

Untersuchungen zur Bestimmung der Löschwirkung und -effizienz von Druckluftschäum

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von M.Sc., Tim Rappsilber
geb. am 03.01.1990 in Herzberg/Elster

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause
Prof. Dipl.-Chem. Dr. rer. nat. Roland Goertz
Dr. rer. nat. Simone Krüger

eingereicht am 07.01.2021
Promotionskolloquium am 18.06.2021

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Löscheffizienz von Druckluftschäum (engl.: Compressed Air Foam, CAF) bei der Anwendung auf definierte Brände, vor allem solche, die mit Wasser schwer zu löschen sind, untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen war die experimentelle Bestimmung physikalischer Größen, welche den Löscherfolg bzw. die Löscheffizienz beschreiben. Diese Bestimmung erfolgte anhand von Labortests und Löschversuchen in unterschiedlichen Maßstäben.

Unverschäumte Lösungen aus Wasser und Class-A-Schaummitteln, als Basis für die Erzeugung von CAF, wurden in Anlehnung an die EN 1772 auf ihr Tauchnetzvermögen und gemäß DIN 55660-6 auf ihre dynamischen Kontaktwinkel untersucht. Mit diesen Versuchen konnte eine gesteigerte Netzfähigkeit der Lösung durch eine Erhöhung der Schaummittelzumischrate und folglich ein Herabsetzen der Oberflächenspannung des Premixes herausgestellt werden.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen folgten Löschversuche mit Wasser, Netzwasser und CAF an Feststoffbemessungsbränden. Dazu wurde eine spezielle Mischbrandkrippe mit hohem Kunststoffanteil und einer komplexen Geometrie für hohe Ansprüche an die zu testenden Löschmittel entwickelt. Parallel dazu ergänzte eine Versuchsreihe mit 5A-Holz-krippenbränden in Anlehnung an die DIN EN 3-7 die Reihe der getesteten Löschmittel um strahlrohrverschäumten Schaum. Beide Versuchsreihen ergeben ein deutliches, übereinstimmendes Bild über die Wirksamkeit der einzelnen Löschmedien. Darin sind Wasser und Netzwasser im unteren Wirksamkeitsbereich einzuordnen. In Abhängigkeit ihrer Strahlform verfügen sie über vergleichsweise geringe bis mittlere Kühlkapazitäten.

Strahlrohrverschäumter Schaum verstopfte die Ventilationskanäle der Krippen und drang deshalb nur schlecht bis ins Krippeninnere vor. Daher konnte er seine Wirkung unter Versuchsbedingungen nicht vollständig entfalten, weshalb seine Löscheffizienz mit der des Netzwassers vergleichbar ist.

Am effizientesten ist nass- bzw. medium verschäumter CAF mit einer Schaummittelzumischrate von 0,5 %. Eine Erhöhung der Schaummittelzumischrate auf 1,0 % bedingte in den Laborversuchen zwar eine weitere Steigerung der Netzfähigkeit der Wasser-Schaummittelgemische, wirkte sich aber weder in der Bekämpfung von Feststoffbränden noch in der Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden gemäß DIN EN 1568-3 positiv auf das Löschergebnis aus. Vielmehr war es die Verschäumungszahl des Löschmittels, welche Einfluss auf die Löscheffizienz und Stabilität des Schaumes ausübte. Die Untersuchungen ergeben, dass bei der Brandbekämpfung eine Verschäumungszahl im Bereich von 5 bis 9, idealer Weise 7, den höchsten Wirkungsgrad erreicht. Sowohl Wassergehalt, Fließfähigkeit

und Schaumstabilität sind in diesem Bereich optimal für eine Brandbekämpfung von festen und flüssigen Brandstoffen.

Auch ungewöhnliche Brandszenarien, wie Fließbrände bei Transformatorenbränden oder Reifenstapelbrände mit eingeschlossenen Glutnestern, konnten mit CAF erfolgreich bekämpft werden.

Die Herstellung von CAF kann neben Leitungs- bzw. Brunnenwasser auch mit Meerwasser erfolgen. Sowohl Feststoff- als auch Flüssigkeitsbrände lassen sich mit Meerwasser-CAF löschen. Die Versuche zeigten, dass dabei lediglich geringe Einbußen in der Lösch- und Rückbrandzeit der Schaumdecke zu erwarten sind.

Abstract

The extinguishing efficiency of compressed air foam (CAF) applied to defined fires, especially those that are difficult to extinguish with water, was investigated within the scope of this dissertation. An essential part of the investigation was the experimental determination of physical quantities which describe the extinguishing success or its efficiency. This determination was carried out on the basis of laboratory tests and extinguishing tests in different scales.

The basis for the generation of CAF were unfoamed solutions consisting of water and Class A foaming agents which were examined in accordance with EN 1772 with regard to their wetting power by immersion and in accordance with DIN 55660-6 with regard to their dynamic contact angles. These tests concluded that an increased wetting power of the solution was attainable by increasing the admixing rate of the foam concentrate and consequently reducing the surface tension of the premix.

In the further course of the investigation, extinguishing tests with water, water with foaming agent, and CAF on solid design fires followed. For this purpose, a special mixed-material burning crib with a high plastic content and a complex geometry was developed for high demands on the extinguishing agents to be tested. In parallel, a series of tests with 5A wood crib fires in accordance with DIN EN 3-7 supplemented the series of tested extinguishing agents with nozzle-aspirated foam (NAF). Both test series yielded a clear, consistent image of the effectiveness of the individual extinguishing media. Water and water with foaming agent are classified in the lower effectiveness range. Depending on their jet type, they have comparatively low to medium cooling capacities.

NAF blocked the ventilation channels of the cribs and therefore did not penetrate very far inside the cribs. As a result, NAF could not fully develop its effect under the tested conditions, which is why its extinguishing efficiency is comparable to that of water with foaming agent.

The most efficient is wet or medium foamed CAF with a foam concentrate admixing rate of 0.5 %. An increase in the admixing rate to 1.0 % caused a further increase in the wetting capacity of the water/foam concentrate mixtures in laboratory tests but did not have a positive effect on the extinguishing result, neither in fighting solid fires nor in fighting liquid fires according to DIN EN 1568-3. Rather, it is the foaming index of the extinguishing agent which influences the extinguishing efficiency and stability of the foam. Investigations have shown that a foaming index in the range of 5 to 9, ideally 7, achieves the highest efficiency when fighting fires. Water content, flowability and foam stability are optimal in this range for firefighting of solid and liquid fire materials.

Even unusual fire scenarios, such as flowing liquid fires in transformer fires or tire pile fires with enclosed embers, can be successfully extinguished with CAF.

CAF can be produced using tap or well water as well as sea water. Both solid and liquid fires can be extinguished with seawater CAF. The tests showed that only slight losses in the extinguishing and burn-back resistance of the foam blanket are to be expected.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Verzeichnis von Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	X
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Begriffsdefinitionen	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Fragestellung.....	1
1.1.1 Notwendigkeit der Untersuchungen von Compressed Air Foam	1
1.1.2 Ziel der Arbeit	2
1.2 Stand der Forschung.....	3
1.2.1 Brandkrippen zur Bestimmung der Löschmitteleffizienz	3
1.2.2 Zusammensetzung und Wirkungsweise der Druckluftschäume.....	4
1.2.3 Gängige Schaummittelkonzentrate und deren Umweltverträglichkeit	7
1.2.4 Richtlinien und Leitfäden zum Umgang mit CAF.....	9
1.2.5 Systembeschreibung - CAFS	10
1.2.6 Verwendung von CAF mit herkömmlichen Druckschläuchen und Armaturen	13
2 Methoden	17
2.1 Bestimmung der Netzfähigkeit einer Wasser-Schaummittellösung in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung.....	17
2.1.1 Bestimmung des Tauchnetzvermögens.....	17
2.1.2 Kontaktwinkelanalyse.....	19
2.2 Bestimmung der Effizienz von CAF bei der Bekämpfung von Feststoffbränden im Vergleich zu herkömmlichen Löschmitteln.....	20
2.2.1 Outdoor-Mischkrippenbandversuche	24
2.2.2 Indoor-Mischkrippenbrandversuche.....	28
2.2.3 Indoor-Holzkrippenbrandversuche.....	30

2.3	Bestimmung der Effizienz von CAF bei der Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden im Vergleich zu herkömmlichen Löschmitteln	34
2.3.1	Outdoor-Heizöllachenbrandversuche	34
2.3.2	Indoor-Heptanlachenbrandversuche.....	36
2.4	Untersuchung der Anwendbarkeit von CAF bei ungewöhnlichen Brandszenarien	38
2.4.1	Reifenbrandversuche	38
2.4.2	Transformatorenbrandversuche.....	41
3	Datenanalyse.....	45
3.1	Bestimmung des Tauchnetzvermögens	45
3.2	Kontaktwinkelanalyse	47
3.3	Outdoor-Mischkrippenbrandversuche	51
3.4	Indoor-Mischkrippenbrandversuche	57
3.5	Indoor-Holzrippenbrandversuche	61
3.6	Outdoor-Heizöllachenbrandversuche	69
3.7	Indoor-Heptanlachenbrandversuche	73
3.8	Reifenbrandversuche.....	77
3.9	Transformatorenbrandversuche	81
4	Fehleranalyse	87
4.1	Methodische Fehler.....	87
4.1.1	Versuchsplanung und -durchführung	87
4.1.2	Verfremdung der Messdaten durch Verunreinigungen	90
4.1.3	Messgeräteabweichung.....	91
4.1.4	Datenaufbereitung und Datenauswertung.....	93
4.2	Zufällige Fehler	95
4.2.1	Technische Defekte	97
4.2.2	Witterungseinflüsse.....	97
4.2.3	Beobachtereinflüsse	100
4.3	Gesamtfehler.....	101

5	Diskussion.....	103
5.1	Zusammenfassung.....	103
5.1.1	Löscheffizienz in Abhängigkeit von Schaummittel und Zumischrate	103
5.1.2	Löscheffizienz in Abhängigkeit der Verschäumungszahl.....	105
5.1.3	Löscheffizienz in Abhängigkeit der zur CAF-Herstellung verwendeten Wasserart	107
5.1.4	Auswirkungen der Strahlform auf die Löscheffizienz bei Krippenbränden.....	108
5.2	Limitierung der Untersuchungsergebnisse.....	109
5.3	Schlussfolgerungen.....	111
5.4	Ausblick.....	113
	Literaturverzeichnis	115

Verzeichnis von Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

A	Fläche	m^2
c	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
\bar{C}	mittlere Konzentration	ppm
C_{max}	maximale Konzentration	ppm
d	Durchmesser	m
d_i	Innendurchmesser	m
F_A	Auftriebskraft	N
F_G	Gewichtskraft	N
h	Höhe	m
H_i	Materialheizwert	MJ/kg
\bar{H}_K	Heizwert einer Krippe	MJ/kg
\bar{H}_{Zi}	Heizwert eines Zimmers, gemittelt	MJ/kg
L_D	Limit of Detection	ppm
L_Q	Limit of Quantification	ppm
m	Kurvenanstieg	$kW/m^2, ^\circ C/s$
m_i	Massenanteil	$\%$
m_k	Krippenmasse	kg
\dot{m}''	spezifische Abbrandrate	$kg/(m^2 s)$
$\overline{\dot{m}_{vb}}$	mittlere Abbrandrate in der Vollbrandphase	kg/s
\dot{Q}_{rad}	Wärmestrahlung	kW/m^2
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate	MJ/s
r	Korrelationskoeffizient	<i>o. D.</i>
R_z	Oberflächenrauheit	μm
s	Distanz	m
t	Zeit	s
$u(y)$	Messunsicherheit	$^\circ C, s, MW, \dots$
$U(y)$	Gesamtfehler	$\%$
v_p	Pumpgeschwindigkeit	ml/Std
V	Volumen	l
\dot{V}	Volumenstrom	l/min
\dot{v}	spezifischer Volumenstrom	$l/(min \cdot MW)$
X		

VZ	Verschäumungszahl	<i>o. D.</i>
\overline{VZ}	mittlere Verschäumungszahl	<i>o. D.</i>
W	Wärmemenge	<i>MJ</i>
y	Messwert	$^{\circ}C, s, MW, \dots$
\bar{y}	arithmetisches Mittel der Messwerte	$^{\circ}C, s, MW, \dots$
α	Kontaktwinkel	$^{\circ}$
γ	Oberflächenspannung	<i>mN/m</i>
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$
$\bar{\vartheta}$	mittlere Temperatur	$^{\circ}C$
ϑ_{min}	minimale Temperatur	$^{\circ}C$
ρ_i	Materialdichte	<i>g/cm³</i>
σ	Standardabweichung	<i>s, $^{\circ}C/l, ppm$</i>
σ_{max}	maximale Standardabweichung	$\%$
$\bar{\sigma}$	mittlere Standardabweichung	$\%$
σ_L	Oberflächenenergie Flüssigkeit	<i>J/m²</i>
σ_S	Oberflächenenergie Festkörper	<i>J/m²</i>
σ_{SL}	Grenzflächenenergie zw. Flüssigkeit und Festkörper	<i>N/m</i>
Σ	Summe	<i>o. D.</i>
χ	Verbrennungseffektivität	<i>o. D.</i>
\emptyset	Mittelwert	<i>s, $^{\circ}, \%$, ...</i>

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AFFF	Aqueous Film Forming Foam (dt.: wasserfilmbildender Schaum)
AR	Alcohol Resistant (dt.: Alkoholbeständig)
B	Breite
CAF	Compressed Air Foam (dt.: Druckluftschaum)
CAFS	Compressed Air Foam System (dt.: Druckluftschaumsystem)
DLS	Druckluftschaumanlage
DZA	Druckzumischanlagen
FTIR	Fourier Transform Infrarot

H	Höhe
HRR	Heat release rate (dt. Wärmefreisetzungsrate)
IBC	Intermediate Bulk Container
k.A.	keine Angabe
L	Länge
LF	Löschfahrzeug
MBS	Mehrbereichsschaummittel
MDF	Mitteldichte Holzfaser
NAF	Nozzle-aspirated Foam (dt.: strahlrohrverschäumter Schaum)
o.D.	ohne Dimension
PA6	Polyamid 6
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PFC	Perfluorocarbons (dt.: perfluorierte Kohlenwasserstoffe)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
TE	Thermoelement
VE	Vollentsalztes Wasser
VZ	Verschäumungszahl
WGK	Wassergefährdungsklasse
ZR	Zumischrate

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Feuerwehren in Deutschland mit CAFS-Fahrzeugen im Bestand (Stand: 01/2017)	1
Abbildung 2	Schematische Darstellung eines CAFS gemäß [36]	11
Abbildung 3	Musterdiagramm für den Arbeitsbereich einer Druckzumischanlage DZA 2400 [33]	12
Abbildung 4	Optimierter Versuchsaufbau mit Baumwollpad am Widerhaken zur Bestimmung der Netzfähigkeit verschiedener Premixe (zum Zeitpunkt des Eintauchens)	18
Abbildung 5	Versuchsaufbau der Kontaktwinkelmessungen	20
Abbildung 6	Aufbauplan der neuartigen Mischbrandkrippe	24
Abbildung 7	Versuchsaufbau der Outdoor-Mischkrippenbrandversuche	26
Abbildung 8	Verteilung der Thermoelemente an und in der Mischbrandkrippe	26
Abbildung 9	Versuchsaufbau der Indoor-Mischkrippenbrandversuche	29
Abbildung 10	Versuchsaufbau der Indoor-Holzrippenbrandversuche	31
Abbildung 11	Versuchsaufbau der Outdoor-Heizöllachenbrandversuche	35
Abbildung 12	Versuchsaufbau der Indoor-Heptanlachenbrandversuche	37
Abbildung 13	Reifenbrandversuche - Stapelweise der Brandlast und Verteilung der Thermoelemente	39
Abbildung 14	Transformatorenbrandversuche - Versuchsaufbau und Verteilung der Thermoelemente T01 - T12	43
Abbildung 15	Benetzungszeiten verschiedener Wasserarten mit einer Schaummittelzumischrate von $ZR(X) = ZR(Y) = 0,5 \%$	45
Abbildung 16	Benetzungszeiten von vollentsalztem Wasser mit Zumischraten von $ZR(X) = ZR(Y) = 0,1 - 3,0 \%$	46
Abbildung 17	Dreiphasenkontakt eines auf einer Festkörperoberfläche aufliegenden Flüssigkeitstropfens mit Veranschaulichung der Grenzflächenenergien	47
Abbildung 18	Dynamischer Kontaktwinkel von Tropfen aus vollentsalztem Wasser und dem Schaummittel Y in Abhängigkeit der Zumischrate auf Glas	48
Abbildung 19	Änderung des dynamischen Kontaktwinkels pro 100 ms in einer 0,5%igen Lösung aus vollentsalztem Wasser und Schaummittel Y auf Glas	48
Abbildung 20	Tropfencharakteristik von vollentsalztem Wasser und dem Schaummittel Y in Abhängigkeit der Zumischrate auf Glas	49

Abbildung 21	Kontaktwinkel zwischen Tropfen und Probenplatte zur Zeit $t = 0$ s in Abhängigkeit der Wasserart und der Probenplatte	50
Abbildung 22	Massenänderung und Wärmefreisetzungsrates der Mischbrandkrippe während des ungehinderten Abbrandes [39]	52
Abbildung 23	Charakteristische Temperaturkurven der Mischbrandkrippe während des ungehinderten Abbrandes [39]	52
Abbildung 24	Krippentemperatur während aller Löschvorgänge ohne Mindestlöschaabstand [39]	53
Abbildung 25	Krippentemperatur während der Löschvorgänge mit Mindestlöschaabstand s	54
Abbildung 26	Temperatur im Mittelpunkt der Löschaseite 1 während der Löschvorgänge mit Mindestlöschaabstand s [39]	55
Abbildung 27	Wärmestrahlung während der Löschvorgänge ohne Mindestabstand s	56
Abbildung 28	Wärmestrahlung während der Löschvorgänge mit Mindestabstand s	56
Abbildung 29	Lineare Anpassung der Wärmestrahlung während der Löschvorgänge ohne Mindestabstand s	56
Abbildung 30	Krippentemperatur während der Löschvorgänge [39]	58
Abbildung 31	Temperatur in der Heißgasschicht während der Löschvorgänge	58
Abbildung 32	CO ₂ -Konzentration im Brandraum während der Löschvorgänge [39]	60
Abbildung 33	HCl-Konzentration im Brandraum während und nach den Löschvorgängen [39]	60
Abbildung 34	Krippenkerntemperatur während der Löschvorgänge	62
Abbildung 35	Krippenkerntemperatur während der Löschvorgänge mit Wasser und Netzwasser in Abhängigkeit der Strahlform [8]	64
Abbildung 36	Kühlkapazitäten von Wasser und Netzwasser in Abhängigkeit der Strahlform und der Applikationsdistanz	65
Abbildung 37	Kühlkapazitäten unterschiedlicher Löscha Medien im Vollstrahl während des systematischen Löscha Vorganges	67
Abbildung 38	Zeitpunkte des Gleichgewichtes zwischen aufkommenden und abgehenden Massenströmen als Maß für die Eindämmung der Brandenergie bei Löscha Versuchen mit verschiedenen Löscha Medien	68
Abbildung 39	Temperaturen über der Lache während der Löschvorgänge mit unterschiedlichen Zumischraten	70
Abbildung 40	Berechnung der Löscha Effizienz anhand der charakteristischen Zeiten der 99 % Kontrolle und des 25 % Rückbrandes	72

Abbildung 41	Temperatur über der Flamme während der Löschvorgänge mit unterschiedlichen Zumischraten	74
Abbildung 42	Schaumqualitäten während der Löschvorgänge mit unterschiedlichen Zumischraten	74
Abbildung 43	Vergleich des Rückzünd- und Rückbrandverhaltens von CAF (X) in Abhängigkeit der VZ	76
Abbildung 44	Vergleich des Rückzünd- und Rückbrandverhaltens von CAF (Y) in Abhängigkeit der VZ	76
Abbildung 45	Durchschnittstemperaturen im Reifenstapel und Rückzündungszeiten der Löschversuche mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen	78
Abbildung 46	Rückgang der Wärmestrahlung während der ersten 30 s der CAF-Löschvorgänge mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen	80
Abbildung 47	Momentaufnahmen aus den Videoaufzeichnungen während der ersten 30 s der CAF-Löschvorgänge mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen	80
Abbildung 48	Temperaturverläufe der Versuche mit unterschiedlichen Schaumlöschmitteln	83
Abbildung 49	Temperaturverlauf im Transformatorenöl und im abgeschirmten Bereich während des kombinierten Löschangriffes	84
Abbildung 50	Zerstörung der CAF-Schicht bei direkter Applikation von ABC-Löschpulver	85
Abbildung 51	Benetzungszeiten von 0,3%igen und 0,5%igen Lösungen der Schaummittel X und Y in Abhängigkeit des verwendeten Leitungswassers bei 20 °C	88
Abbildung 52	Temperaturverläufe von Löschversuchen mit unterschiedlichen spezifischen Löschmittelvolumenströmen	89
Abbildung 53	Wiederholte Messung von Kontaktwinkeln auf Glas mit und ohne definierter Wartezeit nach der Plattenreinigung	90
Abbildung 54	Wiederholte Messung von Kontaktwinkeln auf Edelstahl mit und ohne definierter Wartezeit nach der Plattenreinigung	90
Abbildung 55	Verlauf der Krippenkerntemperatur als Grundlage zur Bestimmung der Kühlkapazität	94
Abbildung 56	Differenzen der Messdaten bei wiederholten Versuchsdurchgängen am Beispiel der ungehinderten Abbrände zur Charakterisierung der Mischbrandkrippen	96
Abbildung 57	Reproduzierbarkeit der Gasmessung während der Brandentwicklungsphase bei Outdoor-Mischkrippenbränden gemäß [88]	99

Abbildung 58	Reproduzierbarkeit der Gasmessung während der Brandentwicklungsphase bei Indoor-Mischkrippenbränden gemäß [88]	99
Abbildung 59	Reproduzierbarkeit der Temperaturentwicklung bei Outdoor-Mischkrippenbränden	100
Abbildung 60	Reproduzierbarkeit der Temperaturentwicklung bei Indoor-Holzkrippenbränden	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Übersicht herkömmlicher Schaummittel [40]	7
Tabelle 2	Oberflächenspannung von Wasser mit verschiedenen Schaumbildnern [24]	8
Tabelle 3	Übersicht der durchgeführten Feststoff-Bemessungsbrände	21
Tabelle 4	Materialien und Massenanteile im zeitgenössischen Durchschnittswohnzimmer und die daraus übernommene Materialverteilung in der neu entwickelten Mischbrandkrippe [39]	22
Tabelle 5	Technischer Aufbau des Löschangriffes für die Outdoor-Mischkrippenbrandversuche	25
Tabelle 6	Liste der getesteten Parameter während der Outdoor-Mischkrippenbrandversuche	28
Tabelle 7	Versuchsparameter während der Indoor-Mischkrippenbrandversuche	30
Tabelle 8	Technischer Aufbau des Löschangriffes für die Indoor-Holzrippenbrandversuche [63]	32
Tabelle 9	Versuchsparameter während der Indoor-Holzrippenbrandversuche	33
Tabelle 10	Versuchsparameter während der Outdoor-Heizöllachenbrandversuche	36
Tabelle 11	Versuchsparameter während der Indoor-Heptanlachenbrandversuche	38
Tabelle 12	Technischer Aufbau des Löschangriffes für die Reifenbrandversuche	40
Tabelle 13	Versuchsparameter während der Reifenbrandversuche	41
Tabelle 14	Versuchsparameter während der Transformatorenbrandversuche ...	44
Tabelle 15	Löschzeiten und Löschmittelverbrauch während der Indoor-Brandbekämpfung	59
Tabelle 16	Mittelwert, Standardabweichung, Limit of Detection und Limit of Quantification des während der Brandversuche angewandten FTIR-Spektrometers	92
Tabelle 17	Messunsicherheiten der USB-Datenlogger TC-08 für die Temperaturmessung	92
Tabelle 18	Technische Daten und Standardabweichungen der Waagen	93
Tabelle 19	Berechnung der mittleren Kühlkapazität anhand unterschiedlich ausgewählter Daten	94

Begriffsdefinitionen

50 % (bzw. 90 % / 99 % / 100 %) Brandkontrolle

Zeitpunkt, zu dem der Löschvorgang so weit vorangeschritten ist, dass 50 % (bzw. 90 % / 99 % / 100 %) des zu Löschbeginn vorhandenen Brandausmaßes gelöscht wurden.

