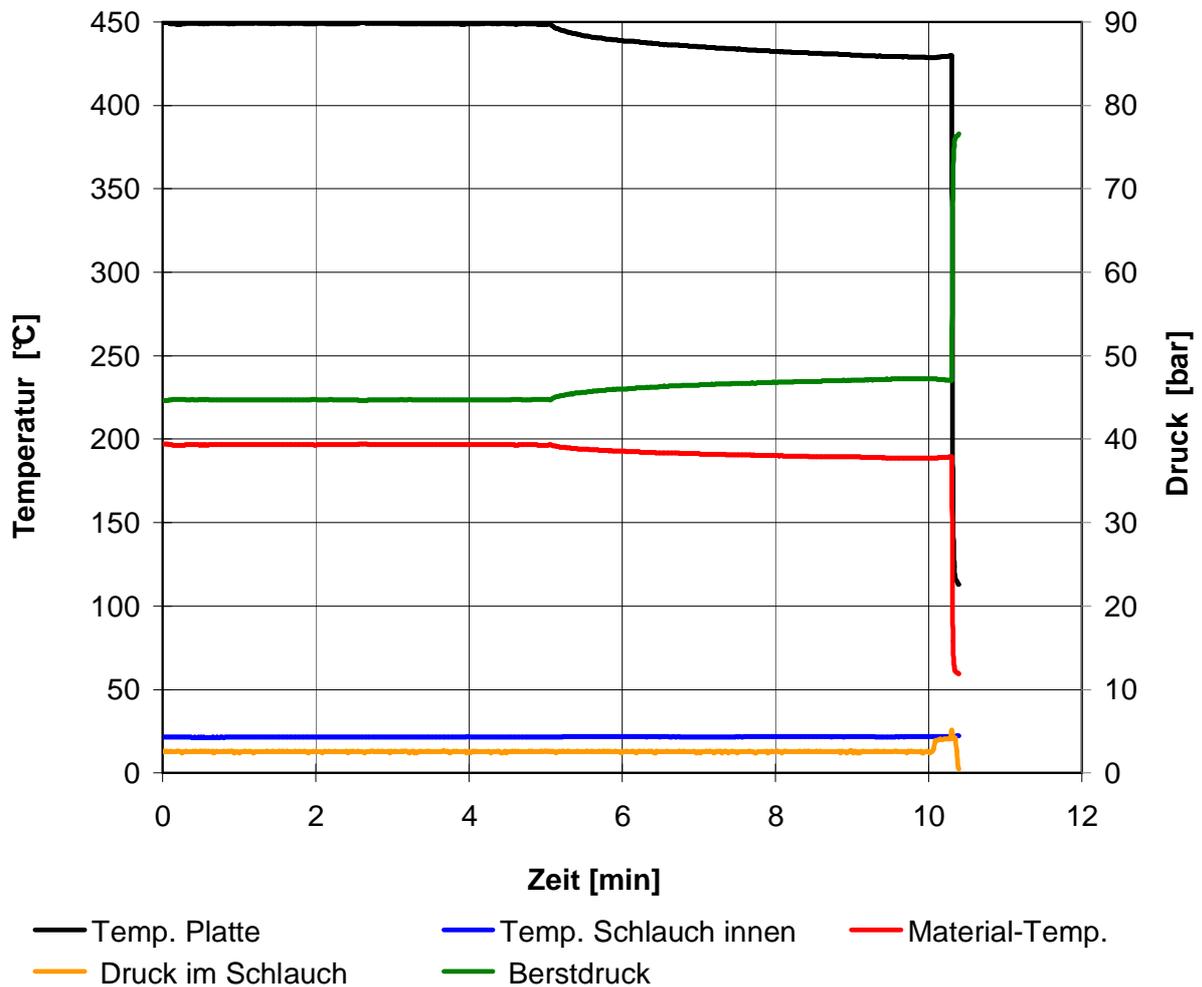


Bild 10: Der Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei dem Versuch (Vers.50) mit Wasser in einem Klasse-1-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, Förderstrom = 130 L/min, Arbeitsdruck = 2,6 bar, Schließdruck = 5 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 18 sec danach versagt der Schlauch.

