



Schlussbericht zum Teilvorhaben

**Erprobung des Druckluftschaumverfahrens und
Erstellung von Handlungskonzepten
(Förderkennzeichen: 13N13631)**

AERIUS: Projektlaufzeit: 01.08.2015 – 31.12.2018



Alternatives Löschmittel Druckluftschaum
– komplexe Großschadenslagen vermeiden

Autoren: Lutz Orlik, Frieder Kircher, Sabina Kaczmarek,
Wolf-Joachim Kühl, Torsten Vollbrecht, Wilfried Gräfling
Adresse Berliner Feuerwehr Voltairestr. 2, 10179 Berlin
E-Mail: forschung@berliner-feuerwehr.de
Stand: Juli 2019

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	
I	Kurzdarstellung..... 1
1	Aufgabenstellung..... 1
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... 1
3	Planung und Verlauf des Vorhabens..... 2
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde..... 3
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... 4
II	Eingehende Darstellung..... 4
1	Erzielte Ergebnisse im Einzelnen..... 4
1.1	AP 01 „Ausgangsszenario“..... 5
1.1.1	Auswertung der Fragebögen zu CAF-Einsätzen im Bundesgebiet und in Berlin..... 5
1.1.2	Stichprobenartige Expertenbefragung..... 6
1.2	AP 02 „Brand- und Löschversuche an Bemessungsbränden“..... 6
1.3	AP 03 „Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen“..... 6
1.3.1	Brand- und Löschversuche mit mehreren aufgestapelten Lithium-Ionen-Batterien..... 6
1.3.2	Brand- und Löschversuche an Lithium-Ionen-Batterien und Elektro-Personenkraftwagen (e-Pkw)..... 7
1.3.3	Brand- und Löschversuche an Autoreifenstapeln..... 9
1.3.4	Dokumentation von Löschversuchen mit einer Highspeed-Kamera (z.T. AP 02)..... 11
1.3.5	Raumbrandversuche zur Untersuchung der Löscheffekte des Druckluftschäumverfahrens und zur Verdrängung des Sauerstoffs..... 15
1.4	AP 05 „Brände an Hochspannungsanlagen und Transformatoren“..... 20
1.4.1	Ermittlung von Sicherheitsabständen beim Einsatz von Druckluftschäum im Voll- und Sprühstrahlverfahren an Hochspannungsanlagen..... 20
1.4.2	Brandbekämpfung an Transformatoren unter Anwendung verschiedener Löschmittel und Einsatztaktiken..... 23
1.5	AP 06 „Bemessungs- bzw. Beschaffungskriterien für öffentliche Feuerwehren“..... 24
1.6	AP 07 „Ausbildung und Handlungsempfehlungen“..... 25
1.6.1	Ausbildungskonzept, Lehrmaterial und Handlungsempfehlungen..... 25

1.6.2	Konzeption einer Druckluftschaum-Brandübungsanlage	25
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	30
4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse	31
5	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	31
6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	31
	Abbildungsverzeichnis	34

Abkürzungsverzeichnis

AERIUS	Alternatives Löschmittel Druckluftschäum-Komplexe Großschadenslagen vermeiden
AG	Aktiengesellschaft
AP	Arbeitspaket
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachbereich 7.5 Thermische Beständigkeit von Polymeren
BF	Berufsfeuerwehr
BFw	Berliner Feuerwehr
BFRA	Berliner Feuerwehr- und Rettungsdienst-Akademie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAF	Compressed Air Foam (dt. Druckluftschäum)
CAFS	Compressed Air Foam System (dt. Druckluftschäumanlage siehe unten)
CEN/TC 192/WG 2	DIN Standards Committee Firefighting and Fire Protection, Firefighting pumps - mirror committee
DFV	Deutscher Feuerwehrverband
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung eingetragener Verein
DIN 14430:2008-12	Feuerwehrwesen - Druckzumischanlagen und Druckluftschäumanlagen (zurückgezogen)
DIN 14811:2008-01	Feuerlöschschläuche - Druckschläuche und Einbände für Pumpen und Feuerwehrfahrzeuge; Änderung A3
DIN EN 16327:2014-07	Feuerwehrwesen - Druckzumischanlagen (DZA) und Druckluftschäumanlagen (DLS); Deutsche Fassung EN 16327:2014
DIN VDE 0132:2015-10	DIN-Norm „Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung im Bereich“ revidiert durch DIN VDE 0132 VDE 0132:2018-07
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im VDE
DLS	Druckluftschäum/ -anlage
DZA	Druckzumischanlage
e-PKW	Elektro-Personenkraftwagen
FBB	Forschungsstelle für Brandschutztechnik
FF	Freiwillige Feuerwehr
FNFV	Normenausschuss Feuerwehrwesen
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer

HV	Hochvolt
IdF NRW	Institut der Feuerwehr Nordrhein-Westfalen
IPH	Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik“ GmbH Berlin
ISO	International Organization for Standardization
l	(klein „L“ für Liter)
KFZ	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
kV	Kilovolt
LF KatS	Löschfahrzeug für den Katastrophenschutz
LHF	Löschhilfeleistungsfahrzeug
mA	Milliampere
mbH	mit beschränkter Haftung
MW	Megawatt
OvGU	Otto- von-Guericke- Universität Magdeburg, Institut für Apparate- und Umwelttechnik
PKW	Personenkraftwagen
RGB	additive Farbraum (Rot, Grün, Blau)
SOP	Standard Operating Procedure (dt. Standardvorgehensweisen)
TLF	Tanklöschfahrzeug
TWB	Technisch Wissenschaftlicher Beirat des vfdb
UAP	Unterarbeitspaket
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik eingetragener Verein
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vfdb	Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes eingetragener Verein
VZ	Verschäumungszahl
WSG	Wasser-/Schaummittelgemisch
3D	Dreidimensional

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

An Beispielen von Großbränden in den vergangenen Jahren wird deutlich, dass es immer wieder zu erheblichen Schadensausmaßen kommt, die mit Auswirkungen auf die Umwelt, die Wirtschaft und Ökonomie, sowie mit Gefahren für die Bevölkerung und für die Einsatzkräfte verbunden sind. In der Regel erfolgt die Brandbekämpfung mit Wasser und klassischem Luftschaum, dessen Anwendungsschwerpunkt in der Flüssigkeitsbrandbekämpfung liegt. Druckluftschaum (engl. Compressed Air Foam, CAF) wird seit 1997 in Europa mit unterschiedlicher Intensität eingesetzt und stellt eine Alternative zum bisherigen, deutlich weiter verbreiteten Wasserlöschverfahren (mit oder ohne Zusätze) dar. Der Einsatz von Druckluftschaum (DLS) wurde bisher weder systematisiert dokumentiert noch ausgewertet. Ebenso gibt es keine standardisierten Einsatztaktiken oder Ausbildungsunterlagen.

Deshalb stellte sich die Berliner Feuerwehr (BFW) in dem Teilprojekt der Aufgabe,

- neue Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten von Druckluftschaum in ungewöhnlichen Brandszenarien zu gewinnen und
- mit Hilfe von Realbrandversuchen die Wirkweise des Druckluftschaums zu ergründen. Im Mittelpunkt standen Brandszenarien, von denen erhöhte und schwer einschätzbare Gefährdungspotenziale für die Einsatzkräfte und die Bevölkerung ausgehen.
- aus dem gewonnenen Wissen Handlungsempfehlungen und Ausbildungsunterlagen zu generieren und so einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit von Einsatzkräften und der Bevölkerung zu leisten.
- erhobene Datensätze zum Einsatz von DLS in Deutschland zu analysieren, um einen Überblick der technischen und einsatztaktischen Standards zu erhalten.

Das primäre Ziel war die Beherrschung von komplexen Bränden (auch bei Großschadenslagen) mittels einer effizienten, umweltschonenden und vor allem sicheren Brandbekämpfung. In einer vergleichenden Betrachtung zwischen herkömmlichen Löschverfahren und dem Druckluftschaumverfahren wurden im Projekt chemisch-physikalische, ökonomische, ökologische, einsatztaktische und arbeitsschutzrechtliche Aspekte berücksichtigt.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zur Erreichung der Forschungsziele wurde ein interdisziplinäres Konsortium gebildet, an dem neben der Berliner Feuerwehr (BFW) folgende Verbundpartner beteiligt waren:

- Otto-von-Guericke-Universität (OvGU), Institut für Apparate- und Umwelttechnik (Verbundkoordinator)
- Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Fachbereich 7.5 Thermische Beständigkeit von Polymeren
- Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb)

Mehrere assoziierte Partner unterstützen die Versuchsdurchführungen durch die Bereitstellung von Technik, Verbrauchsgütern und Versuchsräumen.

Die Bfw nahm im Projekt die Rolle des Praxispartners ein und brachte insbesondere im Arbeitspaket 03 umfangreiches Wissen und große Erfahrung hinsichtlich der realitätsnahen Brandbekämpfung ein. Die Bfw hatte für die Arbeit im Forschungsprojekt zusätzliche Beschäftigte befristet eingestellt, um die sehr ambitionierten Ziele zu erreichen. Die Leitung des Teilprojektes lag bei einer Führungskraft des höheren feuerwehrtechnischen Dienstes der Bfw, die nicht über Projektmittel abgerechnet wurde. Damit wurde die Verbindung zur Einsatzpraxis der Feuerwehr gewährleistet. Als Garant für den bundesweiten Austausch, den Bezug zur Einsatzpraxis und der Inklusion feuerwehrtechnischer Expertise wurden im Projektverlauf mehrere Unteraufträge geschlossen. Die akquirierte Expertise floss bei den Brand- und Löschversuchen und in die Berichte zu den Versuchen ein.

3 Planung und Verlauf des Vorhabens

Das Projekt war in sieben verschiedene Arbeitspakete (AP) gegliedert deren Bearbeitung, soweit möglich und erforderlich, parallel erfolgte. Die Bfw war unterschiedlich intensiv in die Arbeitspakete eingebunden. Im Arbeitspaket 03 „Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen“ sowie im Arbeitspaket 05 „Brände an Hochspannungsanlagen und Öl-Transformatoren“ und im Arbeitspaket 06 „Bemessungs- bzw. Beschaffungskriterien für öffentliche Feuerwehren“ oblag der Bfw die Federführung. An dem AP 01 „Ausgangsszenario“ wirkte sie unter anderem durch die Erhebung und Dokumentation zum bundesweiten Einsatz von DLS mit. Im AP 02 unterstützte die Bfw bedarfsorientiert die Partner mit Personal, Geräten, Verbrauchsmitteln und fachlicher Expertise bei den Brand- und Löschversuchen an Bemessungsbränden. Am Arbeitspaket 04 „Umweltbilanz“ war die Bfw nicht unmittelbar beteiligt, sondern brachte lediglich den entsprechenden Löschschaum auf. Daher wird das Arbeitspaket in diesem Bericht nicht näher berücksichtigt. Im Arbeitspaket 07 „Ausbildung und Handlungsanweisungen“ erarbeitete die Bfw in enger Abstimmung mit dem Projektpartner vfdb die Handlungsanweisungen und unterstützte maßgeblich bei der Erstellung der Ausbildungsunterlagen. Die Aktivitäten in und die Ergebnisse aus dem Projekt wurden bei Veranstaltungen in Deutschland und Europa der Fachöffentlichkeit präsentiert. In den regelmäßigen Verbundtreffen wurden die aktuellen Arbeitsergebnisse vorgestellt und die weitere Vorgehensweise abgestimmt.

Zur Unterstützung des Projektes wurde ein Expertenbeirat mit Vertretern unterschiedlicher, fachlicher Schwerpunkte berufen und ein gegenseitiger Informationsaustausch bestritten. Die Vertreter des Beirates kamen u.a. aus dem Werkfeuerwehrverband, dem Bundeswehrfeuerwehrverband, dem Bundesumweltamt und einer Universität. Die Experten nahmen an Brandversuchen teil und begleiteten das Projekt in ihrer fachlichen Zuständigkeit.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die BFW begann im Jahr 1998 mit der praktischen Erprobung des Einsatzes von Druckluftschaum (DLS). Seit 2006 werden alle neu zu beschaffenden Löschhilfeleistungsfahrzeuge (LHF), Tanklöschfahrzeuge (TLF) und Löschfahrzeug für den Katastrophenschutz (LF KatS) mit Druckluftschäumen (CAFS) ausgestattet. Mit Ausnahme der Erstbeschaffungen, handelt es sich ausschließlich um leistungsfähige Anlagen. Gegenwärtig (Stand: April 2019) sind bei der Berliner Feuerwehr 47 LHF, neun TLF und fünf LF KatS (Landesbeschaffung) im Einsatz. Von diesen, insgesamt 61 Einsatzfahrzeugen mit Druckluftschäumen, sind 14 Fahrzeuge bei den Freiwilligen Feuerwehren (FF) im Einsatz.