Austrittsmoment

Bezeichnung für das vom strömenden Löschmittel ausgeübte Drehmoment an der Austrittsöffnung des Strahlrohres und Maß für die kinetische Energie, mit der das Löschmittel ausgebracht wird.

Fließbrand

Ein, sich durch Auslaufen einer brennenden Flüssigkeit, ausbreitender Brand.

Krippentemperatur

Die Durchschnittstemperatur der Krippe, welche aus den Messdaten aller an und in der Krippe installierten Thermoelemente gebildet wird.

Kühlkapazität

Ein Leistungsmerkmal, das angibt, um wieviel Kelvin die Brandtemperatur unter Anwendung eines Liters Löschmittel gesenkt werden kann.

Kühlrate

Ein Leistungsmerkmal, das angibt, um wieviel Kelvin ein Löschmittel die Brandtemperatur innerhalb einer Sekunde senken kann.

Löscheffizienz

Ein Beurteilungskriterium, mit dem sich beschreiben lässt, ob das Löschmittel geeignet ist, die Löschung des Brandes schnell und nachhaltig zu erzielen.

Mischbrandkrippe

Ein für die Prüfung des Löschvermögens vorgesehenes Prüfobjekt in Anlehnung an die DIN EN 3-7. Die Mischbrandkrippe besteht aus gestapelten Holzstäben und darin eingeschobenen Kunststoffstreifen. Damit beinhaltet sie Stoffe der Brandklassen A und B.

Netzfähigkeit

Maß für die Fähigkeit einer grenzflächenaktiven Lösung, in einen porösen Stoff einzudringen.

Netzwasser

Mit geringen Anteilen Schaummittel versehenes aber unverschäumtes Wasser.

Premix

Eine zur Herstellung von Löschschaum verwendete Lösung aus Schaummittelkonzentrat und Wasser.

25 % Rückbrandzeit

Zeitpunkt, zu dem ein nach DIN EN 1568-3 initiiertes Rückbrand einer ursprünglich geschlossenen Schaumdecke zu 25 % ihrer Fläche vorangeschritten ist.

Rückzündzeit

Zeitpunkt, zu dem die Löschschaumschicht auf einer brennbaren Flüssigkeit durch einen nach DIN EN 1568-3 durchgeführten Rückbrandtest soweit zerstört wurde, dass erstmalig Flammenerscheinungen auf der Flüssigkeitsoberfläche zu erkennen sind.

1 Einleitung

1.1 Fragestellung

1.1.1 Notwendigkeit der Untersuchungen von Compressed Air Foam

Druckluftschaum (engl.: Compressed Air Foam, CAF), dessen Anfänge bis in die frühen 1920er Jahre zurückreichen, wurde in Europa erstmals 1997 im Rahmen eines Feldversuches zur mobilen Brandbekämpfung eingesetzt [1]. Die Berufsfeuerwehren Augsburg und Ingolstadt sammelten zum damaligen Zeitpunkt im Auftrag des bayrischen Innenministeriums erste Praxiserfahrungen mit Druckluftschaumsystemen (engl.: Compressed Air Foam System, CAFS) auf zwei Löschfahrzeugen LF16/12. In ihren Erfahrungsberichten schreiben Habermaier [2] und Braun [3], dass CAF in dieser Testphase bei zahlreichen Bränden erfolgreich und meist effizienter als das Löschmittel Wasser eingesetzt werden konnte. Seitdem ist der Bestand von CAFS-Löschfahrzeugen in deutschen Feuerwehren gestiegen. In Europa wurden im Jahr 2000 auch Feuerwehren in der Schweiz, England, Kroatien und Polen mit ersten CAFS-Löschfahrzeugen ausgestattet. Als Ergebnis einer Erhebung der Berliner Feuerwehr [4] (Stand: 01/2017) ist in Abbildung 1 eine Karte der Feuerwehren in Deutschland, welche mindestens ein CAFS-Löschfahrzeug im Bestand haben, zu sehen. Die CAF-Systeme sind weiträumig verteilt. Doch es fällt auf, dass gerade in Norddeutschland nicht von einer flächendeckenden Verbreitung des Systems gesprochen werden kann.

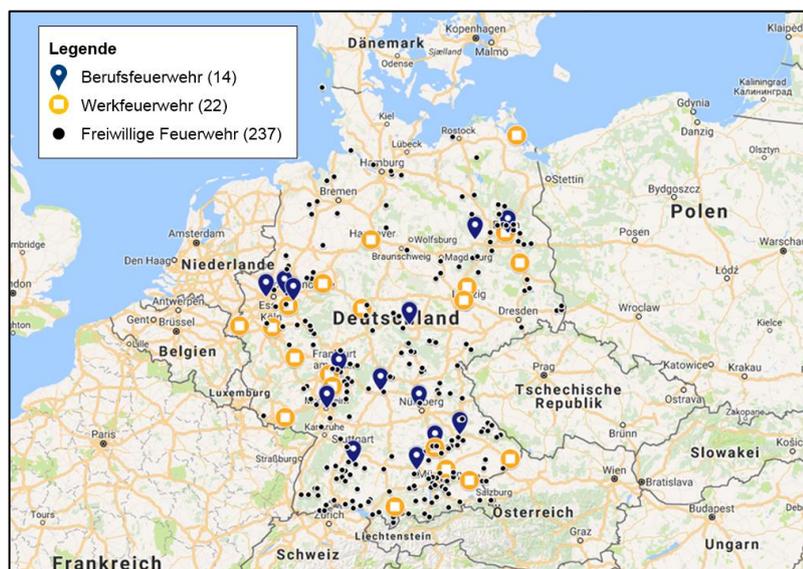


Abbildung 1: Feuerwehren in Deutschland mit CAFS-Fahrzeugen im Bestand (Stand: 01/2017)

Die Gründe dafür sind oftmals die höheren Anschaffungskosten des Systems, gepaart mit der Unsicherheit der potenziellen Anwender über dessen Wirkungsweise, Effektivität und Anwendung. Es fehlen also frei zugängliche Berichte über systematische Untersuchungen

zu den Punkten *Wirksamkeit*, *Einsatzbedingungen* und *Umweltauswirkungen* sowie eine wissenschaftliche Ergründung der bisher unzulänglich bekannten Wirkmechanismen von CAF. Die Untersuchungen des Verbundprojektes AERIUS setzen genau an dieser Stelle an. Vorrangiges Ziel des Projektes ist die wissenschaftliche Untersuchung der Einsetzbarkeit und der Leistungsgrenzen des Löschmittels anhand zahlreicher Labor- und Brandversuchsreihen.

Die aus diesen Untersuchungen resultierenden Erkenntnisse können im Anschluss genutzt werden, um die Charakteristiken und die Bedeutung des Löschmittels in der Brandbekämpfung darzustellen und vorhandene Informationslücken zu füllen.

1.1.2 Ziel der Arbeit

Dem Forschungsprojekt AERIUS lag ein umfangreicher Versuchsplan zugrunde. Alle Versuchspartner arbeiteten kooperativ an einem weitverzweigten Netz systematischer Untersuchungen an und mit CAF, wie es bis dato einmalig und von großer Bedeutung für die erfolgreiche Anwendungen des Löschmittels im abwehrenden Brandschutz war.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden zahlreiche Untersuchungen angestellt, welche darauf abzielten, einen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung des Wirkmechanismus einer CAF-Applikation im Brandfall zu leisten und quantitative Kriterien für die Anwendungsoptimierung des Löschmittels zu liefern. Dazu wurden bei der Bearbeitung des Themas folgende Schwerpunkte abgedeckt:

- Charakterisierung des zur Herstellung von CAF verwendeten Wasser-Schaummittelgemisches
- Entwicklung eines neuartigen Feststoff-Bemessungsbrandes für hohe Anforderungen an das zu untersuchende Löschmittel
- Realisierung von Brandszenarien im In- sowie Outdoor-Bereich zur Beurteilung der Löschwirkung von CAF im Vergleich zu herkömmlichen Löschmedien
- Ermittlung optimaler Einsatzbedingungen für das Löschmittel CAF
- Herausstellen von Möglichkeiten auf physikalischer und taktischer Ebene zur Beeinflussung des Löschergebnisses bei der Anwendung von CAF
- Gewinnung belastbarer Daten zum Einsatz von CAF bei ungewöhnlichen Brandszenarien
- Entstehung und Zusammensetzung von Schadstoffen in Abhängigkeit der eingesetzten Löschmedien

Alle im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Löschversuche fanden ausschließlich unter Verwendung umweltverträglicher Class-A-Schaummittel statt. Mit den Ergebnissen zur Schaummitteleffizienz in Abhängigkeit der Schaummittelzumischrate, soll die Forschung an effizienten, aber umweltschonenden Löschmitteln unterstützt werden.

Die in dieser Arbeit erläuterten Versuche wurden mit einer komplexen messtechnischen Instrumentierung durchgeführt und anschließend detailliert ausgewertet. Wie es in der experimentellen Forschung nicht zu vermeiden ist, unterliegen die Messdaten einem gewissen Fehler, der ihre Aussagekraft beeinflusst. Die aus den Versuchsreihen gewonnenen Daten wurden deshalb hinsichtlich der Fragestellung interpretiert und unter Berücksichtigung etwaiger Fehler analysiert.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit einer vom wirtschaftlichen Interesse unabhängigen Beurteilung der Versuchsergebnisse, einen signifikanten Beitrag zur Einschätzung der Löscheffizienz von CAF unter verschiedenen Einsatzbedingungen zu leisten.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Brandkrippen zur Bestimmung der Löschmitteleffizienz

Im Bereich der Prüfung und Normung verschiedener Löschmedien sind standardisierte Brandlasten unverzichtbar, um zufällige Fehler in der Untersuchung weitestgehend ausschließen und möglichst zuverlässige Daten erheben zu können. Holzkrippen sind dank ihrer Wirtschaftlichkeit und ihres einfach zu reproduzierenden Aufbaus seit mehreren Jahrzehnten fester Bestandteil zahlreicher internationaler Brand- und Löschversuche [5,6,7,8]. Studien über das Abbrandverhalten in Abhängigkeit diverser Konstruktionsparameter von Delichatsios [9], Gross [10], Brein und Schatz [11] sowie McAllister und Finney [12] machten Holzkrippen über die Jahre zu idealen Modellbrandobjekten mit sehr guten Voraussetzungen zur Untersuchung von Löschmitteln und -maßnahmen.

Aktuell regulieren Normen wie die DIN EN 3-7 des Deutschen Instituts für Normung [13] und die UL 711 der Underwriters Laboratories [14] den Aufbau der Holzkrippen für Prüfungen von tragbaren Feuerlöschern. Solche Normen werden in der Brandschutzforschung vielfach appliziert, um geeignete Brandobjekte für Löschversuche mit unterschiedlichsten Löschräten und -mitteln auszuwählen [15,16,17,18].

Durch den rasanten Fortschritt der technischen und chemischen Entwicklung im letzten Jahrhundert sind neue Möglichkeiten der Produktionstechnik und der Gestaltung des alltäglichen Lebens mit noch nie dagewesenen Gefahren verbunden. Ein gutes Beispiel für diesen Wandel ist die überwältigende Menge verschiedener synthetischer Materialien, die

im Alltag Anwendung findet [19]. Diverse Zusatzstoffe, die in synthetischen Materialien enthalten sind, weisen ein völlig anderes Brandverhalten auf, mit intensiveren Eigenschaften als ein gewöhnliches Holzfeuer [20].

In einer Reihe von Feststoffbrandversuchen verwendeten Bryner und Mulholland [21] bereits 1991 mit Kunststoffen versehene Holzbrandkrippen zur Simulation von typischen Brandlasten in Wohngebäuden. Solche und ähnliche [22,23] Weiterentwicklungen einer gewöhnlichen Holzbrandkrippe zur Mischbrandkrippe entsprechen meist nicht dem aktuellen technischen Stand und sind in der internationalen Literatur kaum zu finden. Um der Brisanz der Brandstoffe auch in den heutigen Prüf- und Normverfahren gerecht zu werden, müssen Mischbrandlasten in die Bandbreite von Feststoffbemessungsbränden aufgenommen werden und häufiger Einzug in Brandversuchen halten. Eine erneute Analyse der Materialverteilung der aktuell zur Anwendung kommenden Materialien in Wohneinrichtungen ist zur Zusammenstellung einer zeitgenössischen Mischbrandlast unabdingbar und soll im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen werden.

1.2.2 Zusammensetzung und Wirkungsweise der Druckluftschäume

Reines Wasser kann aufgrund seiner hohen stoffspezifischen Oberflächenspannung von $\gamma = 72 \text{ mN/m}$ Brandstoffe mit geringer Porosität nur schwer benetzen, da es dazu neigt, von glatten Oberflächen abzurollen. Durch das Zumischen eines tensidbasierten Schaummittels entsteht eine Schaummittellösung, deren Oberflächenspannung mit $\gamma = 25 \text{ mN/m}$ so gering ist, dass in Abhängigkeit der Tropfengröße ein größerer Anteil des Löschmittels in die Oberfläche des Brandstoffes eindringt und dort vollständig verdampft [24]. Schriften zum Thema *Zerstäubungstechnik* [25,26] sowie das Werk *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum* [27] befassen sich ausführlich mit dem Zusammenhang zwischen Oberflächenspannung und Tropfengröße. Demnach wird die Tropfengröße allein durch die Zugabe eines Schaummittels verringert, da die aerodynamische Widerstandskraft der in den Tropfen hinein gerichteten Oberflächenspannung entgegenwirkt und zu dessen Zerfall führt [28].

Das Beimengen von Druckluft führt zu einer Verschäumung der Lösung. Der somit erzeugte Schaum verfügt über eine sehr feine Blasenstruktur, wodurch die wirksame Oberfläche des Löschmittels vergrößert wird. Laundess et al. [29] geben an, dass CAF über Blasengrößen von 12 bis 287 μm verfügt und dass 50 % des Schaumvolumens aus Blasen mit einem Durchmesser von $d \leq 163 \mu\text{m}$ besteht. Diese homogene Blasenstruktur mit kleinen Blasendurchmessern bringt weitere einsatztaktische Vorteile wie ein geringes Drainageverhalten [30] und eine hohe Schaumstabilität mit sich.

Druckluftschäume der Feuerwehren werden in der Regel mit Schaummitteln in einer von der zu bekämpfenden Brandlast abhängigen Zumischrate von 0,3 bis 0,5 Vol.-% bei Feststoffbränden, bzw. 0,5 bis 1,0 Vol.-% bei Flüssigkeitsbränden erzeugt [27]. In der aktuellen Literatur existieren jedoch nahezu keine Auskünfte zum Zusammenhang von Zumischrate und Löscheffizienz bzw. Rückbrandzeit. Vereinzelt weisen Quellen allgemein darauf hin, bei der Brandbekämpfung von polaren Flüssigkeiten eine höhere Zumischrate zu verwenden [31] oder dass zu hohe Zumischraten negative Einflüsse auf die Rückbrandzeit des Löschaumes haben [32]. Die Aussagen erfolgen dabei stets ohne Angabe von Zahlenwerten und beinhalten keine wissenschaftliche Begründung.

Eine wichtige Kenngröße der Druckluftschäume ist die Verschäumungszahl (VZ). Sie beschreibt das Mischungsverhältnis von Schaummittellösung und Luft und ermöglicht nach DIN EN 16327 [33] eine Unterteilung der Druckluftschäume in die zwei Kategorien *Nassschaum* und *Trockenschaum*. Namensgebend sind dabei die jeweiligen Wasseranteile im Schaum. Nassschäume verfügen über Verschäumungszahlen, welche im Bereich von $VZ = 4 - 11$ liegen. Das heißt, aus einem Liter Schaummittellösung werden unter Luftzugabe 4 bis 11 Liter Schaum hergestellt. Nassschäume haben eine hohe Fließfähigkeit sowie Kühlwirkung und werden vorrangig zur Brandbekämpfung eingesetzt. Trockenschäume weisen typischerweise eine $VZ > 11$ auf und haben aufgrund ihres geringen Wasseranteils eine hohe Haftwirkung, weshalb sie oftmals für präventive Maßnahmen verwendet werden [27].

Literaturstellen, die sich mit dem Zusammenhang zwischen Verschäumungszahl und Löscheffizienz bzw. Rückbrandzeit befassen, beschränken sich häufig auf die Auswirkungen der unterschiedlichen Verschäumungszahlen, welche sich zwischen Druckluftschäumen und strahlrohrverschäumten Schäumen ergeben [29,34,35]. Demnach wird den Druckluftschäumen aufgrund ihrer geringeren Blasengrößen und einheitlicheren Blasengrößenverteilungen eine gesteigerte Schaumstabilität und folglich eine höhere Rückbrandzeit nachgesagt. Die Anzahl der ausschließlich auf CAF bezogenen Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Verschäumungszahlen auf die Löscheffizienz ist derzeit gering.

Braun et al. [36] sprechen allgemein davon, dass mit einer steigenden Verschäumungszahl der Anteil des Wasser-Schaummittelgemisches in der Schaumschicht sinkt und damit ein geringeres Löschvermögen bei Klasse A-Bränden einhergeht.

Eine weitere Quelle [37] befasst sich mit CAF-Löschversuchen an Klasse B-Bränden, in denen identische Volumenströme und Verschäumungszahlen zwischen 5 und 11 untersucht werden. Unter Verwendung eines wasserfilmbildenden Schaummittels schneidet die $VZ = 8$ dabei am besten ab. Der Löschvorgang mit der $VZ = 11$ zeigt die geringste Löscheffizienz.

Solche Untersuchungen sind für die CAF-Forschung von hohem Stellenwert, jedoch in der Literatur nur in geringem Umfang vorzufinden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Löschversuche meist sehr individuell umgesetzt wurden und es an reproduzierbaren und vor allem quantitativen Kriterien für die Bewertung des Löscherfolges fehlt. Damit zukünftig aus der Gesamtheit aller Untersuchungen allgemeingültige Aussagen über die Auswirkungen der Kenngrößen *Zumischrate* und *Verschäumungszahl* auf den Löscherfolg abgeleitet werden können, sollen mit dieser Arbeit quantitative Bewertungskriterien geschaffen und deren weitläufige Berücksichtigung in weiterführenden Löschversuchen angeregt werden.

CAF wird mit hoher kinetischer Energie als Vollstrahl appliziert und durchdringt die Flammenzone ohne erwähnenswerte Verluste durch Verdampfung. Durch seine anhaftenden Eigenschaften lagert sich CAF auf Oberflächen an und erzielt damit im Vergleich zu Wasser eine längere Verweildauer auf dem Brandgut. Dadurch wird der Wärmetransport zwischen Brennstoff und Löschmittel begünstigt [36]. Die Luft im Inneren der Schaumblasen dehnt sich unter Wärmeeinfluss so weit aus, bis die Blasenstruktur nachgibt und platzt. Beim Platzen wird der Wasseranteil der Schaumblase in feine Partikel zerstäubt und zu mehr als 80 % verdampft. Die Folge ist eine gegenüber reinem Wasser erhöhte Verdampfungsrate und ein schnellerer Löscherfolg. Nicht verdampfte Löschwasseranteile dringen partiell in das brennbare Material ein und schützen somit vor einer Rückzündung [38].