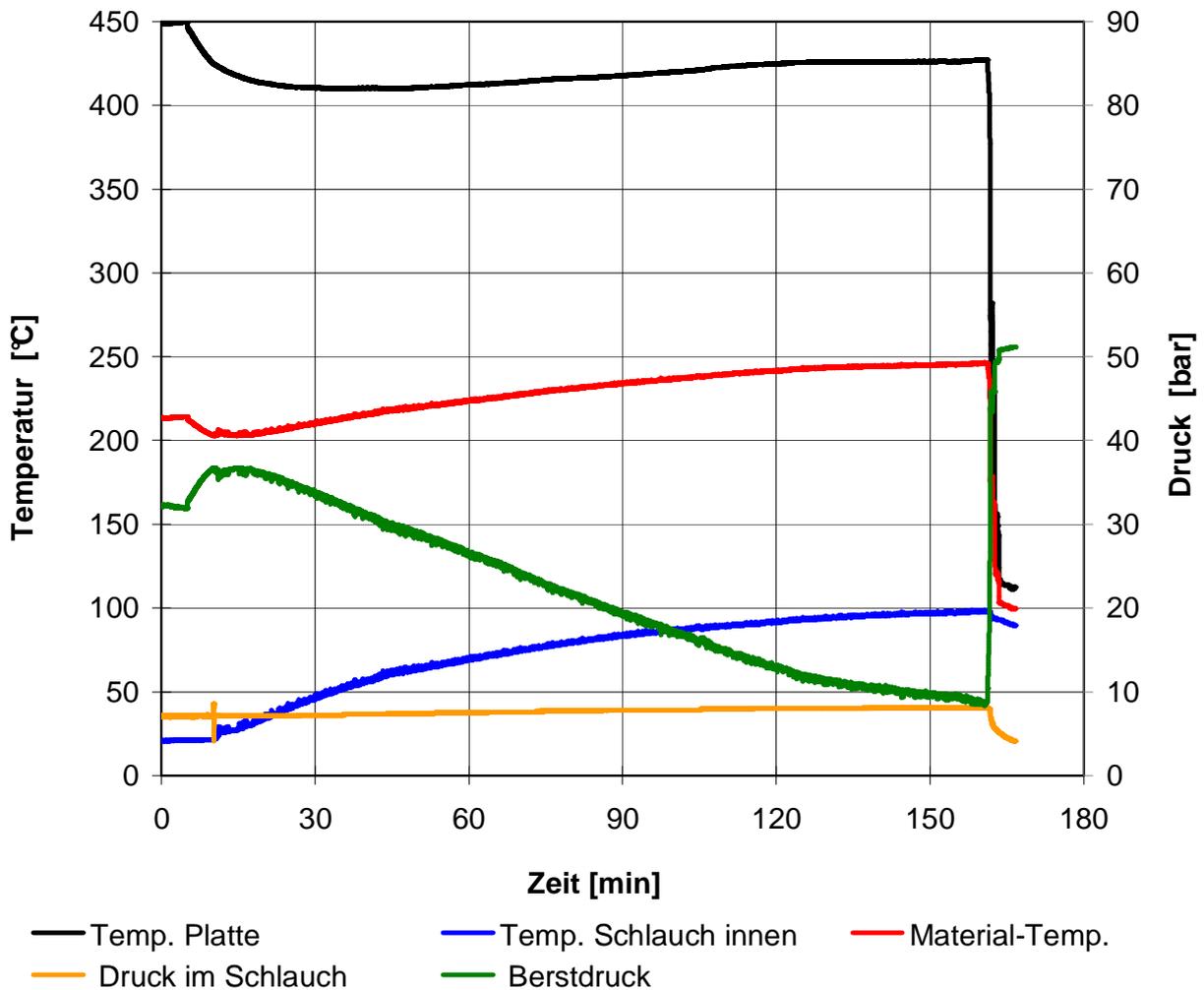


Bild 11: Ein typischer Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.48) mit Wasser in einem Klasse-3-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C, Förderstrom = 130 L/min, Arbeitsdruck \approx Schließdruck \approx 7,2 bar; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird die Heizplatte mit 450°C gegen den Schlauch gedrückt, nach weiteren 5 min wird das Strahlrohr geschlossen, 151 min danach versagt der Schlauch.

