

Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren
der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuß für Feuerwehr-
angelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 150

**Untersuchung der Haltbarkeit von Druck-
luftschaum führenden Feuerwehrschräuchen
unter Wärmebeaufschlagung
im Vergleich zu Wasser führenden**

von
Dipl.-Ing. C. Axel Föhl
und
Dipl.-Ing. Jochen Schaaf

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
September 2008

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">150</div>	Titel des Berichtes: Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschäumen führenden Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden	ISSN: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">0170-0060</div>	
Autoren: <div style="text-align: center;"> Dipl.-Ing. C. Axel Föhl und Dipl.-Ing. Jochen Schaaf </div>	durchführende Institution: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 D-76187 Karlsruhe		
Nummer des Auftrages: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">204 (2/07)</div>	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Abschlußdatum: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">September 2008</div>			
Seitenzahl: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">58</div>	Bilder: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">30</div>	Tabellen: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">4</div>	Literaturverweise: <div style="text-align: center; font-weight: bold;">34</div>
Kurzfassung: <p>In einem Versuchsstand, in dem die Prüfstücke großflächig und andauernd – im Gegensatz zu dem in DIN 14811 genormten Verfahren – erwärmt werden können, wurden 90 Einzelversuche durchgeführt, um die Haltbarkeit von Klasse-1-Schräuchen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur zu testen. Zuvor war der Bruchfestigkeits/Temperatur-Zusammenhang für das tragende Polyestergerewebe im Feuerwehrschräuch aufgenommen worden, mit dem sich der physikalische Vorgang im Versagenszeitpunkt veranschaulichen läßt: Die infolge der Erwärmung geminderte Bruchfestigkeit fällt unter die durch den Arbeits- bzw. Schließdruck verursachte Tangentialspannung im Gewebe.</p> <p>Es zeigte sich, daß Feuerwehrschräuche mit allen hier verwendeten Löschmitteln (Wasser, DLS mit E = 4; 8 und 23) – und sogar wenn sie nur Luft enthalten – bis weit über das von den Schräuchherstellern angegebene Limit von 80°C hinaus der Temperatur- und Druckbeanspruchung standhalten, solange das Medium im Schräuch fließt. Erst wenn das Strahlrohr geschlossen wird, treten signifikante Verhaltensunterschiede auf: Während Schräuche mit DLS-Inhalt in einer 270; 300; 400°C warmen Umgebung nach 35; 8·13; 2 min versagen, platzen Wasser führende Schräuche bei 400°C erst 48 min nach dem Schließen des Strahlrohres ohne Berücksichtigung einer „Wasserhammer-Druckspitze“.</p> <p>Im Anhang werden einige Aspekte zusammengestellt, die bei einer ganzheitlichen Betrachtung – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – aus Sicht der Autoren bei der Bewertung des Löschmittels „DLS“ zu bedenken sind.</p>			
Schlagwörter: Bruchfestigkeit, DLS, Druckluftschäum, Druckspitze, Feuerwehrausbildung, Feuerweh-Druckschräuch, Haltbarkeit, Innenangriff, JOKOWSKI, Materialtemperatur, Polyester, Schräuchgewicht, Schräuchplatzer, Schräuchprüfung, Schließdruck, Standzeit, Tangentialspannung, Umgebungstemperatur, Verschäumungszahl, Wasserhammer, Wasserschaden, Wurfweite, Zugversuch			

INHALTSVERZEICHNIS

	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	
1.	EINLEITUNG.....	4
2.	GRÜNDE FÜR DAS VERSAGEN VON WÄRMEBEAUFSCHLAGTEN FEUERWEHRSCHLÄUCHEN	5
3.	UNTERSUCHUNGSZIEL UND ENTWURF EINES GEEIGNETEN VERSUCHSSTANDES UND VERSUCHSPROGRAMMS.....	6
4.	VERSUCHSSTAND.....	8
5.	BRUCHFESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR.....	11
6.	ERGEBNISSE DER SCHLAUCHPRÜFVERSUCHE.....	12
7.	ZERFALLSZEITEN VON DLS UND SCHADENSBILDER GEPLATZTER FEUERWEHR- DRUCKSCHLÄUCHE	19
8.	DRUCKSPITZEN BEI WASSER UND BEI DRUCKLUFTSCHAUM	21
9.	HÖHERWERTIGE SCHLÄUCHE.....	23
10.	ZUSAMMENFASSUNG	24
11.	LITERATURVERZEICHNIS.....	27
12.	TABELLEN UND BILDER	30
	ANHANG	53

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

Kürzel	Bedeutung	Dimension
a	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Druckwelle	m/sec
A _{PET}	Querschnittsfläche des Polyestergewebes	mm ²
D _a	Schlauch-Außendurchmesser	mm
D _i	Schlauch-Innendurchmesser	mm
DLS	Druckluftschaum	—
DZA	Druckzumisanlage	—
E	Expansion = Verschäumungszahl = $(V_w + V_L)/V_w$	L/L
E _p	Verschäumungszahl unter Betriebsdruck	L/L
F	Zugkraft	N
LF	Löschfahrzeug	—
p _i	Arbeitsdruck des Löschaggregates	bar
ρ	Dichte	kg/L
σ _{Bruch}	Bruchfestigkeit	N/mm ²
σ _{tan}	Tangentialspannung	N/mm ²
T	Zeit	sec
ϑ _∞	Umgebungstemperatur	°C
ϑ _{SO}	Temperatur an der Schlauchoberfläche, oben außen	°C
ϑ ₀	Temperatur auf der Schlauchachse	°C
ϑ ₁	gemittelte Temperatur auf halber Distanz zwischen Achse und Innenseite	°C
ϑ ₂	gemittelte Temperatur an der Schlauchinnenseite	°C
ϑ _{links1}	Temperatur im Schlauch links, halbe Distanz zwischen Achse und Innenseite	°C
ϑ _{links2}	Temperatur an der Schlauchinnenseite, links	°C

Kürzel	Bedeutung	Dimension
ϑ_{oben1}	Temperatur im Schlauch oben, halbe Distanz zwischen Achse und Innenseite	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{oben2}	Temperatur an der Schlauchinnenseite, oben	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{\text{rechts1}}$	Temperatur im Schlauch rechts, halbe Distanz zwischen Achse und Innenseite	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{\text{rechts2}}$	Temperatur an der Schlauchinnenseite, rechts	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{\text{unten1}}$	Temperatur im Schlauch unten, halbe Distanz zwischen Achse und Innenseite	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{\text{unten2}}$	Temperatur an der Schlauchinnenseite, unten	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{\text{ein, aus}}$	Ein-, Austrittstemperatur des Löschmittels	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{Fl}	Temperatur des Fluids	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{PET}	Temperatur des Polyestergewebes	$^{\circ}\text{C}$
V	Strömungsgeschwindigkeit	m/sec
V_{L}	Luftvolumen	m^3
V_{S}	Schaumvolumen	m^3
V_{W}	Wasservolumen	m^3
$\dot{V}_{\text{W, L, S}}$	Wasser-, Luft-, Schaum-Volumenstrom	L/min

1. EINLEITUNG

Während eines Feuerwehreinsatzes in Tübingen im Dezember 2005 kamen zwei Feuerwehrleute ums Leben. In dem Bericht der Kommission [1], die dieses Unglück untersucht hat, werden mehrere Fakten beleuchtet. Unter anderem platzte der Druckluftschlauch führende Schlauch, mit dem der verunfallte Trupp vorging, und wies ein untypisches Reißbild auf.

Auch wenn das Versagen des Schlauches – auf dem Treppenabsatz vor einer brennenden hölzernen Wand muß er einige Minuten gelegen haben – nicht als Ursache für den Tod der beiden Feuerwehrleute angesehen werden kann, so wurden durch diesen Schlauchplatzer doch einige Fragen aufgeworfen, die der vorliegende Forschungsbericht beantworten soll:

- In welchem Maße hängt die Haltbarkeit von wärmebeaufschlagten Feuerwehrschräuchen von ihrem Inhalt (Wasser, nasser, trockener Schaum...) ab?
- Wie weit übertrifft die (vermutete höhere) Wärmebelastbarkeit von Wasser führenden Schläuchen diejenige von Druckluftschlauch (DLS) führenden?
- Und in welchem Maße ist diese Differenz von dem Temperaturniveau abhängig, bei dem dieser Vergleich angestellt wird?

Die ermittelte Belastbarkeitsdifferenz stellt für die Feuerwehr im Inneneinsatz – unter Berücksichtigung realistischer (auch auf anderes Einsatzgerät einwirkender) Randbedingungen – *ein* Beurteilungskriterium zur Bewertung des Feuerwehrgerätes „Druckschlauch“ dar. Im Rahmen dieses Berichtes wurde nicht geklärt, welche Bedingungen hier relevant und für die abschließende Bewertung der Gefährdung heranzuziehen sind.

2. GRÜNDE FÜR DAS VERSAGEN VON WÄRMEBEAUFSCHLAGTEN FEUERWEHRSCHLÄUCHEN

Ein Schlauch versagt, wenn die Spannung im tragenden Gewebe den zulässigen Höchstwert überschreitet. Bei einem zylindrischen Hohlkörper tritt die Maximalspannung nicht axial, sondern tangential am Umfang auf und hängt nach der Kesselformel

$$\sigma_{\text{tan}} = p_i \cdot \frac{\left[\left(\frac{D_a}{D_i} \right)^2 + 1 \right]}{\left[\left(\frac{D_a}{D_i} \right)^2 - 1 \right]} \quad (1)$$

vom Innendruck p_i ab.

Als Maximum der zulässigen Spannung kann die Spannung σ_{Bruch} im Zeitpunkt des Bruches („Bruchfestigkeit“) angenommen werden. Sie ist umso geringer, je stärker das Material erwärmt wird. Die Materialtemperatur ϑ_{PET} (hier die des tragenden Polyestergewebes – der Beitrag der Innengummierung zur mechanisch/thermischen Belastbarkeit des Schlauches ist unerheblich [2]) hängt ab

- von der Umgebungstemperatur ϑ_{∞} ,
- von der Temperatur des Fluids im Schlauch ϑ_{Fl} ,
- von den von den Strömungsverhältnissen bestimmten Wärmeübergangsbedingungen und
- von den Wärmeleiteigenschaften der beteiligten Materialien.

Wenn der Innendruck p_i und/oder die Umgebungstemperatur ϑ_{∞} hoch genug gewählt werden, wird jeder Feuerwehr-Druckschlauch versagen – egal aus welchem Material gefertigt und unabhängig vom Inhalt, hier also vom transportierten Löschmittel.

3. UNTERSUCHUNGSZIEL UND ENTWURF EINES GEEIGNETEN VERSUCHSSTANDES UND VERSUCHSPROGRAMMS

Ziel der Untersuchungen war es,

- bei gängigen Schlauchqualitäten,
- bei realistischen Druck- und Strömungsverhältnissen und
- in einem sinnvollen Temperaturbereich

zu prüfen, ob ein DLS führender Schlauch wesentlich früher versagt als ein Wasser führender.

In Feuerwehrcreisen hält allerdings die Diskussion an, welcher Temperaturbereich als relevant für die Belastung von Mensch und Material während des Feuerwehreinsatzes beim Innenangriff anzusehen ist.

- Die Hersteller von Feuerwehrschräuchen beispielsweise garantieren eine dauerhafte Haltbarkeit ihrer Produkte bis 80°C;
- die Hersteller von Preßluftatmern die der ihren bis 60°C – ebenfalls dauerhaft;
- für Feuerwehrschräuzüge gilt nach DIN EN 469 [3] eine kurzfristige (5 min) Temperaturfestigkeit von 180°C und
- für Feuerwehrrhelme nach DIN EN 443 [4] ebenfalls eine 5-minütige bei 180°C beziehungsweise eine von 20 Minuten bei 90°C.

Zimmerbrandversuche im Realmaßstab an der FFB [5] zeigen, daß die Belastbarkeitsgrenze für einen versierten Feuerwehrrmann kurzfristig bei etwa 250°C liegt.

Der Rahmen der für die Durchführung dieses Forschungsauftrages zur Verfügung stehenden Mittel erlaubte es nicht, mehr als eine Schlauchqualität zu bewerten. Gewählt wurde ein bei den Berufs- und bei den Freiwilligen Feuerwehren häufig anzutreffender unbeschichteter C-Schlauch: Klasse 1 nach DIN 14811 [6], Innendurchmesser = 52 mm, das tragende Gewebe – Kette in Schlauchlängsrichtung zweifach gezwirnt, 151 Faden-

paare, Schuß parallel zum Schlauchumfang fünffach gezwirnt und verstärkt mit 65 Schüssen je 10 cm (vergl. Kesselformel, S. 5), Körperbindung – besteht aus hochfestem Polyestergergarn Typ 717, die dichtende Innenbeschichtung aus TCT-Kautschuk [7].

Als „Löschmittel“ kommen Wasser, Druckluftschaum (mit den Verschäumungszahlen $E = 4; 8; 23$) und Luft (sozusagen als DLS mit $E = \infty$) – jeweils fließend und stehend zum Einsatz. Da auch der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit der Löschmittel im Schlauch auf dessen Erwärmung/Kühlung in den Untersuchungsumfang nicht einbezogen werden konnte, wurden die Experimente aus Gründen der Realitätsnähe mit den Volumenströmen und Förderdrücken angestellt, die die Hersteller der Förderaggregate für die jeweilige Schaumqualität vorsehen:

- $\dot{V} = 1678 \text{ L/min}$, $p \approx 4,4 \text{ bar}$ für DLS mit der Verschäumung $E = 4$;
- $\dot{V} = 1348 \text{ L/min}$, $p \approx 2,3 \text{ bar}$ für DLS mit der Verschäumung $E = 8$;
- $\dot{V} = 1234 \text{ L/min}$, $p \approx 1,8 \text{ bar}$ für DLS mit der Verschäumung $E = 23$;
- $\dot{V} = 1180 \dots 1200 \text{ L/min}$, $p \approx 0,1 \text{ bar}$ für reine Luft und
- $\dot{V} = 130 \text{ L/min}$, $p \approx 7 \text{ bar}$ für Wasser ohne Schaummittel und Luft.

Da die Autoren des vorliegenden Berichtes weder die Schlauchprüfung unter Wärmebelastung nach DIN 14811 noch die nach prEN 1924 [8] für realitätsbezogen halten, weil beide Verfahren zwar eine Beanspruchung des Prüflings bei hoher (unbestimmt nach DIN, 300°C nach prEN) Temperatur vorsehen – die jedoch nur punktuell einwirkt – und dementsprechend nur eine äußerst kurze Standfestigkeit (im Sekundenbereich) fordern, wurde ein Versuchsstand entworfen (würfelförmiger Ofen mit Abzugshaube, Rauminhalt = $1,6 \text{ m}^3$, sh. Bild 1 und 2 [9]), der auf bis zu 500°C aufgeheizt werden kann, um die Schlauchprüfstücke darin großflächig und andauernd zu erwärmen (sh.a. Anhang, Abschnitt V).

Bei verschiedenen Temperaturniveaus

80; 100; 150; 200; 250; 270; 280; 300; 400 und 500°C

werden die Probenstücke eingebracht und 15 min vom Löschmittel durchflossen. Die ersten

Versuche zeigten, daß die im Schlauch aufgenommenen Temperaturkurven bereits nach etwa 5 min fast konstante Werte erreichen (Bild 3). Bei späteren Versuchen wurde deshalb das Strahlrohr am Ausgang des Versuchsaufbaus nicht erst nach 15 min, sondern schon nach 5 min geschlossen. Die Temperaturen am/im Schlauch steigen und erreichen nach etwa 15 weiteren Minuten wieder konstante Werte. Wenn der Schlauch nicht versagt, wird der Versuch mit dieser Temperatur/Druck/Material-Kombination jetzt abgebrochen und zweimal wiederholt (nicht bei eindeutigen Ergebnissen, die keine Versagenswahrscheinlichkeit signalisieren). Versagt er vor Ablauf dieser 30 min, wird der Zeitpunkt festgehalten und der Versuch ebenfalls zweimal wiederholt. Insgesamt wurden 90 Versuche durchgeführt.

4. VERSUCHSSTAND

Der Versuchsstand (Bild 1 und 2 [9]) besteht aus einem aus Winkelprofilen gefertigten, wärmeisolierten Kubus, in den Öffnungen eingeschnitten sind, um den Prüfling einzubringen, den Versuchsablauf zu beleuchten und zu beobachten. Mit Hilfe eines Propangasbrenners kann der Versuchsstand beheizt werden. Über die Regelung der Gaszufuhr kann das Temperaturniveau zwischen 80°C und 500°C eingestellt und konstant gehalten werden.

In Vorversuchen war die Temperaturverteilung im Ofen geprüft worden. Nach Einbau zweier Leitbleche im unteren Ofenbereich konnte eine ausreichend gleichmäßige Verteilung erreicht werden: Maximale Temperaturdifferenzen zwischen den 9 im Ofen verteilten Thermoelementen etwa 1 % des eingestellten Temperaturniveaus [9]. Bei den eigentlichen Schlauchprüfversuchen wurde die Ofentemperatur ϑ_{∞} deshalb nur noch an 3 Positionen in Schlauchnähe (100 mm darüber und in gleicher Höhe 100 mm rechts und links davon) gemessen und gemittelt. Während der Versuche wird diese Temperatur konstant gehalten.

Bild 3 zeigt exemplarisch die Genauigkeit der Temperatureinstellung, -regelung und -messung. Wegen dieser Genauigkeit wird die Ofentemperatur – da mit der Materialtemperatur ja nicht identisch – in den weiteren Versuchsprotokollen ausgeblendet und nur noch als Bezugsgröße „Umgebungstemperatur“ erwähnt.

Die Prüfstücke können schnell, d.h., ohne Temperaturverlust im Ofen, eingebracht werden. In jedem Versuch werden folgende Größen gemessen und kontinuierlich aufgezeichnet:

- die Ofentemperatur ϑ_{∞} ;
- die Temperatur auf der Schlauchoberfläche ϑ_{SO} ;
- 9 Temperaturen im Schlauchinneren (ϑ_{oben2} , ϑ_{oben1} , ϑ_0 , ϑ_{unten1} , ϑ_{unten2} , ϑ_{links2} , ϑ_{links1} , $\vartheta_{rechts1}$, $\vartheta_{rechts2}$) – die Thermoelemente für diese Messungen sind nach Art eines Fadenkreuzes auf einer Halterung befestigt (Bild 4), deren Arme sich so verstellen lassen, daß die äußeren Thermoelemente (Index 2) innen am Schlauch anliegen;
- die Ein- und die Ausgangstemperatur des Löschmittels $\vartheta_{ein, aus}$ und
- der statische Druck p_i im Schlauch (= Arbeits- bzw. Schließdruck des Förderaggregats).
- Die Volumenströme von Wasser, Luft und Schaum $\dot{V}_{W, L, S}$ werden den Herstellerangaben entsprechend für jeden Versuch festgehalten.

Die zu untersuchende Schlauchprobe wird zusammen mit einem Stahlrohr gleicher Dimension, das während der Versuchsvorbereitung die spätere Position des Prüflings einnimmt, auf einen Rollschlitten montiert. Die Schlauchprobe ist in Storzkupplungen eingebunden, mit denen sie einerseits an dem Stahlrohr und auf der anderen Seite an einer Halterung befestigt ist, die auch die Instrumentierung im Schlauchinnern trägt.

Die bei den Schlauchuntersuchungen verwendeten Löschmittel (sh. voriges Kapitel) werden von serienmäßigen Förderaggregaten verschiedener Hersteller zum Versuchsstand

gepumpt und fließen dann über ein Absperrorgan (Hohlstrahlrohr bzw. Kugelhahn) in den Abwasserkanal der Brandversuchshalle der FFB.