Der Vorteil des Löschmittels CAF gegenüber unverschäumten Löschmedien liegt in der Kombination verschiedener Löscheffekte. Obwohl bei der Feststoffbrandbekämpfung der *Kühleffekt* der Hauptlöseffekt ist, kommt auch der *Trenneffekt* zum Tragen, wenn nach der Flammenniederschlagung versteckte, tiefliegende Glutnester vom Umgebungssauerstoff getrennt und erstickt werden. Die Rückzündungswahrscheinlichkeit bei geometrisch anspruchsvollen Brandlasten wird somit verringert. Während der Brandbekämpfung setzt durch Wasserdampfbildung in der Nähe des Brandherdes zudem eine lokale *Verdünnung* der brennbaren Gase ein. Bei Flüssigkeitsbränden ist der Trenneffekt der Schaumdecke auf der brennbaren Flüssigkeit maßgebend für den Löscherfolg [39].

Die Anwendung von Druckluftschäumen verkürzt die Zeit bis zur Niederschlagung eines Brandes und reduziert so die Menge der freiwerdenden Verbrennungsprodukte. Zudem sorgt die Effizienz der Schäume für einen geringen Wasserverbrauch [33]. In Kombination mit einer geübten taktischen Applikation des Löschmittels sind nach der Brandbekämpfung kaum noch Löschmittelrückstände zu erkennen.

1.2.3 Gängige Schaummittelkonzentrate und deren Umweltverträglichkeit

Nach Angaben des *Technischen Berichtes Druckluftschäum* [1] sind grundsätzlich alle zugelassenen Schaummittelarten für das CAF-Verfahren einsetzbar. Tabelle 1 gibt einen Überblick über handelsübliche Schaummittelarten [40].

Tabelle 1: Übersicht herkömmlicher Schaummittel [40]

Protein-Schaumlöschmittel	Synthetische Schaumlöschmittel
Fluorfrei	Fluorfrei
<ul style="list-style-type: none"> • Proteinschaummittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrbereichsschaummittel
Fluorhaltig	<ul style="list-style-type: none"> • Class-A Schaummittel
<ul style="list-style-type: none"> • Fluor-Proteinschaummittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Alkoholbeständiges Schaummittel
<ul style="list-style-type: none"> • Wasserfilmbildende 	Fluorhaltig
<ul style="list-style-type: none"> • Fluor-Proteinschaummittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserfilmbildende Schaummittel
<ul style="list-style-type: none"> • Alkoholbeständige, wasserfilmbildende 	<ul style="list-style-type: none"> • Alkoholbeständige, wasserfilmbildende
<ul style="list-style-type: none"> • Fluor-Proteinschaummittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Schaummittel

Zur Bekämpfung von Feststoffbränden der Klasse A sowie von Flüssigkeitsbränden der Klasse B gemäß EN 2 [41] finden in den kommunalen Feuerwehren im Regelfall synthetische Mehrbereichsschaummittel (MBS) Anwendung. Ihr Name stammt daher, dass mit Hilfe dieser Schaummittel sowohl die Herstellung von Schwer-, als auch Mittel- und Leichtschäumen möglich ist. Als Schaumbildner werden fluorfreie Tenside eingesetzt. Sie setzen die Grenzflächenspannung zwischen den Phasen herab und ermöglichen die Bildung einer Dispersion. Je nach Hersteller sind dem Schaummittel verschiedene Funktionsadditive zugesetzt, wie zum Beispiel Frostschutzzusätze, Konservierungsstoffe, Schaumstabilisatoren, etc., um den Einsatzbereich und die Leistungsgrenze der Schaummittel zu verbessern [24]. Die gängigen MBS sind hauptsächlich der Wassergefährdungsklasse WGK 2 - *wassergefährdende Stoffe* - zuzuordnen. Gemäß der VwVwS [42] sind Lösungen aus MBS und Wasser nicht wassergefährdend, solange der Anteil der WGK 2 Komponenten in der Lösung eine Konzentration von weniger als 0,2 % besitzt. Die anwendungsbereiten Lösungen zur Schaumerzeugung verfügen herstellerabhängig über Konzentrationen von 0,5 bis 1,0 % und sind daher grundsätzlich als wassergefährdend zu bewerten [43].

Große Flüssigkeitsbrände, wie sie beispielsweise in Tanklagern auftreten können, lassen sich nur mit speziellen fluorhaltigen Schaummittelkonzentraten wirkungsvoll bekämpfen. In solchen Fällen werden sogenannte wasserfilmbildende (Aqueous Film Forming Foam, AFFF) oder wasserfilmbildende und alkoholbeständige (Aqueous Film Forming Foam / Alcohol Resistant, AFFF/AR) Schaummittel eingesetzt [1]. Diese synthetischen Schäume verfügen durch Zusätze von Schaumstabilisatoren und Polymeren mit Fluorverbindungen

über hervorragende Löscheigenschaften und eine hohe Rückbrandzeit in der Brandklasse B. Fluortenside sind in der Lage, die Oberflächenspannung des Wassers wesentlich weiter zu senken als Proteine oder normale Tenside. Eine Größeneinteilung der erreichbaren Oberflächenspannung in Abhängigkeit der Schaummittel ist in nachstehender Tabelle 2 zu finden. Zudem verringern die olephoben Eigenschaften der Fluorchemikalie die für den Schaum schädliche Aufnahme von Flüssigbrennstoffen in die Blasenzwischenräume des Schaumes [24].

Tabelle 2: Oberflächenspannung von Wasser mit verschiedenen Schaumbildnern [24]

Schaumbildner	Oberflächenspannung γ [mN/m]
Wasser ohne Zusatz	72
Wasser mit Proteinen	40 - 50
Wasser mit Tensiden	25
Wasser mit Fluortensiden	12 - 16

Durch den gemeinsamen Einsatz von herkömmlichen Tensiden und perfluorierten Kohlenwasserstoffen (engl.: Perfluorocarbons, PFC) bildet sich ein dünner Wasserfilm, der auf der unpolaren brennbaren Flüssigkeit aufschwimmt. Dieser Film stellt eine gasdichte Barriere dar, welche den Gasaustausch zwischen Brennstoff und Flammenzone nahezu vollständig unterbindet. Zudem vereinfacht er das Auffließen des Schaumes auf die Brandfläche [24].

Die Produktion und das Vertreiben des in der Vergangenheit in AFFF/AFFF-AR Schaumlöschmitteln eingesetzten Perfluoroktansulfonats (PFOS) wurden 2006 innerhalb der EU auf Grundlage der Richtlinie 2006/122/EG [44] stark eingeschränkt. Die Verwendung des als persistent, giftig, gesundheitsschädigend und umweltgefährdend klassifizierten Stoffes in Löschsäumen wurde 2010 mit einem Grenzwert von 10 mg/kg untersagt. Die heutzutage eingesetzten PFC werden zwar nicht als giftig eingestuft, zeichnen sich aber nach wie vor durch eine sehr hohe Verweildauer in der Umwelt aus [40]. Sie reichern sich in der Umwelt an und sind bereits weltweit in Gewässern, Sedimenten sowie in Lebewesen nachweisbar. Es ist wissenschaftlich nachgewiesen, dass PFC langfristig zu Problemen für Mensch und Umwelt führen kann [45]. Ein vom Umweltbundesamt veröffentlichter Ratgeber zum umweltschonenden Einsatz von fluorhaltigen Schaumlöschmitteln empfiehlt deren Anwendung nur, wenn sich unter Berücksichtigung der Einsatzlage mit anderen Schaumkonzentraten keine effiziente Löschwirkung erzielen lässt. In diesen Fällen ist durch besondere Vorsichtsmaßnahmen, z.B. durch Eindämmen, Auffangen und fachgerechtes Entsorgen des Löschmittels, der Eintrag in die Umwelt so gering wie möglich zu halten [46].

In einer Zeit, in der dem Schutz der Umwelt eine entscheidende Rolle zugeschrieben wird, gewinnen Class-A-Schaummittel immer mehr an Bedeutung. Class-A-Schaummittel sind hochkonzentrierte und speziell zum Löschen von Feststoffbränden entwickelte Schaummittel, welche häufig zur Erzeugung von Netzmittel oder CAF verwendet werden. Sie wurden ursprünglich für die Vegetationsbrandbekämpfung entwickelt und sind daher umweltverträglich. Gängige Class-A-Schaummittel lassen sich der WGK 1 zuordnen. Diese Schaummittel sind ebenso wie MBS frei von PFC. In der üblichen Anwendungskonzentration sind sie in den meisten Fällen zu 99 bis 100 % biologisch abbaubar [40]. Class-A-Konzentrate verfügen über eine sehr hohe Netzwirkung, weshalb sie immer häufiger als Netzmittel mit Zumischraten von 0,1 bis 0,5 % bei Gebäudebränden zum Einsatz kommen. Mit einer Zumischrate von 0,3 bis 0,5 % kann ein gegen Feststoffbrände wirksamer Schwerschäum erzeugt werden. In Deutschland zugelassene Class-A-Schaummittel eignen sich in Form von Schwer- oder Mittelschäum auch für die Bekämpfung von kleineren Bränden unpolarer Flüssigkeiten [47]. Typische Zumischraten liegen in diesem Fall im Bereich von 0,5 bis 1,0 % [48].

1.2.4 Richtlinien und Leitfäden zum Umgang mit CAF

Für jede Brandbekämpfung mit CAF ist die Wahl eines zugelassenen und für die Einsatzspektren der jeweiligen Wehr geeigneten Schaummittels elementar. Voraussetzung für die Zulassung von Schaummitteln ist, dass ihre Eignung und ihre Eigenschaften von einer anerkannten, für das Typprüfungsverfahren zertifizierten, unabhängigen Prüfstelle getestet wurden [1]. Die Prüfgrundlage der chemisch-physikalischen Anforderungen bildet dabei die DIN EN 1568 *Feuerlöschmittel - Schaummittel* mit ihren Teilen 1 bis 4 zu den *Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von ...*

- Teil 1: ... *Mittelschäum zum Aufgeben auf nicht-polare Flüssigkeiten*
- Teil 2: ... *Leichtschäum zum Aufgeben auf nicht-polare Flüssigkeiten*
- Teil 3: ... *Schwerschäum zum Aufgeben auf nicht-polare Flüssigkeiten*
- Teil 4: ... *Schwerschäum zum Aufgeben auf polare Flüssigkeiten.*

Die Prüfgrundlage für Schaummittel, welche zur Herstellung von Druckluftschäumen genutzt werden, bildet die DIN EN 1568-3 [49], da Druckluftschäume hauptsächlich Verschäumungszahlen von $VZ > 20$ aufweisen und somit zu den Schwerschäumen zählen.

Aufgrund der verschiedenen Gefahrenpotenziale im jeweiligen Ausrückebereich einer jeden Feuerwehr ergeben sich vielfältige Einsatzspektren. Um den Anforderungen dieser Spektren gerecht zu werden, ist eine durchdachte Wahl des Schaummittels unabdingbar. Die Fabrik chemischer Präparate von Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG bietet mit ihrem *Leitfaden Schaumkonzept für kommunale Feuerwehren* [40] Lösungsansätze für diese Problematik an.

Die Serie *Die roten Hefte – Ausbildung Kompakt* stellt mit der Heftnummer 211 *Druckluftschaum* [50] eine Lehrunterlage zum Umgang mit dem Löschmittel zur Verfügung. Dieses Heft beschreibt die technischen Grundlagen von CAFS, die Besonderheiten und physikalischen Eigenschaften, die beim Löschen mit CAF zu beachten sind, das Vorgehen bei der Brandbekämpfung brennender Feststoffe sowie Flüssigkeiten und die Einsatzgrenzen dieser Löschtechnik.

Das *Leistungsbuch Druckluftschaum* als Ergebnisdarstellung mehrjähriger Aufklärungs- und Forschungsarbeit der *Arbeitsgruppe Druckluftschaum* des vfdb-Referats 5 bietet in den Bereichen Technik/Grundlagen, Taktik und Ausbildung eine detaillierte Lehrunterlage für die Anwender [36].

Das Umweltbundesamt veröffentlichte 2013 einen informativen Flyer zum Thema *Fluorhaltige Schaumlöschmittel umweltschonend einsetzen*. Die Broschüre beschreibt, wann eine Brandbekämpfung mit (fluorhaltigen) Schaumlöschmitteln notwendig ist, wann darauf verzichtet werden kann, warum fluorhaltige Schaumlöschmittel die Umwelt gefährden und wie mit den freigesetzten Löschmitteln umgegangen werden sollte [46].

Die europäische Norm EN 16327 [33] behandelt die Konstruktion, die Herstellung und den Betrieb von CAFSs. Sie informiert über wesentliche gefährdende Ereignisse, die für Druckzumischanlagen (DZA) und Druckluftschäumenanlagen (DLS) maßgebend sind, sowohl wenn sie bestimmungsgemäß eingesetzt werden als auch wenn sie einer Fehlanwendung unterliegen. Die EN 16327 definiert Grundanforderungen in Bezug auf Sicherheit und Leistung der Systeme und legt Kriterien zur Prüfung der entsprechenden Anlagen fest.

Die National Fire Protection Association stellt mit ihrer Norm NFPA 11 [51] eine Richtlinie zur Installation, Handhabung, Prüfung und Wartung von stationären, semistationären sowie mobilen Leichtschäum-, Mittelschäum-, Schwerschäum- und CAF-Systemen bereit.

Im Referat 5 der vfdb ist eine ständige *Arbeitsgruppe Druckluftschaum* vertreten, die sich mit den neuesten Erkenntnissen zu diesem Löschmittel befasst. 2009 wurde ein *Technischer Bericht Druckluftschaum* [1] mit Informationen zur Erzeugung, der Wirkungsweise und der Anwendung von CAF erstellt.

1.2.5 Systembeschreibung - CAFS

Gemäß EN 16327 ist ein CAFS eine Anlage, in der dem Löschwasser nach dem Durchlaufen einer Feuerlöschkreiselpumpe kontinuierlich unter Druck Schaummittel und Luft zugeführt werden [33]. Die schematische Darstellung eines CAFS in Abbildung 2 veranschaulicht das Zusammenspiel der Systemkomponenten *Feuerlöschkreiselpumpe*,

Druckzumisanlage und *Druckluftschaumanlage*. Die Feuerlöschkreiselpumpe fördert das benötigte Löschwasser. Der Wasserförderstrom wird dabei messtechnisch erfasst. Anhand der Messdaten mischt das Teilsystem *Druckzumisanlage*, bestehend aus einer Schaummittelpumpe und einem Schaummitteltank, dem von der Feuerlöschkreiselpumpe kommenden Wasserstrom je nach Durchflussrate und manueller Eingabe variierende Schaummittelmengen hinzu. Das so erzeugte Wasser-Schaummittelgemisch gelangt durch Druckleitungen in das dritte Teilsystem, die *Druckluftschaumanlage*. Die Schaummittellösung wird dort in einer Mischkammer mit Druckluft versetzt. Die Druckluft wird in den meisten Fällen von einem Kompressor generiert. Rotierende Einbauten in der Mischkammer verwirbeln die Medien und erzeugen somit CAF. Der fertige Schaum wird anschließend durch Druckleitungen und Druckschläuche zur Auswurfvorrichtung befördert [1,36].

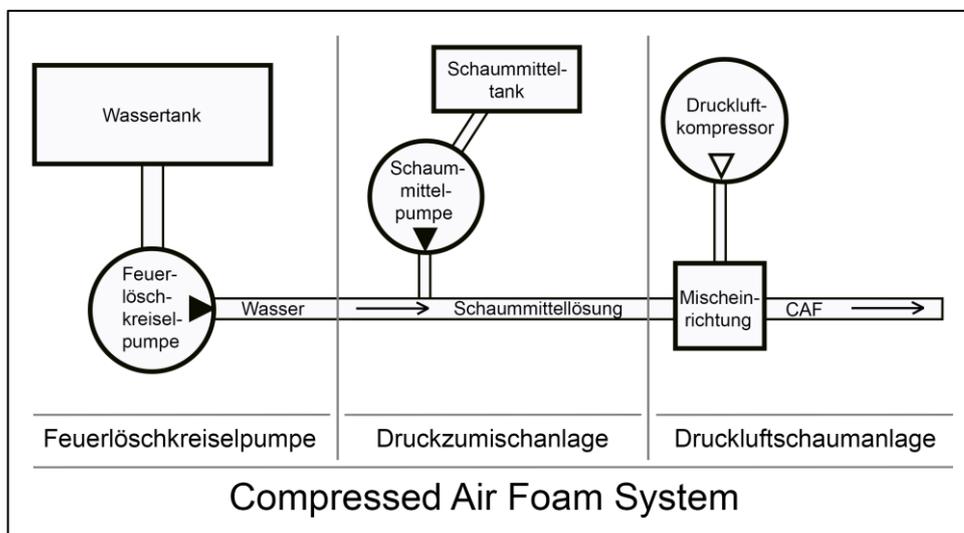


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines CAFS gemäß [36]

DZAs sowie DLSs werden von den Herstellern mit verschiedenen Nennförderströmen angeboten. Der Leistungsbereich der derzeit genormten DZA liegt bei 200 bis 2400 Liter Schaummittellösung pro Minute bei 1,0%iger Schaummittelzumischrate. DZAs mit höheren Nennförderströmen sind nach gesonderten Vereinbarungen zwischen Hersteller und Anwender zu realisieren. Die passende DLS ist unter Berücksichtigung des Schaummittellösung-zu-Luftförderstrom-Verhältnisses von mindestens 1:3 auszuwählen. Dieses Verhältnis ist der Schwellwert zur Erzeugung von löschwirksamen Nassschaum. Demzufolge ist eine DZA 800 mit einem Schaummittellösung-Nennförderstrom von $\dot{V} = 800 \text{ l/min}$ kompatibel zur DLS 2400 mit einem Luft-Nennförderstrom von $\dot{V} = 2400 \text{ l/min}$.

Der Betriebsdruck der Anlagen ist bei der CAF-Erzeugung auf 10 bar an den Systemausgängen beschränkt. Um unzulässig hohe Reaktionskräfte am Strahlrohr und andere druckbedingte Gefährdungen für Personal und Technik auszuschließen, ist nach

EN 16237 ein maximaler Betriebsdruck von 7 bar zu fahren. Dieser Wert ist nach Angaben der Richtlinie für alle potenziellen Anwendungen ausreichend [33].

Im Falle des Versagens der DZA und/oder der DLS ist weiterhin die Förderung von Löschwasser durch die Feuerlöschkreiselpumpe möglich. Ist nur das Teilsystem DZA vom Ausfall betroffen, verhindern Sicherheitseinrichtungen eine Druckluftzumischung, um unkontrollierbaren Druckstößen am Strahlrohr durch Lufteinschlüsse im Löschwasserstrom vorzubeugen. Die Zumischung von Druckluft erfolgt nur, wenn die DZA in Betrieb ist und der Anlagendruck über 1 bar liegt. Die Zumischrate des Schaummittelkonzentrates lässt sich je nach Anlagenausführung stufenlos oder stufenweise einstellen. Der Arbeitsbereich einer DZA ist aus den erreichbaren Zumischraten in einem Wasserstrom definiert. Beispielhaft ist der Arbeitsbereich einer DZA 2400 in Abbildung 3 gezeigt. Zu erkennen ist, dass die maximal erreichbare Schaummittelkonzentration von 6 % bei 50 bis 450 l/min mit steigendem Wasserförderstrom exponentiell sinkt. Die EN 16327 schreibt in ihrer Tabelle 2 *Klassifizierung von Druckzumischanlagen* beispielsweise für eine DZA 2400 vor, dass bei einem Förderstrom von $\dot{V} = 800 \text{ l/min}$ eine Zumischrate von mindestens 0,5 % erreicht werden muss. Mit diesem Garantiepunkt wird bestimmt, ab welchem Förderstrom spätestens eine Zumischung erfolgen muss. Die Daten im Diagramm der Abbildung 3 zeigen, dass der dort beschriebene Anlagentyp diesen Garantiepunkt der EN 16327 erfüllt. Eine betriebsbereite Anlage soll diesen Zustand binnen zehn Sekunden an den Druckabgängen erreicht haben.

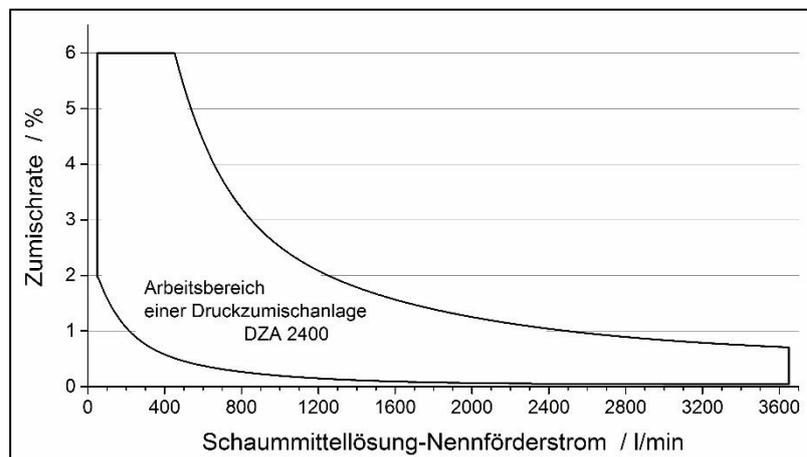


Abbildung 3: Musterdiagramm für den Arbeitsbereich einer Druckzumischanlage DZA 2400 [33]

Innerhalb des Arbeitsbereiches, bei einem Schaummittellösungsförderdruck von 4 bis 10 bar, darf die Abweichung der vorgewählten Zumischrate nicht außerhalb der Toleranzwerte liegen. Bei Zumischraten $< 1,0 \%$ wird eine Abweichung von 0 bis +40 % akzeptiert. Für Zumischraten zwischen 1,0 und 3,0 % liegt der Toleranzbereich bei 0 bis +30 %. Eine Unterdosierung kann den Wirkungsgrad der Schaumanwendung negativ

beeinflussen und somit ein erhöhtes Sicherheitsrisiko nach sich ziehen. Eine Überdosierung wirkt sich in erster Linie auf den Kostenfaktor aus. Gefahren für das Einsatzpersonal entstehen dabei aber nicht [33].