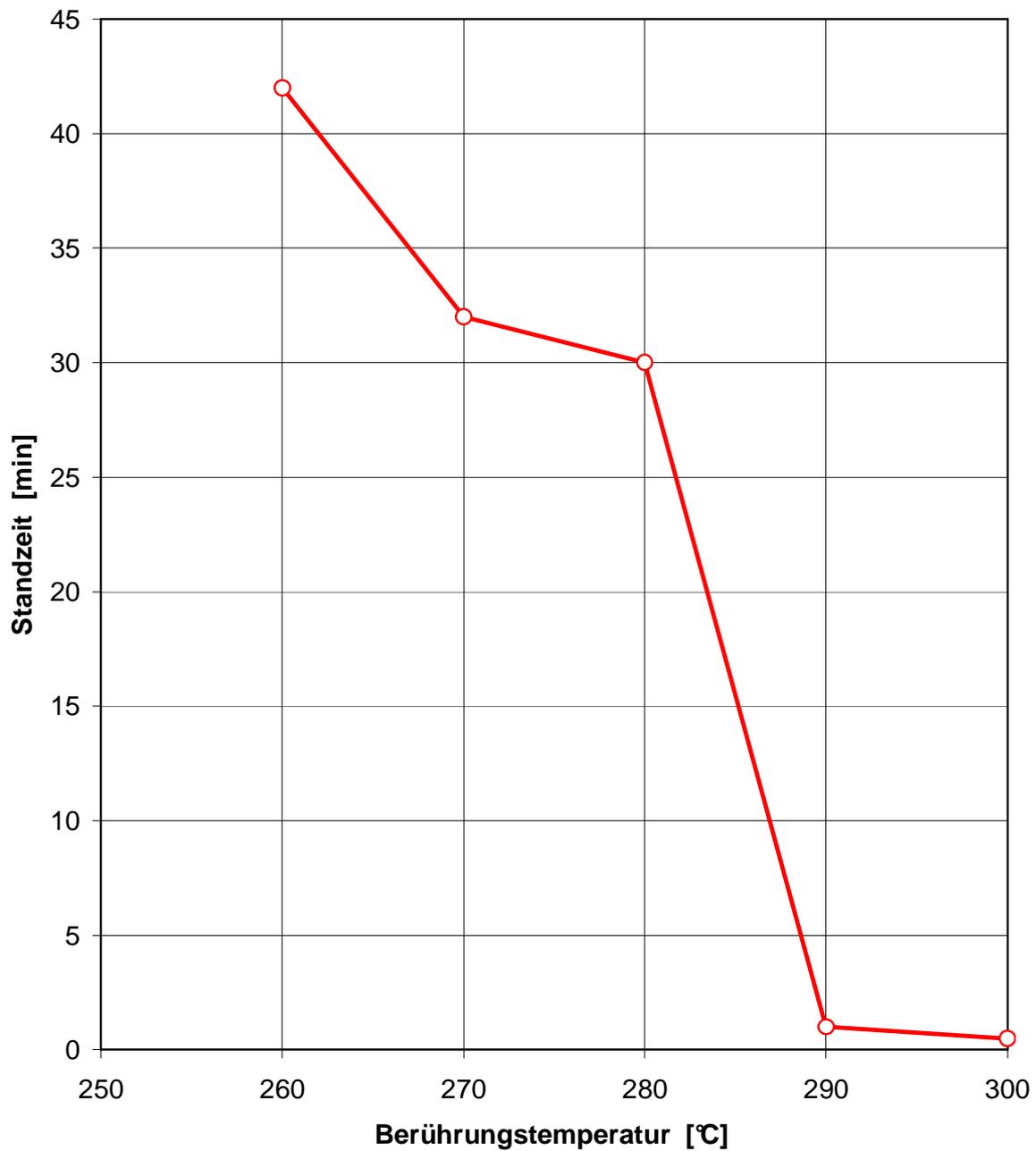


Bild 12: Standzeiten von Feuerwehr-Druckschläuchen der Klasse 1 mit geschlossenem Strahlrohr bei Wärmebeaufschlagung durch Konvektion und Strahlung – Umgebungstemperatur = 275°C – und Berührung mit einer heißen Platte in Abhängigkeit von deren Temperatur



Bild 13: Schadensbild eines Klasse-2-Schlauches mit DLS in 275°C warmer Umgebung 6 Sekunden nach der Berührung mit einer 450°C warmen Platte (Vers.24)



Bild 14: Schadensbild eines Klasse-3-Schlauches mit Wasser in 275°C warmer Umgebung 151 Minuten nach der Berührung mit einer 450°C warmen Platte (Vers.48)