Bei der BFW bestehen Vorkompetenzen durch die Mitarbeit in folgenden Gremien:

- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) – Normenausschuss Feuerwehrwesen (FNFW): DIN 14430:2008-12 Feuerwehrwesen - Druckzumischanlagen und Druckluftschäumen
- DIN – FNFW: DIN 14811/A3:2008-01 Feuerlöschschläuche - Druckschläuche und Einbände für Pumpen und Feuerwehrfahrzeuge; Änderung A3, CEN/TC 192/WG 2 Druckzumischanlagen und Druckluftschäumen (DIN EN 16327:2014-07)
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): Arbeitsgruppe „Alternative Antriebe“
- Gefährdungsbeurteilung beim Feuerwehreinsatz (Auftrag des Referates 5 der vfdB unter Mitwirkung des Bayerischen Staatsministeriums des Inneren, des Bayerischen Gemeindeunfallversicherungsverbandes und Feuerwehren der Bundesländer Bayern, Berlin und Hessen; München 2008.
- Vorsitz der Arbeitsgruppe Druckluftschäumen des Referats 5 (Brandschutz, Brandbekämpfung) der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
- Fachbereich 4 und 6 des Deutschen Feuerwehrverbandes (FB 4 - Fachausschuss Technik der deutschen Feuerwehren, FB 6 – Einsatz, Löschmittel und Umweltschutz)
- Europäische und internationale Normungsgremien (CEN/TC 192, ISO Druckluftschäumen TC 121)

Im Auftrag des Technisch Wissenschaftlichen Beirates der vfdb (TWB) begleitete die BFW den Forschungsbericht Nr. 150 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung „Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschäum führenden Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden“ (s. Fröhl & Schaaf, 2008)¹.

Als Initiator und Akteur war die BFW an Versuchen der Uni Karlsruhe an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) der Universität Karlsruhe zur Untersuchung des „immediate flame knock downs“ (plötzliches Erlöschen eines Brandes, ohne direkte Einwirkung des Löschrstrahls auf den Brandherd in einem nach oben abgeschlossenen Raum) sowie an Versuchen zur Evaluation der Leitfähigkeit von DLS im Niederspannungsbereich beteiligt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die BFW arbeitete während des gesamten Projektes eng mit allen Partnern zusammen. Als Unterauftragnehmer der BFW unterstützte die Berufsfeuerwehr (BF) Ingolstadt die Durchführung der Brandversuche sowie bei der ausführlichen wissenschaftlichen Dokumentation ihrer Einsätze (u.a. Erstellung von Lehrfilmen). Als assoziierte Partner begleiteten, die Firmen „One Seven of Germany GmbH“ Luckenwalde, „Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG“ Hamburg, „Rosenbauer International AG“ Leonding (Österreich) und die „Deutsche Bahn AG“ das Projekt bei den Versuchen und mit ihrer fachlichen Expertise sowie durch die kostenlose Bereitstellung von Schaummitteln und technischem Gerät. Außerdem unterstützte die Freiwillige Feuerwehr (FF) Fürstenwalde/Spree bei der Dokumentation von Einsätzen mit DLS.

Durch die Beteiligung an Fachkonferenzen entstand ein enger Erfahrungsaustausch mit dem Institut für Elektrotechnik der Montan Universität Leoben (Österreich), Herrn Prof Weiß, der sich an den Versuchen zum Thema „Brände an Lithium-Ionen-Batterien“ beteiligte.

II Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

In den folgenden Abschnitten werden die erreichten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete unter Beteiligung der BFW erläutert.

¹ Föhl, C. A. & Schaaf, J. für Brandschutztechnik, Forschungsstelle. (2008). *Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschäum führenden Feuerwehrschräuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden*. Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Univ. Karlsruhe (TH).

1.1 AP 01 „Ausgangsszenario“

Im Arbeitspaket 01 wurde zu Beginn und iterativ eine umfangreiche Literatur- und Internetrecherche durchgeführt. Dabei konnten zahlreiche Dokumente gefunden werden, die je nach Themenschwerpunkt und Relevanz zur Planung und Durchführung der Versuche bzw. bei der Erstellung der Handlungsanweisungen genutzt wurden und entsprechend in den Dokumenten als Quellen aufgenommen sind.

Weiterhin wurde das Ziel verfolgt, bisherige Einsatzerfahrungen mit Druckluftschäum in der Brandbekämpfung in möglichst großer Zahl auszuwerten. Basierend auf einem Fragebogen zur Einsatzauswertung von Brandeinsätzen mit DLS bei der BFW wurde ein Fragebogen für die Feuerwehren der Bundesrepublik entwickelt.

1.1.1 Auswertung der Fragebögen zu CAF-Einsätzen im Bundesgebiet und in Berlin

Insgesamt wurden 273 Feuerwehren gebeten, sich an der Datenerhebung zu beteiligen. 58 Einsätze aus dem Bundesgebiet und 138 Einsätze der BFW konnten ausgewertet werden.

Bei den eingegangenen Fragebögen zu Einsätzen von Feuerwehren aus Deutschland stellten Freiwillige Feuerwehren mit 39,7% den Hauptanteil dar. Freiwillige Feuerwehren mit hauptamtlichen Kräften, also größeren Städten unter der Berufsfeuerwehrgrenze haben einen Anteil von 37,9% aller ausgewerteten Einsätze. Berufsfeuerwehren waren mit 19%, Werks- und Betriebsfeuerwehren mit 3,4% vertreten.

Im Ergebnis der ausgewerteten Einsätze konnten wichtige Erkenntnisse für die Erreichung der Projektziele und somit der Handlungsempfehlungen und des Ausbildungskonzeptes gewonnen werden. Hervorzuheben sind, dass sowohl bundesweit bei den befragten Feuerwehren, als auch in der BFW:

- Druckluftschäum bei der Brandbekämpfung als ausschließliches Löschmittel verwendet wurde,
- fast ausschließlich C- Hohlstrahlrohre (97,8%) eingesetzt wurden,
- am häufigsten Druckluftschäumenanlagen 800/1600 nach der DIN EN 16327:2014-07 zum Einsatz kamen,
- nur geringe Mengen an Wasser und Schäummittel verbraucht wurden (bei 25% der Brände unter 200l Wasser) und kein bzw. deutlich geringerer Schaden durch das Löschmittel DLS, als bei reinem Wassereinsatz, verursacht wurde.

Bei dem Vergleich und der Bewertung der Löschmittel wurde bei 96,2% der Brandeinsätze angegeben, dass der Zeitraum bis zum Wirksamwerden des Löschmittels DLS kürzer als bei Wasser war und der Einsatz von Druckluftschäum im Vergleich zu einem Wassereinsatz überzeugt hat. Die Auswertung der geschilderten Probleme beim Einsatz von Druckluftschäum gibt Hinweise dazu, wo die Zufriedenheit bei der Nutzung durch Verbesserung der Bedienung, Zuverlässigkeit und Qualität erhöht werden kann.

1.1.2 Stichprobenartige Expertenbefragung

Entsprechend dem AP erfolgte eine stichpunktartige Befragung von sechs Experten aus verschiedenen Bundesländern. Die ausgewählten Führungskräfte aus dem Feuerwehrwesen wurden beispielsweise um Angaben gebeten, welche Informationsquellen zu Methoden der Einsatztaktik mit DLS herangezogen werden. Es wurde deutlich, dass am häufigsten die eigene Erfahrung und persönliche Kontakte als Informationsquelle genutzt werden. Das mag auch daran liegen, dass es derzeit wenig deutschsprachige Literatur oder auch Schulungsunterlagen dazu gibt und unterstreicht die Relevanz des Arbeitspaketes 07 „Ausbildung und Handlungsanweisungen“.

1.2 AP 02 „Brand- und Löschversuche an Bemessungsbränden“

Die in den AP durchgeführten Brandversuche mit Indoor-Holzmischbrandkrippen und mit Outdoor-Holzmischbrandkrippen sowie acht Poolfire Versuche wurden seitens der BFW unterstützt, d.h. die Löscharbeiten erfolgten durch die BFW gemeinsam mit Kräften der BF Ingolstadt.

Die Indoor-Brandversuchen zeigten das Potential auf, welches DLS besitzt, Brände unter den getesteten Bedingungen schneller und effektiver als herkömmliche Löschmittel zu bekämpfen. Die Druckluftschäume erreichen eine bis zu 50% kürzere Löschzeit. Die Vorteile einer guten Sichtbarkeit des Löschmittels DLS, sowie eine große Wurfweite erleichtern dem Feuerwehrpersonal die Arbeit und erhöhen die Sicherheit im Einsatz (Rappsilber & Krüger, 2018)². Weitere ausführliche Ergebnisse sind im Abschlussbericht des Projektpartners OvGU unter II. Punkt 1 „Erzielte Ergebnisse im Einzelnen“ zu entnehmen.

1.3 AP 03 „Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen“

1.3.1 Brand- und Löschversuche mit mehreren aufgestapelten Lithium-Ionen-Batterien

Da Brände von Lithium-Ionen Zellen relativ unerforscht sind, wurden zum Brand- und Löschverhalten im Februar 2018 auf dem Gelände der Feuerwache Marzahn Versuche durchgeführt. Zunächst wurde das Brandverhalten nach Überladung beobachtet und auf dieser Basis, Löschversuche mit DLS unternommen. Der Schwerpunkt lag bei der Dokumentation der Brandausbreitung von Modulen mit mehreren Zellen und ob die betreffenden brennenden Zellen mit DLS gelöscht werden können bzw. eine Ausbreitung auf benachbarte Zellen verhindert werden kann.

Die Versuche ergaben, dass bei Überladung die Zellen an den Sollbruchstellen mit lautem Knall platzen und danach eine Stichflamme aus der Zelle solange brennt, bis

² Rappsilber, T., & Krüger, S. (2018). Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams. *Fire Safety Journal*, 98, 3–14.

die Zelle ausgebrannt war. Der Strom floss weiter, so dass auch die benachbarten Zellen in gleicher Form reagierten. Nach dem Ausbrennen der Zellen erfolgte keine weitere Reaktion. Bei einem weiteren Versuch mit der Überladung eines Teils der Zellen wurde ein Löschversuch mit DLS unternommen, der erfolgreich die Brandausbreitung auf nicht überladene Zellen zum Stillstand brachte.

In einem dritten Versuch wurden Zellen mit einem Gasbrenner der Leistung 100kW in Brand gesetzt. Hierbei wurde zunächst festgestellt, dass insbesondere in der Anfangsphase die Brandausbreitung nur schleppend erfolgt. Durch die Kühlung mit DLS wurde eine deutliche Behinderung der Brandausbreitung auf benachbarte Zellen erreicht, insbesondere unter minimalen Wassereinsatz, der dann auch für eine sehr geringe Löschmittelausbreitung im Umfeld sorgt. Eine Löschung der brennenden Zellen, entgegen der austretenden Stichflamme, war nicht möglich.

1.3.2 Brand- und Löschversuche an Lithium-Ionen-Batterien und Elektro-Personenkraftwagen (e-Pkw)

Die Brand- bzw. Löschversuche an Lithium-Ionen Batteriespeichersystemen mit Druckluftschaum fanden im IV. Quartal 2018 statt. Ziel dieser Versuche war es durch Brand- und Löschversuche erste Erkenntnisse über die Löschwirkung von DLS zu gewinnen.

Insgesamt standen eine einzelne Lithium-Ionen Hochvoltbatterie (HV-Batterie), zwei e-Pkw sowie 13 Forschungsbatteriemodule a 12 Zellen zur Verfügung.

Bei allen Löschversuchen wurden, bis auf die Zumischrate, keine Parameter variiert. Weitestgehend ging es darum, die gleichen Rahmenbedingungen sicherzustellen.

Beim ersten Versuch wurde eine voll aufgeladene HV-Batterie mittels 100 kW-Propangasbrenner bis zum eigenständigen Brennen beflammt und somit extreme Brandbedingungen erzeugt.