Die Auslegung eines CAFS sollte einen Dauerbetrieb von mindestens 6 Stunden bei Nennförderstrom und der vom Hersteller gesetzten maximalen Zumischrate ermöglichen. Die DZA muss bei laufender Feuerlöschkreiselpumpe, ohne Unterbrechung der Wasserförderung, zugeschaltet werden können. Die Leistungsmerkmale eines jeden Systems müssen im Rahmen von Konstruktions-, Funktions- und individuellen Einzelprüfungen mit den in EN 16237 niedergeschriebenen Anforderungen auf Übereinstimmung geprüft werden [33].

1.2.6 Verwendung von CAF mit herkömmlichen Druckschläuchen und Armaturen

Im Jahr 2005 entfachte aufgrund eines Unfalls in Tübingen, bei dem während eines Einsatzes ein mit CAF gefüllter Feuerwehrschauch platzte und der zwei Einsatzkräften das Leben kostete, eine Diskussion über die Temperatur- und Druckfestigkeit von Feuerwehr-Druckschläuchen im CAF-Einsatz.

In einem Unfallbericht [52] zum tödlichen Vorfall in Tübingen sieht sich das Innenministerium Baden-Württembergs veranlasst, vorsorglich und ohne wissenschaftlichen Nachweis, *Hinweise für den Einsatz von Druckluftschaum bei der Brandbekämpfung* zu geben. Demnach wird Feuerwehren beim Löscheinsatz empfohlen, grundsätzlich Nassschaum einzusetzen und immer dann auf den Einsatz von CAF zu verzichten, wenn eine Wärmebeaufschlagung der Druckschläuche durch glühende oder brennende Teile nicht ausgeschlossen werden kann. So sollte bei einem Wohnungsbrand, bei dem der Angriffstrupp über abgelöschte Bereiche in weiter entfernte Räume vorgeht, kein CAF verwendet werden. Es bestehe aber dennoch die Option, dem Löschwasser weiterhin Schaummittel zuzuführen, was zu einer verbesserten Löschwirkung beiträgt.

De Vries geht in seinem Werk *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum: Technik und Taktik* [27] sogar so weit, dass er den Befehl zum Einsatz von CAF im Inneneinsatz, unabhängig von der Größe des Brandobjektes (sei es ein Zimmer- oder ein Gebäudebrand), als Verletzung der Fürsorgepflicht und vorsätzliches Handeln des Einsatzleiters bezeichnet.

Im Jahr 2008 untersuchte die Forschungsstelle für Brandschutztechnik vom Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (AFKzV) die Haltbarkeit von CAF-führenden Feuerwehrdruckschläuchen unter Temperaturbeaufschlagung auf einem dem Unglücksort nachempfundenen Prüfstand. In einer Versuchsreihe aus 90 Einzeldurchgängen wurden Schläuche der Materialklassen 1, 2 und 3 unter verschiedenen Bedingungen einer großflächigen Erwärmung unterzogen und beobachtet. Die Untersuchungsaspekte unterschieden sich in erster Linie in der Art des

Löschmittels, ob Wasser oder CAF, und in der Fluidströmung, ob stehend oder fließend. Die Ergebnisse sind im Forschungsbericht 150 [53] der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe veröffentlicht.

Es wurde festgestellt, dass bei einer erheblichen Überschreitung von 190 bis 400 °C der vom Hersteller zugelassenen Maximaltemperatur von 80 °C die mit CAF gefüllten Schläuche der Klasse 1 bei stehendem Löschmittel, also bei geschlossenem Strahlrohr, empfindlicher reagieren als mit Wasser gefüllte Schläuche. Jedoch blieben selbst bei Ofentemperaturen bis zu 500 °C sowohl mit Wasser als auch mit CAF gefüllte Schläuche intakt, solange die Löschmittel flossen. Auch bei geschlossenem Strahlrohr, also bei ruhendem Fluid, hielten die Schläuche stand, solange die Umgebungstemperatur die Schmelztemperatur von Polyester von 250 °C nicht überschritt. Weiterführende Versuche, unter anderem auch mit den Schläuchen der höherwertigeren Materialklassen 2 und 3, wurden bei einer Umgebungstemperatur von 275 °C durchgeführt. Zusätzlich simulierte eine 450 °C warme Platte, die nach fünf Minuten bei 275 °C Umgebungstemperatur gegen den Schlauch gedrückt wurde, das Aufliegen auf heißem Brandschutt. Dabei kam es mit beiden Löschmedien zum Versagen der Druckschläuche der Klassen 1 und 2, wenn die Löschmittel bis zu 5 Minuten lang im Schlauch standen. Bei längeren Standzeiten des Löschmediums CAF kam es unter den Versuchsbedingungen auch bei Schlauchklasse 3 zum Versagen des Schlauchmaterials.

Aus den Untersuchungen leiten Föhl und Schaaf [53] Einsatzhinweise für die Verwendung von CAF im Inneneinsatz ab. So empfehlen die Autoren, im Inneneinsatz mit CAF nur geringe Verschäumungszahlen im Bereich des Nassschaumes zu verwenden und das Strahlrohr unabhängig von der auf das Einsatzpersonal einwirkenden Temperatur nicht länger als acht Minuten geschlossen zu halten. Besteht die Gefahr, dass der Schlauch gefährlichen Temperaturen ausgesetzt sein könnte, sollte stets so viel Löschmittel abgegeben werden, dass dem Schaumzerfall im Schlauch vorgebeugt wird. Alternativ dazu ist in solchen Fällen die Unterbindung der Luftzufuhr zur Schaummittellösung in Betracht zu ziehen.

Im Zusammenhang mit seiner Auseinandersetzung mit der Thematik *CAFS* in seinem Werk *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum* schreibt de Vries [27] von Schlauchplatzern beim CAF-Einsatz in Tübingen/Deutschland und East Sussex/England. Noch häufiger kommt es seinen Recherchen zu Folge zum Abrutschen der Druckschläuche von den Einbindestutzen der Schlauchkupplungen. Bekannt geworden ist dieses Problem durch Meldungen aus Luxemburg und Offenbach am Main, wo es infolgedessen zu erheblichen Sachschäden kam. Zwar gäben amerikanische Hersteller, die als Vorreiter der CAF-Anwendung gelten, an, derartige Probleme nicht zu kennen, jedoch warnt de Vries davor, die mechanischen Eigenschaften amerikanischer Druckschläuche mit denen europäischer

Schläuche zu vergleichen. Demnach verfügen die Amerikaner über Schläuche mit einer zweiten gewebten Außenhaut, welche einen zusätzlichen Schutz vor äußeren Einwirkungen bietet. Zudem ist das Kupplungssystem bzw. dessen Einbindung ein anderes. In diesem Zusammenhang erwähnt de Vries, dass nach DIN 14811:2008-01 genormte Feuerwehrdruckschläuche nur für den Einsatz von Wasser mit nichtkomprimierbaren Löschmittelzusätzen, also nicht für CAF, vorgesehen sind.

Neben besonders genormten Druckschläuchen empfehlen amerikanische Quellen im CAF-Einsatz die Verwendung von Vollstrahlrohren und Kugelhähnen. Bei den in Deutschland üblicherweise zum Einsatz kommenden Hohlstrahlrohren und Niederschraubventilen hat nach de Vries' Meinung der am Strahlrohr ausgebrachte Schaum keine der Eigenschaften mehr, die am Fahrzeug eingestellt werden. Grund dafür seien Einbauten wie Ventilteller und Siebe in den Armaturen, die sich nachteilig auf die Schaumqualität auswirken [27].

Nach Braun [54] ist auch die Verwendung von Hohlstrahlrohren im CAF-Einsatz möglich. Die Hohlstrahlrohre sollten dabei aber die Einstellung eines Volumenstromes im Bereich von mehr als 300 l/min zulassen. Die Einstellung niedrigerer Durchflussmengen zieht für den CAF zu kleine Querschnitte an der Austrittsöffnung nach sich. Die Schaumqualität nehme dadurch ab und eine wässrige Dispersion mit einer geringen Schaumschichtstärke sei dann das Resultat. Braun erwähnt aber auch, dass nur Rundstrahlrohre mit einem Mindestquerschnitt von 19 mm den Schaum in seiner höchstmöglichen Qualität ausbringen können.

Praxiserfahrungen, wie sie zum Beispiel Demel in seiner Arbeit über Brand- und Löschversuche bei der Berufsfeuerwehr Wuppertal [55] auswertet, lassen verlauten, dass auch der CAF-Einsatz mit Rundstrahlrohren im Innenangriff nicht empfehlenswert ist. So sei eine flächendeckende Abgabe von CAF mit dem Rundstrahlrohr nicht möglich. Unter der Annahme einer Betriebsstörung des CAFS stünde der Angriffstrupp dann einem Wohnungsbrand mit einem Wasservollstrahl gegenüber. Dieser ist weder in der Lage, den Brand wirksam zu bekämpfen, noch bietet er Schutz vor Flammen und Hitze. Demel empfiehlt für den CAF-Innenangriff die Verwendung von Hohlstrahlrohren mit einer Durchflusseinstellung von $\dot{V} = 300 - 400 \text{ l/min}$. Die Verschäumungszahl sollte dabei nicht größer als 10 sein, um genügend Wasseranteil zur Kühlung des Brandgutes vorhalten zu können.

Die Löschversuche der Berufsfeuerwehr Wuppertal zeigen, dass die im Innenangriff zur Anwendung kommende Rauchgaskühlung mittels Impulslöschtechnik mit dem Löschmittel CAF weder unter Verwendung von Rundstrahlrohren noch mit Hohlstrahlrohren zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Wenn CAF mit dem dafür vorgesehenen Rundstrahlrohr verwendet wird, sei zwar eine Rauchgaskühlung zu

verzeichnen, wenn der Schaumstrahl gegen die Decke gerichtet wird, dort abprallt und sich großflächig im Raum verteilt. Diese sei aber nicht vergleichbar mit dem Sprühstrahl eines Hohlstrahlrohres. Zudem wurde beobachtet, dass die mit dem Schaumstrahl in den Raum eingebrachte Frischluft eine Intensitätszunahme des Brandes und sogar eine Rauchgasdurchzündung bewirkte. Das Versuchskomitee kam zu dem Entschluss, dass der Innenangriff mit einem Rundstrahlrohr nicht nur wenig sinnvoll, sondern auch lebensgefährlich sein kann.

Darüber hinaus spricht man sich auch gegen die Anwendung des Impulslöschverfahrens mit CAF und Hohlstrahlrohren aus. Ein sehr hoher, druckluftbedingter Rückschlag beim Öffnen des Strahlrohres sowie sich ändernde Schaumqualitäten bergen Gefahren und mindern die Effizienz des Verfahrens [55].

2 Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit wurden umfangreiche Versuchsreihen in Kooperation mit den Partnern des Verbundprojektes AERIUS durchgeführt. Laborversuche zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der anwendungsbereiten Wasser-Schaummittelgemische (im Folgenden auch *Premix* genannt) gehörten ebenso zum Versuchsplan wie diverse Brandversuche zur Bestimmung der Effizienz des fertigen Löschmittels CAF. Für die Untersuchungen kamen zwei Class A Schaummittel unterschiedlicher Hersteller zum Einsatz. Diese werden nachfolgend anonymisiert und als X bzw. Y bezeichnet.

2.1 Bestimmung der Netzfähigkeit einer Wasser-Schaummittellösung in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung

Die Netzfähigkeit verschiedener Premixe wurde in zwei unterschiedlichen Versuchsserien bestimmt. Die Auswirkungen von Wasserart, Schaummittel, Schaummittelzumischrate und Premixtemperatur auf die Netzfähigkeit einer Lösung wurden in Anlehnung an die EN 1772 *Grenzflächenaktive Stoffe - Bestimmung des Tauchnetzvermögens* [56] ermittelt. Ebenfalls ein Maß für die Netzfähigkeit dieser Lösungen ist deren Oberflächenspannung, welche unter Zuhilfenahme der DIN 55660-6 *Beschichtungsstoffe - Benetzbarkeit - Teil 6: Messung des dynamischen Kontaktwinkels* [57] bestimmt wurde.

2.1.1 Bestimmung des Tauchnetzvermögens

Die Bestimmung des Tauchnetzvermögens ist ein geeignetes Verfahren, die Netzfähigkeit eines Löschmittels zu untersuchen. Die Netzfähigkeit einer Lösung beschreibt deren Bereitschaft, die in einem Material eingeschlossene Luft zu verdrängen. Die Untersuchung der Netzfähigkeit unverschäumter Schaummittellösungen erfolgte in 792 Einzeltests und wurde in Anlehnung an das Verfahren zur Bestimmung des Tauchnetzvermögens gemäß EN 1772 [56] in Zusammenarbeit mit der Berufsfeuerwehr Hamburg [58] durchgeführt.

Versuchsaufbau

Das Testverfahren dieser Versuchsreihe erfüllte die gleichen Kriterien wie das Verfahren der Untersuchung des Tauchnetzvermögens nach EN 1772. Dabei wurde ein genormtes Baumwollpad vollständig in die zu testende Lösung eingetaucht und die Zeit bis zur vollständigen Benetzung des Gewebes gemessen. Der gegenüber der Norm modifizierte Versuchsaufbau umging das gelegentliche Verhaken des Baumwollpads in der Tauchklemme, indem diese durch eine spezielle Vorrichtung ersetzt wurde. Die Pads wurden mittels Angelhaken der Größe 10 und einem 0,16 mm starken Nylonfaden mit einem 1,5 g schweren Gewicht verbunden, welches für den nötigen Abtrieb sorgte, um das Pad gänzlich in die Testflüssigkeit einzubringen. Das speziell entwickelte Gefäß mit den Abmessungen 160 mm x 85 mm x 100 mm (L x B x H) fasste 1,0 Liter des zu testenden Premixes. Es bestand aus einem 1,0 mm starken Gefäßboden aus Edelstahlblech und einer

Edelstahlblechwandung mit eingefasstem Acrylglas-Sichtfenster. Auf das Gefäß wurde eine Haltevorrichtung angebracht, die durch eine Drehung bis zu sechs präparierte Baumwollpads gleichzeitig in die Testflüssigkeit einbringen konnte. Das Gefäß stand auf einem Magnetrührer (IKA RCT basic), mit welchem die Temperatur der Schaummittellösung angepasst wurde. Die Temperaturüberwachung der Flüssigkeit erfolgte mittels elektronischem Kontaktthermometer (IKA ETS-D5). Der beschriebene Versuchsaufbau sowie eine Skizze des Baumwollpads am beschwerten Widerhaken sind in Abbildung 4 dargestellt.

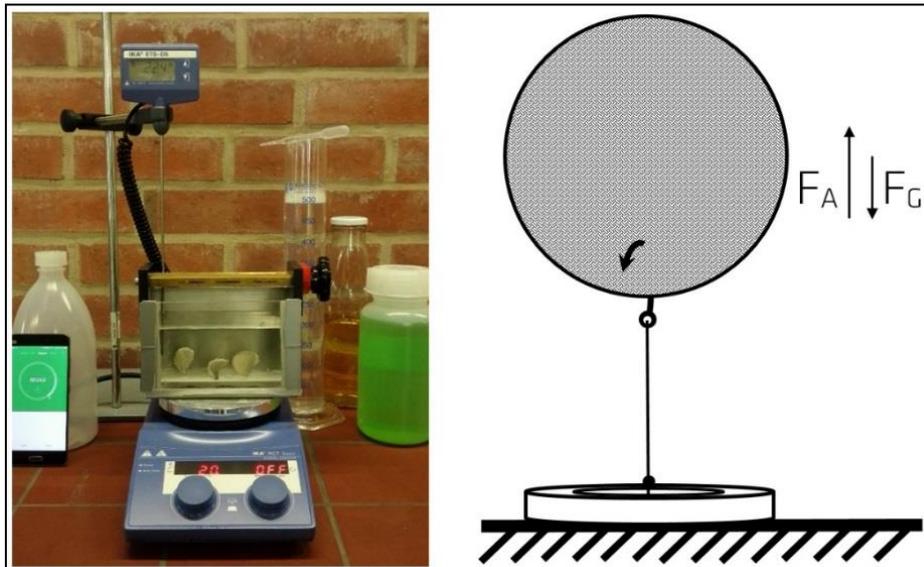


Abbildung 4: Optimierter Versuchsaufbau mit Baumwollpad am Widerhaken zur Bestimmung der Netzfähigkeit verschiedener Premixe (zum Zeitpunkt des Eintauchens)

Versuchsablauf

Die Zeiten bis zur vollständigen Benetzung des Gewebes wurden in Abhängigkeit folgender Faktoren bestimmt:

- Wassertyp (Vollentsalztes Wasser / Süßwasser / Meerwasser)
- Schaummittel (Class A, Hersteller X / Class A, Hersteller Y)
- Zumischrate (0,0 % / 0,1 % / 0,3 % / 0,5 % / 1,0 % / 3,0 %)
- Löschmitteltemperatur (4 °C / 20 °C / 40 °C / 60 °C) [58]

Sowohl das Meerwasser als auch das Süßwasser wurden nach den Angaben der EN 1568-3:2018 [49] künstlich hergestellt. Jeweils ein Liter der Testlösung wurde unmittelbar vor Versuchsbeginn aus dem Gewässer sowie dem Schaummittel angerührt und auf eine Ausgangstemperatur von 4 °C herabgekühlt. Die Baumwollpads wurden mit den Gewichten versehen. Um eine Verfremdung der Messdaten durch Verunreinigungen zu vermeiden, kamen dabei sorgfältig entfettetes Werkzeug und Nitrilhandschuhe zum Einsatz. Nachdem die Pads in die Testlösung gegeben wurden, sanken die Gewichte sofort

zu Boden, während die Pads durch ihre Auftriebskraft zunächst in der Lösung schwebten. Die Flüssigkeit benetzte dann allmählich das Gewebe, bis die Auftriebskraft (F_A) geringer als die Gewichtskraft (F_G) war und das Pad zu sinken begann. Die verstrichene Zeit vom Eintauchen des Pads in die Flüssigkeit bis zum Berühren des Gefäßbodens ist ein Maß für die Netzfähigkeit der Lösung. Nach einer ausreichenden Wiederholungsanzahl wurde die Flüssigkeit mittels Heizplatte und Magnetrührer auf die nächsthöhere Temperaturstufe erwärmt, sodass sie für die nächsten Tests wiederverwendet werden konnte. Während der Messung stand das Gefäß neben der Heizplatte, die Testflüssigkeit ruhte und ihre Oberfläche war frei von Schaumblasen.

2.1.2 Kontaktwinkelanalyse

Mit Hilfe der Kontaktwinkelanalyse wurden die Auswirkungen einer Tensidzugabe auf die Oberflächenspannung eines Wassertropfens untersucht. Da die Netzfähigkeit einer Flüssigkeit von ihrer Oberflächenspannung abhängt [59,60], kann mit Hilfe der Kontaktwinkelanalyse die Bereitschaft zur Benetzung eines bestimmten Stoffes bestimmt werden. Insgesamt wurden 1200 Messungen an Tropfen verschiedener Wasser-Schaummittelgemische auf unterschiedlichen Untergründen durchgeführt.

Versuchsaufbau

Die zu untersuchenden Wasser-Schaummittelösungen entsprachen den in Kapitel 2.1 beschriebenen Konstellationen aus Wassertyp, Schaummittel und Zumischrate. Die Löschmitteltemperatur lag je nach Alter des Premixes zwischen 17 °C zu Versuchsbeginn und 22 °C zu Versuchsende. Zur Ausbringung der Tropfen wurde eine horizontal angeordnete 1,0 ml Einwegspritze (Braun Inject F) mit aufgesteckter Vieweg Dosiernadel ($d = 0,15 \text{ mm}$) verwendet. Die Dosierung erfolgte durch eine automatische Spritzenpumpe von World Precision Instruments, AL1000-220, mit einer Pumpgeschwindigkeit von $v_p = 4.000 \text{ ml/Std.}$ Die Auflageplatten, auf denen die Tropfen aufgebracht wurden, bestanden aus Materialien mit unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten. Für die Untersuchungen wurden Glas ($R_z = 0,33 \text{ }\mu\text{m}$), Polystyrol ($R_z = 0,80 \text{ }\mu\text{m}$) und polierter Edelstahl ($R_z = 1,24 \text{ }\mu\text{m}$) herangezogen. Die Erfassung der Messdaten erfolgte mit dem optischen Kontaktwinkelmessgerät OCA 35XLH der DataPhysics Instruments GmbH. Dieses Gerät verwendet eine Kamera zur Erfassung der Tropfenkonturen vor einer LED-Lichtquelle. Die Visualisierung und Aufzeichnung der Daten erfolgte durch mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware SCA20.



Abbildung 5: Versuchsaufbau der Kontaktwinkelmessungen

Versuchsablauf

Vor Versuchsbeginn wurde die jeweilige Tropfenauflegeplatte auf dem dreidimensional steuerbaren Probentisch des Kontaktwinkelmessgerätes so in Position gebracht, dass die Distanz zwischen Dosiernadel und Auflageplatte $s = 15 \text{ mm}$ betrug. Dieser Wert wurde experimentell ermittelt. Er beziffert die Mindestdistanz, die notwendig war, damit der Tropfen ungehindert infolge seines Eigengewichtes von der Dosiernadel abreißen konnte. Bei einer geringeren Distanz wirken Adhäsionskräfte auf den an der Dosiernadel hängenden Tropfen, die ein frühzeitiges Abreißen bewirkt hätten. Die Kamera wurde mit Hilfe eines Probetropfens auf den Auftreffort des zu untersuchenden Tropfens fokussiert und so eingestellt, dass der abgesetzte Tropfen $2/3$ des Bildes einnimmt. Die Auftreffplatte wurde anschließend gereinigt und erneut an der gleichen Stelle positioniert. Die Spritzenpumpe wurde aktiviert und nach Abreißen eines Tropfens gestoppt. Die automatische Kontaktwinkelmessung begann zum Zeitpunkt des Auftreffens des Tropfens auf die Auflageplatte und dauerte über einen Zeitraum von 15 Sekunden an. Um die Einflüsse durch Messabweichungen zu minimieren, wurden mindestens 12 Wiederholungen pro Löschmittelkonstellation durchgeführt. Nach jeder Messung wurde die Probenplatte mit einem Präzisionswischtuch und Ethanol gereinigt. Eine anschließende Wartezeit von 60 Sekunden garantierte eine völlig saubere und trockene Oberfläche der Probenplatten.