Für die Versuche mit reinem Wasser wurde eine an der FFB vorhandene Pumpe eingesetzt [10], die bei einer Leistungsaufnahme von 18,5 kW bei 2930 Umdrehungen/min 1067 L/min fördern kann. Da die Angaben zur erforderlichen Wasserbeaufschlagung beim Löschen in weitem Maße differieren – von 60 L/min für einen 15 m²-Brand [11] bis 240 L/min für ein 4 MW-Feuer [12] – wurde die Pumpe mit einem mittleren Volumenstrom von 130 L/min betrieben. Der Arbeitsdruck beträgt etwa 7 bar, der Schließdruck 7,6 bar.

Der DLS mit $E = 4$ wurde von einer Druckluftschäum-Anlage DLS 1200 mit DZA 8/0,1-1 nach DIN 14430 erzeugt [13]. Die nominelle Kompressorleistung dieser Anlage beträgt 1400 L/min bei 6250 Umdrehungen/min. Die Förderung des Wasser/Schaummittel-Gemisches läßt sich von 60 L/min bis auf 460 L/min steigern, so daß Schaumqualitäten von $E = 4$ bis $E = 24$ eingestellt werden könnten. Die Schaummittel-Zumischung kann von 0,1 % bis 1 % verändert werden – eingestellt wurden 0,5 %. Der Arbeitsdruck kann von 4 bar bis 10 bar gesteigert werden.

Eine Druckluftschäum-Anlage DLS 1200 mit DZA 2/0,2-2 nach DIN 14430 [14] produzierte DLS für die Versuche mit $E = 8$ und mit $E = 23$. Die nominelle Kompressorleistung dieser Anlage beträgt 1200 L/min. Die Förderleistung der Kreiselpumpe läßt sich zwischen 170 L/min und 54 L/min variieren, so daß die genannten Schaumqualitäten hergestellt werden können. Die Schaummittel-Zumischung kann von 0,2 % bis 2 % gewählt werden – eingestellt wurden 0,3 %. Der Arbeitsdruck von 8 bar beziehungsweise 2 bar paßt sich den Förderbedingungen automatisch an. – Dieselbe Anlage [14] wurde auch für die Versuche mit reiner Luft als „Löschmittel“ benutzt.

Für alle in den Versuchen eingesetzten Schaumqualitäten wurde dasselbe hochkonzentrierte class-A-Schaummittel auf der Basis von Kohlenwasserstoff-Tensiden ver-

wendet [15], das in sehr geringer Dosierung dem Löschwasser beigemischt wird (genaue Konzentrationsangaben sh. vorige Absätze mit der Beschreibung der DLS-Aggregate).

5. BRUCHFESTIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER TEMPERATUR

Wie in Kapitel 2 schon angesprochen, stellt die Temperaturabhängigkeit der Bruchfestigkeit des Schlauchmaterials das ausschlaggebende Phänomen für die Haltbarkeit / das Versagen von Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung dar. Da Angaben über die Festigkeit von Polyestergerarnen von Herstellerseite nur für die Einzelfaser und auch nur für den Temperaturbereich $< 200^{\circ}\text{C}$ erhältlich sind, wurden im zuvor beschriebenen Versuchsstand eigene Bruchfestigkeits-Messungen

$$\sigma_{\text{Bruch}} = f(\vartheta_{\text{PET}}) \quad (2)$$

durchgeführt [9].

Hierfür wurden von dem zu prüfenden Schlauchmaterial 60 mm breite Ringe geschnitten, die mit Hilfe zweier Rundstähle (Durchmesser: 21,5 mm) in eine Zugmaschine eingespannt werden konnten. Mit einem implantierten Thermoelement versehen wurde der Prüfling in den temperierten Versuchsstand gebracht und außen die Kraft an der Zugvorrichtung so lange gesteigert, bis die Probe riß. Bei 6 verschiedenen Temperaturniveaus von Zimmer- bis Schmelztemperatur wurden diese Experimente durchgeführt und 4-mal bei Zimmertemperatur, 8-mal bei den höheren Temperaturen wiederholt. Die maximalen Meßwertschwankungen liegen bei $1 \cdots 6\%$ des Mittelwertes.

Bei der Berechnung der Bruchspannung

$$\sigma_{\text{Bruch}} = F / A_{\text{PET}} \quad (3)$$

wurde als Materialstärke nur die Stärke des Polyestergerwebes (1,1 mm) eingesetzt [2], obwohl im Experiment in Wirklichkeit die Festigkeit der Materialkombination Polyester/Gummierung (Stärke 2,1 mm) gemessen wurde. Zur Kompensation wird deshalb

auch bei der Berechnung der durch den Innendruck verursachten Tangentialspannung nach Gleichung (1) nur die Stärke des Polyestergewebes verwendet.

Bild 5 gibt die ermittelte Festigkeits/Temperatur-Funktion wieder. Sie zeigt mit steigender Temperatur ein zunehmendes Gefälle. EXCEL[®] berechnet für die an die Meßwerte angepaßte Ausgleichskurve:

$$\sigma_{\text{Bruch}} = 1,3 \cdot 10^{-4} \vartheta_{\text{PET}}^3 - 1,68 \cdot 10^{-2} \vartheta_{\text{PET}}^2 - 2,78 \cdot 10^{-2} \vartheta_{\text{PET}} + 249 \quad (4)$$

Diese Beziehung wird in den Versuchsdiagrammen der eigentlichen Experimente zur Bestimmung des Schlauch-Versagenszeitpunktes in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur benutzt, um den physikalischen Effekt des Versagens zu veranschaulichen.

6. ERGEBNISSE DER SCHLAUCHPRÜFVERSUCHE

Da bei offenem Strahlrohr der Unterschied zwischen Ein- und Ausgangstemperatur des Löschmittels wegen der kurzen Meßstrecke – 1 m – und der hohen Fließgeschwindigkeit so gering ist (sh. Bild 3: die beiden Kurven ϑ_{ein} und ϑ_{aus} sind deckungsgleich), daß sich der Wärmedurchgang und damit die Schlauchtemperatur hieraus nicht berechnen lassen, wurden Versuche durchgeführt, um diese Temperatur zu ermitteln. Sowohl Bild 3 als auch die Bilder 6···25 zeigen, daß sich relativ rasch ein Gleichgewichtszustand einstellt: Die Kurven der Löschmitteltemperaturen ϑ_0 , ϑ_1 und ϑ_2 und die an der Schlauchoberfläche ϑ_{SO} verlaufen nach kurzer Aufheizzeit auf konstantem Niveau.

In den Bildern 6···25 sind deshalb nur noch die außen und innen am Schlauch gemessenen Temperaturverläufe ϑ_{SO} und ϑ_{oben2} wiedergegeben. Die wirkliche Materialtemperatur ϑ_{PET} muß zwischen diesen beiden Werten liegen.

Die Verknüpfung von ϑ_{PET} mit σ_{Bruch} nach Bild 5 erlaubt es, zur Materialtemperatur-Kurve $\vartheta_{\text{PET}} = f(t)$ einen Verlauf der Materialfestigkeit $\sigma_{\text{Bruch}} = g(t)$ zu berechnen, indem Gleichung (4) auf jeden einzelnen Wert von $\vartheta_{\text{PET}}(t)$ angewendet wird. Der Zeitpunkt des

Schlauchversagens ist dadurch gekennzeichnet, daß hier die Bruchfestigkeit $\sigma_{\text{Bruch}}(\vartheta_{\text{PET}})$ die im Material bestehende Tangentialspannung $\sigma_{\text{tan}}(p_i)$ unterschreitet.

Wenn als Materialtemperatur ϑ_{PET} nicht einfach der Mittelwert zwischen ϑ_{SO} und ϑ_{oben2} gewählt wird, sondern wenn der Einfluß dieser beiden Temperaturen gewichtet wird, läßt sich der Verlauf der $\sigma_{\text{Bruch}}(t)$ -Kurve so einstellen, daß sie sich zum experimentell ermittelten Versagenszeitpunkt mit der $\sigma_{\text{tan}}(t)$ -Kurve schneidet. Dies erlaubt Rückschlüsse auf eine das Verhalten des Materials kennzeichnende mittlere Temperatur – und zwar nicht nur zu diesem Zeitpunkt, wenn die Polyester-Schmelztemperatur erreicht wird, sondern während des gesamten Versuchsabschnittes mit stehendem Medium.

Die Bilder 6...25 zeigen die Mittelwerte von jeweils 2...5 Versuchen pro Löschmittel und Temperaturniveau. Über der Versuchszeit (i.a. 30 min incl. 15 min mit fließendem Löschmittel) sind die Temperaturen ϑ_{oben2} , ϑ_{SO} und ϑ_{PET} und die Spannungen σ_{Bruch} und σ_{tan} aufgetragen.

In Abhängigkeit von der Ofentemperatur steigen nach dem Schließen des Strahlrohres die relevanten Temperaturen. Die Steigungsgeschwindigkeit korreliert ebenfalls mit der Ofentemperatur. Je nach Höhe dieser Temperatur stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein – der Schlauch hält –, oder die Spannungskurven schneiden sich – der Schlauch versagt.

Bild 6 gibt den Verlauf des einzigen Versuchs mit Wasser bei 300°C wieder. Er zeigt noch Probleme bei der Fixierung des Thermoelementes an der Schlauchoberfläche – zwei „Ausrutscher“ von ϑ_{SO} . Der Versuch erforderte dennoch keine Wiederholung, denn die Temperaturkurven machen deutlich, daß der Schlauch halten wird – auch wenn statt des geringeren Druckes der FFB-Pumpe (7,4 bar) der höhere samt „Wasserhammer“ (sh. Kap. 8) berücksichtigt würde.

Der Versuchsverlauf mit Wasser bei 400°C ist in Bild 7 (verlängerte Abszisse!) dargestellt. Die beiden ersten Versuche wurden nach einer halben Stunde abgebrochen – der Schlauch blieb unbeschädigt. Die Temperaturkurven bis zu diesem Zeitpunkt sind in der

Mittelung enthalten. Bei zwei Langzeitversuchen versagten die Schlauchproben: 38 und 57 Minuten nach dem Schließen des Strahlrohres (zu erkennen an den Sprüngen in den gemittelten Temperaturkurven – die darauf zurückzuführen sind, daß jeweils nach einem Versagenszeitpunkt eine Temperatur-Meßreihe weniger für die Mittelung herangezogen werden kann). Ein möglicher Spitzendruck von 22,5 bar (statt 7,8 bar) würde hier zu einer deutlichen Verkürzung der Standzeit führen: 8 und 25 Minuten bei stehendem Löschmittel¹.

Bild 8 zeigt den Versuchsverlauf mit Wasser bei 500°C. Die Standzeiten fallen auf 2...3 Minuten beim Versuchs-Druckniveau von 7,7 bar – auf 0,2...1,6 Minuten beim Maximaldruck.

In Bild 9 ist der Versuchsverlauf mit Schaum ($E=4$) bei 300°C wiedergegeben. Die Versuchsdauer mit fließendem Löschmittel betrug hier 10 Minuten. Die Sprünge in den Temperaturkurven zeigen die Versagenszeitpunkte: 11; 14; 15 Minuten nach dem Schließen des Strahlrohres ($p_i=8,6$ bar).

In den Versuchen mit Schaum ($E=4$, $p_i=6,6$ bar) bei 400°C fallen diese Werte auf 1,8...2,2 Minuten. In Bild 10 ist die Versuchsphase mit fließendem Löschmittel graphisch gestreckt, um die Vergleichbarkeit mit den anderen Versuchen bei 400°C zu erleichtern.

Bild 11 (mit verlängerter Abszisse) gibt den Versuchsverlauf mit Schaum ($E=8$) bei 270°C wieder. Die Phase mit fließendem Löschmittel dauerte nur 5 Minuten. Es zeigte sich, daß die Schläuche bei Langzeitexposition (29...38 Minuten bei geschlossenem Strahlrohr, $p_i=6,4$ bar) auch dann versagen – obwohl die σ_{Bruch} -Kurve die σ_{tan} -Kurve nicht schneidet –, wenn nur die ausschlaggebende Materialtemperatur ϑ_{PET} lange genug – etwa eine halbe Stunde – in der Nähe des Schmelzpunktes gehalten wird („Kriech“effekt).

Die Kurzbeschreibungen der weiteren Versuche sind in Tabelle 1 stichwortartig zusammengestellt:

¹⁾ sh. Fußnote in Kapitel 8

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten

Bild Nr.	Löschmittel	E	\dot{V} [L/min]	Ofentemp. [°C]	Schließdruck [bar]	Schlauchverhalten	Besonderheiten
12	DLS	8	1348	280	6,6	platzt nach 25...29 min	Fließphase nur 5 min, verlängerte Abszisse
13	DLS	8	1348	300	6,7	platzt nach 7,5...8,5 min	$\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide gering
14	DLS	8	1348	400	6,5	platzt nach ≈ 2 min	$\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide sehr gering
15	DLS	23	1234	250	6,3	platzt nicht	
16	DLS	23	1234	270	6,5	platzt nach 34...39 min	Fließphase nur 5 min, verlängerte Abszisse
17	DLS	23	1234	280	6,3	platzt nach 22,5...25 min	Fließphase nur 5 min, $\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ sehr gering
18	DLS	23	1234	300	6,3	platzt nach 7...8 min	$\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide gering
19	DLS	23	1234	400	6,2	platzt nach ≈ 2 min	$\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide sehr gering
20	Luft	∞	1180	250	5,8	platzt nicht	
21	Luft	∞	1200	270	5,4	platzt nach 16...25 min	Fließphase nur 5 min, $\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ gering, Δt_{Bruch} groß (wie bei allen Versuchen $\leq 270^\circ\text{C}$)
22	Luft	∞	1200	280	5,6	platzt nach 21...22,5 min	Fließphase nur 5 min, $\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide gering
23	Luft	∞	1180	300	5,8	platzt nach ≈ 5 min	$\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide gering
24	Luft	∞	1180	400	5,1	platzt nach $\approx 0,3$ min	$\Delta\vartheta_{\text{Bruch}}$ und Δt_{Bruch} beide sehr gering
25	DLS	8	1348	300	7	platzt nach ≈ 11 min	Fließphase nur 5 min, FW-Schlauch mit Außengummierung

Tabelle 2 faßt die gewonnenen Versuchsergebnisse für *fließende und stehende* Löschmittel in übersichtlicher Form zusammen und zeigt tendentielle Abhängigkeiten der Standzeiten von der Art des Löschmittels und vom Temperaturniveau.

Tabelle 2: Standzeiten von Feuerwehrschräuchen in Minuten

Ofen- Temperatur [°C]	Löschmittel fließend		Löschmittel stehend	
	Wasser und DLS (E = 4...8)		Wasser	DLS (E = 4...8)
≤250	≫ 15		≫ 15	≫ 15
270...300	≫ 15		≫ 15	35...8
400	≫ 15		38...57	≈2
≥500	≫ 15		≈2	<1

Im Temperaturbereich von 80°C (Herstellergarantie) bis 250°C (Schmelzpunkt) versagen die Schläuche also nicht – weder bei fließendem noch bei stehendem Inhalt.

Die Standzeiten der geprüften Schläuche bei *stehendem* Löschmittel sind in Tabelle 3 (im Kap. 12 „Tabellen und Bilder“ nach Bild 25) detailliert zusammengestellt – geordnet nach „Löschmitteln“ (Wasser; E = 4; 8; 23; Luft) und nach Ofentemperaturen (80...500°C) wie sie den Diagrammen der Versuchsverläufe entnommen werden können. Ab 270°C sind bei DLS die ersten Schlauchplatzer zu beobachten, nach etwa 35 Minuten. Mit steigender Umgebungstemperatur fallen die Standzeiten auf 8...13 Minuten bei 300°C, auf etwa 2 Minuten bei 400°C.

Mit Wasser gefüllte Schläuche (*stehendes* Löschmittel) zeigen erst bei dieser Temperatur (400°C) die ersten Schäden – nach etwa 48 Minuten beim versuchsbedingten Druckniveau.

Ab 500°C Umgebungstemperatur bestehen keine praxisrelevanten Unterschiede mehr zwischen den Standzeiten der Schläuche mit den verschiedenen Löschmitteln.

In Bild 26 sind die Meßwerte aus Tabelle 2 (und weitere Werte aus Tabelle 3) veranschaulicht: Die gemittelten Standzeiten der untersuchten Schlauchproben während des Versuchsabschnittes mit geschlossenem Strahlrohr aufgetragen über der Umgebungstemperatur. Es zeigt sich der typische hyperbelähnliche Verlauf: Hohe Standzeiten für geringe Temperaturen und geringe Standzeiten für hohe Temperaturen. Die Kurven von DLS mit verschiedenem Expansionsverhältnis und von Luft liegen relativ nahe beieinander – allerdings in der zu erwartenden Staffelung: Hoher Wasseranteil führt zu höheren Standzeiten. Bei 300°C versagt ein Schlauch mit DLS mit $E = 8$ nach durchschnittlich 7,9 min, während ein Schlauch mit DLS mit $E = 4$ 13,3 min hält, d.h., 68 % länger. Die geringsten Werte werden gemessen, wenn der Schlauch nur Luft enthält.

Orientierende Rechnungen mit dem Modellansatz des instationären Wärmeübergangs ergeben Näherungswerte für die Temperatur an der inneren Schlauchoberfläche [16]. Diese liegen durchweg über den experimentell ermittelten Werten an dieser Stelle. Sie liegen schon nahe an den auf der äußeren Oberfläche gemessenen. Die Differenzen sind unerheblich bei Temperaturen $\leq 200^\circ\text{C}$, weil die Schläuche weder im Experiment noch in der Rechnung versagen, und ebenfalls bei Temperaturen $\geq 500^\circ\text{C}$, weil das Versagen dann sehr rasch eintritt. Nicht unerheblich sind diese Differenzen in einem mittleren Temperaturbereich ($\approx 250 \dots 300^\circ\text{C}$), weil die Rechnung zu kürzeren Standzeiten führt als die Versuche. Die Vorhersagegenauigkeit derartiger Rechnungen hängt von der Kenntnis der temperaturabhängigen Stoffwerte und der Randbedingungen ab. Bei geringer Zuverlässigkeit dieser Eingangsdaten können solche Rechnungen deshalb nur orientierenden Charakter haben.

Die Kurve „Standzeit = $f(\vartheta_\infty)$ “ für Luft darf nicht als „Grenzkurve“ für das Verhalten von Schaum in einem geneigt verlegten Schlauch interpretiert werden. Alle Versuche wurden auf ein und demselben Versuchsstand durchgeführt, der in der Positionierung des Schlauchprüflings einschließlich Zu- und Ablauf quasi „Tübingen“ nachbildet, weil – ähnlich zur Situation auf dem heißen Treppenabsatz – das bei Erwärmung des Schaumes ausfallende Wasser ablaufen kann – vom hohen Niveau im Prüfofen zum niedrigen auf dem Boden der Versuchshalle. Je nach Temperaturniveau während des Versuches und in

Abhängigkeit von der Schaumqualität ($E = 4 \dots 23$, sh. Kap. 7) zerfällt der Schaum unterschiedlich schnell und es fließen unterschiedliche Wassermengen ab. Der Schlauch erwärmt sich weiter, bis er an der Oberseite, wo mit Schließen des Strahlrohres das Zerfallen des Schaumes beginnt, versagt. Diese Versagenszeitpunkte sind (mit meßtechnischen, aber relativ geringen Schwankungen) charakteristisch für bestimmte Kombinationen aus Schlauchmaterial, Löschmittel, Umgebungstemperatur und Schließdruck und bilden die Zahlenbasis für die Kurven in Bild 26.

Die – im Vergleich zu Wasser von vorneherein geringere – Kühlwirkung von DLS schwindet in derselben Zeitspanne, die das im Schaum enthaltene Wasser braucht, um auszufallen. Dieser Prozeß (sh. folgendes Kapitel) hat asymptotischen Charakter und begründet, daß die Standzeit des mit DLS gefüllten Schlauches immer größer ist als die des luftgefüllten.