Der Löschangriff mit Druckluftschaum führte zum sofortigen Erlöschen der Flammen, verbunden mit einer starken Rauchentwicklung. Die einzelnen Zellen reagierten aber weiter, so dass periodisch Löschimpulse mit Druckluftschaum abgegeben werden mussten. Zum Beenden der Reaktion in der HV-Batterie wurde diese in einer mit Wasser gefüllten Stahlwanne versenkt.

Die zweite Versuchsreihe beinhaltete die Fahrzeugbrände. Beim ersten Fahrzeug erfolgte die Zündung (Beflammung unter dem Fahrzeug im Bereich der HV-Batterie) mittels eines Propangasbrenners. Der e-Pkw stand im Vollbrand. Nach 20 Minuten erfolgte ein Löschangriff mit Druckluftschaum, mit dem nach 3,5 Minuten und einem Wasser-/Schaummittelverbrauch von 60 Litern (75 l einschließlich Nachlöscharbeiten) ein schneller und effektiver Löscherfolg eintrat.

Beim zweiten e-Pkw erfolgte die Zündung mittels 10 Litern Kerosin, das in einer Blechwanne vor dem rechten Hinterrad positioniert wurde, also in unmittelbarer Nähe der HV-Batterie. Im Verlauf des Brandes kam es immer wieder zu Knall- und Abblasgeräuschen aus Richtung der HV-Batterie. Die Löschzeit, einschließlich Nachlöscharbeiten, betrug sechs Minuten. Es wurden nur 90 Liter Wasserschaumgemisch (WSG) für den Vollbrand und 140 Liter für die Nachlöscharbeiten verbraucht.

In der dritten Versuchsreihe ging es um die Löschwirkung von Druckluftschaum bei brennenden Batteriemodulen. Um das Brandverhalten der Module zu erkennen, wurden in einem Nullversuch sechs Batteriemodule mit je 12 Zellen entzündet und nicht gelöscht. Nach 60 Minuten war das Feuer nur noch schwach, da ein Großteil der Zellen ausgebrannt war. Trotzdem kam es noch zum Bersten einzelner Zellen. Der eigentliche Brandversuch wurde an sieben Batteriemodulen mit je 12 Zellen durchgeführt. Bei diesem Versuch kam es bereits nach 20 Sekunden zum Bersten der ersten Zellen, danach dann zur Reaktion mehrerer Zellen parallel. Ausströmendes Gas, welches sich unverzüglich entzündete, bildete in der Folge eine ca. 1 Meter hohe Stichflamme. Ab Minute 9:50 erfolgte der erste Löschimpuls, worauf die Flammen erloschen und die Temperatur sank. Kurz darauf stieg die Temperatur wieder schlagartig an und es kam zum erneuten Bersten einzelner Zellen, allerdings ohne dass sich das ausströmende Gas entzündete. Darauf folgte ein erneuter Löschimpuls, um die Module zu kühlen. Wenige Augenblicke später stieg die Temperatur erneut auf über 350°C und es erfolgte ein letzter Löschimpuls. Insgesamt wurden bei den drei Löschimpulsen 18 Liter WSG verbraucht.

Die Versuche vermitteln einen Eindruck, welches Brandverhalten eine intakte Lithium-Ionen-Sekundärzelle aufweist und wie diese mit DLS zu löschen ist. Sie haben gezeigt, dass die Bekämpfung der brennenden Batteriemodule und des Fahrzeugbrandes mittels DLS zu einem schnellen Erfolg führte und hohe Effektivität auswies.

Die längere Verweildauer des Druckluftschlums gegenüber Wasser auf den Oberflächen erhöht die Kühlwirkung und reduziert den Löschmittelverbrauch. Ein Aufsteigen der Blasen zwischen den Modulen (bei offenem Batteriegehäuse) vergrößert zudem die benetzte Oberfläche. In dem Zusammenhang wird auf die Versuche unter 1.3.1 dieses Berichts verwiesen.

Auch bei den extremen Versuchsbedingungen konnte eine kritische thermische Aufbereitung durch einen Fahrzeugbrand nicht beobachtet werden. HV-Batterien mussten intensiv und über einen längeren Zeitraum unterfeuert werden, um eine Reaktion der Batteriemodule zu erreichen. Bei Bränden innerhalb geschlossener Ortschaften an Pkw bzw. Kfz, die mit Verbrennungskraftstoff betrieben werden, ist die Zeitdauer der thermischen Beaufschlagung durch den Kraftstoff, die Brandlasten und die Reaktionszeit der Feuerwehr begrenzt. Das Ablöschen der Versuchsfahrzeuge mit DLS war problemlos und ressourcensparend möglich. Die taktischen Grundsätze bei der

Brandbekämpfung von Pkw sind anzuwenden. Aus den Versuchsergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die Wassertankinhalte (ab 800 Liter) der Lösch- und Tanklöschfahrzeuge bei taktisch richtigem Druckluftschaumeinsatz für die Brandbekämpfung an einem e-Pkw ausreichen.

Nicht untersucht und damit nicht geklärt werden konnte, ob sich eine HV-Batterie, die zusätzlich mechanisch durch einen Verkehrsunfall beaufschlagt oder stark beschädigt ist, brandtechnisch anders verhält, als eine unbeschädigte HV-Batterie (wie bei den durchgeführten Versuchen).

Ebenfalls offen bleibt der weitere Umgang (Übergabe/Abtransport/Lagerung) mit solchen HV-Batterien bzw. batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen. Es bleiben auch die Fragen offen, wie lange eine HV-Batterie gekühlt werden sollte und ob es möglich bzw. nötig ist, ein solches Batteriesystem für 24 Stunden in einem Wasserbad zu versenken; sowie die Frage nach dem nötigen Sicherheitsabstand (wenn ein gelöschtes Fahrzeug mit HV-Batterien über 24 Stunden in einem sicheren Bereich, also mindestens 5 Meter zu brennbaren Stoffen, abgestellt wird).

Die Beobachtungen, die bei den Versuchen im Zusammenhang mit dem Einsatz von DLS gemacht wurden, lassen es sinnvoll erscheinen weitere Forschung durchzuführen.

1.3.3 Brand- und Löschversuche an Autoreifenstapeln

Entsprechend der Aufgabenstellung sollte bei Reifenbränden ermittelt werden, welche der beiden Löschwirkungen–„Kühlen“ oder „Trennen“–bei ungewöhnlichen Feststoffbränden vorherrschend ist. Die Kühlwirkung wird maßgeblich von der Verdampfung des Löschwasseranteils im Druckluftschaum bestimmt. Das Trennen des Brandstoffes vom, für die Verbrennung, benötigten Sauerstoff erfolgt durch die Abdeckung der Oberflächen. Beide Mechanismen wirken eng zusammen. Des Weiteren sollte durch das Variieren der Verschäumungszahlen (VZ) ermittelt werden, in welchem Bereich die effektivste Brandbekämpfung möglich ist.

Bei den Reifenbränden wurden zehn Versuche mit jeweils 58 PKW-Altreifen (Brandlast ca. 490 kg) durchgeführt. Zwei Versuche wurden mit Luftschaum durchgeführt um einen Vergleichswert zu erhalten. Acht Versuche wurden mit DLS durchgeführt, wobei hier insbesondere die VZ und die Strahlrohrführer variiert wurden. Die Reifen wurden in einer Brandwanne mit einer Fischgrätenmethode gestapelt, die eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche gestattete. Als dritter Versuchsschwerpunkt war die Effizienz der Löschwirkung von herkömmlichen Schwerschäumen (Luftschaum) und DLS zu bewerten.



Abbildung 1: Versuchsaufbau Autoreifenbrände. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.

Gezündet wurden die Reifen synchron an sechs Stellen mittels Pyrotechnik und Kerosin. Die Messtechnik wurde durch die BAM und die OvGU gestellt. Die Reifen wurden bei verschiedenen VZ mit einem fluiden Löschmittelstrom von 135 Litern pro Minute mit DLS und einem Schwerschäumrohr S1 abgelöscht.



Abbildung 2: Löscharbeiten mit Druckluftschäum. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.

Verschäumungszahlen unter $VZ=7,5$ zeigten die besten Löschergebnisse, das heißt, die Brände wurden mit der kürzesten Löschzeit gelöscht. Für die Brandbekämpfung ergibt sich daher, dass VZ unter 7,5 am effektivsten sind. Zusätzlich wirken niedrige VZ positiv aufgrund der Impulse am Brandgut. Es werden größere Wurfweiten sowie tieferes Eindringen in das Brandgut ermöglicht.

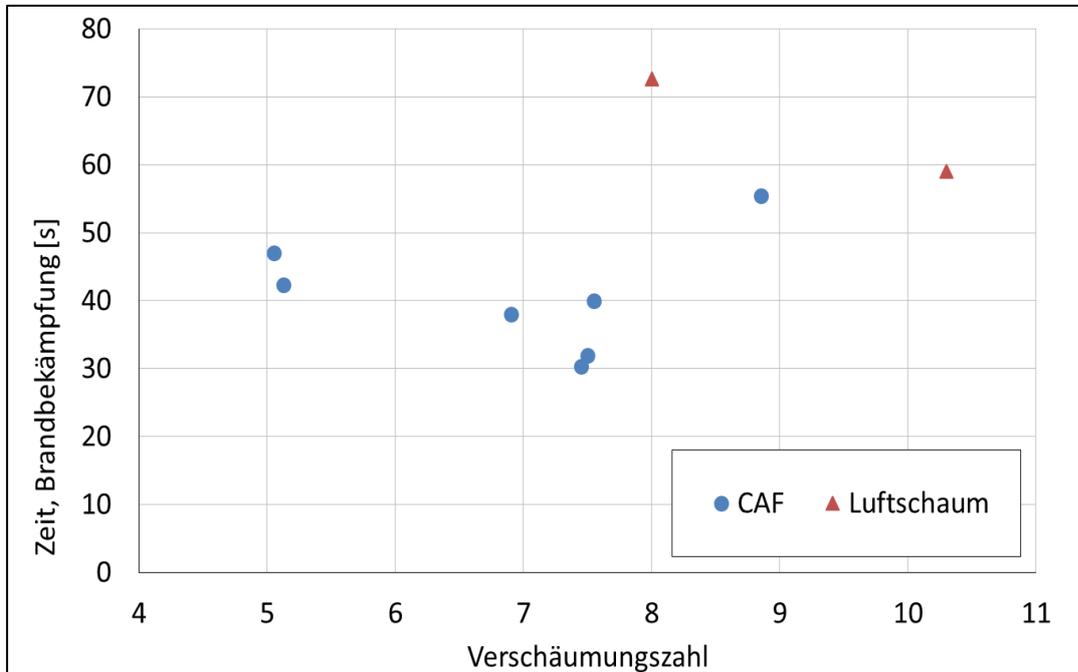


Abbildung 3: Darstellung der Verschäumungszahl gegenüber der Brandbekämpfungszeit.

Mit DLS nass gelang es, die Reifen in der Hälfte der Zeit im Vergleich zu Luftschaum zu löschen. Die Grafik zeigt DLS bei 30-50 Sekunden und Luftschaum bei 60-80 Sekunden.

Die fast vollständige Verdampfung von DLS (keine weiße Schaumdecke auf den Reifen) lässt vermuten, dass die Kühlwirkung der Hauptlöschereffekt bei Feststoffbränden ist und somit eine schnellere Löschung im Vergleich zu Luftschaum ermöglicht.

In den hier aufgeführten Brandszenarien ist DLS trocken nicht zum Löschen geeignet. Bei der Applikation von trockenem DLS mit einer $VZ=12$ ist deutlich zu erkennen, dass nicht so viel Energie gebunden wird, wie bei nassem DLS. Mit Trockenschaum sollten lediglich Flächen bei Nachlöscharbeiten versiegelt, oder gegen Strahlungswärme geschützt werden.

1.3.4 Dokumentation von Löschversuchen mit einer Highspeed-Kamera (z.T. AP 02)

Zur Ergänzung der Reifenbrandversuche wurden im Labormaßstab Reifenbrandversuche mit einer Highspeed-Kamera dokumentiert. Damit wurde die Chance genutzt,

mit bildgebenden Verfahren, das Verhalten von DLS, Luftschaum, Netzwasser und Wasser beim Aufprall auf einen brennenden KFZ-Reifen zu beobachten.