2.2 Bestimmung der Effizienz von CAF bei der Bekämpfung von Feststoffbränden im Vergleich zu herkömmlichen Löschmitteln

Die Untersuchung der Löscheffizienz von CAF im Vergleich zu herkömmlichen Löschmedien wurde in mehreren Versuchsserien mit Feststoff-Bemessungsbränden durchgeführt. Sowohl die Outdoor- als auch die Indoor-Bemessungsbrandversuche erfolgten in Anlehnung an die Bestimmungen des Anhanges I der DIN EN 3-7:2007 *Tragbare Feuerlöscher - Teil 7: Eigenschaften, Löschleistung, Anforderungen und Prüfungen* [13]. Die Eckdaten und Untersuchungsschwerpunkte aller durchgeführten Feststoff-Bemessungsbrände sind in der nachstehenden Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Feststoff-Bemessungsbrände

	Outdoor Mischkrippenbrände	Indoor Mischkrippenbrände	Indoor Holzkrippenbrände
Kapitel	2.2.1	2.2.2	2.2.3
Umgebung	Freiland	Brandraum 7,00 x 5,64 x 2,75 m	Brandraum 9,70 x 5,85 x 8,00 m
Brandlast	Mischbrandkrippe 0,88 x 0,88 x 0,48 m	Mischbrandkrippe 0,88 x 0,88 x 0,48 m	5A-Holzkrippe 0,50 x 0,50 x 0,56 m
Löschmittel	Wasser Netzwasser CAF	Wasser Netzwasser CAF	Wasser Netzwasser Schwerschaum CAF
Schwerpunkt	Untersuchung der Wirksamkeit der Löschmedien bei Freilandbränden	Untersuchung der Wirksamkeit der Löschmedien bei Raumbränden; Untersuchung der Rauchgaszusammensetzung in Abhängigkeit des Löschmediums	Untersuchung des Einflusses von Strahlform, Zumischrate und Verschäumungszahl auf die Wirksamkeit der Löschmedien bei Raumbränden

Entwicklung und Aufbau einer neuartigen Mischbrandkrippe

Mit dem Ziel, einen Bemessungsbrand zu schaffen, welcher Brandlasten mit hohem Kunststoffanteil simuliert, wurde im Rahmen einer Masterarbeit [61] eine Mehrkomponenten-Krippe, basierend auf den Regelwerken DIN EN 3-7 des Deutschen Instituts für Normung [13] und UL 711 der Underwriters Laboratories [62], entwickelt. Durch die Zugabe unterschiedlicher Kunststoffe in das hölzerne Krippengerüst wurde das Brandverhalten der Krippe so angepasst, dass sie hohe Ansprüche an die Effektivität des zu testenden Löschmittels stellt.

Die Konstruktion der Mischbrandkrippe basiert auf einer qualitativen und quantitativen Erfassung aller Möbel und Einrichtungsgegenstände sowie derer Massen in fünf verschiedenen zeitgenössischen Wohnräumen. Das durchschnittliche Wohnzimmer setzt sich demnach aus 70 % Holz, Holzverbundstoffen sowie Papier und 30 % synthetischen Materialien zusammen [61]. Die synthetischen Materialien können in neun unterschiedliche Kunststoffe, die den Hauptbestandteil dieser Kategorie ausmachen, unterteilt werden. Die gesammelten Daten dieser Erfassung sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Der durchschnittliche Heizwert $\overline{H_{Zi}} = 20,12 \text{ MJ/kg}$ aller im Wohnzimmer enthaltenen Materialien berechnet sich aus Gleichung (1). Die neue Mischbrandkrippe sollte über einen

Zeitraum von $\Delta t = 800$ s eine maximale Wärmefreisetzungsrate von $Q_{max} = 1,0 \dots 2,5$ MJ/s aufweisen. Die Wärmemenge, die durch diese Bedingungen gegeben ist, berechnet sich nach Gleichung (2). Aus der errechneten Wärmemenge sowie dem durchschnittlichen Heizwert eines Wohnzimmers ergibt sich gemäß Gleichung (3) die Krippenmasse, die notwendig ist, um alle genannten Vorgabekriterien des Brandverlaufes zu erfüllen.

Tabelle 4: Materialien und Massenanteile im zeitgenössischen Durchschnittswohnzimmer und die daraus übernommene Materialverteilung in der neu entwickelten Mischbrandkrippe [39]

Material	Massenanteil m_i im gewöhnlichen Wohnzimmer [%]	Material- heizwert H_i [MJ/kg]	Massenanteil m_i in der Misch- brandkrippe [kg]	Material- dichte ρ_i [g/cm ³]
Holzverbundstoff/ Holz/ Papier	70,00	15,84	69,58	0,55-0,59
Polyvinylchlorid (PVC)	2,90	18,00	2,88	1,44
Polyurethan (PU)	4,50	24,12	4,47	1,31
Polypropylen (PP)	2,90	43,92	2,88	0,91
Polyamid 6 (PA6)	0,90	28,44	0,89	1,17
Polyethylen (PE)	2,30	43,92	2,29	0,92
Polycarbonat (PC)	5,50	29,88	5,47	1,16
Polyethylenterephthalat (PET)	5,40	21,96	5,37	1,36
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	4,20	35,64	4,17	1,04
Polystyrene (PS)	1,40	39,96	1,39	1,05
	$\Sigma = 100,00$	$\overline{H_{Zt}} = 20,12$	$m_k = 99,40$	

$$\overline{H_{Zt}} = \sum (m_i \cdot H_i)$$

$$\underline{\underline{\overline{H_{Zt}} = 20,12 \text{ MJ/kg}}} \quad (1)$$

$$W = Q_{max} \cdot t$$

$$W = 2,5 \text{ MJ/s} \cdot 800 \text{ s}$$

$$\underline{\underline{W = 2000 \text{ MJ}}} \quad (2)$$

$$m_K = W / \overline{H_{Zt}}$$

$$m_K = 2000 \text{ MJ} / 20,12 \text{ MJ/kg}$$

$$\underline{\underline{m_K \approx 99,40 \text{ kg}}} \quad (3)$$

Das Grundgerüst der Mischbrandkrippe besteht aus zwölf aufeinandergestapelten Schichten von je acht parallel ausgerichteten Kiefernholzstäben mit einer quadratischen Stirnfläche von 40 mm x 40 mm. Jeder Holzstab in jeder Schicht hat eine Länge von 880 mm und ist im rechten Winkel zu den Stäben der angrenzenden Schicht ausgelegt. Benachbarte Stäbe sind durch Lücken mit einer Weite von 80 mm voneinander getrennt. Die daraus

resultierende Krippe hat eine Grundfläche von 880 mm x 880 mm und eine Höhe von 480 mm. Um ein Verrutschen der Holzstäbe während des Löschangriffes zu verhindern, wurden die Stäbe untereinander mit 6 mm Buchenholzdübeln gesichert.

Die Restfeuchtigkeit des technisch getrockneten Holzes beträgt 11 ± 2 %. Der schwankende Harzgehalt in den Holzstäben bewirkt eine Variation im Gewicht des Krippengerüsts zwischen 78,4 kg und 81,3 kg. Die Kunststoffe wurden in Form von 500 mm langen und 47 mm breiten Streifen eingeschoben. Die Stärken der Kunststoffstreifen variieren produktionsbedingt zwischen 4 mm und 8 mm. Um eine Verstopfung der Ventilationskanäle zu vermeiden, wurden die Kunststoffstreifen auf ihrer Längsseite stehend diagonal aufgerichtet und jeweils rechtsbündig an einen Holzstab angelehnt. Abhängig von ihrer Materialstärke wurden sie einzeln oder bündelweise in die Kanäle eingeschoben. Somit bleiben zwischen den Stäben Lücken von mindestens 40 mm Breite, um den vertikalen Heißgasstrom sicherzustellen. Die Kunststoffstreifen wurden nur bis zu einer Tiefe von 440 mm eingeschoben, um Überlappungen und damit blockierte Strömungskanäle im Krippenkern zu vermeiden. Die verbleibenden 60 mm schauen aus der Krippe heraus und bieten dem Feuer eine größere Angriffsfläche. Die Kunststoffstreifen werden ebenfalls mit Buchenholzdübeln gegen Verrutschen gesichert.

Die Verteilung der Kunststoffe erfolgte unter Berücksichtigung ihrer Brandeigenschaften. Schwer entflammbar und nicht selbstständig fortbrennende Materialien wie Polycarbonat und Polyethylenterephthalat wurden in den unteren Krippenschichten verteilt, um die Wärmeenergie der Initialzündflamme unter der Krippe auszunutzen. Normal entflammbar Materialien wurden in den oberen Krippenschichten angeordnet. Dort blieben sie erhalten, bis sich das Feuer vollständig ausgebreitet hat. Der Aufbauplan der Mischbrandkrippe inklusive der Anzahl und Positionen aller verwendeten Kunststoffstreifen ist in Abbildung 6 veranschaulicht.

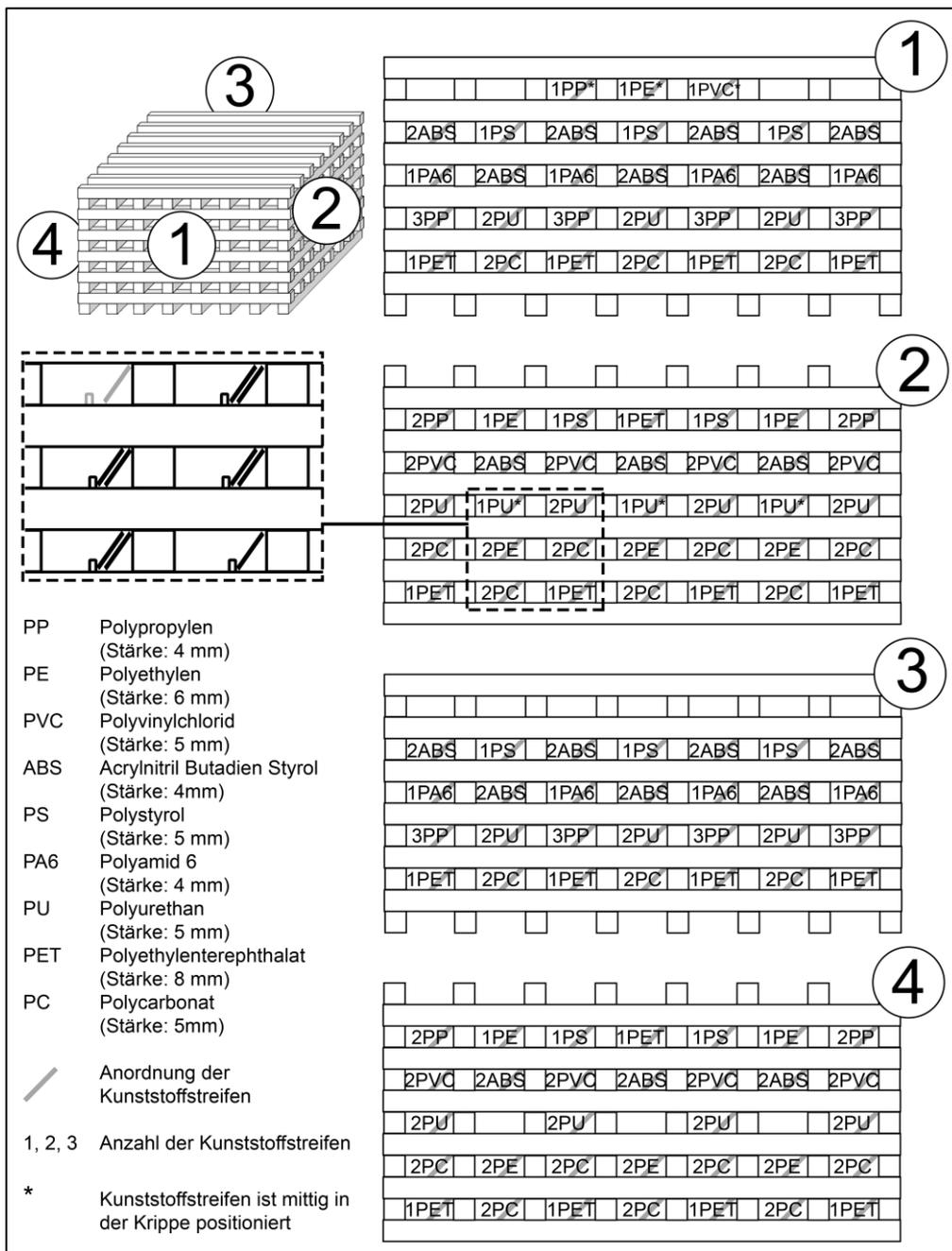


Abbildung 6: Aufbauplan der neuartigen Mischbrandkrippe

2.2.1 Outdoor-Mischkrippenbandversuche

Die Effizienz des Löschmittels CAF gegenüber den herkömmlichen Löschmedien Wasser und Netzwasser wurde anhand einer Outdoor-Versuchsserie mit acht Mischbrandkrippen untersucht [39].

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Mischbrandkrippe (a) stand auf einem Gitterrost 0,20 m über einer 1,00 m x 1,00 m breiten Zündwanne mit einer Wandungshöhe von 0,05 m. Ein 2,00 m hohes, feuerfestes Stativ (b) direkt neben der Krippe diente als Befestigung für die Thermoelemente sowie für die Sonde des Fourier Transform

Infrarot- (FTIR) Spektrometers. Die Rauchgaszusammensetzung wurde mit einem mobilen FTIR-Gerät (Gasmeter Dx4000N, Gasmeter Technologies GmbH) ermittelt. Dabei wurden u.a. Komponenten wie CO, CO₂, NO_x, CH₄, HCl, HCN, Acrolein und SO₂ quantitativ nachgewiesen. Die Sonde des FTIR-Spektrometers befand sich in einer Höhe von 1,50 m zentral über der Krippenoberseite. Für die Erfassung des Temperaturverlaufes wurden zwölf Typ K Thermoelemente (OMEGA Engineering GmbH) in der Krippe sowie an ihrer Oberfläche installiert. Die Verteilung der Thermoelemente ist aus Abbildung 8 zu entnehmen. Der ganze Krippenaufbau befand sich in einer runden Stahlwanne (c) mit einem Durchmesser von 3,70 m. Mit dieser Wanne konnten herabfallende Brandreste und Schmutzwasser aufgefangen werden. Für den Löschangriff verwendete der Angriffstrupp (d) ein speziell entwickeltes und auf das Versuchsdesign angepasstes fahrbares Feuerlöschsystem (e) der Firma Schmitz One Seven GmbH. Das Löschesystem fungierte als mobiles CAFS, konnte aber durch Abschalten der Druckluftzufuhr zur Mischkammer und unter Verwendung unterschiedlicher Strahlrohraufsätze auch unverschäumte Löschemedien wie Wasser und Netzwasser ohne Luft einschüsse ausbringen. Die technischen Daten des Versuchslöschgerätes sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Technischer Aufbau des Löschangriffes für die Outdoor-Mischkrippenbrandversuche

Technische Daten	
Löschgerät	Extinguisher (Schmitz One Seven GmbH)
<ul style="list-style-type: none"> • Löschmitteltank • Druckluftversorgung • Druckluftzumischung • Systemdruck 	50 Liter Premix Externer Kompressor Einstellung über Kugelhahnventil (auf/zu) 7 bar
Schlauchleitung	15 m
Auswurfarmatur	Pistolenstrahlrohr (Hohlrohr), Aufschraubdüsen
Löschmittel	Wasser / Netzwasser / CAF
Löschmittelfwurfweite	3,00 – 6,00 m (abhängig vom Löschemedium)
Durchflussrate	9,80 ± 0,80 Liter Premix pro Minute

Um den Verbrauch des Premix während des Löschvorganges zu bestimmen, stand das Löschgerät auf einer Waage (Sartorius CW1P1-150IG-I), in Abbildung 7 mit (f) gekennzeichnet. Die trichterförmige Schaumrutsche (g) diente zum Auffangen von Schaumproben zur näheren Untersuchung. Die Wärmestrahlung des Feuers wurde mit vier Wärmeflussaufnehmern (h) der Firma Medtherm (Model 64-02-14/ZNSW-1C-150) in den Entfernungen 9,70 m und 11,40 m erfasst. Die Sensoren waren so ausgerichtet, dass sie die Krippe frontal anvisierten und sie die Sonne während der Versuchszeiten im Rücken hatten. So wurde eine Beeinflussung der Messergebnisse durch Sonneneinstrahlung verhindert. Der Versuchsablauf wurde mittels Wärmebildkamera (i), hochauflösender Videokamera (j) und dreiteiligem Überwachungskamerasystem (k) aus drei verschiedenen

Winkeln aufgezeichnet. Die Windrichtung wurde mit einer Richtungsanzeige (l) in 10 m Höhe bestimmt. Die Bedienung und Überwachung der Messsysteme erfolgte aus einem Messpavillon (m) in sicherem Abstand zum Versuchsfeuer. Der komplette Versuchsstand war dreiseitig von einem 3 m hohen Brandwall umgeben, welcher bedingt vor Windeinflüssen schützte. Vor Winden aus Richtung der offenen Wallseite schützten drei Windschutzwände (o).

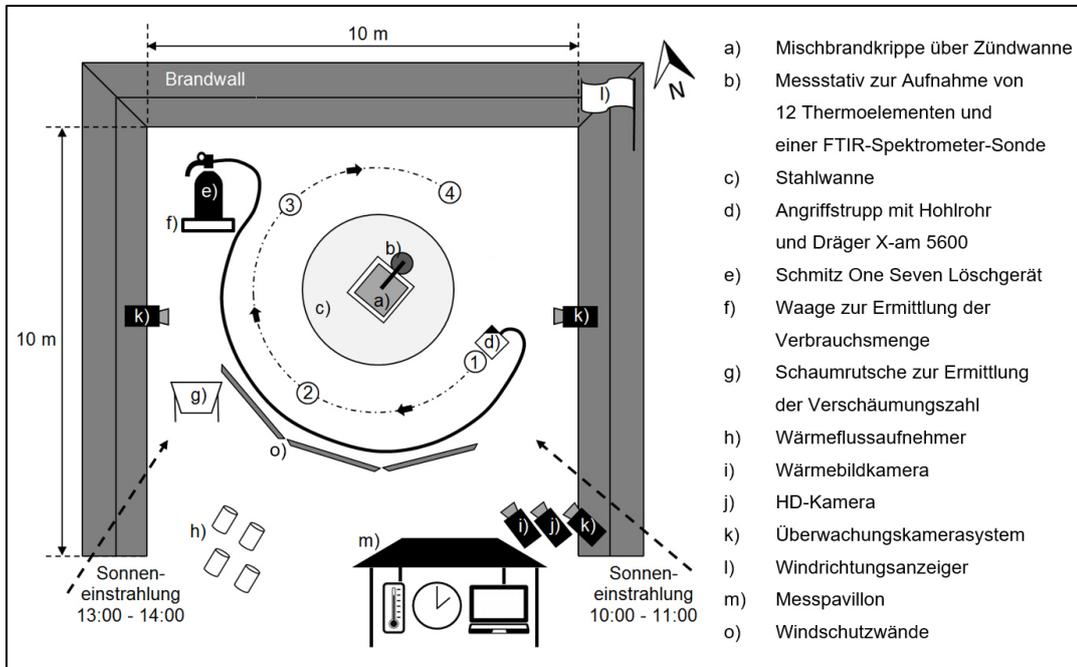


Abbildung 7: Versuchsaufbau der Outdoor-Mischkripenbrandversuche

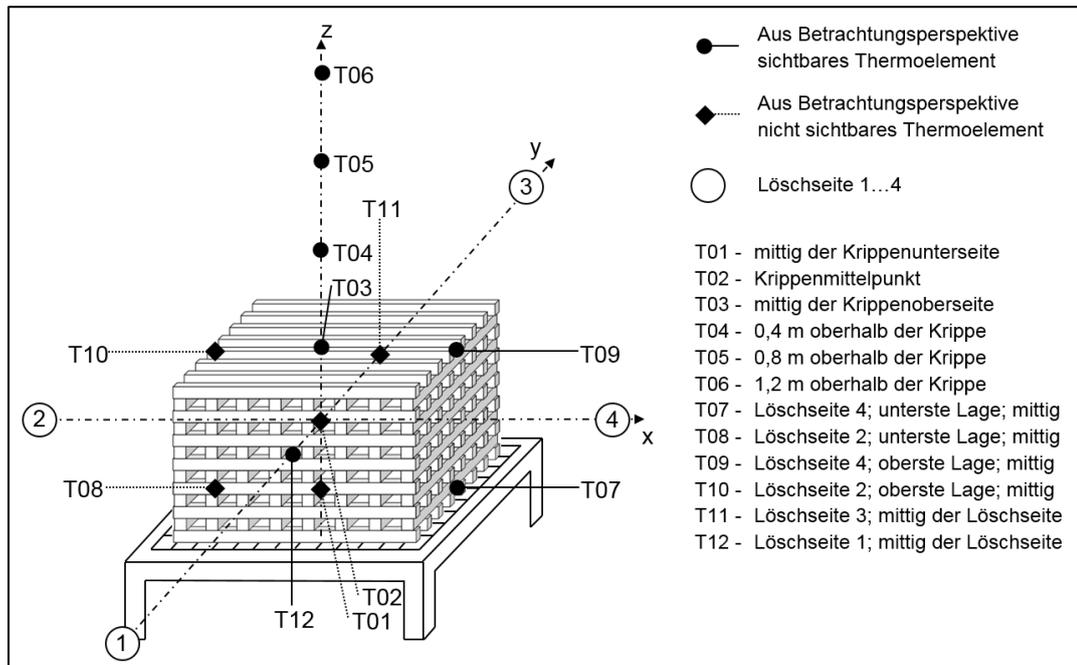


Abbildung 8: Verteilung der Thermoelemente an und in der Mischbrandkrippe

Versuchsablauf

Die Zündwanne war mit 9,0 l Wasser befüllt, sodass eine ebene Fläche geschaffen wurde, auf der sich 6,1 l n-Heptan gleichmäßig und vollflächig unter der Krippe verteilen konnten. Diese Menge n-Heptan sorgte für eine Initialzündung über die Dauer von 140 ± 15 s. Nach Erlöschen der Initialzündung brannte die Krippe bis zum Beginn der Löscharbeiten selbstständig fort. Diese Phase dauerte je nach Witterungsbedingungen zwischen 165 s und 420 s an, bis die Krippe ihre Vollbrandphase erreichte. Die Löscharbeiten wurden eingeleitet, sobald die Krippe komplett vom Feuer erfasst war. Den Löschvorgang führten erfahrene Angehörige der Berufsfeuerwehr aus. Um möglichst reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, startete der Löschvorgang mit einer systematischen Applikation des jeweiligen Löschmittels. Dabei wurde das Strahlrohr, beginnend auf der untersten Ebene der Löschseite 1, horizontal schwenkend gleichmäßig nach oben zur obersten Ebene der Löschseite 1 geführt. Sobald eine Löschseite vollständig mit Löschmittel beaufschlagt war, wurde der Löschvorgang nach dem gleichen Prinzip und ohne Unterbrechung auf der nächsten Löschseite fortgeführt. Der Angriffstrupp umrundete die Krippe dabei im Uhrzeigersinn auf dem in Abbildung 7 spezifizierten Weg. Nachdem die Krippe einmal systematisch umrundet wurde, schloss ein gezielter Löschvorgang an, um die restlichen Flammenerscheinungen und den schwer erreichbaren Krippenkern zu löschen. Dabei erfolgte jeweils ein Versuch pro Löschmittel mit Mindestabstand ($s \geq 1,00$ m bei CAF-Löschvorgängen bzw. $s \geq 0,50$ m bei Wasser- oder Netzwasserlöschvorgängen) und ein Versuch ohne Mindestlöschabstand. Beim Löschen ohne einen Mindestabstand konnte bei Bedarf das Strahlrohr auch in die Krippe eingeführt werden. Beide Taktiken verwendeten nur noch den gezielten Auftrag von Löschmittel auf brennende Krippenteile. Sobald der Angriffstrupp und drei Beobachtungsposten das Erlöschen aller Flammen feststellten, wurde der Löschvorgang eingestellt. Es begann eine dreiminütige Beobachtungsphase. Trat in dieser Zeit eine Rückzündung auf, wurden die Flammen unverzüglich gelöscht. Die Beobachtungsphase begann dann von vorn. Die Löschzeit wurde gestoppt, sobald die Beobachtungsphase vollständig ohne Rückzündungen ablief.