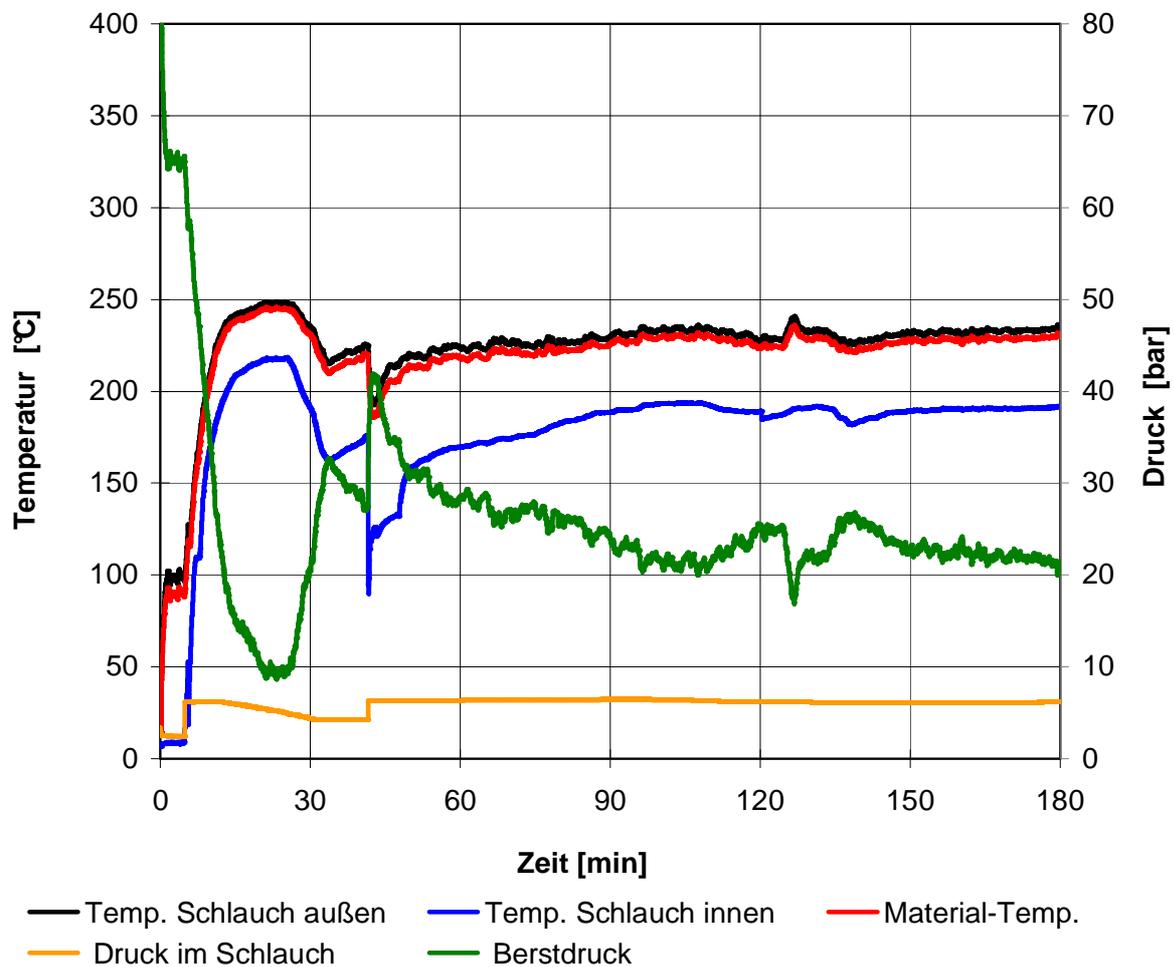


Bild 15: Der Verlauf der Temperatur- und Druckkurven bei einem Versuch (Vers.2) mit DLS ($E = 6,5$) in einem Klasse-2-Schlauch, Umgebungstemperatur = 275°C , DLS-Förderstrom = 1040 L/min , Arbeitsdruck = $2,6\text{ bar}$, Schließdruck = $6,4\text{ bar}$; das Löschmittel fließt 5 min, dann wird das Strahlrohr geschlossen, der Schlauch versagt nicht ($\approx 2\frac{1}{2}\text{ Std.}$), obwohl nach 13 min ein

8. Anhang - Schlauchuntersuchungen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB)

8.1. Rahmenbedingungen

Die Beantwortung der in den Punkten 1...4 des Kapitels 4.1 enthaltenen Fragen bestimmte die Randbedingungen für die anzustellenden Experimente:

1. Für die Bewertung der Haltbarkeit von „höherwertigen“ Schläuchen unter Wärmebelastung – im Vergleich zu den untersuchten Schläuchen der Klasse 1 [2] – wurde für alle Versuche eine Ofentemperatur von 275°C gewählt, weil einerseits nach den vorliegenden Erfahrungen erst über 250°C mit Schlauchversagen zu rechnen ist und weil andererseits nach Ansicht von Feuerwehrleuten ein Druckschlauch keiner höheren Temperatur ausgesetzt wird [27].

Brand- und Löschversuche im Realmaßstab an der FFB [12] zeigen, dass der Strahlrohrführer den Brandraum erst dann betrat, wenn durch Löschen von außen die Raumtemperatur in *Kopfhöhe* unter 250°C abgesenkt war. Die Grenze der kurzfristigen (2...3 Minuten!) thermischen Belastbarkeit der Einsatzkräfte liegt bei etwa 200°C [27]. Während der ersten Löschmaßnahmen im Raum, kurz hinter der Tür, liegt der Schlauch noch in voller Länge vor der Tür – ohne Wärmebeaufschlagung. Wenn der Strahlrohrführer in den Raum vorgeht, wird der Schlauch über den *Boden* gezogen, wo sicherlich geringere Temperaturen herrschen als in Kopfhöhe. Also liegt eine Haltbarkeitsprüfung bei einer Umgebungstemperatur von 275°C auf jeden Fall auf der sicheren Seite.

2. In Vorversuchen waren Oberflächentemperaturen von mangelhaft gelöschtem Brandgut ermittelt worden, mit dem nach DIN 14811 der Feuerwehrschauch nicht in Berührung kommen sollte. Die Temperaturen reichten von 200°C bis 400°C.

In Anlehnung an die europäische Norm EN 1924 [28] wurde für die Versuchsreihe mit Wärmeübertragung durch Leitung eine Kontakttemperatur von 450°C gewählt, obwohl nach früheren Erfahrungen [2] bei dieser Temperatur nur äußerst kurze Standzeiten zu erwarten waren. Andererseits – bei einer realitätsbezogenen Temperatur von $\leq 250^\circ\text{C}$ am Boden – hätten die Schläuche infolge dieser Berührung nicht

versagt und Haltbarkeits-Unterschiede zwischen den Prüfstücken hätten nicht festgestellt werden können.

3. Bei marktgängigen DLS-Anlagen wird das Löschmittel mit 3...7 bar gefördert. Die Drücke bei geschlossenem Strahlrohr erreichen 6...9 bar. Sie dürfen nach DIN 14430 10 bar nicht überschreiten. Das Phänomen „water-hammer“ tritt bei DLS nicht auf. — Der Arbeitsdruck beim Löschmittel Wasser liegt in der Praxis bei 5...8 bar. Laut DIN 14811 kann er bei bis zu 16 bar liegen und beim Schließen des Strahlrohres kurzfristig 18 bar erreichen [5]. Beim schnellen Schließen können zusätzliche Druckspitzen von 4,5 bar auftreten [29].
4. Unabhängig vom Inhalt wird von Feuerwehrschräuchen erwartet, dass sie in einer 200°C warmen Umgebung auch bei geschlossenem Strahlrohr 15 min halten. Bei 300°C werden nur noch 5 min gefordert [30].

Die Untersuchungen wurden auf dem im Forschungsbericht Nr. 150 [2] beschriebenen Versuchsstand durchgeführt. Zur Erzeugung des Schaumes diente eine DLS-Anlage vom Typ DLS 1.200 mit DZA 2 / 0,2–2,0 nach DIN 14430 [4], die mit einem Luftvolumenstrom von 880 L / min und einem Wasservolumenstrom von 160 L / min Druckluftschaum mit einer Verschäumungszahl $E = 6,5$ produziert [31]. Einerseits stellt dies eine – im Vergleich zu den im vorliegenden Bericht gegebenen Empfehlungen – relativ hohe Verschäumung dar, andererseits wird hiermit aber garantiert, dass die so gewonnenen Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite liegen, denn eine Verschäumung mit $E = 4$ hätte höhere Standzeiten zur Folge [2].