Im März 2017 fanden die Aufnahmen mit der Highspeed Kamera in einem Labor des assoziierten Partners, Dr. Sthamer, in Hamburg statt. Mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (4000 Bildern pro Sekunde) sollte das Verhalten unterschiedlicher Löschmittel beim Auftreffen auf der brennenden Reifenoberfläche visualisiert werden. Allerdings war nur eine Seitenansicht möglich, wobei durch eine temperierte Glasplatte eine weitere Perspektive geschaffen werden konnte. Hier stellte sich die Frage nach dem Verhalten der Löschmittel bezüglich des Auftreffens und der Verteilung auf der, um 130°C temperierten Glasoberfläche.



Abbildung 4: DLS Applikation auf einen brennenden KFZ-Reifen, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.

Die Bilder der Highspeed-Kamera bestätigten die in der Versuchsbewertung der Reifenbrände aufgeführten Erkenntnisse. Der Druckluftschaum zerteilt sich nach Austreten aus dem Strahlrohr und nimmt dabei unterschiedliche Formen (Schaum-Cluster

oder Schaumklumpen) an. Die Brennstoffoberfläche wird kontinuierlich mit Schaumklumpen beaufschlagt. Der Schaum breitet sich beim Auftreffen auf der heißen Oberfläche aus und verdampft dabei. Ein geringer Teil sammelt sich in Vertiefungen (hier Reifenprofil). Nach einer ausreichenden Kühlung haftet immer mehr Schaum auf der Reifenoberfläche. Sichtbar ist dabei eine Dampfbildung, die solange anhält, bis die Temperatur ausreichend reduziert ist. Ein Abrutschen bzw. Abfließen des Schaumes konnte nicht beobachtet werden. Deutlich zu erkennen sind Unterschiede zwischen gekühlten und erwärmten Oberflächen. Kühle Oberflächen (unter 100 °C) sind durch eine weiße Schaumschicht gekennzeichnet.

Im Gegensatz zu DLS konnte bei Luftschaum, der eine deutlich geringere Fließgeschwindigkeit hat (DLS ca. 1,3-fach höher), erkannt werden, dass die Schaumblasen ungefähr die zweifache Größe haben (Rappsilber, Krüger & Below, 2019).³

Bei Wasser mit Netzmittel trifft eine Vielzahl von Wassertropfen auf der Reifenoberfläche auf und zerplatzt. Große Tropfen werden dadurch in eine Vielzahl von kleinen Tropfen umgewandelt. Ein Teil dieser Tropfen wird weggeschleudert, der andere Teil des Wassers verbleibt auf der Oberfläche, schäumt auf, und fließt in die Vertiefungen des Probestücks. Der nach dem Auftreffen erzeugte Schaum fließt, der Schwerkraft folgend, ab. Eine Dampfbildung ist auch hier sichtbar, eine flächendeckende Schaumschicht ergibt sich mit Netzmittel nicht.

Beim reinen Wasser zerspringen die Tropfen beim Auftreffen auf der Oberfläche und werden weggeschleudert, bzw. laufen sofort ab. Eine Haftung auf der Reifenoberfläche konnte nicht beobachtet werden. Bei Filmaufnahmen mit Normalgeschwindigkeit (29 Bilder pro Sekunde) ist zu sehen, wie wasserabweisend die Reifenoberfläche ist.

³ Rappsilber, T., Krüger, S. & Below, P. (2019). Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range. *Fire Safety Journal*, 106, 136-145.



Abbildung 5: DLS Applikation auf erwärmte Glasscheibe, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.

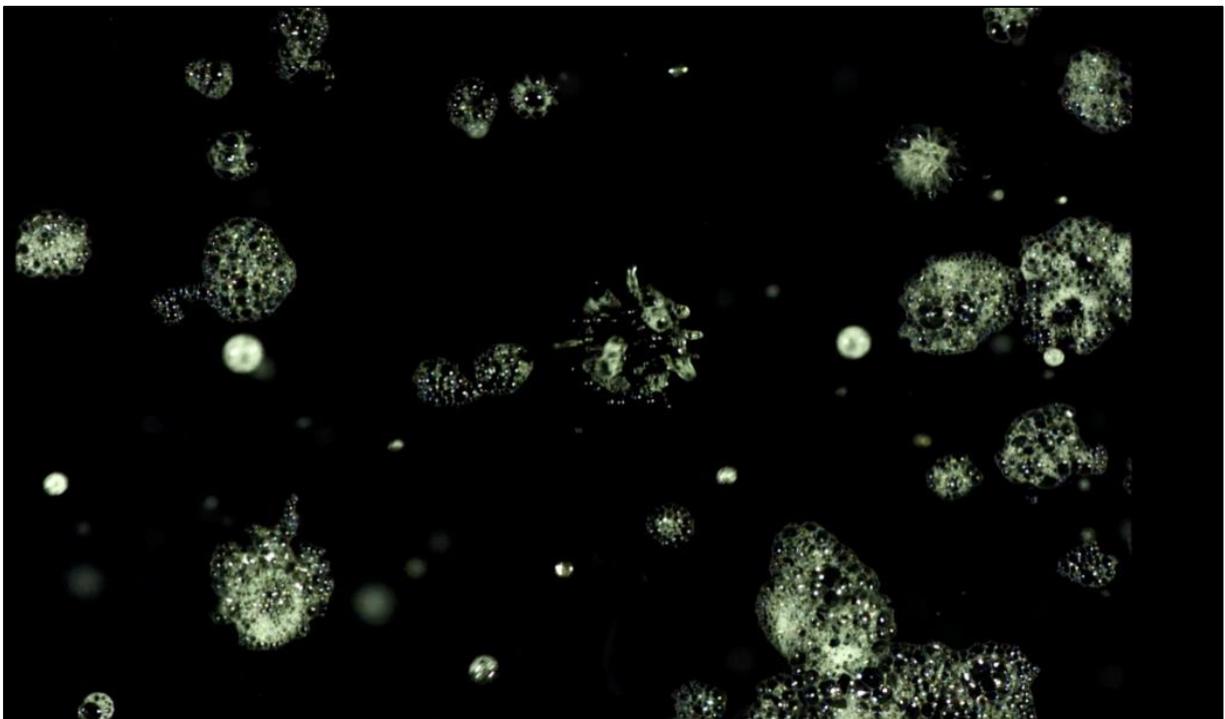


Abbildung 6: Netzmittel Applikation auf erwärmte Glasscheibe, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.

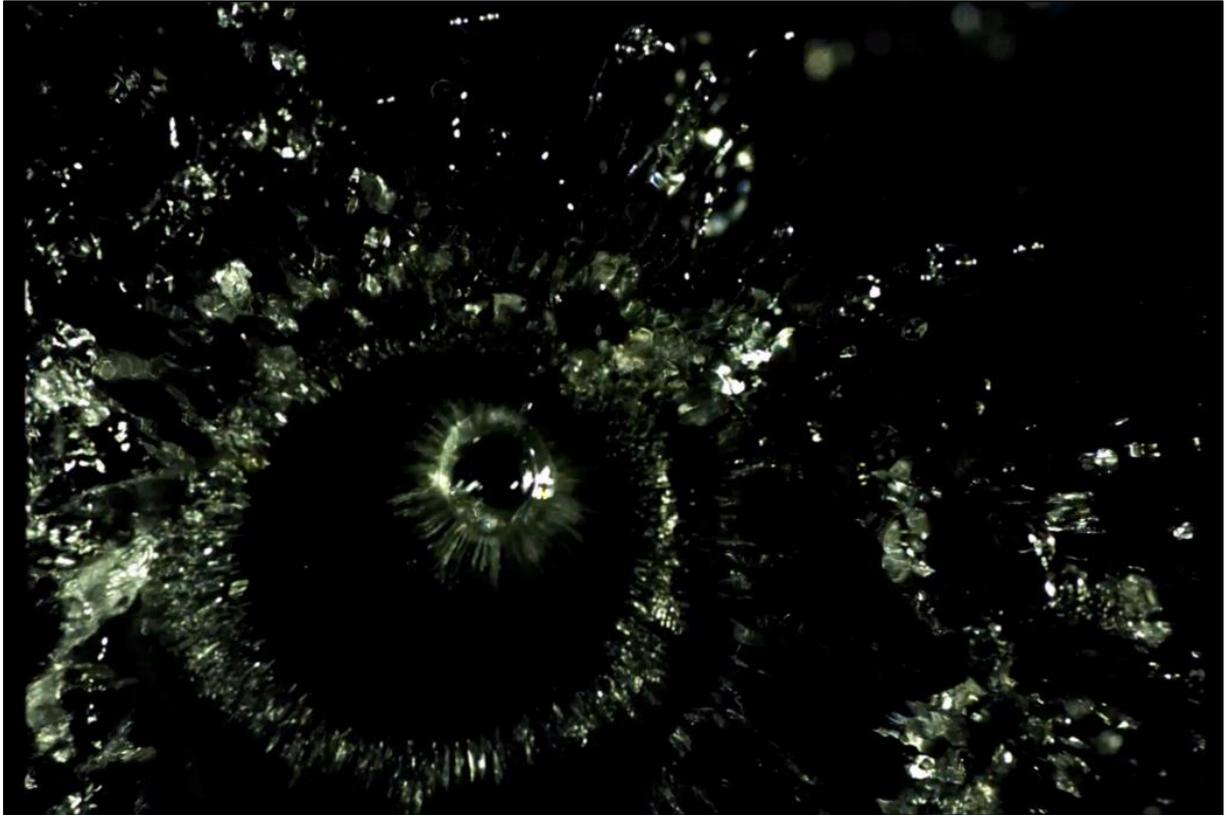


Abbildung 7: Wasser (Vollstrahl) Applikation auf erwärmte Glasscheibe, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.

Schlussfolgernd ist zu erkennen, dass die Wärmeübergangsformel (Kühleffekt) die aus Naturkonstanten und zwei Variablen (Aufenthaltszeit des Löschmittels auf dem Brandgut und benetzende Fläche) besteht, zugunsten von DLS auch visuell dahingehend bestätigt wurde, dass DLS gegenüber Wasser und Wasser mit Zusätzen die höhere und schnellere Löschwirkung, bei gleicher taktischer Anwendung besitzt.

1.3.5 Raumbrandversuche zur Untersuchung der Löscheffekte des Druckluftschaumverfahrens und zur Verdrängung des Sauerstoffs

Es wurden drei Raumbrandversuche mit gleichwertiger Brandlast im Mai 2016 durchgeführt. Diese Brände wurden mit den Löschmitteln Wasser, Wasser mit Netzmittel und DLS gelöscht.

Ziel dieser Brandversuche war es, die Löschmitteleffektivität bei einem Wohnzimmerbrand mit gleicher Flüssigkeitsapplikationsrate und Brandlast bei Einsatz unterschiedlicher Löschmittel zu untersuchen. Es konnten Erkenntnisse hinsichtlich der Löschwirkung, Einsatztaktik und technischen Grundlagen gewonnen werden.

Die Brandbekämpfung mit DLS hat durch die schnelle Brandeindämmung überzeugt, da schon aus großer Entfernung Löschmittel in die Brandzone eingebracht werden konnte. Die Temperaturabsenkung im Raum dauerte jedoch sehr lange, was in der

ausschließlichen Fokussierung auf die Hotspots begründet war. Eine abschließende Effizienzbetrachtung der Löschmittel ist aufgrund einer fehlenden Reproduktionsmöglichkeit der Einzelversuche nicht möglich. Aus diesem Grund wurden weitere Versuche zur Untersuchung der Faktoren sauerstoffverdrängende /-verdünnende Wirkung und die Kühlwirkung auf Feststoffe ausgearbeitet. Diese Versuche konnten zum Abschluss des Projekts im Dezember 2018 in einem holzbefeuerten Brandraumcontainer realisiert werden.



Abbildung 8: Brandraum vor Brand, Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.



Abbildung 9: Brandraum nach Zündung. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016



Abbildung 10: Brandraum im Vollbrand. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.