Ein einzelner Versuch (Signatur roter Stern in Bild 26 – entnommen dem in Bild 25 dargestellten Versuchsverlauf) wurde mit einem auch außen gummierten Feuerwehrschauch durchgeführt – bei 300°C Ofentemperatur mit der Verschäumungszahl $E = 8$. Die Standzeit verbesserte sich gegenüber dem einfachen Schlauch von 7,9 min auf 10,5 min, d.h., um etwa 33 %, bleibt aber in ähnlicher Größenordnung unter dem Ergebnis, das mit einem geringeren Expansionsverhältnis zu erzielen ist.

Deutlich abgesetzt verläuft die Standzeit-Kurve von Wasser – auch wenn rechnerisch das höhere Druckniveau einschließlich „Wasserhammer“ (sh. Kap. 8) berücksichtigt wird. Insbesondere wenn in der näheren Umgebung des Schlauches Temperaturen zwischen 300°C und 400°C herrschen, macht sich ein signifikanter Unterschied bemerkbar: Die Standzeiten liegen mehr als eine Stunde (bei 300°C) bis 13 Minuten (bei 400°C) über den besten DLS-Werten.

7. ZERFALLSZEITEN VON DLS UND SCHADENSBILDER GEPLATZTER FEUERWEHR-DRUCKSCHLÄUCHE

Wenn während des Löschens das Strahlrohr geschlossen wird, beginnt sich die Dispersion aus Wasser/Schaummittel und Luft zu zersetzen, das heißt, das Wasser mit dem Schaummittel fällt aus und sammelt sich (bei $E = 8$ – d.h., $E_p = 2,08$ bei einem Schließdruck von 6,6 bar – zur Herleitung von E_p aus E und p sh. Gl. (6) in Kap. 9) in der unteren Hälfte des Schlauchquerschnittes. Nach 5···6 Minuten ist mehr als die Hälfte des flüssigen Anteils ausgefallen und der Pegel steht etwa auf Höhe des 0,3···0,4-fachen des Schlauchdurchmessers, wenn der Versuch auf dem Boden der Brandversuchshalle durchgeführt wird. Im Prüfstand beginnt jedoch die Flüssigkeit schon vor dem Erreichen dieses Standes abzulaufen. Während des Versuchsablaufes ist deutlich zu beobachten, wie zu Beginn der Versuchsphase mit geschlossenem Strahlrohr die Temperatur oben im Schlauchinneren ϑ_{oben2} rasch steigt, wogegen dies unten – $\vartheta_{\text{unten2}}$ – erst mit einiger Verzögerung stattfindet, wenn das Wasser/Schaummittel-Gemisch nach dem Ausfallen abläuft.

Bei DLS mit $E = 4$ (d.h., $E_p = 1,33$ beim Schließdruck von 7,6 bar) würde das ausgefallene Wasser/Schaummittel-Gemisch – hochgerechnet – drei Viertel des Schlauchquerschnittes füllen, der Flüssigkeitspegel stünde beim 0,7-fachen des Schlauchdurchmessers, wenn es dem Gefälle folgend im Prüfstand nicht ebenfalls ablaufen würde. Der Unterschied im Wassergehalt zwischen diesen beiden Schaumqualitäten erklärt die Standzeitsteigerung von fast 70 % des $E=4$ -Schaumes gegenüber dem $E=8$ -Schaum.

Der obere Restquerschnitt ($\geq 50\%$ bei $E = 8$; $\geq 25\%$ bei $E = 4$) enthält nach dem Ausfallen des Wasser/Schaummittel-Gemisches praktisch nur noch Luft, die wegen ihrer geringen Wärmekapazität den Schlauch nicht mehr zu kühlen vermag. Er erwärmt sich rasch und platzt (immer oben), sobald das geschwächte Polyester dem Schließdruck nicht mehr standhält.

In Bild 27 sind die ermittelten Zeiten, in denen die Hälfte der im Schaum enthaltenen Schaummittel-Lösung ausfällt, beispielhaft für eine mittlere Schaumqualität ($E = 8$) über der Temperatur aufgetragen. Hieraus ist eine eindeutige Tendenz abzulesen: Mit zunehmender Temperatur zerfällt der Schaum schneller. Die vom Tabellenkalkulationssystem EXCEL[®] ausgeworfene Trendlinie zeigt, daß die Schaumhaltbarkeit überproportional abnimmt.

So fällt beispielsweise bei 300°C innerhalb einer Minute nahezu die Hälfte des im Schaum gebundenen Wassers aus. Dies bedeutet zwar nicht, daß ein so weit erwärmter, DLS führender Schlauch jetzt versagt, denn das im Schaum noch enthaltene restliche Wasser, das in weiteren 15···20 Minuten ausfällt, besitzt noch eine geringe Kühlwirkung. Aber um auf der sicheren Seite zu bleiben, sollte die in Bild 13 für *diese* Umgebungstemperatur dokumentierte Standzeit von 8 Minuten nicht voll ausgeschöpft werden, das heißt, daß das Strahlrohr bei dieser Temperatur nicht ganz so lange geschlossen bleiben sollte.

Mit einem kurzen Öffnen kann erreicht werden, daß Schaummittel-Lösung und Luft sich wieder mischen, so daß – im horizontal verlegten Schlauch – augenblicklich (≤ 1 sec – im Unterschied zu der für das Zerfallen benötigten Zeitspanne) wieder DLS in der vorgewählten Qualität ansteht. Im geneigt liegenden Schlauch könnte maximal die Laufzeit vom DLS-Aggregat bis zum Strahlrohr angesetzt werden (11 sec beispielsweise für 45 m mit DLS und $E = 4$).

Bei den während der Versuche geplatzen Schlauchprüflingen unterscheiden sich die Schadensbilder (sh. Bild 28 und 29) auffällig: DLS führende Schläuche – egal welche Verschäumungszahl – zeigen große, weit aufgerissene Schadstellen, wogegen die Löcher in den Wasser führenden Schläuchen so klein sind, daß nach einem Versagen im Verlauf eines Einsatzes mit Innenangriff das Strahlrohr nicht völlig trocken fallen muß. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, daß sich das praktisch inkompressible Wasser nahezu schlagartig entspannt (sh. blaue Kurve in Bild 30), so daß an dem wärme-geschwächten

Polyestergewebe keine vom Innendruck verursachte Tangentialspannung mehr angreift, die das Loch weiter aufreißen könnte.

Im Unterschied hierzu wird der Druck in einem kompressiblen Medium bei gleich großer Entlastungsöffnung deutlich langsamer abgebaut (sh. rote Kurve in Bild 30) – im Falle des erwärmten Feuerwehrschauches so langsam, daß das weiterbestehende Druckniveau ausreicht, das rings um die Schadensstelle geschwächte Material weiter aufzureißen. Dieser Vergleich gilt in der geschilderten und in Bild 30 wiedergegebenen Art, wenn nicht nur die Anfangsschädigung gleich groß, sondern wenn auch der Druck in den beiden Schläuchen gleich groß ist.

Berichte darüber [17], daß auch Wasser führende Schläuche mit umfangreichen Rissen platzen können, sind damit zu erklären, daß in diesen Schläuchen im Versagenszeitpunkt ein wesentlich höherer Druck herrscht als der im Experiment eingestellte – die beiden unteren Kurven in Bild 30. Wenn man statt dessen den im nächsten Kapitel erläuterten Maximaldruck von 22,5 bar und einen gleich großen Gradienten für den Druckverlust unmittelbar nach dem Bersten annimmt, so zeigt die schwarze Kurve, daß es auch bei Wasser durchaus länger als eine Sekunde dauern kann, bis der Druck auf ein ungefährliches Niveau gefallen ist, so daß also auch hier durch die Theorie begründet größere Risse als bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Versuchen möglich und begründet sind.

8. DRUCKSPITZEN BEI WASSER UND BEI DRUCKLUFTSCHAUM

Nach DIN 14811 kann als maximale Druckbelastung der Schläuche der Schließdruck der Kreiselpumpe in Höhe von 18 bar angenommen werden. Mit den der FFB zur Verfügung gestellten Förderaggregaten [10, 13, 14] konnte ein solches Druckniveau nicht verifiziert werden, weshalb ursprünglich weitere Experimente mit einer Feuerwehrkreiselpumpe anstatt der DLS-Aggregate vorgesehen waren. Auf die Durchführung solcher

„Versuche bei höherem Druckniveau“ kann jedoch verzichtet werden, weil sich dies auch anschaulich am Rechner simulieren läßt.

Beim schnellen Schließen eines Absperrorgans in einer von einer inkompressiblen Flüssigkeit durchströmten starren Rohrleitung wird diese von einer Druckwelle („Wasser-Hammer“) durchlaufen, deren maximale Höhe sich nach der JOUKOWSKI-Formel [18...20]

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v \quad (5)$$

berechnen läßt. Bei einer Fließgeschwindigkeit von $v = 2,35$ m/sec (entspr. 300 L/min bei $D_i = 52$ mm) und einer Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle von $a = 1300$ m/sec (nahe der Schallgeschwindigkeit in Wasser) müssen die Rohre demnach einem zusätzlichen Druck von 30 bar standhalten.

Feuerwehrschräume sind aber keine starren Rohre, weshalb die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle hier nur $a \approx 275$ m/sec erreicht [21, 22] und die Druckspitze auch nur 6,5 bar über dem in DIN 14811 definierten Arbeitsdruck von 16 bar liegt. Für die Druck-Beanspruchung der Schäume stellt die Summe von 22,5 bar im Vergleich zum Schließdruck also das schärfere Kriterium dar².

Wegen der Kompressibilität der Luft tritt dieser Effekt bei DLS im Schlauch nicht auf [20...22].

Es zeigt sich, daß die Standzeiten Wasser führender Schäume bei diesem Druckniveau annähernd gedrittelt werden – verglichen mit den experimentell mit Hilfe der FFB-Pumpe [10] bei 7...8 bar ermittelten Werten. Sie liegen aber immer noch deutlich über jenen DLS führender Schäume, denn der dominierende Einfluß auf den Zeitpunkt „wann schneiden sich steigende Tangentialspannungs- und fallende Bruchfestigkeitskurve“ geht vom Temperatureinfluß auf die Bruchfestigkeit aus.

²) dieser Wert stellt eine physikalisch begründete worst-case-Betrachtung dar, der in der Feuerwehreinsatzpraxis in dieser Höhe eigentlich nicht auftreten sollte

Bei einer Umgebungstemperatur von 500°C werden die Einflüsse von Temperatur und Drucksteigerung (in Folge eines Druckstoßes beim schnellen Schließen des Strahlrohres – sh. $\Delta\sigma_{\text{Bruch}}$ und $\Delta\sigma_{\text{tan}}$ bei $t \geq 15$ min in Bild 8) dann etwa gleich groß und der Wasser-Schlauch versagt ebenso rasch wie ein DLS-Schlauch. Ohne Druckstoß hält er 1½ Minuten länger.

9. HÖHERWERTIGE SCHLÄUCHE

Zwar sind diese Schläuche³ (Klasse 3 oder 4 nach prEN 1924) in Abhängigkeit von der Stärke der Außenbeschichtung (z.B. Polyurethan, Nitril- oder Acrylnitril-Butadien-Kautschuk) etwa 15···50 % schwerer als die in Klasse 1 derselben Norm eingeordneten unbeschichteten Schläuche [23], doch bleibt der Gewichtsvorteil selbst des schwersten Schaumes mit $E = 4$ gegenüber Wasser nahezu vollständig erhalten.

Tabelle 4: Gewichte gefüllter Feuerwehrschräuche

Schlauchgewichte [kg]	unbeschichtet – Wasser –	unbeschichtet – DLS –	mit Außengummierung – DLS –
Gewicht von 15 m C-52-Schlauch	4,5	4,5	5,18···6,75
Gewicht der Kupplungen	0,77	0,77	0,77
Gewicht des Löschmittels	31,86	18,94···22,84	18,94···22,84
Summe	37,13	24,21···28,11	24,89···30,36

Der Berechnung wurde ein mittleres Schlauchgewicht in Klasse 1 von 300 g/m und die oben genannte Spreizung von 115···150 % hiervon für Klasse 3 beziehungsweise 4 zu Grunde gelegt. Bei der Berechnung der Verschäumungszahl E_p unter Druck

³) in Großbritannien nahezu ausschließlich im Einsatz – in den USA noch schwerere doppelwandige [12]

$$E_p = (E-1+p) / p \quad (6)$$

wurde sowohl der Förderdruck bei offenem Strahlrohr (4,4 bar) als auch der Schließdruck (7,6 bar) berücksichtigt. Andere Aspekte der Handhabung werden hier nicht angesprochen.

10. ZUSAMMENFASSUNG

Ein tragischer Unfall während eines Feuerwehreinsatzes mit Druckluftschaum (DLS) hat die Frage aufgeworfen, wie viel schneller DLS führende Feuerwehr-Druckschläuche unter Wärmebeaufschlagung versagen als Wasser führende.

In einem Versuchsstand, in dem die Prüfstücke in einer Heißgasatmosphäre erwärmt werden können, wurden 90 Einzelversuche durchgeführt, um die Haltbarkeit von Klasse-1-Schläuchen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur zu testen. Zuvor war der Bruchfestigkeits/Temperatur-Zusammenhang für das tragende Polyestergewebe im Feuerwehrschauch aufgenommen worden, mit dem sich der physikalische Vorgang im Versagenszeitpunkt veranschaulichen läßt: Die infolge der Erwärmung geminderte Bruchfestigkeit fällt unter die durch den Arbeits- bzw. Schließdruck verursachte Tangentialspannung im Gewebe.

Das Testszenario im Versuchsstand entspricht nicht dem in DIN 14811 genormten Verfahren, sondern bildet eine Art der Beanspruchung der Schläuche ab – großflächig und andauernd –, wie sie im praktischen Einsatz auftreten kann.

Die bislang durchgeführten Experimente zeigen, daß mit DLS gefüllte Schläuche bei erheblicher Überschreitung der vom Hersteller angegebenen Maximaltemperatur ($\Delta\theta \geq 190^\circ\text{C}$!) empfindlicher reagieren als mit Wasser gefüllte Schläuche. Zwar halten jeweils beide Schläuche, solange das „Löschmittel“ fließt – unter Einsatzbedingungen, mit offenem Strahlrohr. Selbst bei fließendem, trockenem DLS mit $E=23$ versagt der Schlauch

bei 500°C Ofentemperatur nicht. Sogar die geringe Kühlwirkung von fließender Luft würde noch ausreichen, um einen Schlauch in 400°C heißer Umgebung vor dem Platzen zu schützen.

Unter den gewählten Versuchsbedingungen versagen die Schläuche bei stehendem Löschmittel nicht, solange die Ofentemperatur unter 250°C bleibt (= Schmelztemperatur von Polyester). Jedoch werden bei Temperaturen von 270°C und darüber deutliche Standzeit-Unterschiede ermittelt, wobei die des „Löschmittels“ „Luft“ und die von DLS relativ nahe beieinander liegen (1···8 min). Dagegen reißt der Wasser enthaltende Schlauch bei beispielsweise 400°C und stehendem Löschmittel erst nach 48 min (unter Versuchsbedingungen, Druckniveau: 7···8 bar). Ab 500°C unterscheidet sich die Standzeit des Wasserschlauches nicht mehr wesentlich von der des DLS-Schlauches.

Bei der Verwendung von DLS im Inneneinsatz können also aus den an der FFB durchgeführten Experimenten folgende Einsatzhinweise abgeleitet werden:

- Es darf hier nur Schaum mit geringem Expansionsverhältnis verwendet werden;
- unabhängig von der Temperatur, mit der sich der Feuerwehrangehörige konfrontiert sieht, darf das Strahlrohr nicht länger als 8 Minuten geschlossen bleiben (entspricht in etwa der Zeitspanne, nach der spätestens eine Meldung/Abfrage des vorgehenden Angriffstrupps erfolgen muß) und
- auch beim Vorrücken – *sobald die Gefahr droht, daß der Schlauch höheren Temperaturen ausgesetzt werden könnte* – muß immer so viel Löschmittel abgegeben werden, daß der Schaum nicht zerfällt und seine Kühlwirkung im Schlauch nicht verliert, alternativ wäre der Maschinist anzuweisen, die Luftzufuhr zum DLS auszustellen.

Mit dem Forschungsvorhaben konnte ein Beitrag zur Klärung geleistet werden, welchen Druck- und thermischen Belastungen Feuerweherschläuche der Klasse 1 nach DIN 14811 ausgesetzt werden dürfen, damit sie im Feuerwehreinsatz nicht versagen.

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik dankt den projektbegleitenden Kooperationspartnern für ihre fachkundige Beratung und den im folgenden aufgezählten Firmen für die großzügige Unterstützung dieses Forschungsauftrages, indem sie die zur Durchführung der Experimente erforderlichen Geräte und Materialien zur Verfügung stellten (im Bericht spezifiziert unter [7], [13], [14] und [15]):

- Hale Products Europe ltd., Feuerwehr- und Rettungssysteme, Egelsbach;
- GIMAEX-Schmitz Fire and Rescue GmbH, Wilnsdorf;
- Dr. Sthamer, Schaum- und Sonderlöschmittel, Hamburg und
- Albert Ziegler GmbH & Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik und Schlauchweberei, Giengen.

11. LITERATURVERZEICHNIS

- [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] Mersch, Hubert (Parsch GmbH&Co.KG, Schläuche & Armaturen, Ibbenbüren):
Hitzetest – Flammtest an Feuerlöschschläuchen nach DIN 14811 Teil 4, Vortrag auf der Tagung mit dem Landesbranddirektor in der Landesfeuerweherschule Bruchsal am 25.1.2006
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuß Feuerwehrwesen (FNFW):
Schutzbekleidung für die Feuerwehr – Leistungsanforderungen für Schutzbekleidung für die Brandbekämpfung (DIN EN 469), Beuth-Verlag, Berlin, März 2006
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuß Feuerwehrwesen (FNFW):
Feuerwehrlinien für die Brandbekämpfung in Gebäuden und anderen baulichen Anlagen (DIN EN 443), Beuth-Verlag, Berlin, Juli 2008
- [5] Föhl, C.Axel:
Ermittlung der Anforderungen an Druckluftschäum-Systeme im Lösch-einsatz,
Forschungsbericht Nr. 140 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe 2004
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuß Feuerwehrwesen (FNFW):
Feuerlöschschläuche – Druckschläuche und Einbände für Pumpen und Feuerwehrfahrzeuge (DIN 14811), Beuth-Verlag, Berlin, Januar 2008
- [7] Braun, Julian (Albert Ziegler GmbH&Co.KG, Feuerwehrgerätefabrik und Schlauchweberei):
Produktinformation zum Feuerwehrschauch „Silberfuchs K2 L“, Giengen 2007
- [8] 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
- [9] Schaaf, Jochen:
Versagt ein Druckluftschäum führender Schlauch unter Temperatur-Beaufschlagung eher als ein Wasser führender?,
Diplomarbeit an der Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Fachbereich Bauingenieurwesen, Karlsruhe 2007
- [10] Speck-Pumpen:
Produktinformation,
<http://www.speck-pumpen.de>
- [11] Grimwood, Paul:
Zimmerbrände – Wasserdurchflüsse für die Brandbekämpfung,
<http://www.fire-flows.com>
- [12] Schumann, Ulrich:
Risikoanalyse zum Einsatz von Druckluftschäum (Entwurf), Egelsbach 2008