Die Schaummittel-Zumischrate wurde auf 0,3 % eingestellt. Verwendet wurde ein hochkonzentriertes Class-A-Schaummittel [32].

Für die Versuche mit Wärmeübertragung durch Kontakt mit einem heißen Gegenstand – zusätzlich zu Strahlung und Konvektion – wurde der Versuchsstand mit einer beweglichen, beheizbaren Platte von 20 cm Breite ausgestattet, um zu berücksichtigen, dass in der Praxis auch diese Wärmebelastung nicht punktförmig, sondern flächig stattfindet. Die Plattenheizung besteht aus einem handelsüblichen elektrischen Grillanzünder mit einer Leistungsaufnahme von nominell 750 W bei 230 V. Werden 160 V angelegt, dann heizt der resultierende Strom von 2,27 A die Plattenoberfläche auf 450°C. Die elektrischen Werte wurden in allen Versuchen

konstant gehalten. Die Durchführung der Versuche wird im Kapitel 3 dieses Anhangs im einzelnen beschrieben.

5. Die Bruchfestigkeit von höherwertigen Feuerwehrschräuchen

Im Rahmen der Untersuchungen von Klasse-2- und -3-Schräuchen nach DIN 14811 konnte der $\sigma_{\text{Bruch}}(\vartheta_{\text{Mat}})$ -Zusammenhang nur punktuell ermittelt werden. Von den 8 zur Verfügung gestellten Fabrikaten (sh. Tabelle 6) wurden jeweils 6 Ringe mit 60 mm Breite geschnitten, wovon 3 Ringe bei Zimmertemperatur und 3 Ringe bei 200°C bis zum Bruch belastet wurden. Die Messwerte schwanken 0,5...4 % um den jeweiligen Mittelwert. Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der Bruchfestigkeiten von der Materialtemperatur. Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der Klasse-1-Schräuche [2] ebenso dargestellt.

Im Gegensatz zum $\sigma_{\text{Bruch}}(\vartheta_{\text{Mat-Klasse 1}})$ -Verlauf können die Kurven für Klassen 2 und 3 wegen der geringen Zahl tatsächlich gemessener Werte nur als grobe Interpolation verstanden werden, deren Verlauf sich an dem der Klasse 1 orientiert, weil das für das Bruchverhalten maßgebende Gewebe in allen drei Klassen aus dem gleichen Material besteht.

Die Kurve für Klasse 2 wurde gemittelt aus 2 Fabrikaten – das heißt, aus 6 Messwerten je Temperatur-Niveau, die Kurve für Klasse 3 aus 3 vergleichbaren Fabrikaten, was 9 Messwerten je Temperatur-Niveau entspricht. Schräuche, die zwar in Klasse 3 einzuordnen sind, die aber einen deutlich abweichenden Gewebeaufbau aufweisen, werden gesondert dargestellt. Dies betrifft Schräuche mit Gewebe aus p-Aramid [33] oder mit geringerem Fadengewicht [34]. Der Silikon-ummantelte Schlauch [35] gehört wegen seiner Beschichtung ebenfalls in die Klasse 3, enthält aber einen Klasse-1-Gewebeaufbau.

Die Festigkeitswerte von Klasse 2 liegen auf ähnlichem Niveau wie die von Klasse 1, weil sie den gleichen Gewebeaufbau enthalten wie jene. Wegen des lockereren Gewebes der Klasse-3-Schräuche – um im Prozess der Schlauchherstellung das Extrudieren der Kunststoffbeschichtung vom Schlauchinneren durch das Polyestergeritter nach außen zu ermöglichen – liegt deren Festigkeit im unteren Temperaturbereich deutlich unter der von Klasse 1 oder 2. Über 150°C, wenn auch Klasse-1-Schräuche schon 40 % ihrer Festigkeit verloren haben, verschwindet diese Differenz.