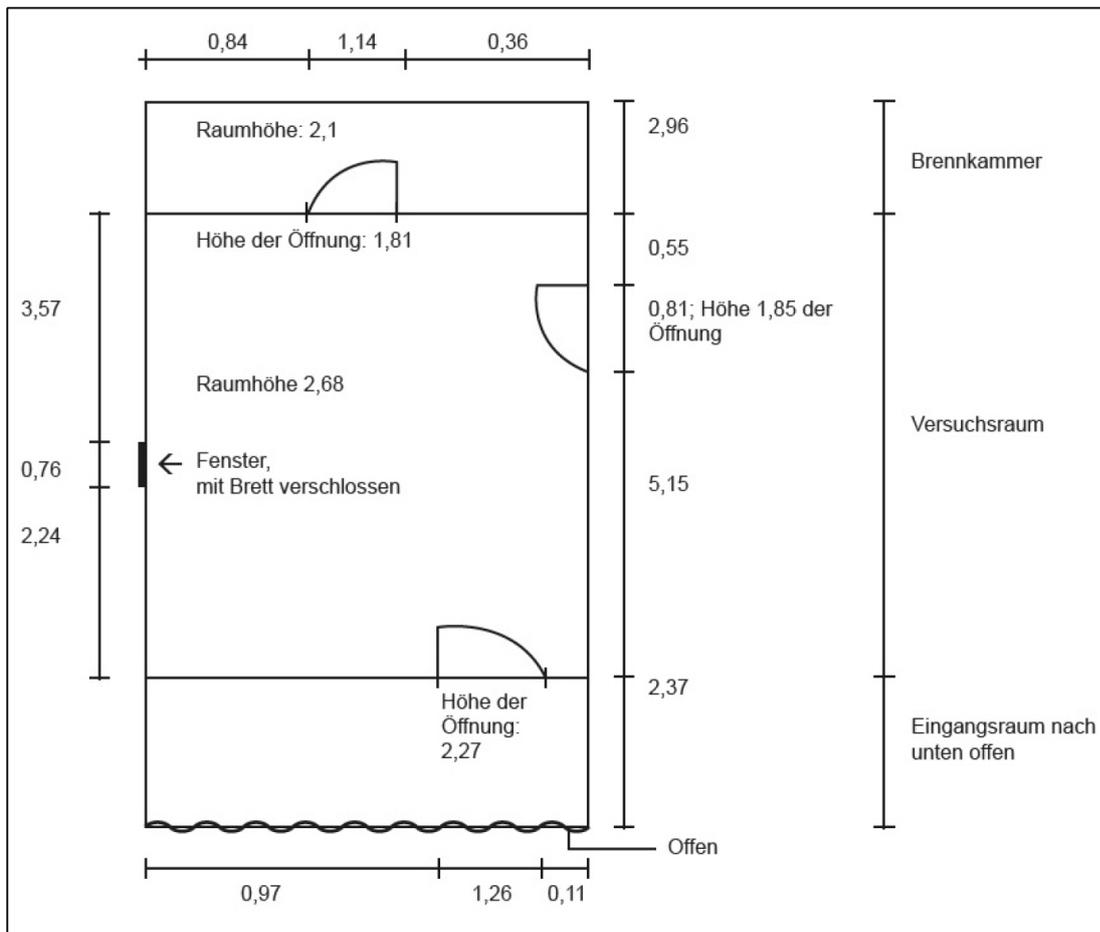


Abbildung 11: Der Brandraumcontainer war in Brennkammer, Versuchsraum und Eingangsraum gegliedert.

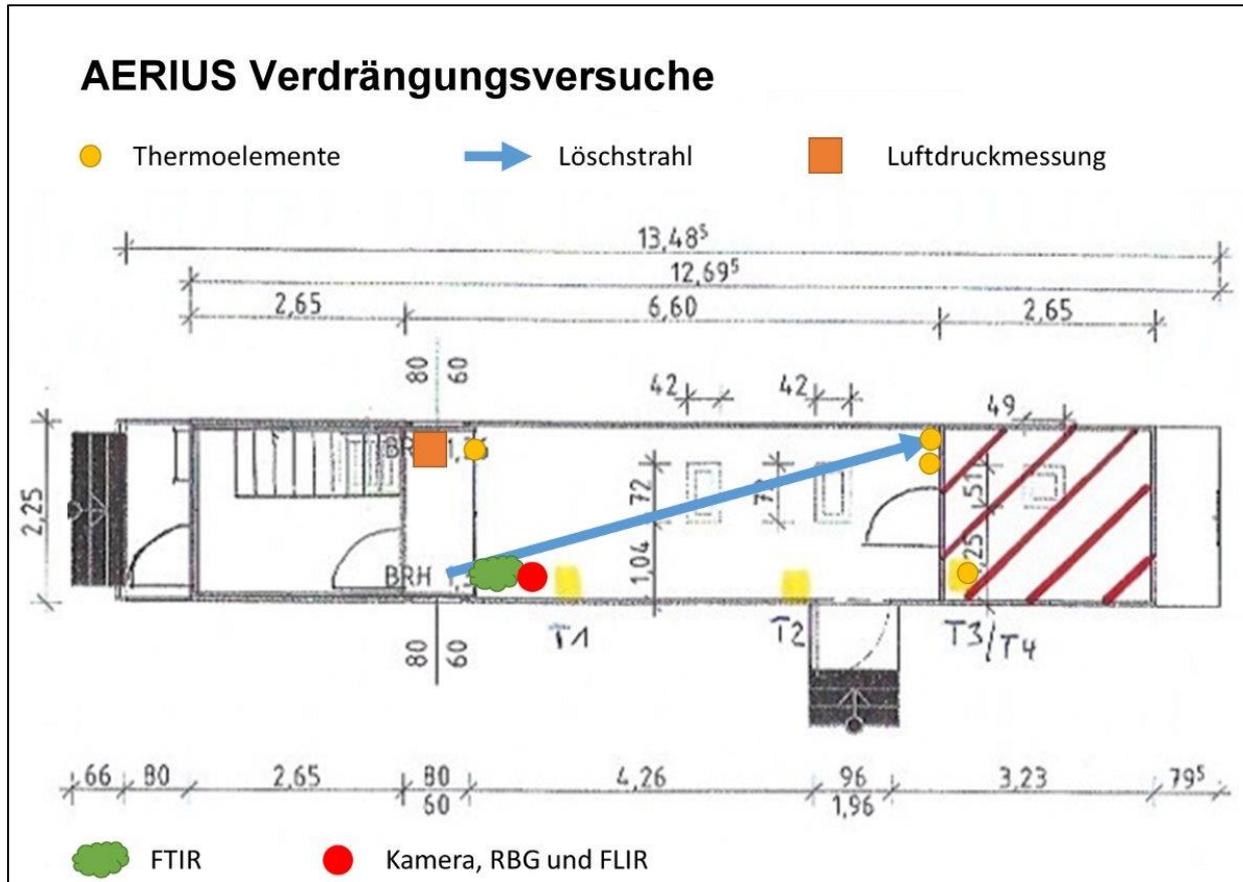


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Messelemente. Grüne Wolke: Indikator für Standort des Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers. Roter Punkt: Indikator für Standort der RGB-Kamera und Wärmebildkamera der Firma FLIR.

Die Untersuchung des Wirkungsmechanismus der Sauerstoffverdrängung bei der Löschmittelapplikation zeigte, dass bei DLS eine andere Verdampfung als bei Wasser charakteristisch ist. Die Verdrängungswirkung von DLS hält länger an, was bedeutet, dass DLS eine relativ hohe Wasserdampfkonzentration halten kann. Durch DLS wird daher eine höhere Inertisierung als bei Wasser erreicht.

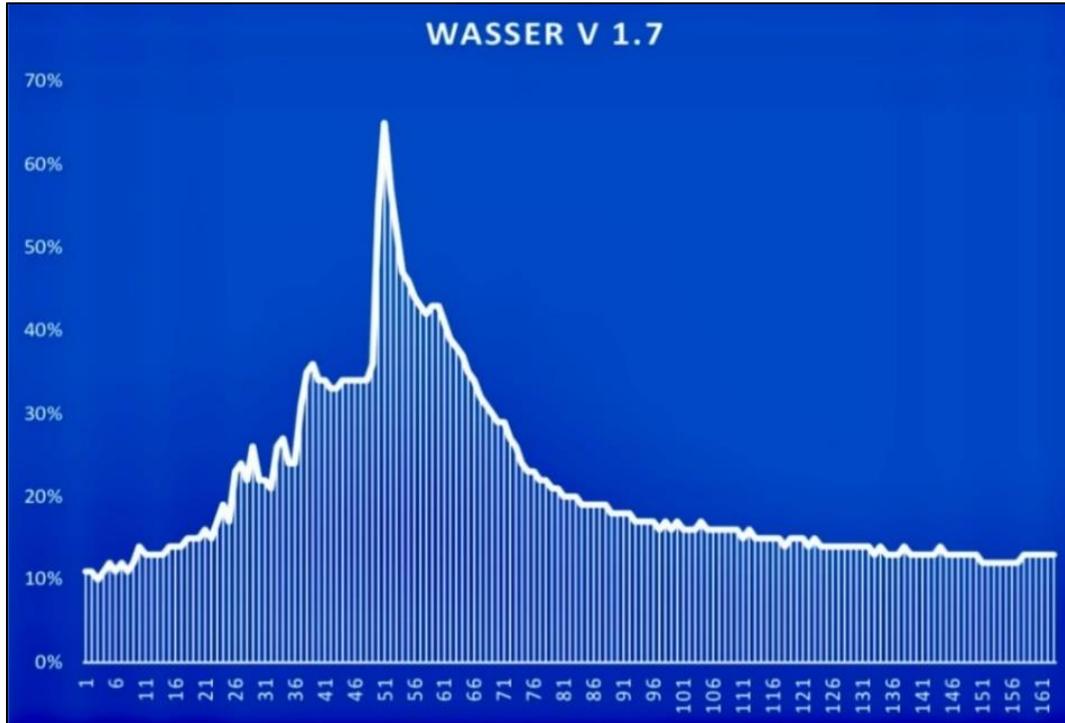


Diagramm 1: Verlauf der Wasserdampfbildung bei der Anwendung von reinem Wasser in % der absoluten Luftfeuchte über der Zeit in Sekunden. Bei Wasser erfolgt ein kurzer steiler Anstieg, der schnell wieder abfällt.



Diagramm 2: Verlauf der Wasserdampfbildung bei der Druckluftschäumenanwendung in % der absoluten Luftfeuchte über der Zeit in Sekunden. Bei Druckluftschaum erfolgt ein Anstieg der Kurve, der hohe Wasserdampfgehalt hält über einen deutlich längeren Zeitraum an.

Die Versuche bestätigten die Erscheinungsbilder des knock-down Effektes (plötzliches Erlöschen des Brandes nach einem Außenangriff), wie sie auch bei den Realbränden im Jahr 2017 in Fürth und im Jahr 2018 in Berlin dokumentiert wurden. Für die Einsatztaktik ergibt sich die Erkenntnis, dass beim Vollbrand z.B. eines Wohnzimmers die Kombination aus Bauteilkühlung (ggf. auch durch einen Außenangriff) und direktem Löschen aus sicherer Entfernung, die Anwendung von DLS die effektivste Brandbekämpfungsoption ist und gegenüber Wasser sicherer und bedeutend effizienter ist.

1.4 AP 05 „Brände an Hochspannungsanlagen und Transformatoren“

Bei diesen Versuchen stand der Erkenntnisgewinn zu Mindestabständen und Einsatzregeln bei Bränden an Hochspannungsanlagen und Öltransformatoren im Fokus.

1.4.1 Ermittlung von Sicherheitsabständen beim Einsatz von Druckluftschaum im Voll- und Sprühstrahlverfahren an Hochspannungsanlagen

Bis zur Ausgabe der DIN VDE 0132 VDE 0132:2015-10 Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung im Bereich elektrischer Anlagen war der Schaumeinsatz, damit auch der von DLS, an unter Spannung stehenden Anlagen untersagt. Für die Niederspannung wurde die Norm dahingehend novelliert, den Einsatz von Hohlstrahlrohren bis zum Durchfluss 235 Litern pro Minute WSG mit den Sicherheitsabständen 1 Meter für Sprühstrahl und 5 Meter für den Vollstrahl zu gestatten. Ziel der Versuche war es analog Tabelle 6 der DIN VDE 0132 VDE 0132:2015-10, Sicherheitsabstände für den Einsatz von DLS bei Hochspannung bis 380 KV zu ermitteln. Entsprechende Versuche wurden auf dem Gelände des IPH (Institut „Prüffeld für elektrische Hochleistungstechnik“ GmbH Berlin) durchgeführt.