Die Löschmedien wurden alle mit dem gleichen Löschesystem ausgebracht. Bei der Applikation von CAF wurde ein Hohlrohr in Form eines Pistolenstrahlrohres verwendet. Für die Anwendung von Wasser oder Netzwasser wurde die Druckluftversorgung zur Mischkammer des Löschesystems unterbunden und eine Sprühdüse auf das Hohlrohr aufgeschraubt. Die Premix-Durchflussrate lag bei allen Löschmitteln bei $\dot{V} = 9,80 \pm 0,80$ l/min. Vor jedem Löschversuch mit CAF wurde die Verschäumungszahl (VZ) bestimmt, indem der Löschrhahl auf die Schaumrutsche gerichtet wurde. So konnte der Schaum in einem Messbecher mit dem Volumen von $V = 1$ l aufgefangen und ausgewogen werden. Eine Liste der getesteten Parameter findet sich in Tabelle 6.

Tabelle 6: Liste der getesteten Parameter während der Outdoor-Mischkrippenbrandversuche

Nr.	Vorbrennzeit [s]	Löschmittelzusammensetzung	Mindestlöschabstand [m]
1	360	Wasser	$s \geq 0,50$
2	285	Wasser	-
3	540	Netzwasser (X: 0,3 % Class A)	$s \geq 0,50$
4	330	Netzwasser (X: 0,3 % Class A)	-
5	330	CAF (X: 0,3 % Class A), VZ = 3,9	$s \geq 1,00$
6	360	CAF (X: 0,5 % Class A), VZ = 5,5	-
7	300	CAF (Y: 0,3 % Class A), VZ = 4,7	$s \geq 1,00$
8	390	CAF (Y: 0,3 % Class A), VZ = 4,6	-

2.2.2 Indoor-Mischkrippenbrandversuche

Zur Untersuchung der Effizienzunterschiede zwischen den Löschmedien Wasser, Netzwasser und CAF unter Anwendung von feuerwehrtechnischem Equipment dienten vier Indoor-Löschversuche mit Mischbrandkrippen. Zudem wurde mit ihnen der Einfluss der Löschmedien auf die Rauchgasfreisetzung während des Löschvorganges ermittelt [39].

Versuchsaufbau

Der Aufbau der Indoor-Mischkrippenbrandversuche, welcher sich so weit wie möglich an dem zuvor beschriebenen Aufbau der Outdoor-Mischkrippenbrandversuche anlehnte, ist in Abbildung 9 gezeigt. Die Versuche fanden in einem Brandraum mit den inneren Abmessungen von 7,00 m x 5,64 m x 2,75 m (L x B x H) statt. Der Brandraum befand sich im 6. Stock und war über eine trockene Steigleitung mit einem Kleintanklöschfahrzeug mit eingebautem CAFS verbunden. Der Raum verfügte über zwei Fenster mit einer Öffnungsfläche von jeweils 0,70 m x 1,40 m (B x H). Rechnungen gemäß nationalem Anhang DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09 zufolge sind die Fensteröffnungsflächen ausreichend, um einen brandlastkontrollierten Brandverlauf zu realisieren. Die Tür zum Brandraum wurde während des gesamten Brandversuches geschlossen gehalten und nur kurz für den Angriffstrupp zum Betreten des Brandraumes geöffnet. Die Mischbrandkrippe (a) stand im hinteren Drittel des Raumes. Der Abstand zur Stirnseite des Raumes betrug 1,40 m. Zu den Seitenwänden wurde ein Abstand von jeweils 2,38 m eingehalten. Die Krippe stand wie bei den Outdoor-Brandversuchen auf einem Gitterrost 0,20 m über einer 1,00 m x 1,00 m großen Zündwanne (b), in der sich 9,0 l Wasser und 6,1 l n-Heptan befanden. Eine Auffangwanne (c) schützte die unter dem gesamten Aufbau befindliche Waage (d), welche den Brandverlauf messtechnisch erfasste, vor Wärme- und Feuchtigkeitseintrag. Alle Thermoelemente wurden, wie in Abbildung 8 dargestellt, installiert. Ihre Ausgleichsleitungen führten gebündelt durch eine kleine Öffnung in der Decke, 1,20 m vom Krippenzentrum entfernt, zum Messcomputer in der darüberliegenden Etage. Die Sonde des ebenfalls im 7. Stock aufgebauten FTIR-Spektrometers wurde auch durch die Öffnung geführt und 0,50 m unterhalb der Decke im Brandraum fixiert. Die

Deckenkonstruktion direkt über der Krippe wurde durch eine abgehängte, mit 40 mm starken Mineralwollplatten beplankte, MDF-Platte vor Brandeinwirkungen geschützt. Die Raumtemperatur wurde mit einem weiteren vertikalen Thermoelementestrang (f) in der Raummitte in Halbmeterabständen, 0,70 m über dem Boden beginnend, gemessen. Drei Überwachungskameras und eine Wärmebildkamera zeichneten den Brandverlauf auf. Beim Löschangriff kamen hinter der Steigleitung zwei 15 m lange C-Druckschläuche mit einem Innendurchmesser von 42 mm und ein D-Mehrzweckstrahlrohr ohne Mundstück zum Einsatz. Ein Pumpendruck von 7,5 bar förderte einen Flüssigkeitsvolumenstrom von $\dot{V} = 65 \text{ l/min}$. Der Wasserverbrauch während des Löschangriffes wurde über ein Display am CAFS registriert.

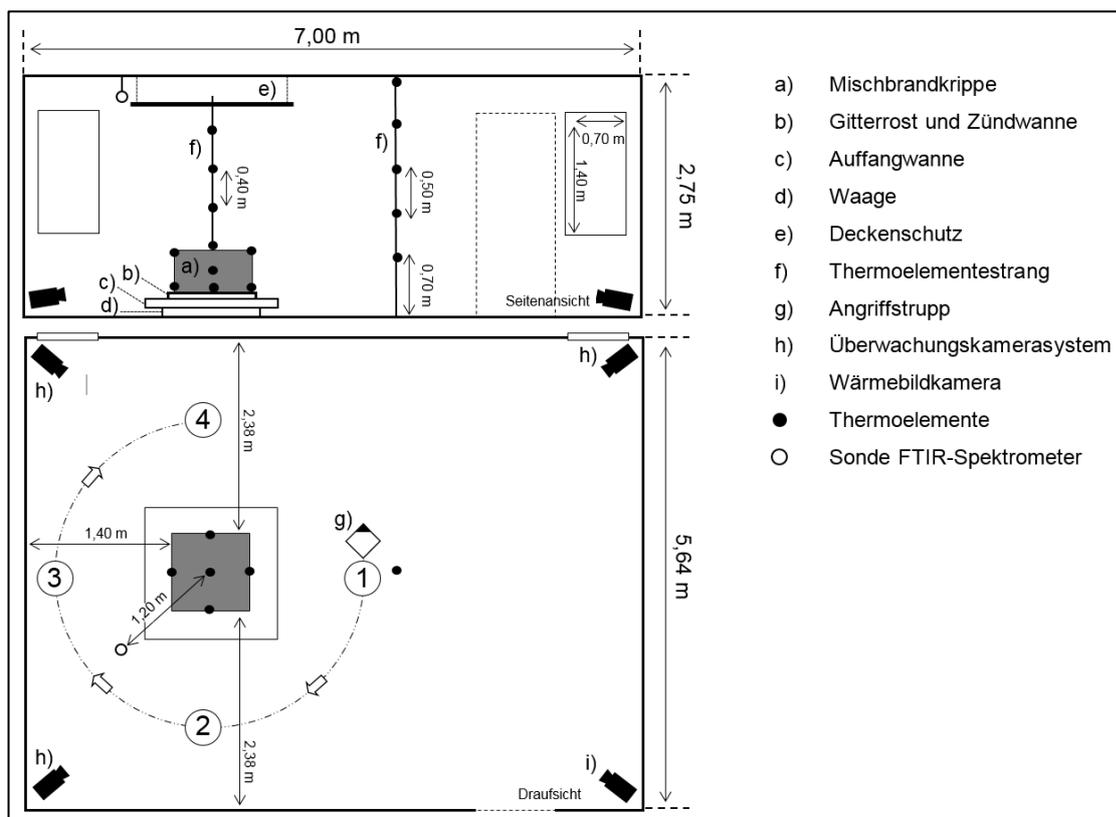


Abbildung 9: Versuchsaufbau der Indoor-Mischkrippenbrandversuche

Versuchsablauf

Vor jedem Versuch wurde durch natürliche und technische Belüftung über einen längeren Zeitraum von 3 bis 5 Stunden die Atmosphäre im Brandraum annähernd der Umgebungstemperatur und -luftfeuchtigkeit angepasst. Die Bestimmung der VZ vor jedem CAF-Versuch fand stets außerhalb des Brandraumes statt. Mit Entzündung des n-Heptans setzte die $140 \pm 15 \text{ s}$ andauernde Beflammung der Krippenunterseite ein. Nach Erlöschen der Heptanlache brannte die Krippe für weitere 420 s selbstständig fort, bevor nach insgesamt 540 s Vorbrennzeit der Angriffstrupp den Brandraum betrat und innerhalb von 10 s die Löscharbeiten einleitete. Der Trupp folgte dabei dem gleichen Angriffsweg über die Krippenseiten 1 bis 4 wie bei den Outdoor-Mischbrandkrippenversuchen. Die Verwen-

derung von feuerwehrtechnischem Equipment mit höherer Durchflussrate, größerem Sprühbild und höherem Austrittsmoment ermöglichte ein schnelleres Ablöschen der einzelnen Krippenseiten mit nur drei Strahlrohrschwenkbewegungen pro Seite. Der CAF-Vollstrahl benötigte vier bis fünf Schwenkbewegungen pro Seite. Zudem war der Brand nach einer einzigen Krippenumrundung bereits vollständig gelöscht, sodass keine weiteren Nachlöscharbeiten erforderlich waren. Im Anschluss erfolgte die dreiminütige Beobachtungsphase wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Genau wie zu den Outdoor-Versuchen wurden Wasser und Netzwasser mit der Sprühstrahleinstellung des Strahlrohres ausgebracht. Die Applikation von CAF erfolgte mit der Vollstrahleinstellung. Für die gesamte Versuchsreihe wurde das Schaummittel des Herstellers X verwendet.

Tabelle 7: Versuchsparameter während der Indoor-Mischkrippenbrandversuche

Nr.	Löschmittelzusammensetzung	Mindestlöscharabstand
1	Wasser	$s \geq 1,50$ m
2	Netzwasser (X: 0,3 % Class A)	$s \geq 1,50$ m
3	CAF (X: 0,5 % Class A), VZ = 5,2	$s \geq 1,50$ m
4	CAF (X: 0,7 % Class A), VZ = 5,6	$s \geq 1,50$ m

2.2.3 Indoor-Holzrippenbrandversuche

Zur Differenzierung der Wirksamkeit der Löschmedien Wasser, Netzwasser, Luftschaum (im Folgenden als *NAF* bezeichnet; Abkürzung aus dem Englischen *Nozzle-aspirated Foam*) und CAF verwendete diese Versuchsreihe genormte 5A-Holzrippen. Dabei wurden in 48 Brandversuchen der Einfluss von Strahlform, Verschäumungszahl (VZ) und Zumischrate (ZR) auf die Schaum- und Löscharqualität von CAF untersucht [8].

Versuchsaufbau

Der in Abbildung 10 dargestellte Versuchsaufbau wurde in einem Brandraum der Dimensionen 9,70 m x 5,85 m x 8,00 m (L x B x H) vorgenommen. Die Krippe (f) stand mindestens 2,60 m von jeder Wand des Raumes entfernt. Der Raum verfügte über keine Fenster und eine Tür der Abmessungen 1,35 m x 2,50 m (B x H), welche während der Versuche stets offen stand, um die für den brandlastgesteuerten Brandverlauf notwendige Ventilation sicherzustellen. Die Holzrippe stand auf einem Gitterrost 0,20 m über einer 0,60 m x 0,60 m großen Zündwanne (g) mit einer Wandungshöhe von 0,10 m. In der Zündwanne befanden sich jeweils 1,0 l Wasser zum Ausgleich etwaiger Unebenheiten und 1,0 l 2-Propanol zur Entzündung der Krippe. Eine 1,00 m x 1,00 m große Stahlblechwanne (h) fing abfließendes Löschwasser auf. Eine wärme- und feuchtigkeitsbeständige Abbrandwaage (Kern DS 150K1) unter der Stahlblechwanne erfasste den Masseverlust der Krippe während des Brand- und Löscharvorganges. Der ganze Aufbau stand auf einem Drehteller, welcher auf 2,5 Umdrehungen pro Minute justiert war.

Den Temperaturverlauf erfassten insgesamt sieben Typ K Thermoelemente (OMEGA Engineering GmbH). Die Thermoelemente wurden, wie in Abbildung 10 dargestellt, zu einem Strang gebündelt, sodass deren Messspitzen jeweils 0,08 m auseinander lagen. Der Strang wurde so zentral wie möglich in die Krippe eingeführt. Das unterste Thermoelement befand sich in einer Höhe von 0,06 m über dem Krippenboden. Die Ausgleichleitungen wurden an einem Gestell 1,2 m über der Krippe befestigt. So konnte der leicht bewegliche Strang seiner Position in der sich drehenden Krippe nachgehen. Drei Wärmeflussaufnehmer mit einem Messbereich von 20 bzw. 50 kW/m² (Kraft & Temperatur Messtechnik, Sensor Typ: Schmidt Boelter bzw. Gardon Gauge) zeichneten den Verlauf der Wärmestrahlung in einem Abstand von $s = 1,00\text{ m}$ zum Brandobjekt auf. Die Wärmeflussaufnehmer wurden so ausgerichtet, dass sie jeweils den Mittelpunkt einer Krippenseite im rechten Winkel anvisierten. Der Angriffstrupp (e) platzierte sich neben der Krippe und hielt die Strahlrohröffnung horizontal in einem Abstand von $s = 0,50\text{ m}$ zu einer Krippenecke. Das Löschmittel kam aus einem Versuchslöschgerät (a) der Firma Micro-Foam-Unit. Das Löschgerät stand auf einer Waage (b) der Marke Sartorius (CW1P1-150IG-I), welche den Premixverbrauch während der Löscharbeiten erfasste. Eine hochauflösende Videokamera (c) zeichnete den Löschvorgang auf. Eine trichterförmige Schaumrutsche (d) diente der Bestimmung der Verschäumungszahl.

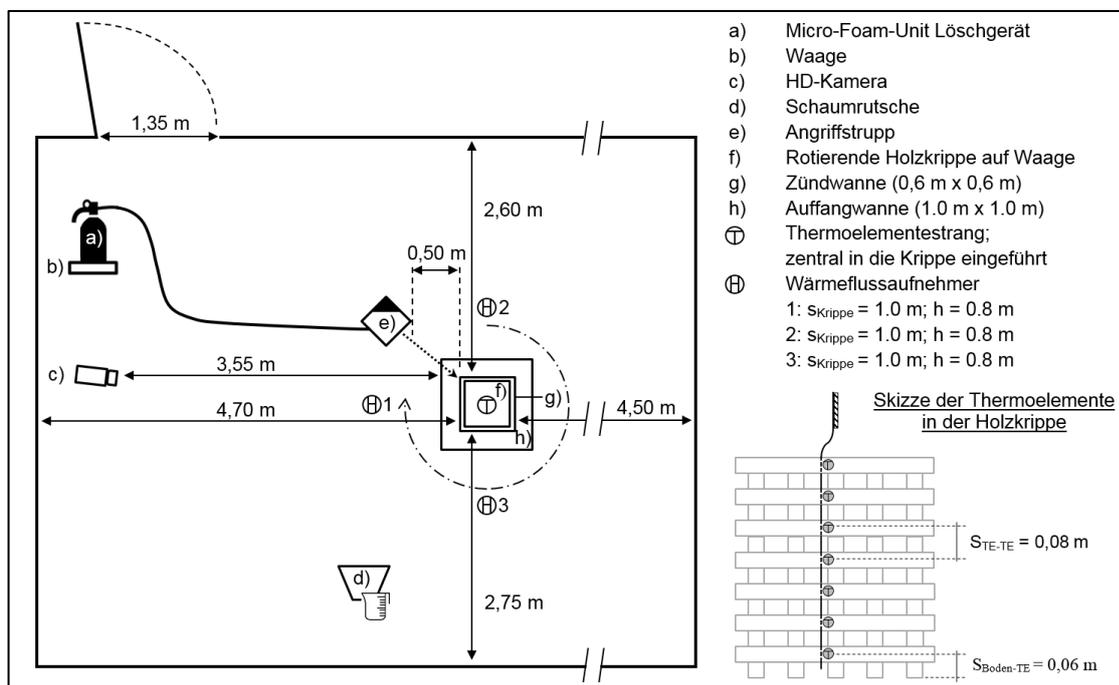


Abbildung 10: Versuchsaufbau der Indoor-Holzkippenbrandversuche

Das Versuchslöschgerät der Firma Micro Foam Unit (M.F.U-CAFS-Attack-Air) [63] ist ein kleinmaßstäbliches, speziell für Schaumausbildungen entwickeltes, mobiles CAFS, welches durch Unterbrechung der Druckluftzufuhr zur Mischkammer und unter Verwendung von verschiedenen Aufschaubdüsen und -strahlrohren ebenfalls unverschäumte, bzw. strahl-

rohrverschäumte Löschmittel ausbringen kann (siehe Tabelle 8). Die während der Löschversuche angewandten Strahlrohre und Düsen sind Miniaturnachbildungen von feuerwehrtechnischem Equipment und applizieren die Löschmittel in identischer Art und Weise.