- [13] Hale Produktinformation:
Druckluftschäum-Aggregat
„Hale CAFS 50“ (DLS 1200 / DZA 8 /
0,1-1 nach DIN 14430),
Egelsbach 2007
- [14] GIMAEX-Schmitz Produktinformation:
Druckluftschäum-Aggregat
„One Seven® OS 1200 SU“ (DLS 1200
/ DZA 2 / 0,2-2,0 nach DIN 14430),
Wilnsdorf 2008
- [15] Dr. Sthamer:
Schaum gegen Feuer,
Produktinformation über Schaum- und
Sonderlöschmittel,
Hamburg 2003
- [16] Reick, Michael:
Temperaturbeständigkeit von Feuer-
weherschläuchen,
Vortrag auf der Tagung mit dem Lan-
desbranddirektor in der Landesfeuer-
weherschule Bruchsal am 25.1.2006
- [17] Bayerisches Staatsministerium des
Inneren und Bayerischer Gemeinde-
unfallversicherungsverband:
Entwurf einer Gefährdungsbeurteilung
beim Feuerwehreinsatz,
München, Juni 2008
- [18] Wagner, Walter:
Apparate- und Rohrleitungsbau –
Festigkeitsberechnungen,
Vogel-Buchverlag, Würzburg 1984
- [19] Ebert, Karl:
Handbuch Feuerwehrrmaturen,
2. Auflg. (1988), Max Widenmann
Armaturenfabrik Giengen (AWG)
- [20] Lüdecke, Horst-Joachim und Bernd
Kothe:
Der Druckstoß,
Klein, Schanzlin & Becker AG,
KSB-Know-how, Band 1,
Frankenthal 2003
- [21] Hinrichs, Behrend R.:
Untersuchung der Vor- und Nachteile
des Kugelhahnes im Wasserförder-
system außerhalb des Strahlrohres im
Vergleich zum Niederschraubventil,
Forschungsbericht Nr. 6 der Arbeits-
gemeinschaft der Landesdienststellen
für Feuerschutz in den Bundesländern
(AGF), Karlsruhe 1964
- [22] Fachhochschule Bingen, Fakultät für
Elektrotechnik:
Wasserhammerprüfstand an der FH
Bingen,
<http://www.fh-bingen.de/elektrotechnik.801.0.html>
- [23] Parsch Schläuche und Armaturen
GmbH & Co.KG:
Produktinformationen,
Ibbenbüren 2006
- [24] Demel, Jan Tino:
Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von
in Löschfahrzeugen eingebauten Druck-
luftschäumen bei Brandeinsätzen
unter besonderer Berücksichtigung des
Unfallschutzes,
Hausarbeit für den feuerwehr-
technischen Dienst, Hagen 2006
- [25] Pleß, Georg und Ursula Seliger:
DSD – Brandschutz und Brand-
bekämpfung in Wertstofflagern,
Forschungsbericht Nr. 123,1 der Ständi-
gen Konferenz der Innenminister und
-Senatoren der Länder, Arbeitskreis V
– Ausschuß für Feuerwehrangelegen-
heiten, Katastrophenschutz und zivile Ver-
teidigung, Heyrothsberge 2001
- [26] Christ, Thomas:
Feuer unterm Hoteldach,
Feuerwehr-Magazin, 19. Jahrgg. (2002),
Heft 12, Seite 36–39

- [27] Raab, Wolfgang:
Alternative Löschschaum – Bericht über
einen Großbrand in einer Privatklinik,
Schadenprisma, 27. Jahrgg. (1998),
Heft 2, Seite 12···19
- [28] dpa:
Brand in der Philharmonie,
Badische Neueste Nachrichten,
63. Jahrgg. (2008), Nr. 117 (21. Mai),
Seite 1
- [29] Berger, Martina und Jens-Peter Wilke:
„Da brennt ein gelbes Gebäude“ – Brand
der Berliner Philharmonie,
Brandschutz / Deutsche Feuerwehr-
Zeitung, 62. Jahrgg. (2008), Heft 9,
Seite 686···692
- [30] Donath, Claus und Bernd Kamleitner:
Feuer zerstört Berghotel,
Badische Neueste Nachrichten,
63. Jahrgg. (2008), Nr. 112 (6. Mai),
Seite 1
- [31] Donath, Claus:
Beliebtes Ausflugsziel wird ein Raub
der Flammen,
Badische Neueste Nachrichten,
63. Jahrgg. (2008), Nr. 112 (6. Mai),
Seite 4
- [32] Haendle, Rainer:
Weniger Touristen am Mummelsee,
Badische Neueste Nachrichten,
63. Jahrgg. (2008), Nr. 147 (26. Juni),
Seite 7
- [33] Hamilton, Walter und Ulrich Kortt:
Handbuch für den Feuerwehrmann,
20. Aufl., Boorberg-Verlag,
Stuttgart···Dresden 2004
- [34] Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der
Landesfeuerwehrschule Baden-
Württemberg:
Ausbildung der Freiwilligen
Feuerwehren – Lehrstoffblätter zur
Grundausbildung, 7. Aufl.,
Neckar-Verlag, Villingen-
Schwenningen 2005

12. TABELLEN UND BILDER

<u>Tabelle 1:</u>	Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsdaten	15
<u>Tabelle 2:</u>	Standzeiten von Feuerwehrschräuchen in Minuten.....	16
<u>Tabelle 3:</u>	Die Zeitpunkte des Schlauchversagens nach dem Schließen des Strahlrohres	48
<u>Tabelle 4:</u>	Gewichte gefüllter Feuerwehrschräuche	23
<u>Bild 1:</u>	Der Versuchsstand in der Brandversuchshalle der FFB – Konstruktionszeichnung [9].....	33
<u>Bild 2:</u>	Der Versuchsstand in der Brandversuchshalle der FFB – Photographie [9].....	34
<u>Bild 3:</u>	Ein typischer Versuchsverlauf – hier der 3. Versuch mit DLS (E = 8), Förderstrom 1348 L/min, Arbeitsdruck 2,2 bar, Schließdruck 6,7 bar, Ofentemperatur 300°C, das Löschmittel fließt 15 min, 8 min nach dem Schließen des Strahlrohres versagt der Schlauch.....	35
<u>Bild 4:</u>	Die Halterung für die 9 Thermoelemente, mit denen die Temperaturen im Schlauchinneren gemessen werden	36
<u>Bild 5:</u>	Die Temperaturabhängigkeit der Bruchspannung des Polyester-gewebes im Feuerwehrschräuch.....	37
<u>Bild 6:</u>	Der Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit Wasser bei 300°C Ofentemperatur.....	38
<u>Bild 7:</u>	Der aus 4 Versuchen mit Wasser gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur	38
<u>Bild 8:</u>	Der aus 3 Versuchen mit Wasser gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 500°C Ofentemperatur	39
<u>Bild 9:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS (E = 4) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur	39

<u>Bild 10:</u>	Der aus 5 Versuchen mit DLS ($E = 4$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur	40
<u>Bild 11:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 270°C Ofentemperatur	40
<u>Bild 12:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 280°C Ofentemperatur	41
<u>Bild 13:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur	41
<u>Bild 14:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur	42
<u>Bild 15:</u>	Der Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit DLS ($E = 23$) bei 250°C Ofentemperatur	42
<u>Bild 16:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 270°C Ofentemperatur	43
<u>Bild 17:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 280°C Ofentemperatur	43
<u>Bild 18:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur	44
<u>Bild 19:</u>	Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur	44
<u>Bild 20:</u>	Der Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit Luft ($E = \infty$) bei 250°C Ofentemperatur	45

<u>Bild 21:</u>	Der aus 3 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 270°C Ofentemperatur	45
<u>Bild 22:</u>	Der aus 2 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 280°C Ofentemperatur	46
<u>Bild 23:</u>	Der aus 3 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur	46
<u>Bild 24:</u>	Der aus 3 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur	47
<u>Bild 25:</u>	Der Verlauf der Temperaturen innen und außen an einem Schlauch mit Außengummierung und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit DLS ($E = 8$) bei 300°C Ofentemperatur	47
<u>Bild 26:</u>	Die Schlauch-Standzeit in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für verschiedene Löschmittel bei geschlossenem Strahlrohr	49
<u>Bild 27:</u>	Die Abhängigkeit der Entwässerungs-Halbzeit von DLS ($E = 8$) von der Umgebungstemperatur	50
<u>Bild 28:</u>	Das Schadensbild eines DLS ($E = 4$) führenden Schlauches bei 300°C Umgebungstemperatur und einem Schließdruck von 9,7 bar, Versagenszeitpunkt: 10,5 min nach dem Schließen des Strahlrohres	51
<u>Bild 29:</u>	Das Schadensbild eines Wasser führenden Schlauches bei 500°C Umgebungstemperatur und einem Schließdruck von 7,5 bar, Versagenszeitpunkt: 2 min nach dem Schließen des Strahlrohres	51
<u>Bild 30:</u>	Die Abnahme des Druckes in einem Feuerwehrschauch beim plötzlichen Aufreißen eines kleinen Lecks – simuliert durch eine 9-mm-Blende vor einem Kugelhahn	52

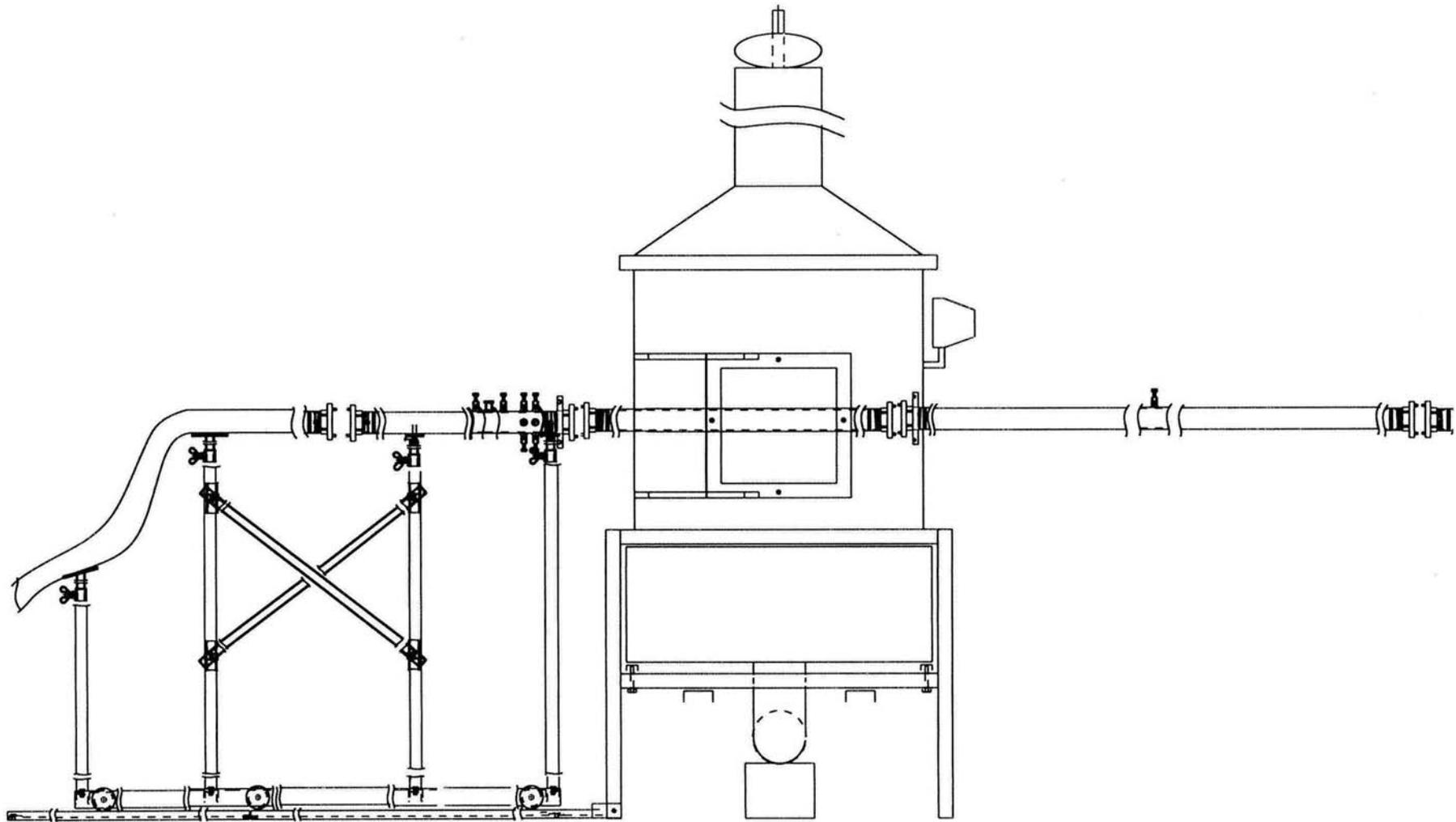


Bild 1: Der Versuchsstand in der Brandversuchshalle der FFBB – Konstruktionszeichnung [9]

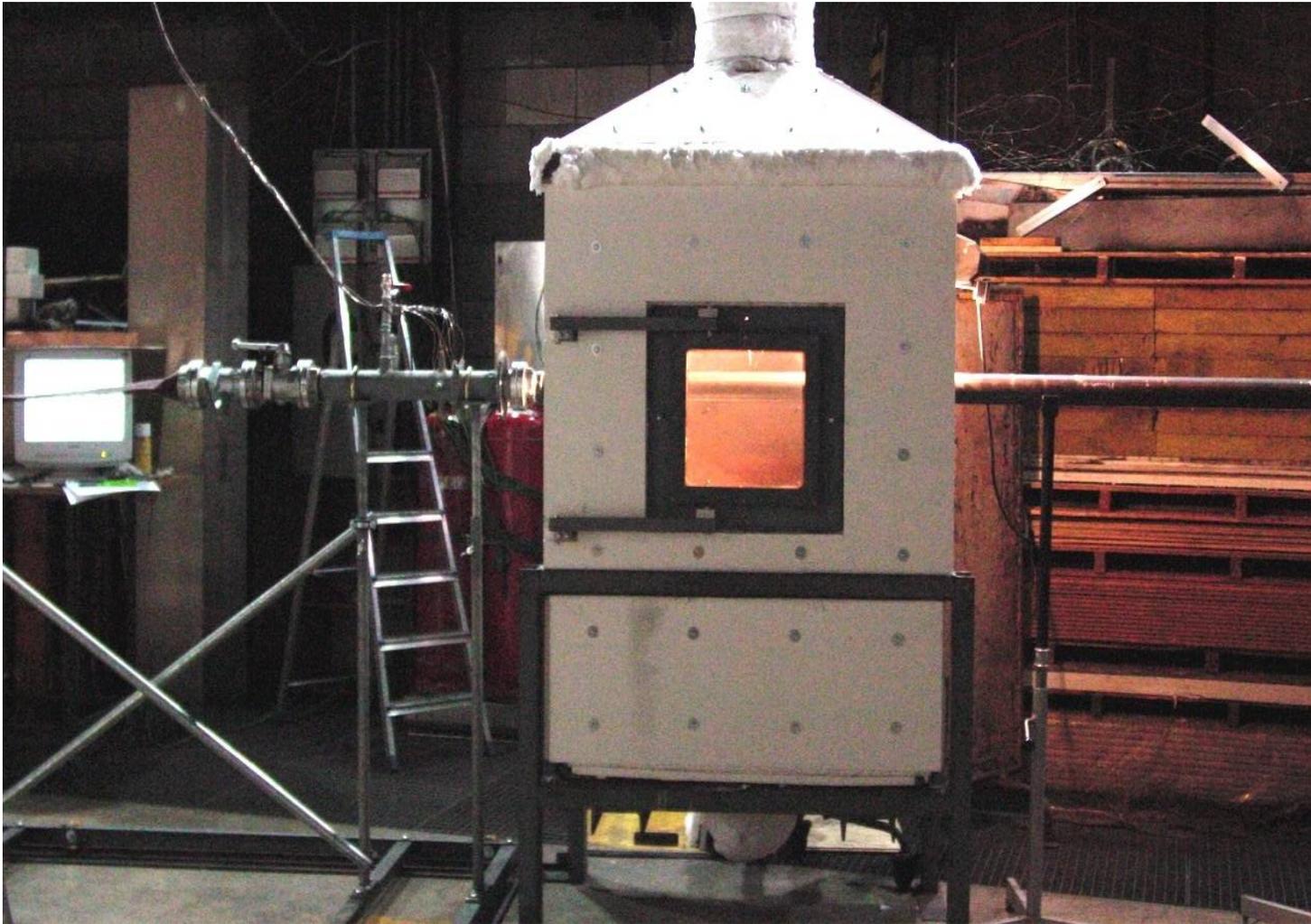


Bild 2: Der Versuchsstand in der Brandversuchshalle der FFB – Photographie [9]

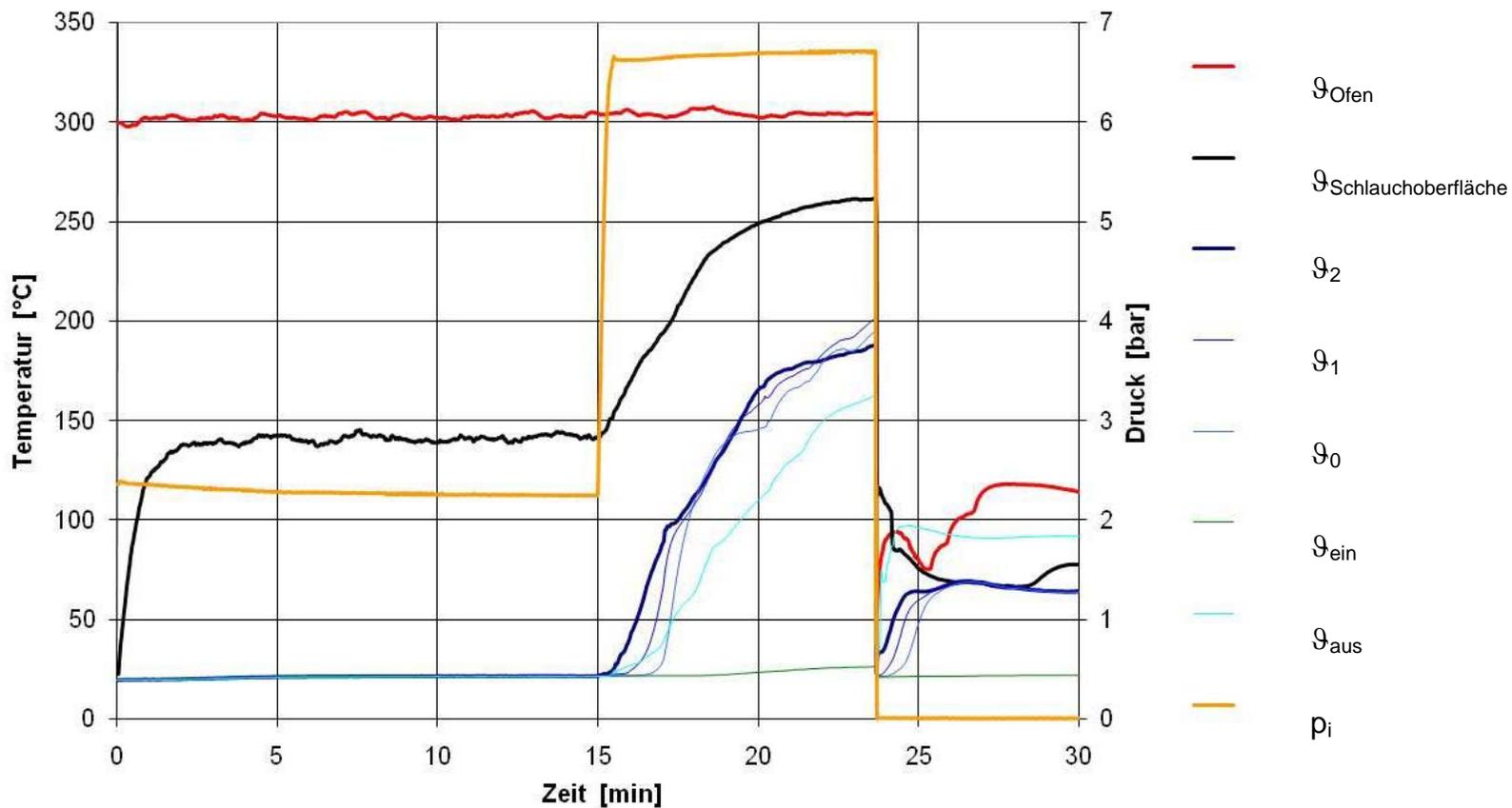


Bild 3: Ein typischer Versuchsverlauf – hier der 3. Versuch mit DLS ($E = 8$), Förderstrom 1348 L/min, Arbeitsdruck 2,2 bar, Schließdruck 6,7 bar, Ofentemperatur 300°C, das Löschmittel fließt 15 min, 8 min nach dem Schließen des Strahlrohres versagt der Schlauch