Als Nachbildung eines unter Spannung stehenden Teiles wurde ein isoliert aufgehängtes Metallgitter mit den Abmessungen 3,50 x 3,50 Meter verwendet. Der Abstand zum Boden betrug 2,15 Meter. Das Metallgitter wurde mit der Hochspannungsquelle verbunden. Die am Ende eines Feuerwehrschaumes (DIN C) angeordneten, auswechselbaren Strahlrohre wurden isoliert und stationär auf einer höhenverstellbaren Plattform befestigt. Diese war zusätzlich mit Rollen versehen, um verschiedene Abstände zum Gitter realisieren zu können. Der Neigungswinkel des Strahlrohres war einstellbar. Komplettiert wurde das Ganze durch eine Druckmessung mittels Drucksensor (zur Löschmittel-Druckmessung) und der Messung des Ableitstromes vom Strahlrohr zur (Prüf-) Erde. Der Ableitstrom wurde über ein Messwiderstand geführt und das resultierende Spannungssignal abgegriffen und per optischer Übertragungstrecke zum Registriergerät geleitet.

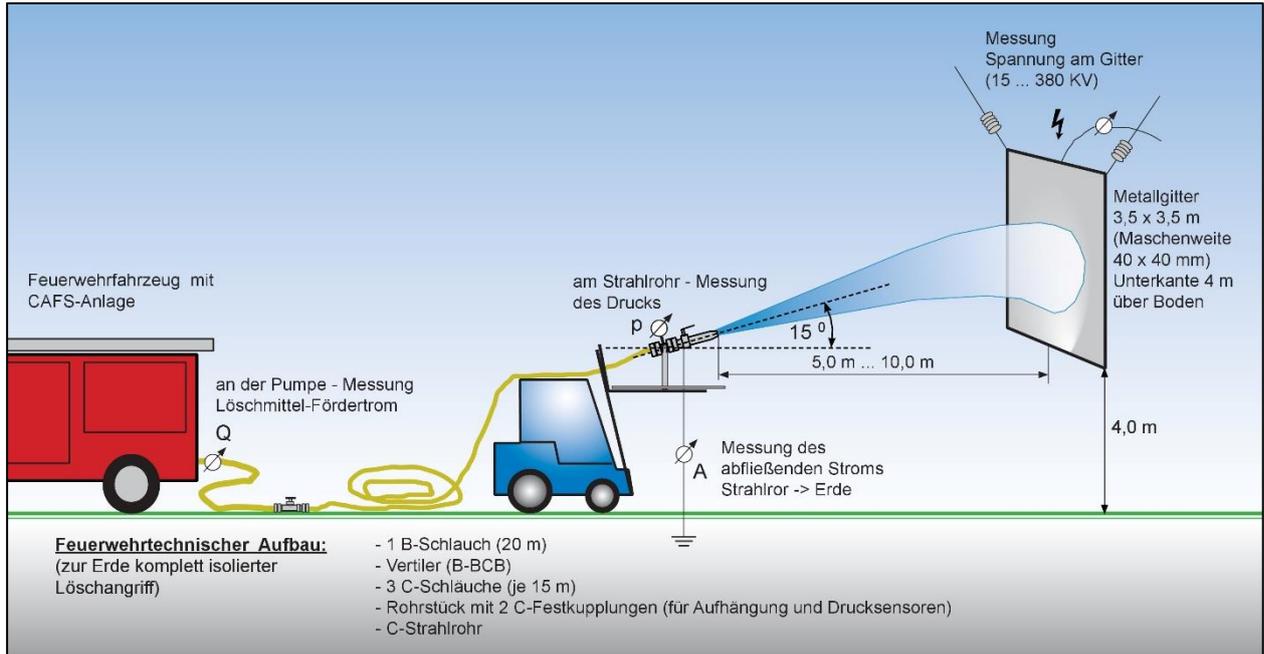


Abbildung 13: Versuchsaufbau. Ermittlung von Sicherheitsabständen. Bild: Berliner Feuerwehr.



Abbildung 14: DLS Applikation auf ein unter Hochspannung stehendes Metallgitter. Bild: Berliner Feuerwehr, 2017.

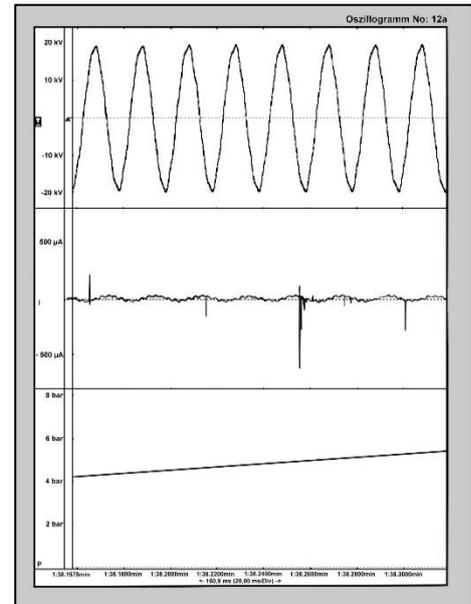


Abbildung 15: Oszillogramm vom Versuch 12.

Zum Vergleich wurden ein CM-Strahlrohr, zwei Hohlstrahlrohre unterschiedlicher Hersteller und eine Rundstrahldüse verwendet. Als Löschmittel wurde Wasser, Netzwasser und DLS nass sowie DLS trocken eingesetzt. Bei unterschiedlichen Abständen im Bereich von 1 bis 15 Metern, wurden die Ableitströme, sowohl beim Sprühstrahl, als

auch beim Vollstrahl bis zu einer maximalen Spannung von 275 kV ermittelt. Das Erreichen eines Ableitstroms von 0,5 mA war als Abbruchkriterium definiert.

Insgesamt wurden 42 Messungen durchgeführt. Bei einer durch die DIN VDE 0132 VDE 0132:2015-10 zugrunde gelegten Grenze für den Ableitstrom von 0,5 mA ergeben sich bei der Verwendung von DLS folgende Sicherheitsabstände für ein Hohlstrahlrohr ($V_{Wsg} \leq 235$ Liter pro Minute):

- Sprühstrahl 5 Meter
- Vollstrahl 15 Meter

Für den Vollstrahl gilt dabei die Einschränkung, dass dieser Abstand „nur“ für den Bereich der Hochspannung (bis 110 kV) gilt. Für die Höchstspannungsebene (220 kV bzw. 380 kV) konnte kein Sicherheitsabstand ermittelt werden.

Der bei Vollstrahl um 5 Meter höhere Sicherheitsabstand gegenüber Wasser ergibt sich aus dem länger kompakt gehaltenen Strahl nach Austritt aus dem Strahlrohr. Die Ergebnisse wurden der DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im VDE) mit der Bitte um Anpassung der DIN VDE 0132 übermittelt. Wegen grundsätzlicher Bedenken der DKE beim Einsatz von Schaum an Hochspannungsanlagen wurde auf eine Änderung der DIN VDE 0132 hinsichtlich der Sicherheitsabstände im Hochspannungsbereich verzichtet. Die DIN VDE 0132 VDE 0132:2018-07 wurde wie folgt verändert:

Tabelle 6: Am Ende der Legende heißt es nun:

„Hochspannungsanlagen: Schaum darf ohne Ausnahmen nur bei spannungsfreien Anlagenteilen eingesetzt werden; erforderlichenfalls sind auch benachbarte Anlagenteile spannungsfrei zu machen, denn es besteht ansonsten die Gefahr der explosionsartigen Zerstörung der elektrischen Anlage (einhergehend mit z.B. herumfliegenden Teilen und Druckwellen) mit zusätzlicher Gefährdung der Einsatzkräfte.“

Tabelle 6: Am Ende der Anhang B (zur Verwendung von Schaum in Hochspannungsanlagen) wird hinzugefügt:

„Durch Schaum werden die Isolationsstrecken beeinträchtigt. Dies kann zu Erd- und Kurzschlüssen führen, einhergehend mit explosionsartigen Zerstörungen der elektrischen Anlagen.“

Die ermittelten Sicherheitsabstände sind aber geeignet, über entsprechende Gefährdungsbeurteilungen den Einsatz von DLS an Hochspannungsanlagen speziell für einzelne Feuerwehren zu regeln. Die Verwendung im Bereich von Bahnanlagen mit einer Betriebsspannung bis 15 kV wäre nach den vorliegenden Messergebnissen denkbar. Aufgrund der grundsätzlichen Bedenken der DKE wurde jedoch auf den geplanten Feldversuch an einem unter 15.000 Volt stehenden Fahrdrabes der Deutschen Bahn AG verzichtet.

1.4.2 Brandbekämpfung an Transformatoren unter Anwendung verschiedener Löschmittel und Einsatztaktiken

Vor dem Hintergrund des Brandes eines Transformators in der Nähe von Abu Dhabi (Vereinigte Arabische Emirate) im Jahr 2014, dessen Brandbekämpfung über vier Tage dauerte und fast alle Schaumreserven des Landes verbrauchte, sollte untersucht werden, wie sich die verschiedenen Löschmittel DLS, Luftschaum sowie DLS mit Löschpulver bei einem Echtbrand eines Transformators (3D-Brand) verhalten. Im Versuchsaufbau wurde ein eingehauster Transformator in einer 60 Liter Öllache, die ein Überlaufen simulieren sollte, zum Brand gebracht. Ein ebenfalls eingehauster PKW-Reifen, an einer für den Angriffstrupp ungünstigsten Stelle, hatte die Funktion vorhandene Stromleitungen zu simulieren. Der Löschangriff erfolgte bei 135°C Ölspiegeltemperatur.



Abbildung 16: Transformatoren-Brandversuche mit Druckluftschaum. Bild: Alan Ratajczak, BF Ingolstadt, 2017.

Neben einem Vorversuch mit DLS nass, der die Zeiten und Temperaturen bestimmte, wurden zwei Versuche mit Luftschaum (Schwerschaum), zwei Versuche mit DLS nass, zwei Versuche mit DLS trocken, zwei Versuche mit DLS nass und Pulver und ein zusätzlicher Versuch mit Netzwasser durchgeführt.

Alle Versuche wurden mit 130 Litern Wasser-Schaum-Gemisch (WSG) konstant durchgeführt. Im Ergebnis war festzustellen, dass alle Settings in der Lage waren, das Feuer zu löschen, wobei DLS trocken aufgrund der geringen Wurfweite für die Einsatzkräfte die größte Gefahr darstellte. Auch Netzwasser funktionierte, es besteht aber

die Gefahr der Ausdehnung der Einsatzstelle durch Aufschwimmen des brennenden Öls.

Es wird vermutet, dass die Ergebnisse hinsichtlich der Löschwirkung verschiedener Löschmittel, durch den für einen Transformatorbrand dieser Größenordnung relativ hohen Volumenstrom an Löschmitteln verursacht wurden.

Bei den Versuchen kam es auch zur Rückzündung des PKW-Reifens. Die Kombination von DLS nass mit ABC-Löschpulver verhinderte die Rückzündung. Daraus kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Kombination von DLS nass, verbunden mit dem Einsatz von Pulver ideal ist, da die große Wärmemenge durch DLS gebunden wird und die Flammreaktion durch das Pulver unterdrückt wird. Diese Taktik macht auch insbesondere bei KFZ-Bränden Sinn, da das flüssige Löschmittel nicht jede Stelle treffen kann. Der Realbrand eines Großtransformators in Berlin-Marzahn während der Projektzeit, der mittels DLS schnell und ohne großen Löschmittelverbrauch gelöscht werden konnte, bestätigte augenscheinlich die Versuchsergebnisse.

1.5 AP 06 „Bemessungs- bzw. Beschaffungskriterien für öffentliche Feuerwehren“

Das AP zielte darauf ab, Handlungsempfehlungen für die Beschaffung und die Auswahl von Druckluftschaumanlagen, deren technische Abnahme und der Wartung und Prüfung solcher Anlagen anzubieten.

Auf der Basis der Erfahrung mit der Beschaffung und dem Einsatz von DLS-Anlagen sowie den im Projekt durchgeführten Tests, Gesprächen mit Experten und Auswertungen von Fragebögen hat sich die Höhe des Förderstroms einer DLS-Anlage als wichtiges Kriterium herausgestellt. Der Förderstrom ist eine der entscheidenden Größen für die Leistungsfähigkeit von DLS-Anlagen und die Wirksamkeit des Löschangriffs. Insbesondere bei Großbränden ist ein hoher Förderstrom für eine erfolgreiche Löschwirkung maßgeblich.