Tabelle 8: Technischer Aufbau des Löschangriffes für die Indoor-Holzrippenbrandversuche [63]

Technische Daten	
Löschgerät	M.F.U-CAFS-Attack-Air (Micro Foam Unit)
<ul style="list-style-type: none"> • Löschmitteltank • Druckluftversorgung • Druckluftzumischung • Systemdruck 	20 Liter Premix Externer Kompressor Einstellung über Kugelhahnventil (auf/zu) 4 bar
Schlauchleitung	3 m, 8 mm Innendurchmesser
Auswurfarmatur	Hohlrohr, Aufschraubdüsen
Löschmittel	Wasser / Netzwasser / Luftschäume / CAF
Löschmittelwurfweite	2,5 - 6,0 m (Abhängig von Löschmedium und Strahlform)
Durchflussrate	1,40 ± 0,15 Liter Premix pro Minute

Versuchsablauf

Die Holzbrandkrippe wurde gemäß Anhang I, Absatz I.2.1 *Eigenschaften der Prüfobjekte* der DIN EN 3-7:2007 auf einem Gitterrost aufgebaut und im Versuchsstand positioniert. Das Versuchslöschgerät wurde mit dem entsprechenden Premix befüllt und in einen betriebsbreiten Zustand versetzt. Für die gesamte Versuchsserie wurde ein einheitlicher Premix-Volumenstrom von $\dot{V} = 1,40 \text{ l/min}$ voreingestellt, welcher aber durch veränderte Druckluftzumischraten bei trockenem und nassem Schaum Werte von $\dot{V} = 1,01 \text{ l/min}$ bis $\dot{V} = 1,55 \text{ l/min}$ annahm. Ein Liter des Brennstoffes 2-Propanol wurde vorsichtig auf das in der Zündwanne befindliche Wasserbett aufgegossen. Die Menge des Brennstoffes genügte für eine Brenndauer von $120 \pm 15 \text{ s}$. Nach Erlöschen der Initialzündung brannte die Krippe für 360 s bis zum Erreichen der Vollbrandphase selbstständig fort. Im Falle der Schaumlöschversuche wurde diese Zeit genutzt, um die Bestimmung der VZ durchzuführen. 10 s vor Löschbeginn wurde der Drehteller aktiviert, damit die Krippe während der Löschmaßnahmen einer gleichmäßigen Drehbewegung unterlag. Exakt 480 s nach der Zündung begann der Löschangriff durch einen erfahrenen Angehörigen der Berufsfeuerwehr. Die Applikation während der Schaumlöschversuche startete 5 s vor Löschbeginn. Dabei wurde das Strahlrohr in einen Auffangbehälter gehalten, um so durch längere Standzeiten im Schlauch entmischtes Löschmittel abzugeben, bevor der Löschstrahl auf die Krippe gerichtet wurde. Die Löschprozedur war weitestgehend automatisiert, um die Verfälschung der Testergebnisse durch den menschlichen Einfluss zu minimieren. Jeder Löschvorgang startete zunächst mit einer 120 s andauernden systematischen Applikation.

In dieser Phase bewegte der Strahlrohrführer das waagrecht ausgerichtete Strahlrohr entlang einer vertikalen Führungsschiene gleichmäßig auf und ab. In Verbindung mit der Krippenrotation erfuhr so jede Krippenseite drei aufwärts- und drei abwärtsführende Strahlrohrbewegungen pro Krippenumdrehung. Der Abstand zwischen Strahlrohrmündung und Krippe betrug $s = 0,50 \text{ m}$. Nach 120 s systematischer Löschmittelapplikation ging der Löschvorgang direkt in einen gezielten Löschvorgang über, um letzte Flammenerscheinungen zu unterdrücken. Der gezielte Löschvorgang zeichnete sich dadurch aus, dass kein bestimmter Bewegungsablauf und kein Mindestabstand zwischen Strahlrohrmündung und Krippe eingehalten werden musste. Sobald keine Flammenbildung mehr zu erkennen war, wurde die Zeit bis zum Erreichen der Flammenunterdrückung genommen. Nach dem Ablöschen intensiver Glutnester, wenn der Angriffstrupp die Wahrscheinlichkeit einer Rückzündung als gering bewertete, wurde der Löschangriff eingestellt und die benötigte Zeit für den Löschvorgang gestoppt. Anschließend erfolgte die in Kapitel 2.2.1 näher beschriebene, dreiminütige Beobachtungsphase. Während des gesamten Versuchsablaufes erfolgte eine maschinelle Entrauchung des Brandraumes. Zwischen den Brandversuchen wurden Pausen von 20 bis 30 Minuten eingelegt, um die Atmosphäre im Brandraum den Umgebungsbedingungen anzugleichen. Eine Auflistung der getesteten Parameter findet sich in Tabelle 9.

Tabelle 9: Versuchsparameter während der Indoor-Holzrippenbrandversuche

Nr.	Löschmittelzusammensetzung				\bar{VZ}
	Löschmittel	Zusatz	Strahlform		
01 - 03	Wasser	kein	sprüh		0
04 - 06	Wasser	kein	voll		0
07 - 09	Netzwasser	X: 0,5 % Class A	sprüh		0
10 - 12	Netzwasser	X: 0,5 % Class A	voll		0
13 - 15	Netzwasser	Y: 0,5 % Class A	sprüh		0
16 - 18	Netzwasser	Y: 0,5 % Class A	voll		0
19 - 21	NAF	X: 0,5 % Class A	voll		9,6
22 - 24	NAF	Y: 0,5 % Class A	voll		9,7
25 - 27	CAF, nass	X: 0,5 % Class A	voll		4,8
28 - 30	CAF, nass	Y: 0,5 % Class A	voll		4,8
31 - 33	CAF	X: 0,5 % Class A	voll		8,4
34 - 36	CAF	Y: 0,5 % Class A	voll		8,9
37 - 38	CAF, trocken	X: 0,5 % Class A	voll		10,8
39 - 40	CAF, trocken	Y: 0,5 % Class A	voll		14,0
41 - 42	CAF, hohe ZR	X: 1,0 % Class A	voll		8,7
43 - 44	CAF, hohe ZR	X: 1,0 % Class A	voll		6,3
45 - 46	CAF, hohe ZR	Y: 1,0 % Class A	voll		8,2
47 - 48	CAF, hohe ZR	Y: 1,0 % Class A	voll		6,4

2.3 Bestimmung der Effizienz von CAF bei der Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden im Vergleich zu herkömmlichen Löschmitteln

Die Löscheffizienz von CAF in Abhängigkeit unterschiedlicher Löschmittelzusammensetzungen und Applikationsmethoden wurde in zwei Versuchsserien mit Flüssigkeits-Bemessungsbränden untersucht. Sowohl die Outdoor- als auch die Indoor-Lachenbrandversuche wurden in Anlehnung an die Bestimmungen der DIN EN 1568-3:2018 *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil 3: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwertschaum zum Aufgeben auf mit Wasser nicht mischbare Flüssigkeiten* durchgeführt [49].

2.3.1 Outdoor-Heizöllachenbrandversuche

Acht Heizöllachen mit einem Durchmesser von 2,40 m und einem Brennstoffvolumen von je $V = 145 \text{ l}$ wurden in dieser Versuchsreihe entzündet. Die Löschung mit CAF untersuchte die Applikationsmethoden *direktes Aufbringen* und *Aufbringen durch Abfließen* sowie die Auswirkungen einer Erhöhung der Zumischrate auf den Löscherfolg unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Schaummitteln. Die Stabilität der Schaumdecke gegenüber erneuter Brandeinwirkung wurde untersucht, indem nach dem Löschvorgang ein Rückbrandgefäß mit brennendem Heizöl in die Mitte der Schaumdecke eingesetzt wurde.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der Outdoor-Lachenbrandversuche ist in Abbildung 11 dargestellt. Gemäß den Vorgaben der DIN EN 1568-3 kamen eine runde Brandwanne mit einem Innendurchmesser von $d_i = 2,40 \text{ m}$ und einer Wandungshöhe von $h = 0,20 \text{ m}$ sowie ein Rückbrandgefäß mit einem Innendurchmesser von $d_i = 0,30 \text{ m}$ und einer Wandungshöhe von $h = 0,25 \text{ m}$ zum Einsatz. Die Brandwanne war rückseitig mit einem 1,00 m x 1,00 m großen Prallblech versehen. Vor Wind schützten, wie in Abbildung 7 abgebildet, der dreiseitige Brandwall und die zusätzlich aufgestellten Windschutzwände, welche auch schon zu den Outdoor-Mischkrippenbrandversuchen Anwendung fanden. Neben dem in Abbildung 11 dargestellten messtechnischen Equipment zur Erfassung der Temperatur- und Rauchgasdaten wurden eine Videokamera und eine Hochgeschwindigkeitskamera zur Aufzeichnung des Brandverlaufes verwendet. Das Versuchslöschgerät der Firma Schmitz One Seven GmbH (siehe Tabelle 5) stand auf einer Waage zur Messung des Premix-Verbrauches. Die Position des Strahlrohres war statisch und variierte zwischen den Versuchen nur geringfügig in Abhängigkeit der Windrichtung und der angewandten Applikationsmethode.

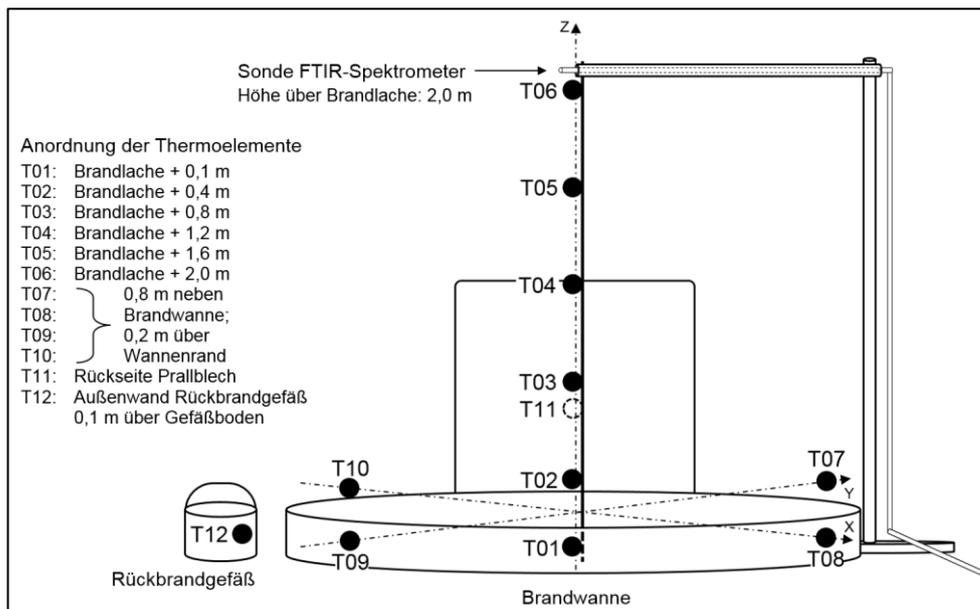


Abbildung 11: Versuchsaufbau der Outdoor-Heizöllachenbrandversuche

Versuchsablauf

Zum Ausgleich der Unebenheiten im Boden der Brandwanne wurden 90 Liter Wasser eingefüllt, bevor 145 Liter Heizöl in die Wanne gegeben wurden. Das bereitstehende Rückbrandgefäß wurde mit zwei Liter Heizöl befüllt. Das Heizöl in der Brandwanne wurde unter Zuhilfenahme eines halben Liters n-Heptan, welches vorsichtig auf die Lache aufgebracht wurde, mit einer brennenden Lanze entzündet. Die Flammenausbreitung dauerte einige Sekunden an. Nachdem die gesamte Lachenoberfläche von den Flammen erfasst wurde, begann eine einminütige Vorbrenndauer. Zeitgleich wurde die brennende Lanze in das mit Heizöl gefüllte Rückbrandgefäß gestellt, damit sich dieses bis zu seinem Einsatz entzünden und aufheizen konnte. Nach Ablauf der Vorbrenndauer erfolgte der Löschangriff.

Bei der direkten Aufbringung des Löschmittels befand sich das Strahlrohr in einem Abstand von $s = 5,00 \text{ m}$ zum vorderen Wannenrand. Der Löschmittelstrahl war auf den Mittelpunkt des Prallbleches ausgerichtet, traf aber einen Meter vor dem Prallblech direkt auf die brennende Oberfläche auf. Bei Versuchen mit einer Aufbringung durch Abfließen (auch: *indirekte Aufbringung*) reduzierte sich der Abstand des Strahlrohrs zum vorderen Wannenrand auf $s = 3,60 \text{ m}$. Bei dieser Methode traf der Löschmittelstrahl mittig auf das rückseitig an der Wanne angebrachte Prallblech und floss von dort aus auf die brennende Oberfläche auf. Die Angriffsrichtung war primär so ausgerichtet, dass der Löschmittelstrahl in einem rechten Winkel auf das Prallblech traf. Der Auftreffwinkel des Löschmittels konnte bei geänderter Windrichtung minimal angepasst werden, sodass der Löschangriff möglichst nicht unter Gegenwind erfolgte, das auf das Prallblech auftreffende Löschmittel aber stets in die Brandwanne abfloss und nicht über den Wannenrand hinausbefördert wurde.

Die Premix-Applikationsrate für diese Versuchsreihe betrug $\dot{V} = 9,8 \pm 0,8 \text{ l/min}$. Es wurden die charakteristischen Löschzeiten 50 % Brandkontrolle, 99 % Brandkontrolle und 100 % Brandkontrolle gemessen. Die Applikation wurde nach 180 s eingestellt. Weitere 300 s nach Beendigung der Schaumaufgabe wurde das brennende Rückbrandgefäß in die Mitte der schaumbedeckten Brandwanne gestellt. Von da an wurde die Zeit gestoppt, bis die Schaumdecke um das Rückbrandgefäß herum so weit beschädigt war, dass die Heizöberfläche eine Rückzündung erfuhr. Des Weiteren wurde die Zeit gemessen, bis sich der Rückbrand auf 25 % der Heizöberfläche in der Brandwanne ausgebreitet hat. Mit Erreichen dieser Marke galt der Versuch als beendet. Die VZ wurde während des Rückbrandtests ermittelt. Die Restablöschung war nicht Bestandteil der Untersuchung und erfolgte mit einem bereitgelegten Sicherheitsrohr. Eine Auflistung der Versuchsparameter findet sich in Tabelle 10.

Tabelle 10: Versuchsparameter während der Outdoor-Heizöllachenbrandversuche

Nr.	Löschmittel	VZ	Applikationsdauer [s]	Applikationsmethode
1	CAF, X: 0,5 % Class A	4,6	180	direkt, statisch
2	CAF, Y: 0,5 % Class A	4,5	180	direkt, statisch
3	CAF, X: 1,0 % Class A	2,4	180	direkt, statisch
4	CAF, X: 1,0 % Class A	5,2	180	direkt, statisch
5	CAF, Y: 1,0 % Class A	4,6	180	direkt, statisch
6	CAF, Y: 1,0 % Class A	4,6	> 240	indirekt, statisch
7	CAF, Y: 1,0 % Class A	4,6	180	indirekt, statisch
8	CAF, Y: 1,0 % Class A	4,6	180	direkt, taktisch

2.3.2 Indoor-Heptanlachenbrandversuche

32 Indoor-Brandversuche mit Heptanlachen waren Bestandteil dieser Versuchsserie. Sie fanden in einer Brandkammer unter Laborbedingungen statt und zeichneten sich durch identische Brand- und Löschvoraussetzungen für jeden einzelnen Versuch aus. Mit diesen Tests wurden die Löscheigenschaften von NAF und CAF bei Klasse B-Bränden in Abhängigkeit der Zumischrate und Verschäumungszahl untersucht.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der Indoor-Lachenbrandversuche, welcher den Vorgaben der DIN EN 1568-3 entsprach, ist in Abbildung 12 gezeigt. Die runde Brandwanne mit einem Innendurchmesser von $d_i = 0,56 \text{ m}$ und einer Wandungshöhe von $h = 0,15 \text{ m}$ stand mit ihrem Stahlgestell auf einer Abbrandwaage. Der Boden der Brandwanne befand sich somit in einer Höhe von $h = 0,88 \text{ m}$ über dem Fußboden. Rückseitig an der Brandwanne war ein Prallblech der Abmessungen $0,60 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ (B x H) angebracht. Das Rückbrandgefäß hatte einen Innendurchmesser von $d_i = 0,12 \text{ m}$ und eine Wandungshöhe von $h = 0,08 \text{ m}$. Die Brandwanne (c) stand in einer vierseitig umschlossenen Kammer direkt unter einem

Rauchabzug. Das Versuchslöschgerät (a) der Firma Micro-Foam-Unit (siehe Tabelle 8) stand außerhalb der Kammer auf einer Waage (b) zur Bestimmung des Premixverbrauches während der Löschmaßnahmen. Der Schlauch wurde unter der Kammerwand hindurchgeführt, sodass das Strahlrohr (d) auf einem Stativ in der Versuchskammer in einer Höhe von $h = 1,15\text{ m}$ und in einem Abstand von $s = 1,56\text{ m}$ zum Prallblech positioniert werden konnte. Die Wärmeflussaufnehmer der Firma Kraft & Temperatur Messtechnik mit Messbereichen von 20 kW/m^2 (Sensor Typ: Schmidt Boelter) und 50 kW/m^2 (Sensor Typ: Gardon Gauge) wurden an den Kammerwänden in einer Höhe von $h = 1,25\text{ m}$ angebracht und fokussierten die Flamme aus drei unterschiedlichen Blickwinkeln. Sieben Thermolemente wurden an einer speziell entwickelten Halterung installiert, um die Brennstofftemperaturen in definierten Tiefen zu messen. Ein achttes Thermolement maß die Gastemperatur in einer Höhe von $h = 0,40\text{ m}$ über dem Brennstoffspiegel. Eine hochauflösende Videokamera (e) zeichnete die Brandverläufe auf.

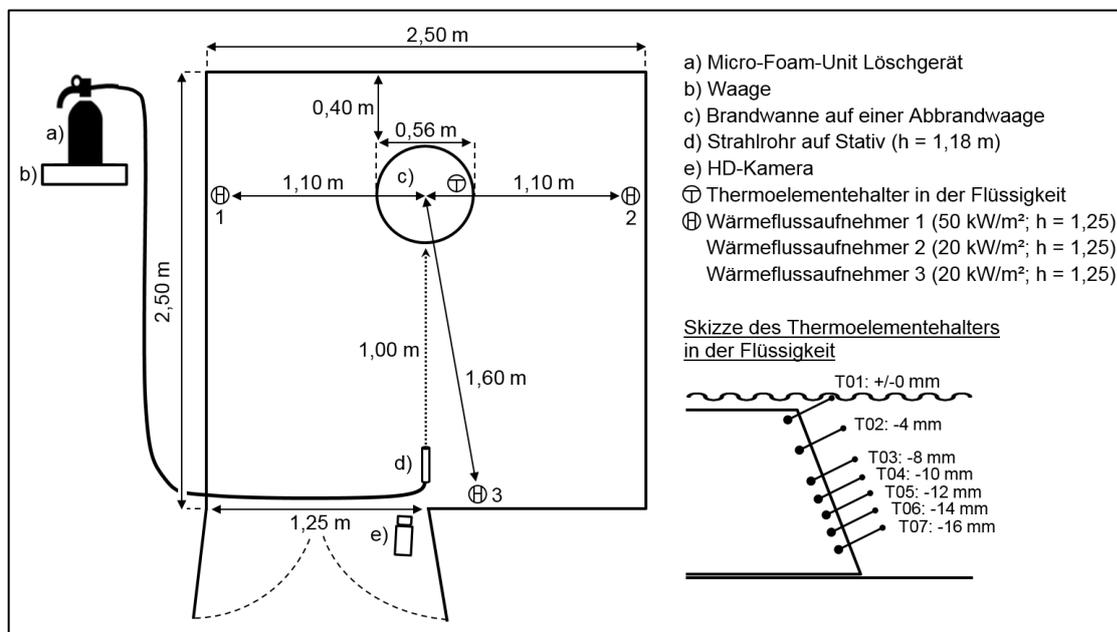


Abbildung 12: Versuchsaufbau der Indoor-Heptanlachenbrandversuche

Versuchsablauf

Das Löschgerät wurde mit einem der Versuchsplanung entsprechenden Premix befüllt und anschließend in einen betriebsbereiten Zustand versetzt. Vor dem Versuchsbeginn wurde die VZ ermittelt. Anschließend wurden $9,0\text{ Liter}$ n-Heptan in die Brandwanne und $0,3\text{ Liter}$ n-Heptan in das Rückbrandgefäß gefüllt. 120 s nach dem Füllvorgang wurde der Brennstoff in der Brandwanne mit einer Lanze entzündet. Nach einer Vorbrenndauer von 55 s begann die Schaumabgabe in ein Auffangbecken, um zu Beginn der Löschmaßnahmen einen konstanten Schaumstrahl anliegen zu haben. Nach weiteren 5 s wurde das Strahlrohr ohne Flussunterbrechung auf den Brandherd geschwenkt und anschließend fixiert. Die Löschmittelabgabe erfolgte indirekt. Je nach Setup wurde ein Premix-Volumenstrom von

$\dot{V} = 1,20 \dots 1,60 \pm 0,03 \text{ l/min}$ verschäumt und über einen Zeitraum von 90 s auf das Prallblech der Brandwanne abgegeben. Währenddessen wurden die charakteristischen Zeiten der 90 % Kontrolle, 99 % Kontrolle und 100 % Kontrolle gemessen. Nach Beendigung der Löschmittelabgabe wurde das Rückbrandgefäß entzündet und 60 s später in die Mitte der schaumbedeckten Brandwanne gestellt. Es wurden die Zeiten bis zur Rückzündung sowie bis zum 25%igen und 100%igen Rückbrand gemessen. Parallel zum Rückbrandtest erfolgte eine zweite Bestimmung der VZ, sodass pro Versuch zwei Werte, einmal vor dem Löschvorgang und einmal nach dem Löschvorgang, vorlagen. Mit Erreichen des vollständigen Rückbrandes galt der Versuch als beendet. Die Ablöscharbeiten waren nicht Bestandteil der Untersuchung und erfolgten mit geeignetem Equipment. Tabelle 11 enthält eine Auflistung der Versuchsparameter.

Tabelle 11: Versuchsparameter während der Indoor-Heptanlachenbrandversuche

Nr.	Löschmittelzusammensetzung		VZ	
	Löschmittel	Zusatz	von	bis
01 - 03	NAF	X: 0,5 % Class A	7,21	8,02
04 - 06	NAF	Y: 0,5 % Class A	8,33	8,37
07 - 09	CAF, nass	X: 0,5 % Class A	4,63	4,76
10 - 12	CAF, nass	Y: 0,5 % Class A	4,41	4,91
13 - 15	CAF	X: 0,5 % Class A	7,54	8,16
16 - 20	CAF	Y: 0,5 % Class A	8,17	8,80
21 - 23	CAF, trocken	X: 0,5 % Class A	9,72	11,21
24 - 26	CAF, trocken	Y: 0,5 % Class A	12,55	12,90
27 - 29	CAF, hohe ZR	X: 1,0 % Class A	8,21	10,22
30 - 32	CAF, hohe ZR	Y: 1,0 % Class A	8,90	9,86

2.4 Untersuchung der Anwendbarkeit von CAF bei ungewöhnlichen Brandszenarien

Ungewöhnliche Brandszenarien dienten der Untersuchung der Anwendbarkeit des Löschmittels CAF fernab von Bemessungsbränden. Schwierig zu bekämpfende Brände mit teils brisanten Brandlasten stellten hohe Ansprüche an das Löschmittel. Die Einsatzgrenzen, die Kombinierbarkeit mit Löschpulver und die optimale Verschäumung des Löschmittels CAF wurden in den Versuchsserien dieser Kategorie untersucht.