Beim einheitlichen Probenmaterial für die im Forschungsbericht Nr. 150 geschilderten Versuche wurde – um dem Praktiker statt der Bruchspannung das vertrautere Maß „Berstdruck“ zu bieten – im $\sigma_{\text{Bruch}}(\vartheta_{\text{Mat}})$ -Diagramm eine zusätzliche Ordinate verwendet, auf der die Druckwerte mit Hilfe der Kesselformel

$$p_{i, \text{berst}} = \sigma_{\text{Bruch}} \cdot 20s / (D_i + 2s)$$

mit den Spannungswerten auf der ersten Ordinate verknüpft wurden (Faktor 20 statt 2 wegen der unterschiedlichen Dimensionen von Druck und Spannung – sh. Tabelle 1). Bei dem für den vorliegenden Bericht untersuchten Material variiert jedoch von Fabrikat zu Fabrikat die Wandstärke des tragenden Gewebes. Für den Zusammenhang $p_{i, \text{berst}}(\vartheta_{\text{Mat}})$ wurden deshalb die von Excel angebotenen Kurvengleichungen $\sigma_{\text{Bruch}}(\vartheta_{\text{Mat}})$ individuell umgerechnet und in einem separaten Diagramm dargestellt: Bild 3.

Es zeigt sich, dass der Schlauch mit dem Gewebe aus p-Aramid die höchsten Drücke zulässt – ebenso die höchsten Spannungen (Bild 2) – und die Schläuche der Klasse 3 die geringsten. Dazwischen kehrt sich jedoch die Reihenfolge um –

$$\sigma_{\text{Bruch}}(940 \text{ dtex}) > \sigma_{\text{Bruch}}(\text{Klasse 1})$$

$$p_{i, \text{berst}}(940 \text{ dtex}) < p_{i, \text{berst}}(\text{Klasse 1})$$

– weil zwar beide, sowohl die Bruchspannung als auch der Berstdruck, direkt proportional von der in den Versuchen aufgebrachten Bruchlast abhängen. Jedoch hängt umgekehrt proportional nur die Bruchspannung von der Wandstärke ab, während der Berstdruck von dem Faktor $1 / (D_i + 2s)$ abhängt, in dem der Innendurchmesser gegenüber der Wandstärke dominiert.

8.2. Schadensbilder

Die Schadensbilder geplatzter DLS- Schläuche infolge von Druck- und Temperaturbeanspruchung bestätigen nicht den durch den Forschungsbericht Nr. 150 entstandenen und in Fachkreisen verbreiteten Eindruck „was müssen hier für Kräfte gewirkt haben!“ [18]. Die Löcher Wasser führender Schläuche waren dort [2] zwar durchweg so klein, dass im Schadensfall das Strahlrohr nicht völlig trocken fallen würde. Doch ist dieses Ergebnis dem versuchsbedingt niedrigen Druckniveau auch

bei Wasser führenden Schläuchen in den Experimente an der FFB zu verdanken. Höhere Drücke, die in der Praxis vorkommen können, würden auch größere Schäden verursachen [2].

Die Bilder 13 und 14 zeigen Schadensbilder von DLS und Wasser führenden Schläuchen der Klassen 2 und 3. Es traten bei den DLS- Versuchen mit Wärmeübertragung auch durch Leitung zwei mal große und elf mal kleine Löcher auf, die ebenfalls eine eingeschränkte Fortsetzung der Löschmittelförderung erlaubt hätten. Bei den DLS- Versuchen ohne Kontakt mit der heißen Platte wurden fünf mal große und fünf mal kleine Löcher registriert. In Einzelfällen konnte auch beobachtet werden, dass sich die Löcher im Versuchsverlauf wieder schlossen, so dass die Löschmittelförderung mit dem ursprünglichen Druckniveau fortgesetzt werden konnte.

Bild 15 zeigt den Verlauf eines solchen Versuches mit DLS in einem Klasse-2-Schlauch bei einer Umgebungstemperatur von 275°C:

- t = 5 min: das Strahlrohr wird geschlossen, der Druck steigt von $p_{fl} = 2,4 \text{ bar}$ auf $p_{schl} = 6,2 \text{ bar}$, das DLS- Aggregat wird ausgeschaltet, alle Temperaturen steigen, der errechnete Berstdruck fällt;
- t = 13 min: durch ein kleines Loch oben am Schlauch entweicht (im wesentlichen) Luft, der Druck fällt langsam, die Temperaturen steigen weiter, bis bei
- t = 23 min: kalter DLS von außerhalb des Versuchsstandes nachdringt und die Temperaturen senkt;
- t = 30 min: das Loch hat sich geschlossen, der Druck bleibt konstant, die Temperaturen steigen wieder;
- t = 42 min: das DLS-Aggregat wird wieder angefahren, der Druck steigt wieder auf $p_{schl} = 6,2 \text{ bar}$, die Temperaturen fallen kurzfristig wegen des frischen DLS und steigen dann wieder;
- t = 180 min: der Schlauch hält.