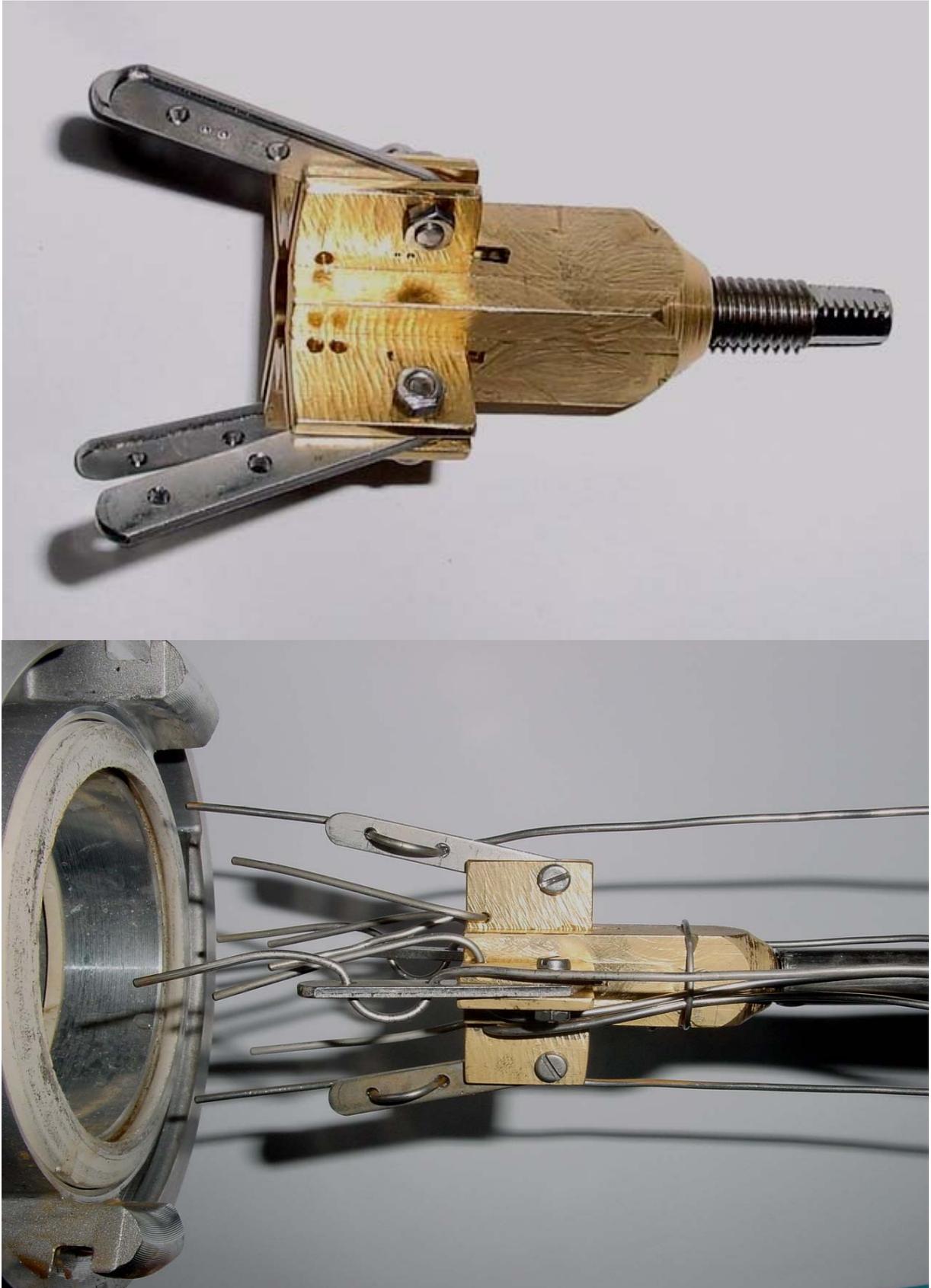


Bild 4: Die Halterung für die 9 Thermoelemente, mit denen die Temperaturen im Schlauchinneren gemessen werden

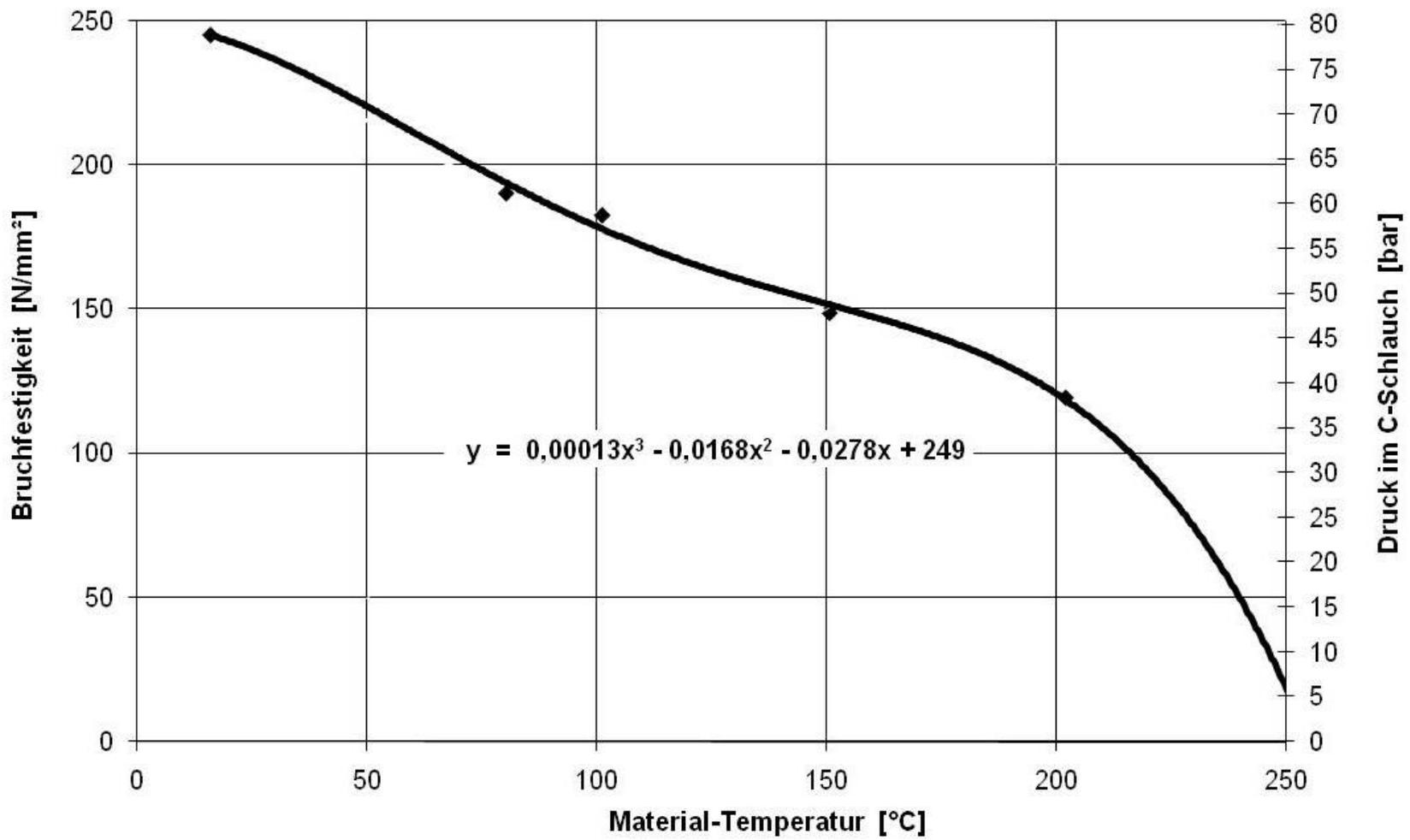


Bild 5: Die Temperaturabhängigkeit der Bruchfestigkeit des Polyesterwebes im Feuerwehrschauch

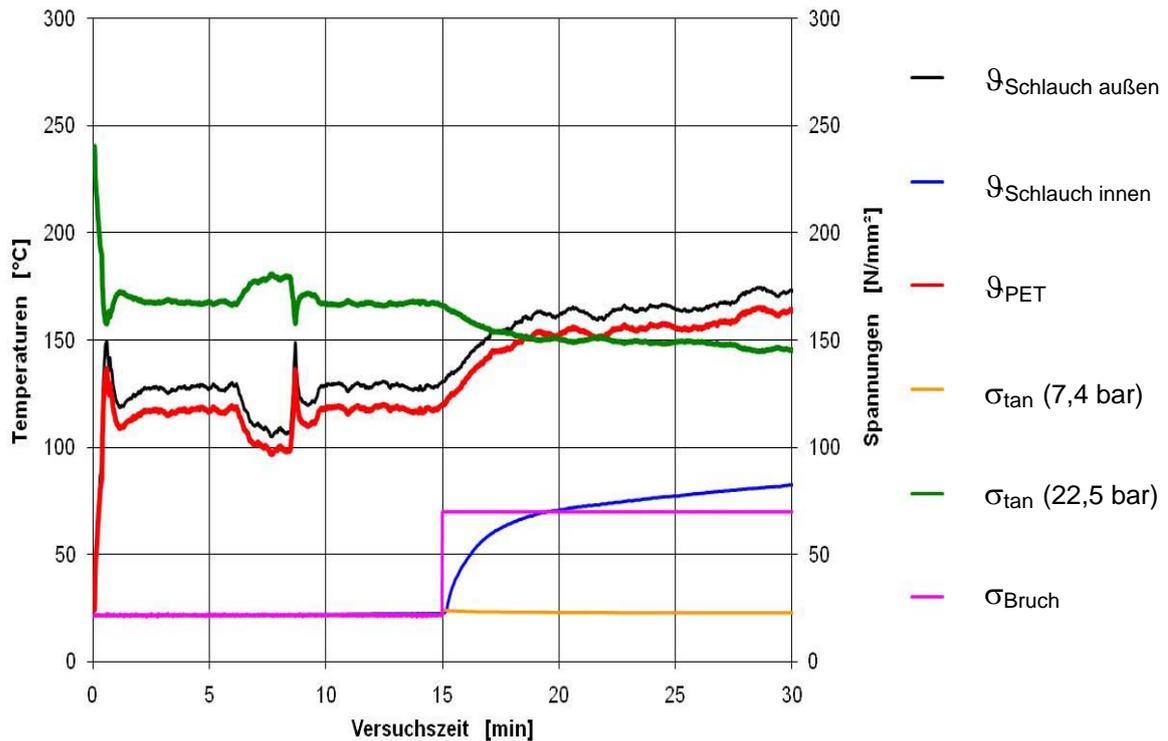


Bild 6: Der Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit Wasser bei 300°C Ofentemperatur

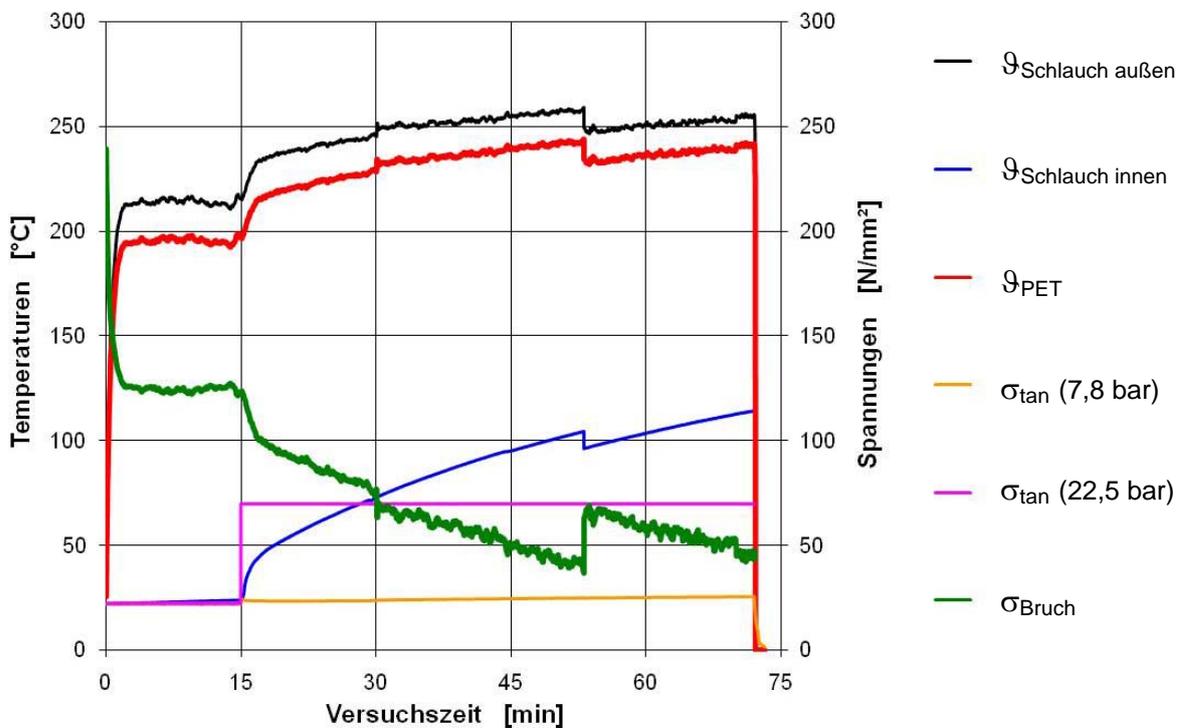


Bild 7: Der aus 4 Versuchen mit Wasser gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur

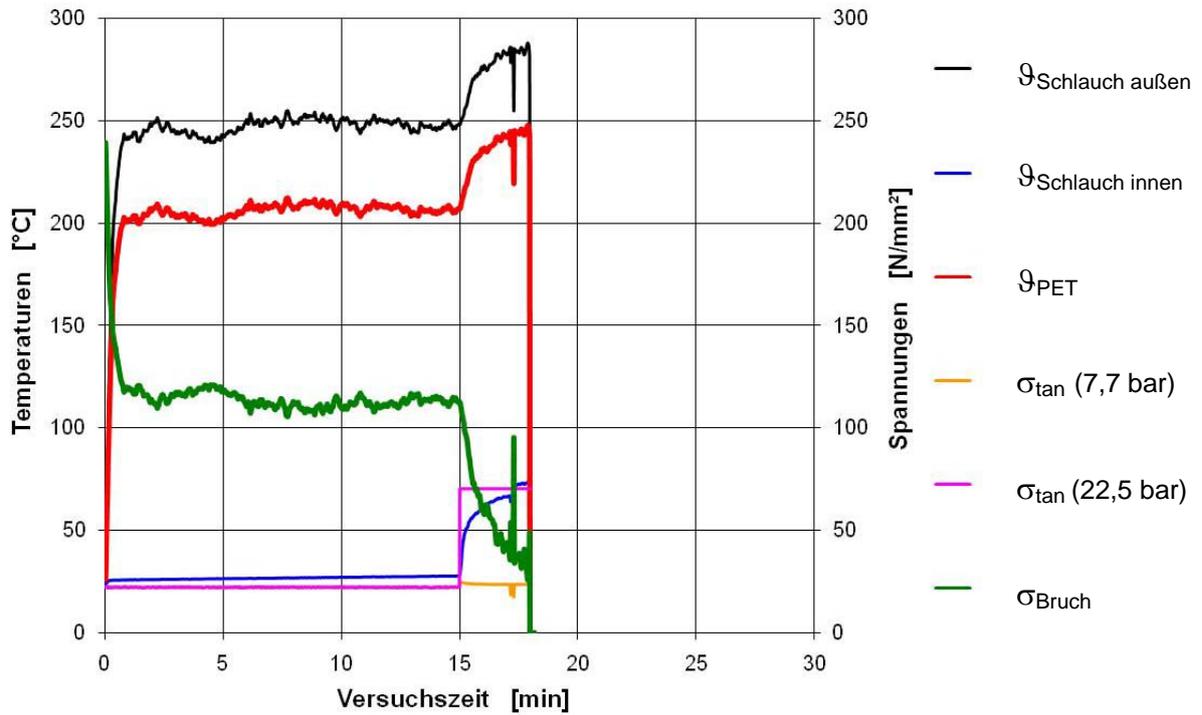


Bild 8: Der aus 3 Versuchen mit Wasser gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 500°C Ofentemperatur

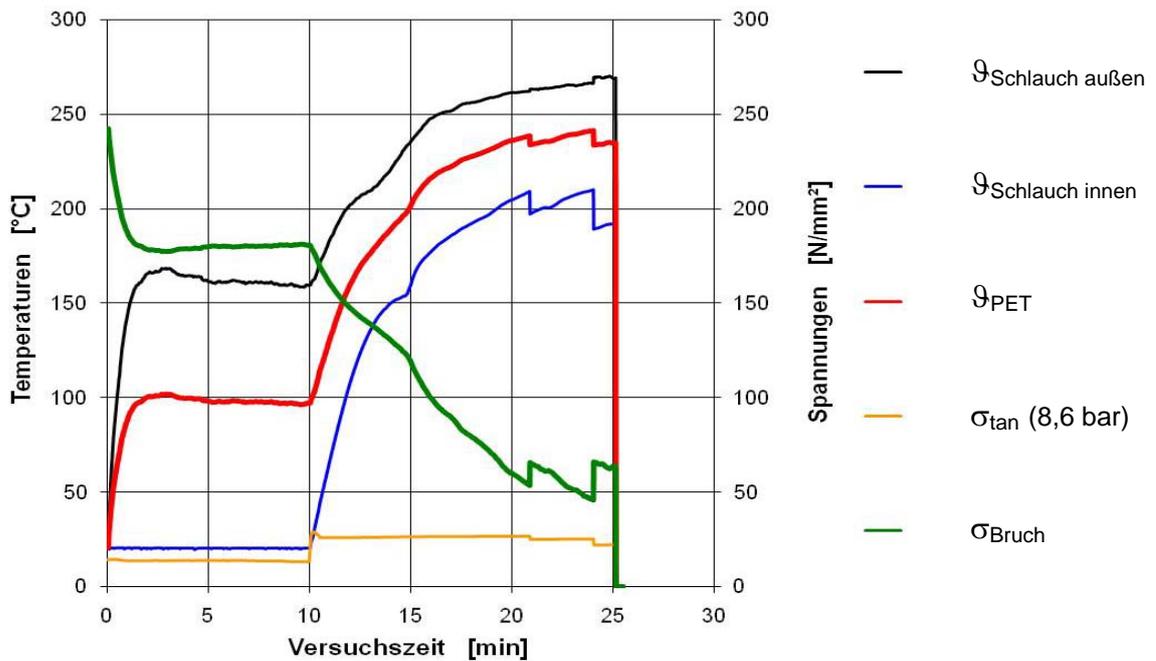


Bild 9: Der aus 3 Versuchen mit DLS (E = 4) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur

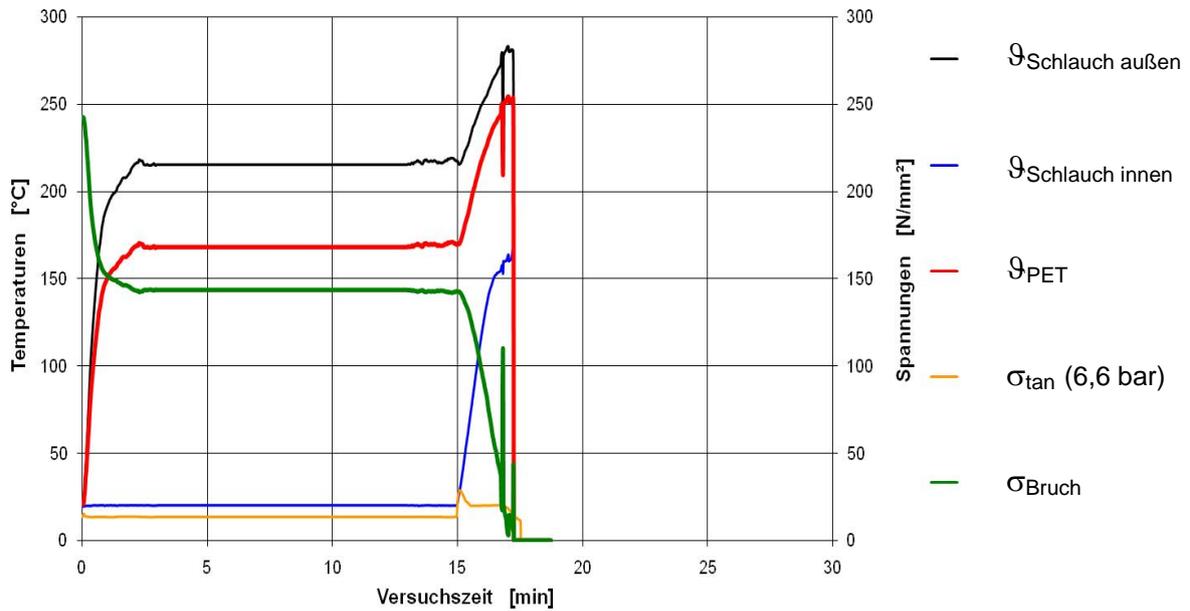


Bild 10: Der aus 5 Versuchen mit DLS ($E = 4$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur

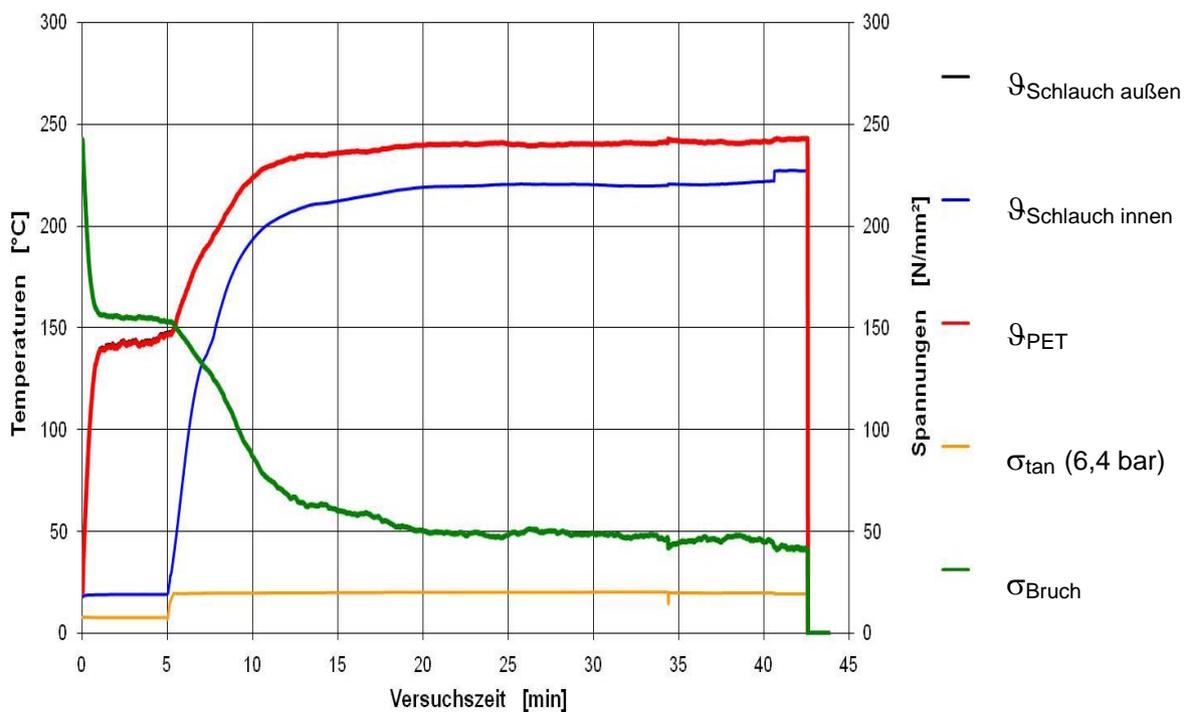


Bild 11: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 270°C Ofentemperatur

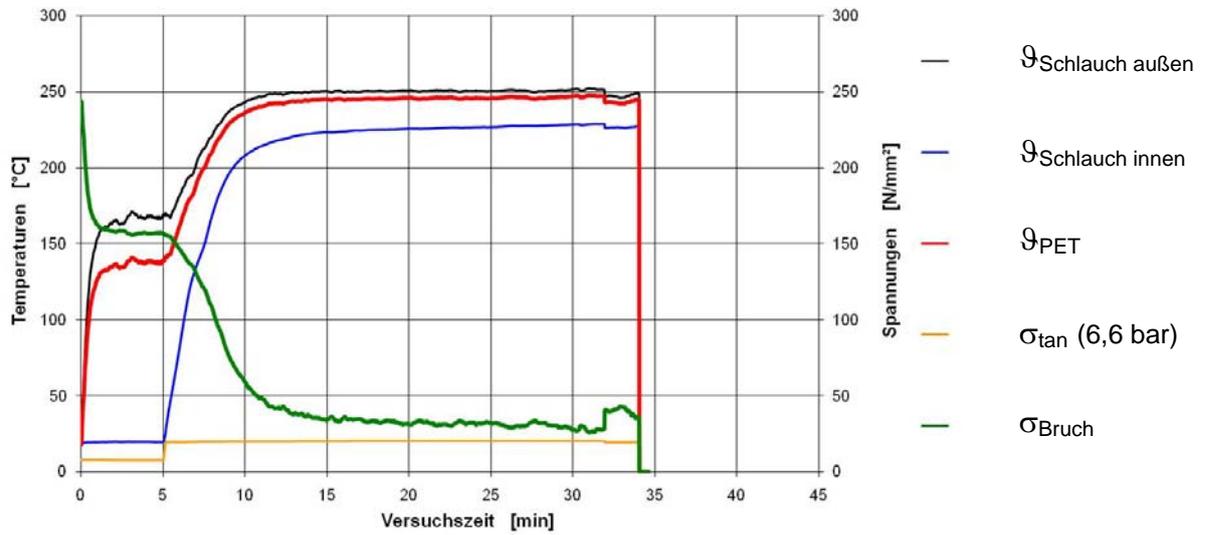


Bild 12: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 280°C Ofentemperatur

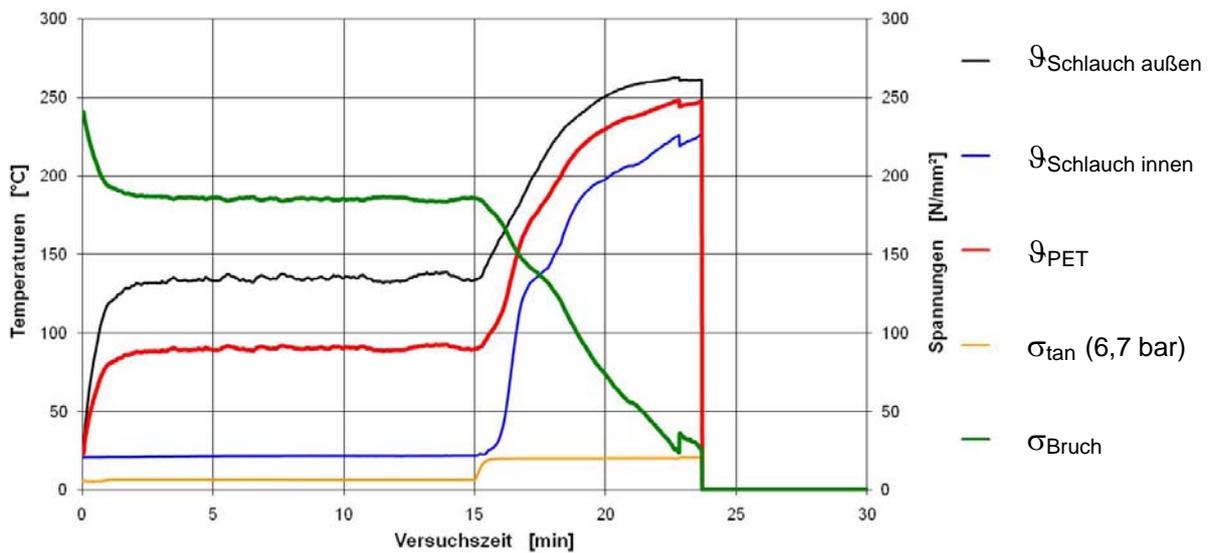


Bild 13: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur

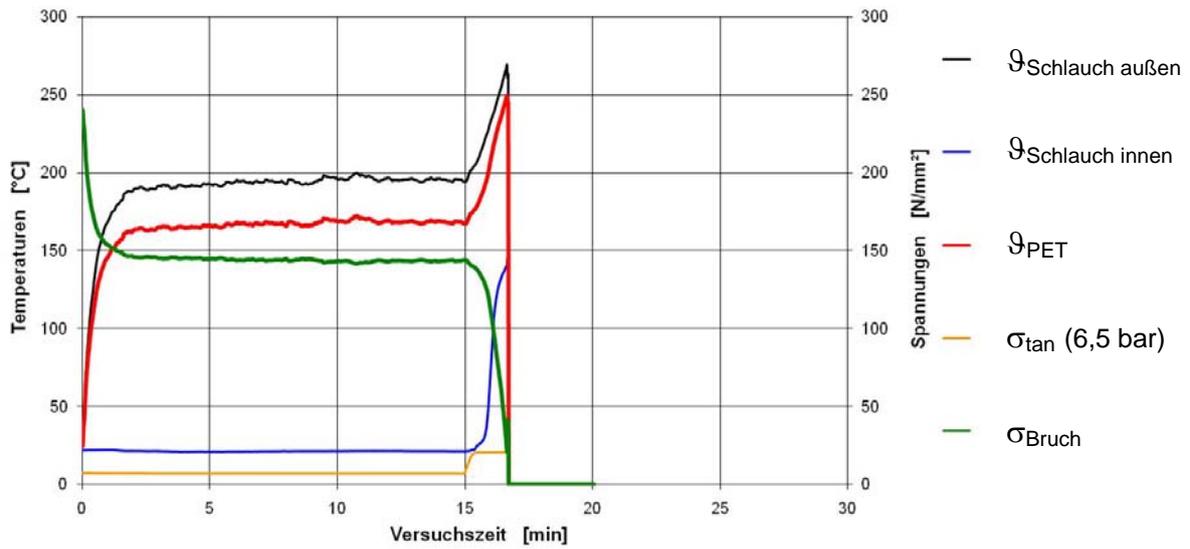


Bild 14: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 8$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur

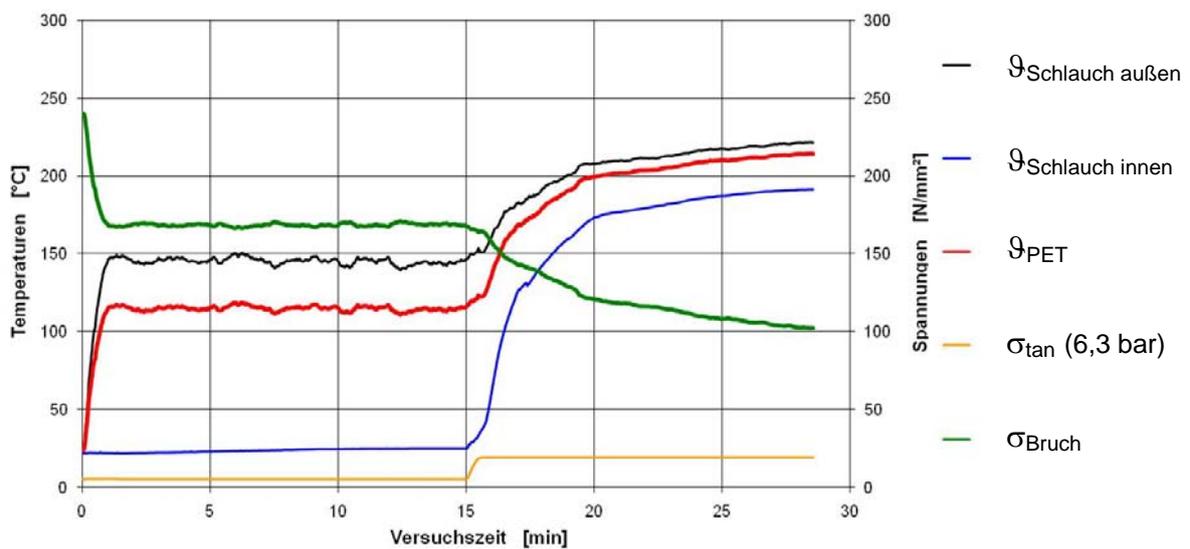


Bild 15: Der Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit DLS ($E = 23$) bei 250°C Ofentemperatur

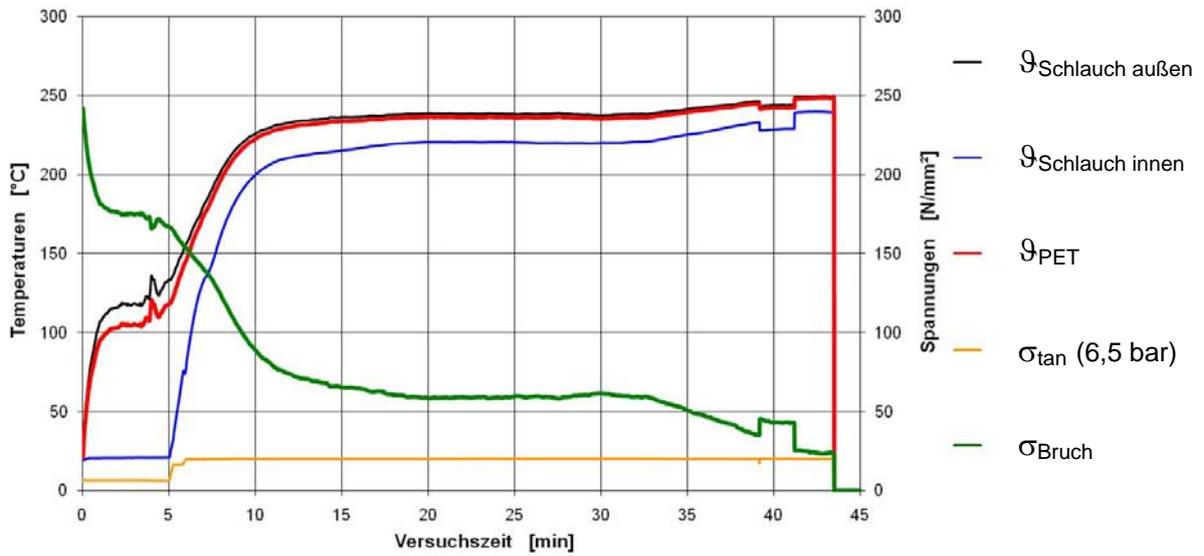


Bild 16: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 270°C Ofentemperatur

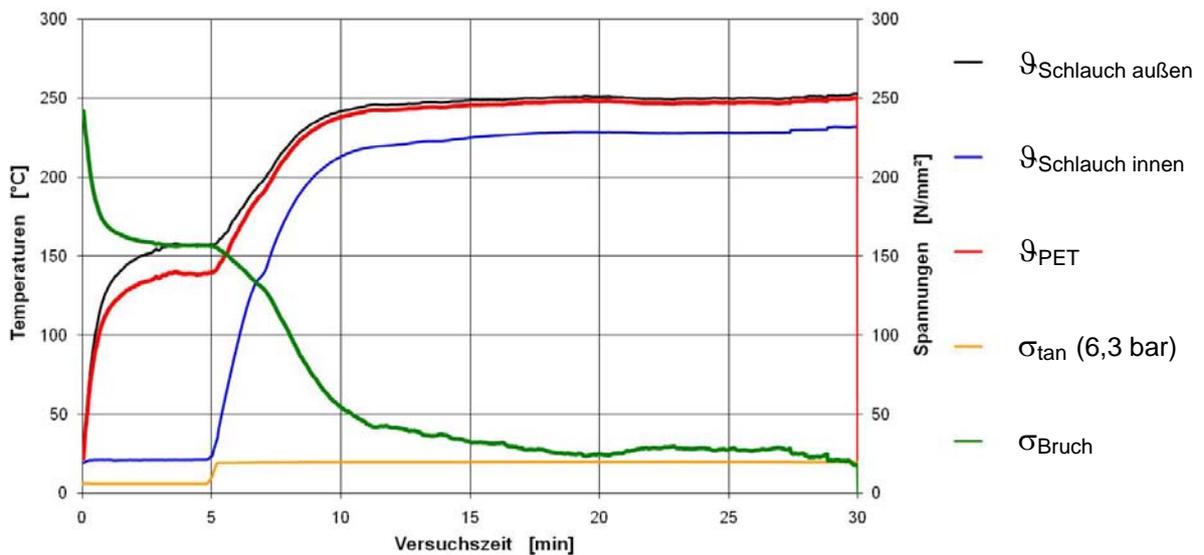


Bild 17: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 280°C Ofentemperatur

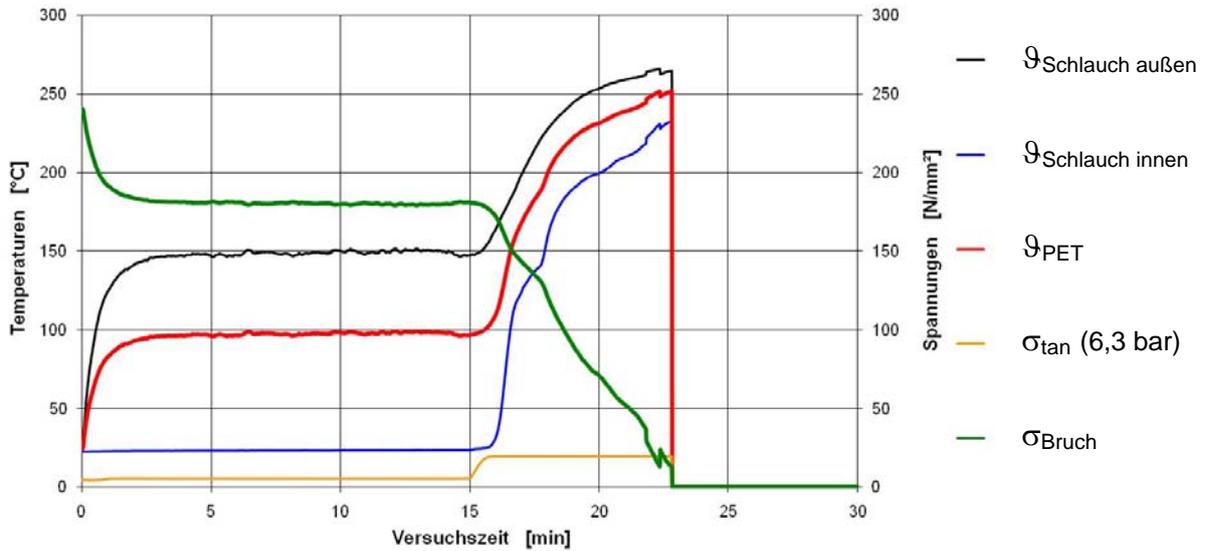


Bild 18: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur

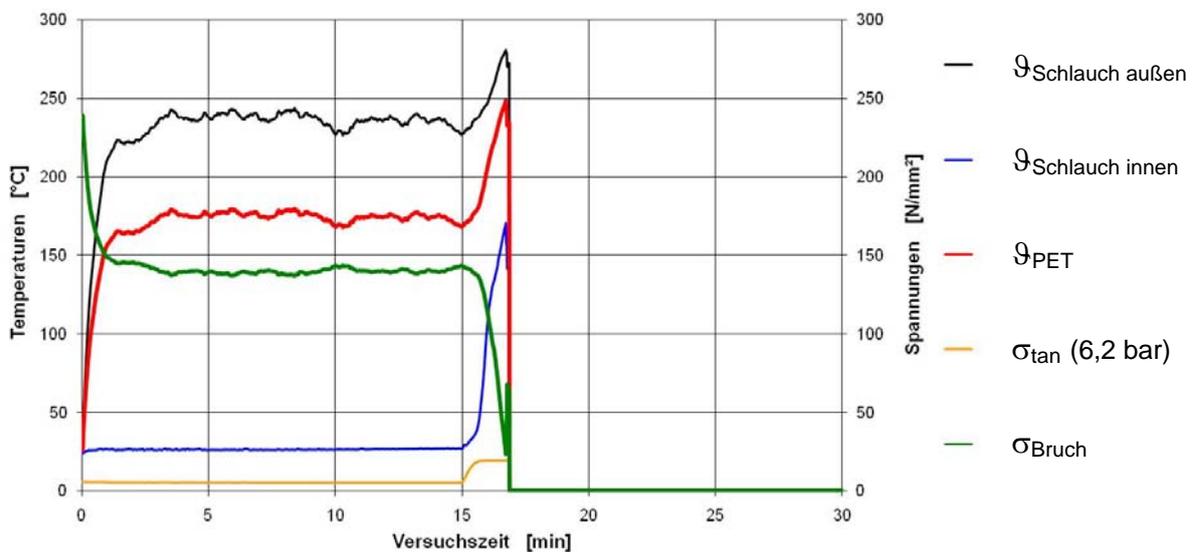


Bild 19: Der aus 3 Versuchen mit DLS ($E = 23$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur

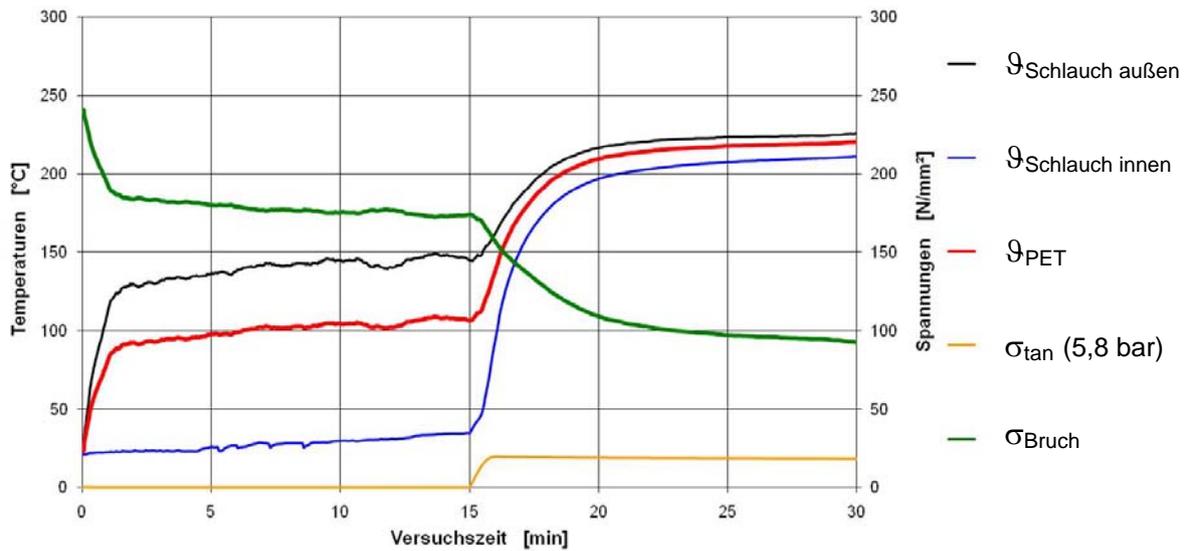


Bild 20: Der Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit Luft ($E = \infty$) bei 250°C Ofentemperatur

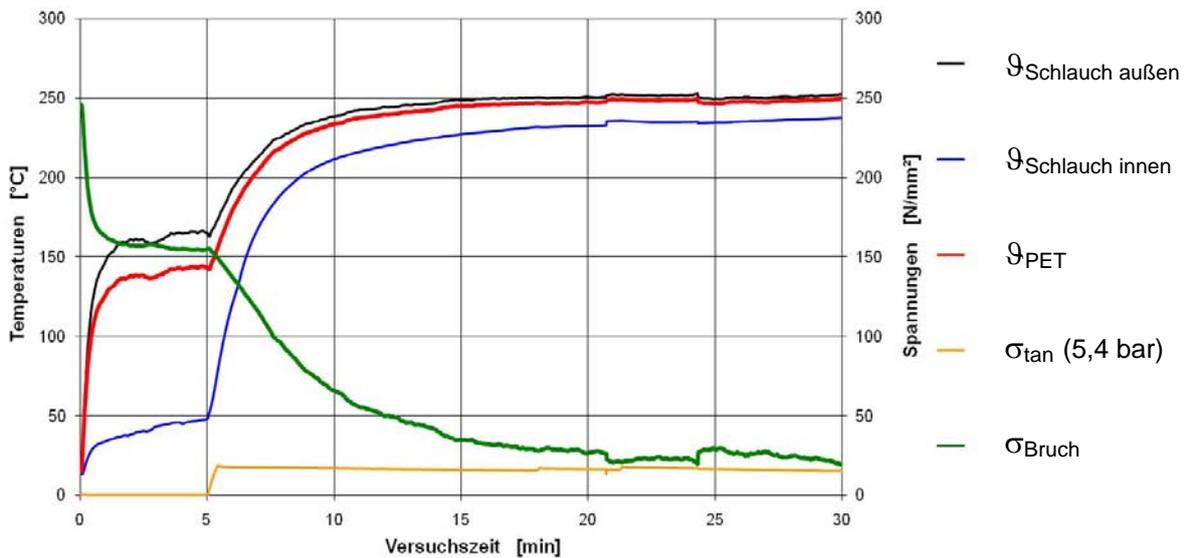


Bild 21: Der aus 3 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 270°C Ofentemperatur

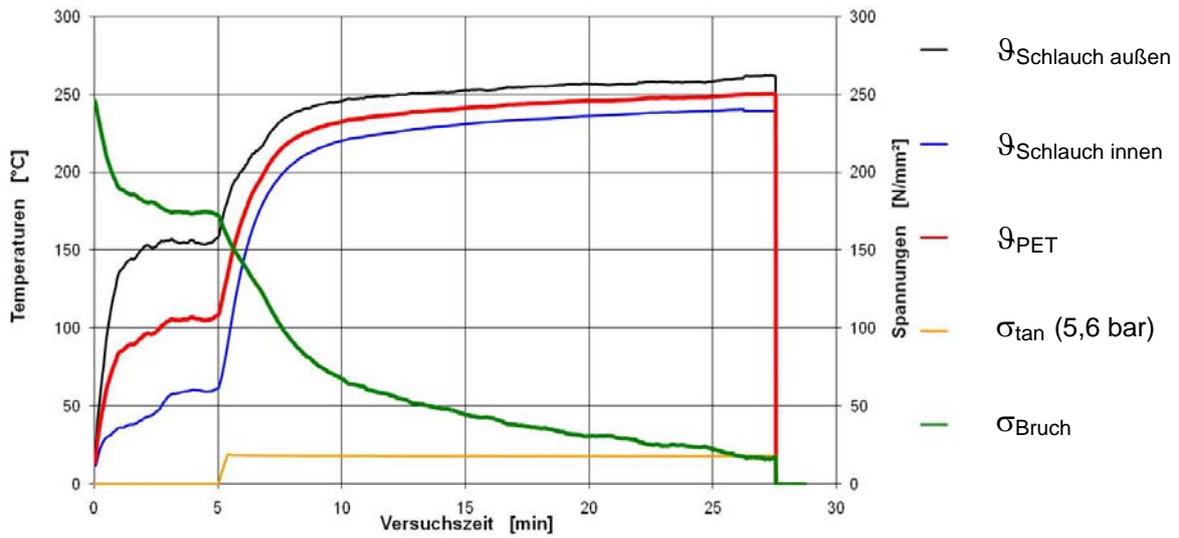


Bild 22: Der aus 2 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 280°C Ofentemperatur

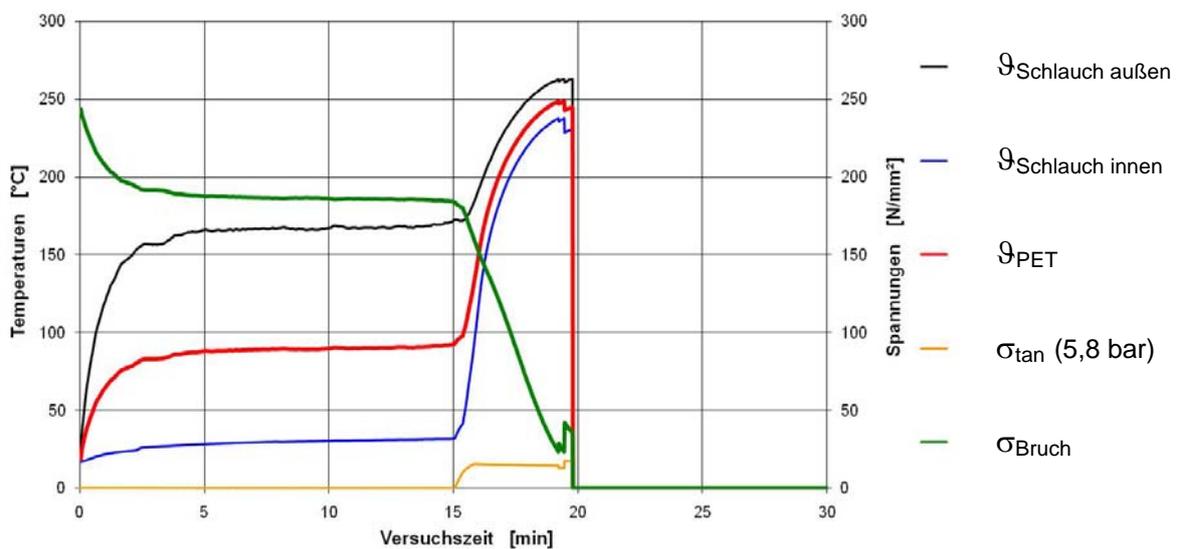


Bild 23: Der aus 3 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 300°C Ofentemperatur

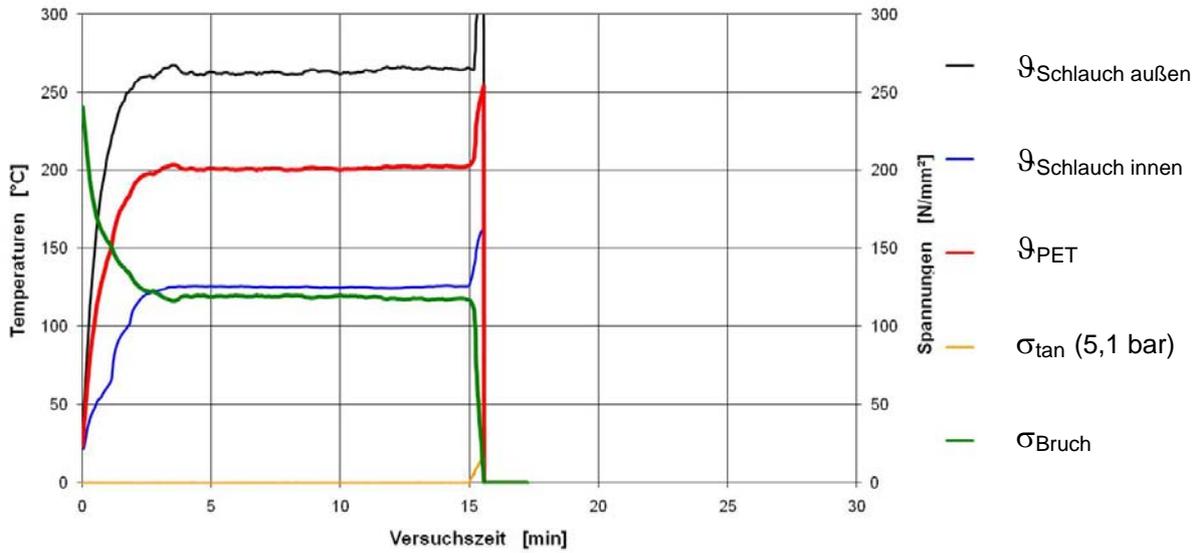


Bild 24: Der aus 3 Versuchen mit Luft ($E = \infty$) gemittelte Verlauf der Temperaturen innen und außen am Schlauch und der Tangential- und der Bruchspannung bei 400°C Ofentemperatur

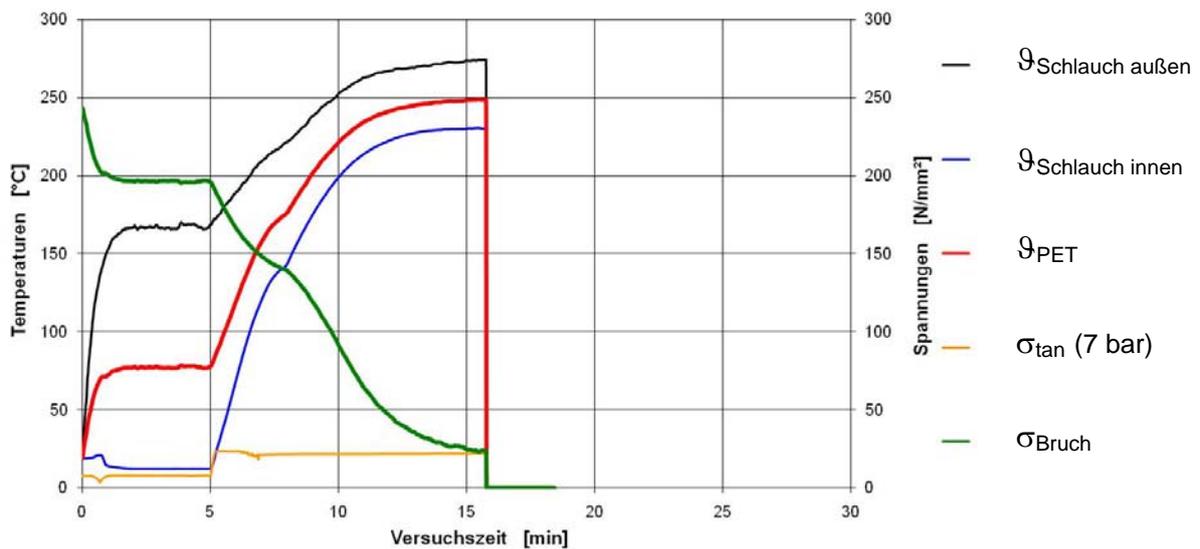


Bild 25: Der Verlauf der Temperaturen innen und außen an einem Schlauch mit Außengummierung und der Tangential- und der Bruchspannung während des Versuches mit DLS ($E = 8$) bei 300°C Ofentemperatur

Tabelle 3: Die Zeitpunkte des Schlauchversagens nach dem Schließen des Strahlrohres

Ofen-Temperatur [°C]	Versuchs-Nr.	Standzeit [min]				
		Wasser 130 L/min	E = 4 1678 L/min	E = 8 1348 L/min	E = 23 1234 L/min	Luft 1200 L/min
80	1	» 15		» 15	» 15	» 15
100	1	» 15		» 15	» 15	» 15
150	1	» 15		» 15	» 15	» 15
200	1	» 15		» 15	» 15	» 15
250	1	» 15		» 15	> 15	> 15
270	1			37,5	38,5	19,3
	2			29,3	34,15	15,7
	3			35,5	36,15	25,15
	Mittelwert			34,1	36,3	20
280	1			29	23,85	21,25
	2			25,5	25	16,3
	3			27	22,5	22,5
	Mittelwert			27,2	23,8	20
300	1	» 15	14	7,6	7,75	4,5
	2		11	7,6	7,3	4,75
	3		15	8,6	6,75	4,75
	4					4,75
	Mittelwert	» 15	13,3	7,9	7,3	4,7
	Klasse 3			10,75		
400	1	» 15	1,75	1,75	1,75	0,5
	2	» 15	2	1,6	1,85	0,15
	3	57	2,25	1,6	1,75	0,25
	4	38	1,75			
	5		2,25			
	Mittelwert	47,5	2	1,65	1,8	0,3
500	1	2	0,7	0,75	1	< 0
	2	2,25	0,75	0,3	1	< 0
	3	3	1,25	0,75	1	< 0
	4		1	0,75		
	5		1			
	Mittelwert	2,4	0,95	0,65	1	< 0

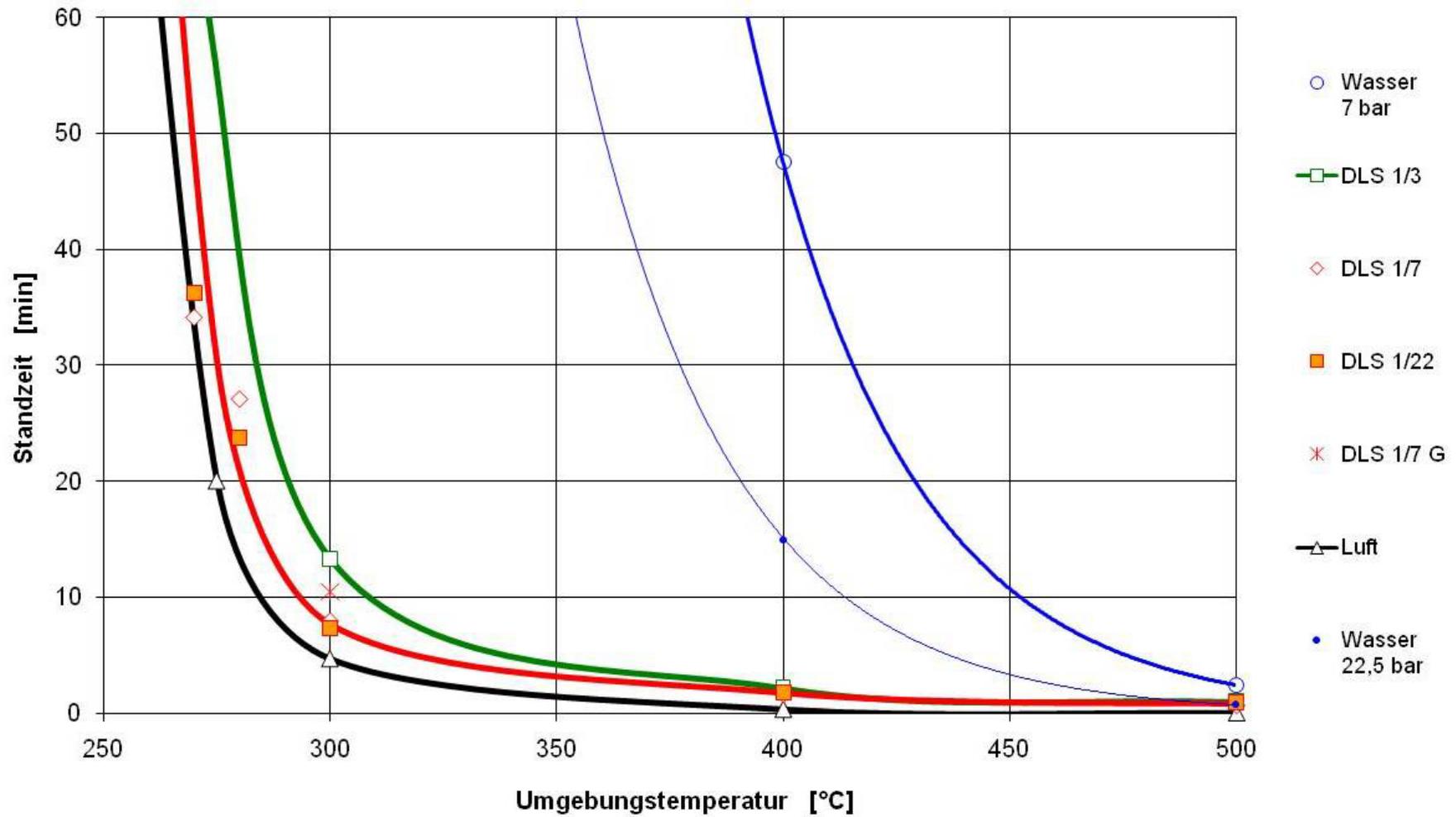


Bild 26: Die Schlauch-Standzeit in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur für verschiedene Löschmittel bei geschlossenem Strahlrohr