Um eine einfache Prüfung der zwei Garantiepunkte gemäß Tabelle 3 (Klassifizierung von DLS-Anlagen) der Norm DIN EN 16327:2014-07 zu ermöglichen, wurde im Rahmen des Projektes die vorliegende Handlungsempfehlung in Form von zwei Teststufen entwickelt. Die Teststufe 1 ergibt sich aus der Norm, Teststufe 2 wurde im Projekt ergänzt. Diese Tests ermöglichen, Abweichungen, die eine schlechte Qualität des DLS verursachen und damit eine nicht ausreichende Löschwirkung zur Ursache haben, frühzeitig zu erkennen. Darüber hinaus können Abweichungen langfristig zu kostenintensiven Schäden oder sogar dem Ausfall der DLS-Anlage führen. Es ist vorgesehen die Handlungsempfehlung in Form eines Merkblattes der vfdb über das Referat 13 (Forschung) zu veröffentlichen. Sie befindet sich im Abstimmungsprozess.

1.6 AP 07 „Ausbildung und Handlungsempfehlungen“

1.6.1 Ausbildungskonzept, Lehrmaterial und Handlungsempfehlungen

Unter Federführung der vfdb waren auf der Basis der Erkenntnisse aus der Literatur- und Internetrecherche, den Fragebögen und den Versuchen Schulungsmaterialien für den Einsatz von DLS zu erarbeiten. Diese Lehrmaterialien sollen den Landesfeuerweherschulen für die Aus- und Fortbildung zur Verfügung gestellt werden. Die BFW hat in diesem AP taktische Grundsätze entwickelt, die als Handlungsempfehlungen zusammengefasst wurden. Die erstellten Handlungsempfehlungen berücksichtigen die Versuchsergebnisse der Arbeitspakete AP 03 und AP 05 und befassen sich mit Bränden in Gebäuden, PKW-Bränden und Industriebränden. Zu den einzelnen Kapiteln wurden Standard Operating Procedure (SOP, dt. Standardvorgehensweisen) für die praktische Anwendung hinterlegt.

Außerdem wurde dem Projektpartner vfdb umfangreiches Material in Form von Videos, Bildern, Arbeitsergebnissen sowie Materialien die in Berlin für Fortbildungen genutzt werden, übergeben. Im ständigen Kontakt mit der vfdb wurde als erstes bei einem Arbeitstreffen in Berlin gemeinsam ein Gesamtkonzept für die Schulungsunterlagen entwickelt. Darauf aufbauend wurden von der vfdb Teilkonzepte erarbeitet. Diese Konzepte wurden in einem iterativen Prozess fachlich begutachtet und Hinweise zur weiteren Gestaltung gegeben. Abschließend gab es zwei Arbeitstreffen in Hamburg, in denen die neuen Ausbildungsunterlagen besprochen und für eine Pilotschulung finalisiert wurden. In der Pilotschulung Ende November 2018 am Institut der Feuerwehren in Münster wurden die erstellten Lehrmaterialien erprobt und evaluiert. Die BFW nahm als Korreferent an dieser Pilotschulung teil. Insgesamt wurden vier Ausbildungsunterlagen erstellt.

- Löschwirkung von DLS
- Einsatz von DLS
- Technische Eigenschaften
- Besondere Einsatzszenarien

1.6.2 Konzeption einer Druckluftschaum-Brandübungsanlage

Auf dem Gelände der Berliner Feuerwehr- und Rettungsdienst-Akademie (BFRA) werden Brandübungsanlagen betrieben, die regelmäßig weiterentwickelt werden und für den Übungseinsatz von DLS genutzt werden können. Im Zuge dieser Weiterentwicklungen wurde eine Druckluftschaum-Brandübungsanlage (DLS-Arena) errichtet. „Die DLS-Arena ist ein kompletter Neuentwurf einer holzbefeuerten Brandübungsanlage. Umfangreiche Recherchen haben ergeben, dass die BFRA mit dieser Anlage über ein Alleinstellungsmerkmal verfügt.“

Bei der „Wassertaktik“ wurde der Fokus der Ausbildung auf die Rauchgaskühlung gelegt. Dieser Schwerpunkt verändert sich in der Ausbildung mit Druckluftschäum auf die Oberflächenkühlung. In ersten Versuchen wurde schnell deutlich, dass die Stahlwandungen einer herkömmlichen holzbefeuerten Brandübungsanlage nicht das Realbild einer Zimmerbrandbekämpfung abbilden kann. Stahl, als guter Wärmeleiter, ist in der Lage seine gespeicherte Wärme sehr schnell an den aufgebracht DLS abzugeben. Der DLS verdampft schlagartig an den heißen Metalloberflächen und verzerrt damit das Ergebnis des Löscherfolges.

Die Übungsanlage wurde als L-förmige Containeranlage errichtet, die von innen mit unterschiedlichen mineralischen Oberflächen ausgekleidet wurde. Die verbauten Seitenwände lehnen sich an den Wohnungsbau an und wurden aus Ziegel-/Klinkerstein, Betonfertigelementen und Gipskarton in Leichtbauweise errichtet. Die mineralische Deckenkonstruktion ist der größten Hitze- und Kälteschockbelastung ausgesetzt und besteht aus mehrlagigen Zementfaserverbundplatten, dessen Unterschicht als „Opferschicht“ ausgeführt wurde. Die Opferschicht ist in Segmente unterteilt und wird wartungsfreundlich lediglich durch Stahlprofilträger gehalten. Diese Konstruktion erleichtert einen Austausch beschädigter Elemente und verkürzt die Revisionszeiten. Der Brandraum wurde mit Betonleichtbausteinen gemauert, mit Kalziumsilikatplatten und Schamottsteinen ausgekleidet.

Eine von innen und außen mechanisch fernbedienbare Brandraumtür trennt den Brandraum vom Übungsraum und steuert die Wärmeabgabe in den Übungsbereich. Über eine Zugangstür innerhalb der Brandanlage wird der Angriff begonnen. Der Vorraum vor der Zugangstür stellt den Treppenraum dar. An der Zugangstür werden unterschiedliche Türprozeduren, auch unter Einbeziehung eines mobilen Rauchverschlusses, unterrichtet. Die Tür ist so konzipiert, dass ein gewaltsamer Zutritt zum Übungsraum mit Hilfe einer Ramme oder eines Multi-Tools geübt werden kann. Ein Einschub in der Tür ermöglicht zudem das wiederholte Anbohren einer Tür, um ggf. über eine Lanze Löschmittel in den Übungsraum abzugeben.

Der Übungsraum verfügt über zwei Fenster. Einsatzkräfte vor der Brandübungsanlage können über das Rauch- und Flammenbild am Fenster erkennen, in welcher Brandphase sich das Feuer befindet. Das Erkundungsergebnis entscheidet über die Belüftungstaktik und über abgestimmte Außen- und Innenangriffstaktiken. Zwischenzeitlich kann der Übungsraum mit klappbaren Metallwänden ausgestattet werden, um die Übungsumgebung zu verändern.

Um den akademischen Anspruch der BFRA gerecht zu werden, können die Ergebnisse aller Brandbekämpfungs- und Ventilationsübungen über eine Mess- und Videotechnik erfasst und ausgewertet werden. Dazu wurden im Übungsraum eine Vielzahl von Thermosensoren, CO-Messgeräte und Wärmebildkameras verbaut. Ein spezieller Rechner fasst die Temperatursenkungen zusammen und stellt sie in Verhältnis mit der abgegebenen Löschmittelmenge pro Zeiteinheit. Aus den Ergebnissen lassen sich

Rückschlüsse aus der Effizienz eines Löschangriffes schließen. Ziel ist es, eine Strahlrohrtechnik und eine Löschmittelabgabemenge mit dem höchsten Wirkungsgrad zu finden. Sprich die höchste Temperatursenkung bei geringster Löschmittelabgabe innerhalb der kürzesten Zeiteinheit. Diese Effizienzsteigerung soll Löschmittelschäden und unnötige und gefährliche Wasserdampfbildungen vermeiden, Ressourcen schonen und bestmögliche Sicherheit für den Angriffstrupps gewährleisten. Zusätzlich steuert der Rechner eine Signallichtanlage, die im Übungsraum bodennah verbaut wurde. Die Ampellichter (rot, gelb, grün) signalisieren dem Strahlrohrführer während der Löschmittelabgabe die Wirkungsweise seines Handelns. Der Strahlrohrführer kann mit Hilfe der Signallichter sein Ergebnis bereits während der Übung korrigieren und verbessern. Zusätzlich erfolgt außen eine Parallelanzeige.



Abbildung 18: Ampel zur Wirkungsweise der Löschmittelabgabe. Berliner Feuerwehr, 2019.

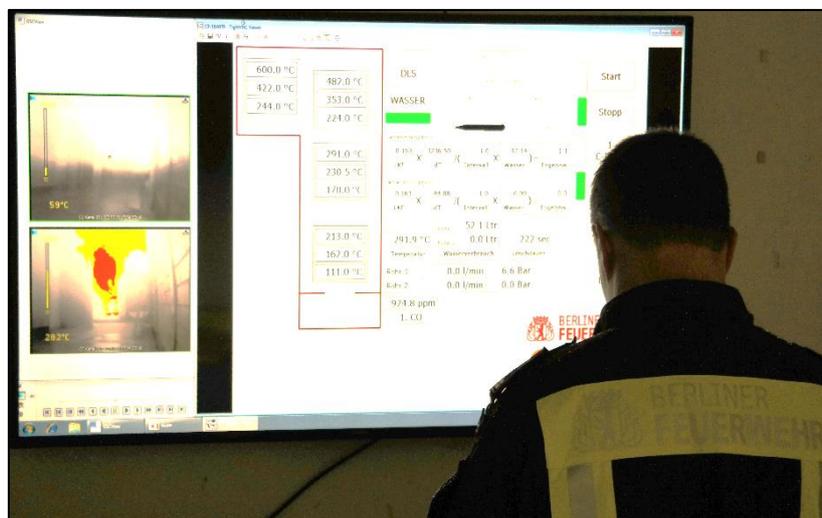


Abbildung 19: Videoserver zur Auswertung der Vorgehensweise. Berliner Feuerwehr, 2019.

Die Videotechnik mit Wärmebildkameras erlaubt über einen speziellen Videoserver das Vorgehen des Angriffstrupps und seine Strahlrohrtechnik auszuwerten. Zeitverzögert kann die Videoaufnahme, bei fortwährender Aufzeichnung anderer Übungen, den Lehrgangsteilnehmer vorgeführt werden, um seine Strahlrohrführung kontinuierlich zu verbessern.

Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, wurde der Rechner mit der neu konzipierten Druckluftschaumanlage vernetzt. Die Druckluftschaumanlage kann über vier Abgänge einzeln oder kombiniert Wasser, Netzmittel oder Druckluftschaum als Löschmittel zur Verfügung stellen. Eine intelligente Steuerung erkennt die Anzahl der geöffneten Strahlrohre und passt die Anlage individuell darauf an. Über hydromagnetische Durchflussmengenzähler werden über eine Datenleitung die Werte der ermittelten Löschmengen an den Rechner weitergegeben. Alle Kennlinien für die Löschmittelabgabe sind frei einstellbar und lassen unterschiedliche Betriebszustände zu. Die Druckluftschaumanlage ist über ein Touchscreen fernbedienbar. Die Bedienoberfläche

ist logisch unterteilt und stellt nur Schaltflächen dar, die für den jeweiligen Betriebszustand notwendig sind. Um die Geräuschemission während der Ausbildung gering zu halten, befindet sich die Druckluftschaumanlage in einem Nebenraum. Für den Betrieb der Übungsanlage wurde eine entsprechende Gefährdungsbeurteilung erstellt. Diese beinhaltet alle erforderlichen Maßnahmen.

Die Tätigkeit als Realbrandtrainer ist körperlich sehr anstrengend. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Konzentrationsfähigkeit nachlässt. Damit es hier nicht zu einem Unfall kommt, wurde ein Sicherheitskoordinator eingeführt. Seine Aufgabe ist es, die Übungsabläufe zu beobachten, eventuell korrigierend einzugreifen oder die Übung aus Sicherheitsgründen abubrechen. Des Weiteren achtet er auf die Ruhephasen und auf die Zuführung von ausreichend Flüssigkeit.

Im Jahr 2014 kam es bei einer bestehenden Übungsanlage zu einer Explosion. Ursache war eine unkontrollierte Ansammlung von Kohlenstoffmonoxid in einem Zwischenraum. Bei der DLS-Arena wurden bereits in der Planungsphase unterschiedliche Schadensszenarien durchgespielt und mögliche Gegenmaßnahmen entwickelt. Die Klinkerwände wurden durch Stahlträger in mehrere Felder unterteilt. Dadurch wird sichergestellt, dass die Wand nicht als Ganzes auf einmal kollabieren kann. Verbindungselemente zwischen den Innenwänden und der Containeraußenhaut sind entweder erheblich überdimensioniert oder durch verschweißen und verschrauben redundant ausgeführt.