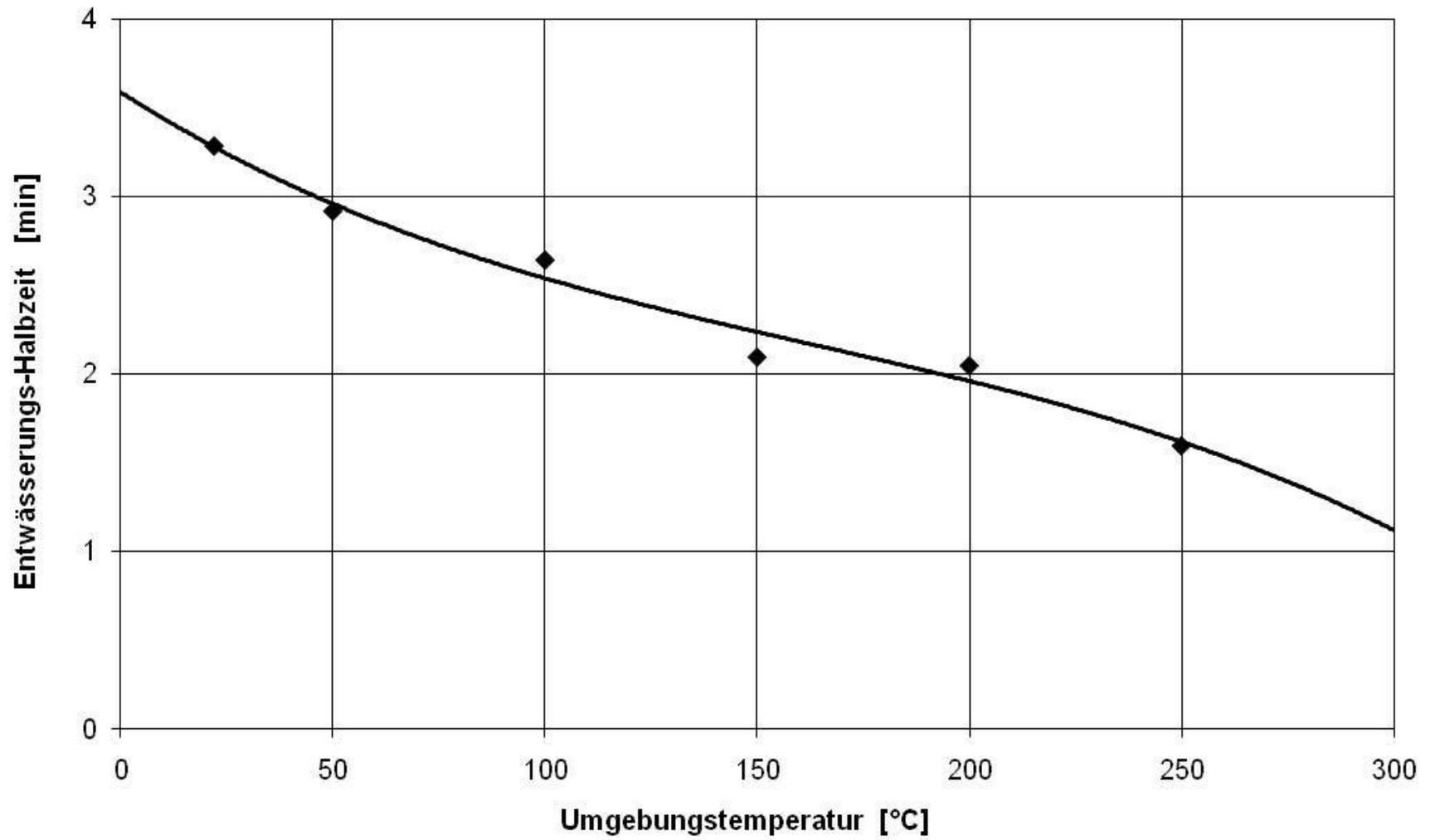


Bild 27: Die Abhängigkeit der Entwässerungs-Halbzeit von DLS (E = 8) von der Umgebungstemperatur



Bild 28: Das Schadensbild eines DLS (E = 4) führenden Schlauches bei 300°C Umgebungstemperatur und einem Schließdruck von 9,7 bar,
Versagenszeitpunkt: 10,5 min nach dem Schließen des Strahlrohres



Bild 29: Das Schadensbild eines Wasser führenden Schlauches bei 500°C Umgebungstemperatur und einem Schließdruck von 7,5 bar,
Versagenszeitpunkt: 2 min nach dem Schließen des Strahlrohres

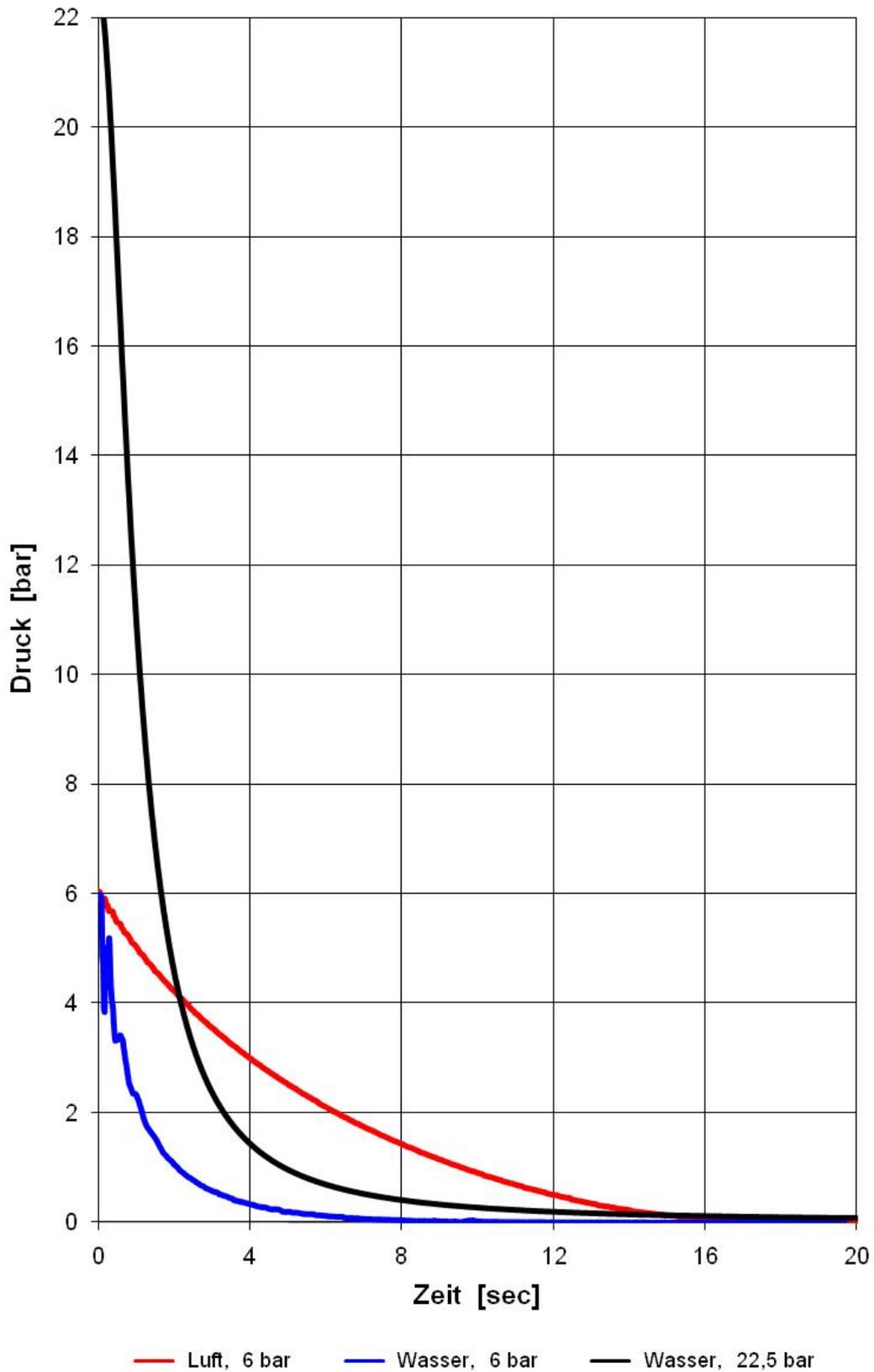


Bild 30: Die Abnahme des Druckes in einem Feuerwehrschauch beim plötzlichen Aufreißen eines kleinen Lecks – simuliert durch eine 9-mm-Blende vor einem Kugelhahn

ANHANG

In diesem Kapitel werden einige Aspekte zusammengestellt, die bei einer ganzheitlichen Betrachtung – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – aus Sicht der Autoren bei der Bewertung des Löschmittels „DLS“ zu bedenken sind.

Die folgenden Abschnitte enthalten

- Abschnitt I und II: Verweise auf die an der FFB und bei jüngsten Feuerwehreinsätzen gesammelten Erfahrungen mit DLS;
 - Abschnitt III: Hinweis des baden-württembergischen Innenministeriums für den Einsatz von DLS bei der Brandbekämpfung;
 - Abschnitt IV: Schlußfolgerungen aus den in diesem Hinweis angekündigten und an der Forschungsstelle durchgeführten Versuchen;
 - Abschnitt V: Einsatz von höherwertigen Schläuchen (in Verbindung mit DLS) und
 - Abschnitt VI: Einordnung der Belastbarkeit von Feuerwehrschräuchen in die Gesamtbeurteilung der Gefährdung während des Löscheinsatzes und ein Vorschlag, wie zukünftig Feuerwehrschräuche sinnvoller geprüft werden könnten.
- I.** Im Forschungsbericht über Druckluftschäum-Systeme im Löscheinsatz stellt die FFB fest [5]:
1. Der hohe Löschmittel-Volumenstrom bewirkt eine – insbesondere im Außeneinsatz oder in großen Hallen relevante – deutliche Steigerung der Wurfweite, nicht nur gegenüber konventionellem Schäum – sondern auch gegenüber Wasser –, was einen erheblichen Sicherheitsgewinn für die Feuerwehr darstellt, und ermöglicht es, aufsteigende Rauchgasströme besser zu durchdringen (sh.a. Pkt. 9).

2. Die sichtbare Anwendung des Löschmittels trägt dazu bei, den Löscherfolg spürbar zu steigern, weil sie die Ausbildung des Strahlrohrführers zu verbessern vermag, was – wie bei jedem anderen Löschverfahren auch – die wichtigste Voraussetzung für erfolgreiches Löschen darstellt⁴.
3. Das geringere Gewicht der schaumführenden Schläuche erleichtert ihre Handhabung (sh. Tabelle 4 auf S. 23).
4. Grundsätzlich wird es mit Schaum möglich, Brände zu beherrschen, die wegen ihres hohen Kunststoffanteils im Brandgut mit Wasser nur schwer oder gar nicht gelöscht werden können [25].
5. Die Zumischung von Schaummittel und Luft erfolgt im LF, die Schaumqualität kann also durch kontaminierte Luft nicht beeinträchtigt werden und es brauchen keine Kanister zum Zumischen geschleppt zu werden.
6. Wegen des im Vergleich zur konventionellen Schaumerzeugung mit VENTURI-Zumischer und Schaumrohr vernachlässigbaren Druckverlustes bei der DLS-Erzeugung und wegen des geringen Gewichtes des DLS beträgt die Förderhöhe ein Vielfaches von konventionellem Schaum, das Doppelte von Wasser. Der statische Gegendruck ist für die Schaumerzeugung unerheblich.
7. Die geringe Schaummittel-Konzentration und das – im Unterschied zu konventionell erzeugtem Schaum – mit DLS mögliche Intervall-Löschverfahren erlauben es, den Vorteil der Sichtbarkeit dieses Löschmittels zu nutzen, das heißt, Löschmittel zu sparen, Wasser- und Umweltschäden zu vermeiden.

⁴) die immer wieder – ohne irgendeinen Beleg – aufgestellte Behauptung, die Ausbildung mit DLS sei schwieriger [24], ist nicht nachvollziehbar

II. Erfahrungen mit DLS bei Feuerwehreinsätzen

1. Im Inneneinsatz können mit dem DLS-Löschverfahren Wasserschäden deutlich verringert bis vermieden werden⁵. Unverdampftes, durchtropfendes Löschwasser fällt praktisch nicht an – weder bei den an der FFB unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführten Brand- und Löschversuchen [5] noch in der Praxis:
 - Archivierte Hotel-Akten können nach dem Einsatz von DLS weiter verwendet werden [26];
 - kaum Löschwasserschäden in der Etage unter dem Brand ... Betrieb fast ohne Sanierungsmaßnahmen wieder aufgenommen [27];
 - geringer Wasserschaden ... Konzertsaal⁶ nicht betroffen [28] –
 - im Gegensatz zum Totalschaden am Mummelsee-Hotel, das mit Hilfe erheblicher Wassermengen gelöscht wurde, obwohl nur der – zugegeben schwer zugängliche – Dachstuhl gebrannt hatte [30...32].
2. Auch im Außeneinsatz ermöglichen die Handhabungsvorteile (große Wurfweite und Durchschlagskraft, hohe Mobilität wegen des geringen Gewichts) in Verbindung mit dem günstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnis einen raschen Löscherfolg und eine dementsprechende Verringerung der Schadstoff-Emission durch den Brand.

⁵) Das Bestreben, Wasserschäden zu vermeiden, darf nicht dazu verleiten, die minimale Applikationsrate von wärmeabführendem Wasser zu unterschreiten. Wasserschäden können von einem versierten Feuerwehrmann mit jedem Löschmittel minimiert werden. Einem weniger versierten Strahlrohrführer wird es jedoch durch DLS erleichtert, dieses Ziel zu erreichen (vergl. Fußnote 2)

⁶) auch beim DLS-Löscheinsatz auf dem Dach der Berliner Philharmonie kam es zu einem Schlauchplatzer – bezeichnenderweise ebenfalls während einer Löschpause [29]

III. Feuerwehrmänner sollen stets ihren Rückzugsweg sichern [33] und sich vergewissern, daß während des Vorrückens „der Rücken kalt bleibt“, indem sie nicht an Türen vorbeigehen, hinter denen es noch brennen könnte [1⁷, 34], und Feuerwehrschräuche sollen nicht über noch warmen Brandschutt gezogen werden [6⁸].

Da unter den besonderen Bedingungen eines Einsatzes nicht mit absoluter Sicherheit auszuschließen ist, daß diese Regeln außer Acht gelassen werden, wurde die Frage nach der Haltbarkeit von Feuerwehrschräuchen unter einer über die Herstellergarantie hinausgehenden Wärmebelastung aufgeworfen und das Innenministerium Baden-Württemberg hat als Anlage 2 des Kommissionsberichtes [1] „Hinweise für den Einsatz von Druckluftschäum bei der Brandbekämpfung“ herausgegeben, die den folgenden Verhaltenshinweis enthalten:

„Den Feuerwehren mit Druckluftschäumen wird empfohlen, beim Löscheinsatz auf die Förderung von Druckluftschäum in Druckschräuchen dann zu verzichten bzw. dem Wasser/Schäumittelgemisch keine Druckluft zuzuführen, wenn die Möglichkeit einer Wärmebeaufschlagung der Druckschräuche beispielsweise durch glühende, brennende oder anderweitig erwärmte Teile besteht. Im Innenangriff sollte immer die Stellung „Nass“ nach DIN V 14430 gewählt werden. Grundsätzlich sollte immer die Möglichkeit der Wärmebeaufschlagung im Brandeinsatz unabhängig vom Löschmittel beachtet werden.“

IV. Anlage 2 endet wie folgt: „Diese Warnhinweise werden vorsorglich und trotz des noch fehlenden wissenschaftlichen Nachweises im Interesse der

⁷) Seite 45

⁸) interessant ist der Formulierungsunterschied zwischen der alten und der neuen Fassung von DIN 14811: Aus „dürfen nicht mit Brandglut in Berührung kommen“ wurde „sollten nicht mit Brandglut in Berührung kommen“

Sicherheit der Feuerwehrangehörigen gegeben. Insbesondere muß vor einer abschließenden Bewertung des Druckluftschäumverfahrens genauestens die Frage des unterschiedlichen Wärmeverhaltens geprüft werden. ...“

Der wissenschaftliche Nachweis der Belastbarkeitsgrenzen von Feuerwehr-Druckschläuchen, auch mit DLS als Löschmittel, wurde mit dem vorliegenden Forschungsbericht erbracht: Bei Schlauch-Umgebungstemperaturen von bis zu 270...280°C halten die geprüften Schläuche bei geschlossenem Strahlrohr dem DLS-typischem Schließdruck 35...25 Minuten stand. In wärmerer Umgebung fallen die Standzeiten rasch auf 13 (bei 300°C) beziehungsweise 2 Minuten (bei 400°C).

- V. Ob ein relevanter Sicherheitsgewinn beim Inneneinsatz von DLS mit hochwertigeren – das heißt auch außen beschichteten – Schläuchen (Klasse 2 oder 3 nach DIN 14811, die beim Übergang vom Außen- in den Innenbereich angekuppelt werden könnten) erzielt werden kann, ist versuchstechnisch noch nicht nachgewiesen. Ein erster Versuch deutet in diese Richtung: Die Außenbeschichtung verkohlt und dient dem tragenden Polyestergewebe als Wärmeisolierung. Eine Bestätigung oder Relativierung dieser Annahme muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben, bei denen neben der im bislang verwendeten Versuchsstand ausschließlich geprüften Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung auch die durch Leitung berücksichtigt werden könnte – sei es durch ein Bett heißen Brandschuttes, eine elektrische Herdplatte oder durch den Glühstab aus der prEN 1924.
- VI. Wegen der in Kapitel 3 aufgezählten Temperaturgrenzen steht zur Diskussion, ob von einem Feuerwehr-Druckschlauch (mit Inhalt) eine deutlich höhere thermische Belastbarkeit zu fordern ist als von der sonstigen Einsatz-ausrüstung. In gegenwärtigen Überlegungen wird versucht, den Stellenwert

des Risikos eines Schlauchversagens im „Gesamtsystem Feuerwehreinsatz“ zu bewerten [17].

Für zukünftige, realitätsbezogene Prüfungen von Feuerwehrschräuchen – unabhängig von ihrem Inhalt! – schlägt die FFB vor, statt des bislang angewandten in DIN 14811 oder statt jenes in prEN 1924 beschriebenen Verfahrens einen Prüfstand zu normieren, der dem entspricht, in dem die hier vorgestellten Untersuchungen durchgeführt wurden: Eine Wärmekammer, in der der Prüfling nicht punktuell, sondern großflächig erhitzt wird, d.h., einer Temperatur ausgesetzt wird, die an der Obergrenze dessen liegt, was einem Feuerwehrmann und seiner sonstigen Ausrüstung zuzumuten ist (280°C?), und der er mindestens so lange standhalten muß, wie ein Feuerwehrmann mit 1 Füllung seines Preßluftatmers arbeiten kann. Wie dies mit konkreten Zeitdauern unterlegt werden kann, muß Gegenstand weiterer Betrachtungen sein.

Die seit 1967 veröffentlichten Forschungsberichte können bei der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gegen Rechnung bezogen werden.

Anschrift: **Forschungsstelle für Brandschutztechnik**

an der Universität Karlsruhe (TH)

– Abteilung Dokumentation –

Hertzstraße 16

D-76187 Karlsruhe

Dienststunden: 8···16 Uhr

Telephon: 0721/608-4453 und -4473

Telefax: 0721/755467

e-mail: helga.zimmer@ffb.uka.de

Die Zusammenstellung dieser Forschungsberichte – einschließlich der zwischenzeitlich online verfügbaren – kann auf den Webseiten der Forschungsstelle für Brandschutztechnik

<http://www.ffb.uni-karlsruhe.de>

und des Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

<http://www.idf.uni-magdeburg.de>

eingesehen werden.