Die Bildung von Kohlenstoffmonoxid und deren Verdrängung in Hohlräume kann nicht verhindert werden. Daher sind sämtliche Hohlräume großzügig hinterlüftet, sodass eine Zirkulation mit der Außenluft stattfindet. Des Weiteren wurden alle geschlossenen Stahlkonstruktionsteile (zum Beispiel Quadratrohr) von außen angebohrt, sodass ein Druckausgleich stattfinden kann. Alle nach außen führenden Türen schließen federbelastet und lassen sich ohne die Betätigung eines Mechanismus öffnen. Sollte es zu einer Rauchgasdurchzündung kommen, dienen die Türen gleichzeitig als Druckentlastungsflächen.

Problematisch ist, dass die Containerbreite, gepaart mit den Einbauten, zu einem Tunnelleffekt führt. Mittelfristig ist geplant, den Übungsraum durch einen weiteren Container zu verbreitern, um diesem Effekt entgegenzuwirken. Für eine größere Raumhöhe wird in künftigen Anlagen die Verwendung von high cube Containern empfohlen.

Des Weiteren muss auf die Konstruktion der Brennkammer geachtet werden. Die gemauerte Brennkammer hat den Belastungen nicht standgehalten. Im Rahmen von Revisionsarbeiten erfolgte eine Neuentwicklung aus Rohrmaterial (DN 2.000) mit entsprechenden Stahlanbauteilen. Zudem hat sich die Trockenbauwand nicht bewährt. Diese wurde durch eine weitere Ziegelwand ersetzt.

Nach dem Durchlauf von 120 Realbrandübungsdurchgängen pro Jahr, aufgeteilt auf 200 Ausbildungstage und 1.200 Atemschutzgeräteträger, kann insgesamt ein positives Zwischenfazit gezogen werden. Das technische und didaktische Konzept, gepaart

mit dem Sicherheitskonzept, hat sich bewährt. Die geschulten Taktiken, die Strahlrohrführung und der kombinierte Innen- und Außenangriff, werden nachweislich im Einsatzdienst angewendet. Als besonders positiv wird die Nachbereitung des Trainings unter Zuhilfenahme der Infrarotvideoaufnahmen empfunden.

Durch die Entscheidung für eine stationäre Pumpe, werden zu Spitzenzeiten zwei Löschfahrzeuge gespart. Diese stehen dann der regulären Ausbildung zur Verfügung. Durch die umfangreiche Messtechnik bekommt der Lehrgangsteilnehmer über die Ampel sofort ein Feedback. Langfristig ist geplant, dass die Daten für eine anonyme Qualitätskontrolle ausgewertet werden. Richtungsweisend ist die Videoauswertung. Das subjektive Empfinden, auch von erfahrenden Einsatzkräften, stimmt nicht immer mit dem geleisteten überein. Dieses Verfahren wird zukünftig auch bei anderen Ausbildungsanlagen angewendet.

Die Übungsanlage wurde im Wesentlichen in Eigenleistung durch die Mitarbeiter der BFRA errichtet. Insgesamt sind die DLS-Arena, die innovative Technik sowie das Ausbildungskonzept als erfolgreich zu bewerten.“⁴

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Seitens der BFW wurden wissenschaftliche Mitarbeiter/-innen für die Projektlaufzeit eingestellt. Zusätzlich wurde themenbezogen die Expertise von Experten durch die Vergabe von Aufträgen, bspw. zur Erstellung von Berichten, mit einbezogen.

Neben den Personalkosten entstanden mit Abstand die höchsten Ausgaben für die Durchführung der Brandversuche.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Förderung war notwendig, da die erforderlichen Mittel durch den Berliner Landeshaushalt nicht zur Verfügung standen und die Teilnahme an dem Forschungsvorhaben sonst nicht leistbar gewesen wäre. Die Begleitung und Durchführung von Forschung ist weder als originäre Aufgabe der BFW vorgesehen, noch im Rahmen der Grundfinanzierung mit den zur Verfügung stehenden Mitteln möglich. Durch die Teilnahme am Forschungsprojekt AERIUS konnte die BFW, die vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen über das DLS-Verfahren und die Anwendung des Löschmittels, wissenschaftlich überprüfen und feuerwehrtechnisch bewerten und weiterentwickeln. Dar-

⁴ Kühl, W.-J. & Vollbrecht, T. (2019) Neue Realbrandversuche bei der Berliner Feuerwehr—Brandübungsanlage für die Ausbildung mit Druckluftschäum. In: Brandschutz Deutsche Feuerwehr-Zeitung. Hrsg: Verlag W. Kolhammer 2/2019. Stuttgart. ISSN 0006-9094

über hinaus wurden neue, wissenschaftlich belegte, Erkenntnisse gewonnen. Die Verwendung der zur Verfügung gestellten Mittel erfolgte nach den Grundsätzen der Wirtschaftlichkeit und des verantwortungsvollen Umgangs mit vorhandenen Ressourcen.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die erarbeiteten Forschungsergebnisse stoßen auf großes Interesse bei anderen Feuerwehren, was sich z.B. durch zahlreiche Anfragen bei besuchten Messen (u.a. zu Vorträgen beim Werksfeuerwehrverband Deutschland und Deutscher Feuerwehrverband (DFV), Anfragen der BF Kopenhagen und BF Augsburg) und anderen Veranstaltungen im In- und Ausland gezeigt hat. Das Referat 5 – Brandbekämpfung – des TWB der vfdb führte im Rahmen seiner Frühjahrstagung 2019 einen Thementag zum Forschungsprojekt AERIUS durch. Zahlreiche Anfragen erreichen die Berliner Feuerwehr. Die Forschungsergebnisse tragen dazu bei die Löscheffizienz von DLS gegenüber Luftschaum (Schwerschaum), Netzwasser und Wasser positiv zu bewerten. Durch die Umsetzung der Forschungsergebnisse kann die Anwendung und Beschaffung von DLS in Bezug auf Taktik und Technik nachhaltig verbessert werden. Diese Erkenntnisse dienen in einer zweckorientierten Ausbildung der Sicherheit der Einsatzkräfte und helfen komplexe Großschadenslagen zu beherrschen.

5 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der BFW sind während der Durchführung keine Ergebnisse Dritter auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Neben diesem Abschlussbericht sind die Ergebnisse des Forschungsprojektes seitens der BFW in folgenden Publikationen veröffentlicht worden.

Jahr	Veröffentlichung
2016	Berliner Feuerwehr: Vorstellung des Forschungsprojektes AERIUS „Alternatives Löschmittel Druckluftschaum – komplexe Großschadenslagen vermeiden. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/ Zugriff am 22.07.2019
2017	R. Erdt, T. Knorr: Vorstellung des Forschungsprojektes AERIUS In: Berliner Feuerwehr (Hrsg.): Jahresbericht 2016 der Berliner Feuerwehr, S. 77.

2017	L. Orlik: Wo hakt es bei Druckluftschaumeinsätzen? Auswertung des Forschungsprojektes AERIUS zu CAFS-Einsätzen in Berlin. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/Forschung/aerius/AERIUS_Auswertung_CAFS_Einsaetze_Berlin.pdf . Zugriff am 11.07.2019
2017	W. Gräßling, D. Oberhagemann, S. Kaczmarek: Das Ende der Schaumparty: AERIUS. Ein Projekt um die Wirkweise von Druckluftschaum zu erforschen. In: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb) (Hrsg.): Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz; Heft 1/2017, S. 40-41.
2017	R. Erdt, T. Knorr: „The efficiency of CAFS in comparison to other extinguishing agents“ Vortrag im Rahmen des National Congress Fire Safety & Science am 08. Und 09. November 2017 am Institute for Safety (IFV) in Arnheim, Niederlande.
2019	N. Racher, T. Nullmeyer: Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen. Testreihe: Raumbrandversuche zur Untersuchung der Löscheffekte des Druckluftschaumverfahrens und zur Verdrängung des Sauerstoffs. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/
2019	U. Braun: Brände an Hochspannungsanlagen & Öl-Transformatoren. Testreihe: Brandbekämpfung an Transformatoren unter Anwendung verschiedener Löschmittel und Einsatztaktiken. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/
2019	U. Braun: Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen. Testreihe: Brand- und Löschversuche an Autoreifenstapeln zur Erprobung verschiedener Löschmittel und Einsatztaktiken. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/
2019	U. Braun: Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen und Brand- und Löschversuche an Bemessungsbränden: Testreihe: Dokumentation von Löschversuchen mit einer Highspeed Kamera. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/
2019	R. Prell, S. Kaczmarek, W. Gräßling: Ausgangsszenario. Befragung: Stichprobenartige Expertenbefragung von Einsatzkräften in Feuerwehren mit Compressed Air Foam System Einsatzerfahrung in Deutschland. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/
2019	Berliner Feuerwehr: Handlungsempfehlungen: Entwicklung taktischer Grundsätze für den Einsatz von Druckluftschaum beim Brand im Gebäude, beim Pkw-Brand und beim Industriebrand. Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/

Jahr	Geplante Veröffentlichung
2019	A. Majewski, W. Gräfling: Ausgangsszenario. Auswertung der Fragebögen zu CAFS-Einsätzen. Voraussichtlich Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/
2019	Berliner Feuerwehr: Brandszenarien mit ungewöhnlichen Brandstoffen. Testreihe: Brand- und Löschversuche mit mehreren handelsüblichen aufgestapelten Lithium-Ionen-Batterien. Voraussichtlich Homepage der Berliner Feuerwehr https://www.berliner-feuerwehr.de/forschung/aerius/

Tabelle 1: Liste der Veröffentlichungen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Versuchsaufbau Autoreifenbrände. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.	10
Abbildung 2	Löscharbeiten mit Druckluftschäum. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.	10
Abbildung 3	Darstellung der Verschäumungszahl gegenüber der Brandbekämpfungszeit.	11
Abbildung 4	DLS Applikation auf einen brennenden KFZ-Reifen, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.	12
Abbildung 5	DLS Applikation auf erwärmte Glasscheibe, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.	14
Abbildung 6	Netzmittel Applikation auf erwärmte Glasscheibe, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.	14
Abbildung 7	Wasser (Vollstrahl) Applikation auf erwärmte Glasscheibe, aufgenommen mit einer High-Speed-Kamera. Bild: OvGu, 2017.	15
Abbildung 8	Brandraum vor Brand, Bild: Berliner Feuerwehr, 2016.	16
Abbildung 9	Brandraum nach Zündung. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016	16
Abbildung 10	Brandraum im Vollbrand. Bild: Berliner Feuerwehr, 2016	16
Abbildung 11	Der Brandraumcontainer war in Brennkammer, Versuchsraum und Eingangsraum gegliedert.	17
Abbildung 12	Schematische Darstellung der Messelemente. Grüne Wolke: Indikator für Standort des Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers. Roter Punkt: Indikator für Standort der RGB-Kamera und Wärmebildkamera der Firma FLIR.	18
Abbildung 13	Versuchsaufbau. Ermittlung von Sicherheitsabständen. Bild: Berliner Feuerwehr.	21
Abbildung 14	DLS Applikation auf ein unter Hochspannung stehendes Metallgitter. Bild: Berliner Feuerwehr, 2017.	21
Abbildung 15	Oszillogramm vom Versuch 12.	21
Abbildung 16	Transformatoren-Brandversuche mit Druckluftschäum. Bild: Alan Ratajczak, BF Ingolstadt, 2017.	23
Abbildung 17	Grundriss der CAFS-Arena nach Vollbrecht, T. (2019).	26
Abbildung 18	Ampel zur Wirkweise der Löschmittelabgabe. Berliner Feuerwehr, 2019	28
Abbildung 19	Videoserver zur Auswertung der Vorgehensweise. Berliner Feuerwehr, 2019	28

Diagramm 1	Verlauf der Wasserdampfbildung bei der Anwendung von reinem Wasser in % der absoluten Luftfeuchte über der Zeit in Sekunden. Bei Wasser erfolgt ein kurzer steiler Anstieg, der schnell wieder abfällt.	19
Diagramm 2	Verlauf der Wasserdampfbildung bei der Druckluftschäumenwendung in % der absoluten Luftfeuchte über der Zeit in Sekunden. Bei Druckluftschäumen erfolgt ein Anstieg der Kurve, der hohe Wasserdampfgehalt hält über einen deutlich längeren Zeitraum an.	19
Tabelle 1	Liste der Veröffentlichungen	33