2.4.1 Reifenbrandversuche

Aufgrund der in der Industrie üblichen Lagerweise von Altreifen entstehen bei Bränden von Reifenstapeln meist für Löschmittel unzugängliche Brandnester, die aufgrund der geringen Lagerdichte über eine für die Brandunterhaltung zulängliche Sauerstoffzufuhr verfügen. Hinzu kommt, dass die im Reifen enthaltenen Stahlkarkassen eine ausreichend große Energiemenge speichern können, um bereits abgelöschte Reifen wieder zu

entzünden [64]. Neun Brandversuche mit Stapeln à 500 ± 10 kg Altreifen (entspricht ca. 58 Altreifen pro Versuch) waren Bestandteil dieser Versuchsserie. Ihr Ziel war es, die Anwendbarkeit des Löschmittels CAF bei schwierig zu bekämpfenden Bränden in Abhängigkeit der VZ zu untersuchen.

Versuchsaufbau

Eine Stahlwanne mit einem Durchmesser von $d = 4,50\text{ m}$ wurde ins hintere Drittel des dreiseitig von Brandwällen umgebenen Brandplatzes gestellt. Die Altreifen wurden nach der in Abbildung 13 dargestellten Methode in die Wanne gestapelt. Der daraus resultierende Reifenstapel bestand aus drei so dicht wie möglich nebeneinanderstehenden Riegeln. Die äußeren Riegel 1 und 3 umfassten jeweils 17 Reifen. Der mittlere Riegel 2 verfügte in der unteren Ebene über einen zusätzlichen geneigten Reifen und beinhaltete bei sonst gleichem Aufbau somit 24 gestapelte Reifen. Die Reifen entsprachen den Felgenreößen von 15 bis 16 Zoll und wogen jeweils zwischen 8 und 10 kg. Unter jedem Riegel standen zwei mit jeweils 0,3 l Kerosin gefüllte Aluminiumschalen, welche mittels ferngezündeter Pyrotechnik zeitgleich in Brand gesetzt wurden.

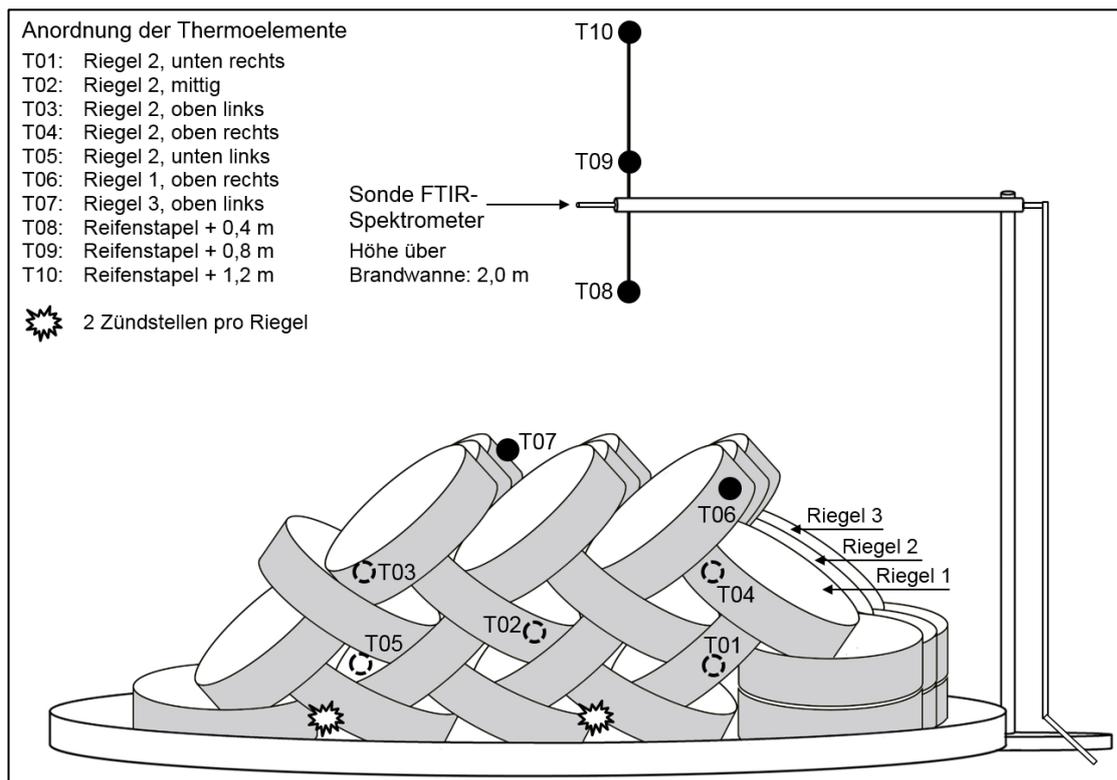


Abbildung 13: Reifenbrandversuche - Stapelweise der Brandlast und Verteilung der Thermoelemente

Insgesamt waren zehn Thermoelemente nach dem in Abbildung 13 gezeigten Prinzip verbaut. Drei davon waren an einem Messstativ installiert und erfassten die Temperaturen über dem Reifenstapel. Fünf Thermoelemente waren in den Reifen des mittleren Riegels (Riegel 2) in Form von zwei sich kreuzenden Diagonalen angebracht. Die zwei übrigen

Thermoelemente steckten in den oberen, außen liegenden Reifen der Riegel 1 und 3. Zur Installation der Thermoelemente wurden feine Löcher in die Karkassen der Reifen gebohrt. So konnten die Messspitzen in die Reifen eingeführt werden, wo sie sich an einem für das Löschmittel schwer erreichbaren Ort befanden. Die Sonde des FTIR-Spektrometers war ebenfalls am Messstativ befestigt und befand sich zentral über dem Reifenstapel in einer Höhe von $h = 2,00\text{ m}$ über der Stahlwanne.

Der Messaufbau wurde durch zwei Wärmeflussaufnehmer ergänzt, welche sich in einer Entfernung von $s = 3,00\text{ m}$ zum Reifenstapel in einer Höhe von $h_1 = 1,00\text{ m}$ (Wärmeflussaufnehmer mit Messbereich von 20 kW/m^2) und $h_2 = 1,50\text{ m}$ (Wärmeflussaufnehmer mit Messbereich von 50 kW/m^2) befanden. Die Aufzeichnung der Versuche erfolgte mit einer hochauflösenden Videokamera, einer Helmkamera und einer Wärmebildkamera.

Neben dem, an die Versuchslöschvorrichtung gekoppelten, Versuchsrohr wurde ein zusätzliches Sicherheitsrohr, welches direkt mit dem CAFS eines bereitgestellten Tanklöschfahrzeuges verbunden war, bereitgelegt. Beide Rohre wurden mit jeweils einem einsatzbereiten Trupp besetzt. Die Versuchslöschvorrichtung war ein mobiles CAFS, welches seine Wasserspeisung während der Versuche durch ein Tanklöschfahrzeug der Feuerwehr erhielt. Die Anlage mischte das Schaummittel in der einzustellenden Konzentration bei und verschäumte den Wasser-Schaummittelstrom unter Zugabe von Druckluft bis zur geforderten Verschäumungszahl. Von der Versuchslöschanlage führte ein B-Schlauch zu einem Kugelhahnverteiler. Die Angriffsleitung hinter dem Verteiler setzte sich aus einem auskoppelbaren, durch Kugelhahnventile verschließbaren Schlauchstück zur Messung der VZ, zwei 15 m langen C-Druckschläuchen mit einem Innendurchmesser von 42 mm und einem Rundstrahlrohr mit 25 mm Durchmesser zusammen. Nähere Daten zur Versuchslöschvorrichtung finden sich in Tabelle 12.

Tabelle 12: Technischer Aufbau des Löschangriffes für die Reifenbrandversuche

Technische Daten	
Löschgerät	Mobiles Löschesystem OS 2600 (Schmitz One Seven GmbH)
<ul style="list-style-type: none"> • Löschmittelversorgung • Druckluftversorgung • Druckluftzumischung • Systemdruck 	<ul style="list-style-type: none"> Externe Speisung durch Tanklöschfahrzeug (9 bar) Interner Kompressor (externe Stromversorgung) Zu- und abschaltbar 8 bar
Schlauchleitung	1x B-75-20, 2x C-42-15
Auswurfarmatur	Rundstrahlrohr, 25 mm / S1 Schwerschaumrohr
Löschmittel	CAF / Schwerschaum
Löschmittelfwurfweite	ca. 7,00 m (Abhängig von Strahlrohr und Löschmedium)
Durchflussrate	150 Liter Wasser-Schaummittellösung pro Minute

Versuchsablauf

Beim Aufbau der Riegel wurden die Reifengrößen so ausgewählt, dass das Gesamtgewicht aller drei Riegel bei 500 ± 10 kg lag. Nachdem die Thermoelemente installiert und die Kerosinschalen samt Zündkörpern unter dem mittleren Riegel platziert waren, wurden die Riegel dicht zusammengeschoben. Anschließend wurden die Kerosinschalen samt Zündkörper unter den äußeren Riegeln platziert. Alle sechs Zündkörper wurden über elektrische Zündleitungen mit einer Kondensatorzündmaschine verbunden, die zum Versuchsstart alle sechs Kerosinschalen zeitgleich zündete. Während der Hauptversuche brannten die Reifenstapel nach der Zündung für jeweils 330 bis 360 s vor. Die Löschmittelabgabe begann 60 s vor dem Löschangriff. Davon wurde 45 s lang in einen Intermediate Bulk Container (IBC) appliziert, um der Anlagenregeltechnik genügend Zeit für eine stabile Schaumqualität zu verschaffen. Weitere 15 s wurden benötigt, um die Messbecher für die VZ-Bestimmung zu füllen. Der Löschangriff fand nach feuerwehrtaktischer Vorgehensweise statt. Dabei wurde zunächst aus sicherer Entfernung gelöscht und im weiteren Verlauf der Löschmaßnahmen ein Mindestabstand zwischen Strahlrohr und Brandlast von $s = 1,00$ m eingehalten. Der Angriffstrupp stellte nach eigenem Ermessen den Zeitpunkt der Flammenniederschlagung fest und beendete daraufhin den Löschvorgang. Die anschließende Beobachtungsphase dauerte mindestens 30 Minuten an und erfolgte unter visueller und thermischer Kontrolle. In dieser Zeit wurden erneute Flammenbildungen und Temperaturanstiege mit gezielten Löschmittelapplikationen bekämpft. Das Feuer galt als gelöscht, wenn beide Anzeichen gegen Ende der Beobachtungsphase für mindestens zehn Minuten nicht auftraten. Eine Übersicht der Versuchsparameter findet sich in Tabelle 13.

Tabelle 13: Versuchsparameter während der Reifenbrandversuche

Nr.	Löschmittel	Vorbrenndauer [s]	Strahlrohr
01 - 02	CAF, X: 0,5 % Class A, VZ = 5	330 - 360	Rundstrahlrohr
03 - 04	CAF, X: 0,5 % Class A, VZ = 7	330 - 360	Rundstrahlrohr
05 - 06	CAF, X: 0,5 % Class A, VZ = 9	330 - 360	Rundstrahlrohr
07 - 08	NAF, X: 0,5 % Class A	330 - 360	S1

2.4.2 Transformatorenbrandversuche

Realistische Transformatorenbrände mit sich ausbreitenden Flüssigkeitsbränden im Inneren einer schwer zugänglichen Transformatorenstation wurden in dieser Versuchsreihe durch acht Brandversuche mit ölgefüllten 200 kVA Transformatoren in Gipskartoneinhausungen simuliert. In dieser Versuchsreihe wurden unterschiedliche Verfahrensweisen bei der Bekämpfung von Transformatorenbränden erprobt. Neben den

Löschmitteln CAF und NAF kam auch Löschpulver zum Einsatz, dessen inhibierende Wirkung und Anwendbarkeit in Kombination mit CAF untersucht wurde.

Versuchsaufbau

Eine Stahlwanne mit einem Durchmesser von $d = 4,50\text{ m}$ wurde im hinteren Drittel des dreiseitig von Brandwällen umgebenen Brandplatzes positioniert. Mit Gipskartonplatten wurde an drei Seiten der Stahlwanne eine Einhausung errichtet. Die verbleibende offene Seite war dabei zur offenen Seite der Brandwallanlage ausgerichtet. Die Gipskartonwände maßen jeweils $3,50\text{ m} \times 2,60\text{ m}$ (B \times H). Sie waren den Dimensionen einer realen Transformatorenstation nachempfunden. Der somit entstandene beengte Raum um den Transformator herum schränkte die Bewegungsfreiheit des Angriffstrupps bei der Brandbekämpfung ein. Im Inneren der Wände wurde eine zweite, kleinere Stahlwanne ($d = 2,40\text{ m}$) aufgestellt, welche eine Öllache mit einem Volumen von $V = 60\text{ l}$ sowie den Transformator beinhaltete. Dieser wurde speziell präpariert, um eine Explosion durch Druckaufbau im Inneren des Transformators zu verhindern. In Anlehnung an realistische Schadensbilder, die sich durch beschädigte Isolatoren auszeichnen, wurden ebendiese vom Gehäusedeckel entfernt. So entstanden mehrere Öffnungsflächen, die einem Druckaufbau vorbeugten und die ein späteres Austreten und Überlaufen von brennendem Öl ermöglichten. Der Transformator war mit 400 Liter Transformatorenöl gefüllt.

Fünf Thermoelemente, deren Positionen in Abbildung 14 dargestellt sind, erfassten die Öltemperaturen im Inneren des Transformators. Drei weitere Thermoelemente registrierten die Flammen-, Lachen- und Transformatorengehäusetemperatur. Ein entlang der Längsachse halbiertes 200 Liter Blechfass auf der Transformatorrückseite wurde mit der offenen Seite so an den Transformator gestellt, dass im Inneren der Fasshälfte ein abgeschirmter Bereich entstand. In dem Fass wurde ein Autoreifen platziert, welcher bei der Brandbekämpfung eine schwer zugängliche Brandlast darstellte. Vier Thermoelemente erfassten den Temperaturverlauf im Fassinneren in vier unterschiedlichen Höhen.

Zwei 100-kW-Propangasbrenner wurden zum Vorheizen des Öls im Transformator genutzt. Eine Pumpe förderte Öl aus einem Zusatztank fernab der Gefahrenzone und leitete dieses mit einem Volumenstrom von $\dot{V} = 5,00\text{ l/min}$ in den Transformator ein, um ein durch Volumenausdehnung bedingtes Überlaufen des Öls zu simulieren. Die Ölzuführung erfolgte mittels einer Edelstahlleitung, deren Austrittsöffnung durch eine der Isolatorenöffnungen im Gehäusedeckel bis auf Höhe des Thermoelementes T05 eingeführt wurde. Zwei Wärmeflussaufnehmer mit einem Messbereich von 20 kW/m^2 zeichneten die Wärmestrahlung im Abstand von $s = 3,50\text{ m}$ zum Transformator in einer Höhe, die der Höhe des Transformatorengehäusedeckels entsprach, auf. Der Löschangriff erfolgte je nach

Setup mit einem S1 Schwerschaumrohr, einem 1 ¼ Zoll Rundstrahlrohr bzw. mit Hohlstrahlrohr.

Das Löschmedium kam über zwei C-Druckschläuche mit einem Innendurchmesser von 42 mm von einem Tanklöschfahrzeug-gebundenen Druckluftschaumsystem (DLS 2400/800) mit einem Arbeitsdruck von 8 bar und wurde je nach Versuchssetup über verschiedene Strahlrohre abgegeben. Am CAFS konnte die Druckluftzumischung unterbunden werden. Dies ermöglichte eine Abgabe unverschäumten Netzwassers, welches erst am Schwerschaumrohr verschäumt wurde.

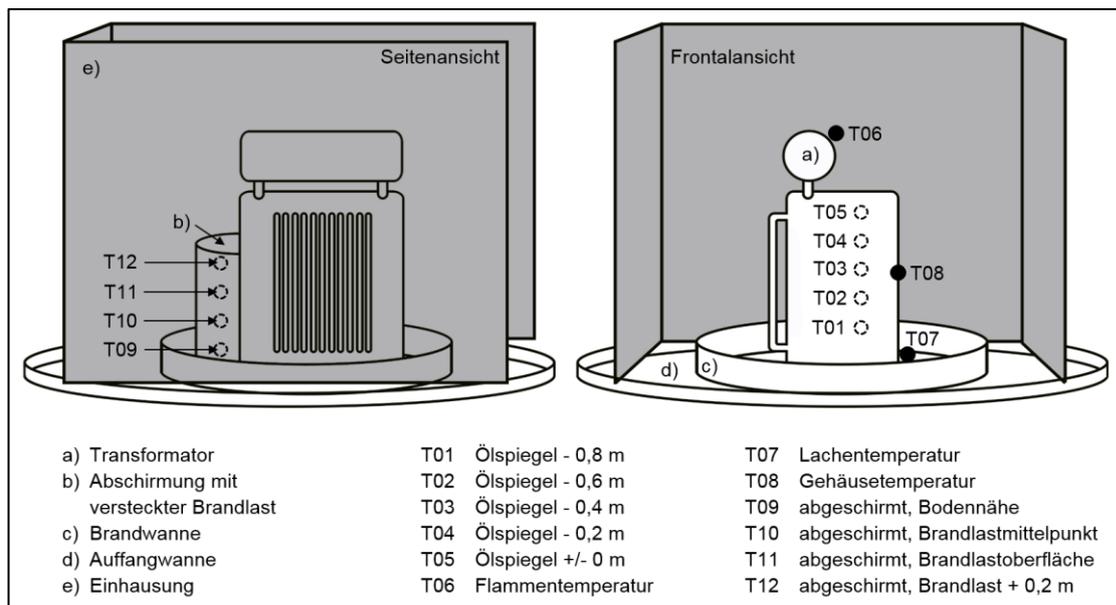


Abbildung 14: Transformatorenbrandversuche - Versuchsaufbau und Verteilung der Thermoelemente T01 - T12

Versuchsablauf

Vor jedem Versuchsdurchlauf wurde der Ölspiegel so angepasst, dass dieser sich 0,05 m unter dem Gehäusedeckel befand. Die Propangasbrenner wurden auf Stative montiert und auf die Kühlrippen des Transformators gerichtet. Sie beflamten den Transformator so lange, bis die Ölspiegeltemperatur bei $\vartheta = 70 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ lag. Anschließend wurden der Ölspiegel im Transformator sowie die Öllache um den Transformator herum mittels elektrisch verkabelter Zündkörper zeitgleich ferngezündet. Unmittelbar nach der Zündung wurde die Pumpe aktiviert, die für den Ölzufluss in den Transformator sorgte. Sobald das Thermoelement T05 eine Temperatur von $\vartheta = 150 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ verzeichnete, begann eine 45-sekündige Löschmittelabgabe in einen IBC. Nach dieser Zeit war eine stabile Schaumqualität erreicht, sodass dann die VZ bestimmt werden konnte. Im Anschluss daran begann die Brandbekämpfung mit einem Flüssigkeitsvolumenstrom von $\dot{V} = 230 \text{ l/min}$ nach feuerwehrtaktischem Vorgehen. Dabei wurde die ange deutete Transformatorenstation nicht betreten. Zwischen der VZ-Bestimmung und dem Löschvorgang wurde die

Applikation nicht unterbrochen. Der Löschangriff wurde eingestellt, sobald die Flammen im Transformator, über der Öllache und im abgeschirmten Bereich erloschen. Nach einer dreiminütigen Beobachtungsphase ohne Rückzündung galt der Versuch als beendet. Eine Auflistung der Untersuchungsparameter findet sich in Tabelle 14.

Tabelle 14: Versuchsparameter während der Transformatorenbrandversuche

Nr.	Löschmittel	Schaummittel	VZ	Strahlrohr
01 - 02	NAF	Y: 0,5 % Class A	7,4...8,8	S1
03 - 04	CAF nass	Y: 0,5 % Class A	3,9...5,3	Hohlstrahlrohr
05 - 06	CAF trocken	X: 0,5 % Class A	10,7...11,8	Rundstrahlrohr
07 - 08	CAF nass + ABC Pulver	Y: 0,5 % Class A	4,7...8,5	Hohlstrahlrohr

3 Datenanalyse

3.1 Bestimmung des Tauchnetzvermögens

Aus den jeweils sechs bis acht Tauchnetzversuchen pro Setup wurde der Mittelwert der gemessenen Zeiten vom Eintauchen der Baumwollpads bis zum Auftreffen auf den Boden, sowie die Standardabweichung der Einzelmessungen zueinander bestimmt. So lassen sich die Messdaten in den beiden nachfolgenden Säulendiagrammen übersichtlich zusammenfassen. Die Benetzungszeiten verschiedener Lösungen aus den Gewässertypen *vollentsalztes Wasser*, *Süßwasser* und *Meerwasser* mit einem 0,5%igen Volumenanteil der Schaummittel X oder Y und einer Lösungstemperatur von $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind in Abbildung 15 veranschaulicht. In diesem Diagramm, wie auch in einigen nachfolgenden Diagrammen, lassen sich die dargestellten Datensätze hinsichtlich der verwendeten Schaummittel in zwei Blöcke unterteilen. Diese beiden Blöcke (*Lösungen mit Schaummittel X* in der linken Diagrammhälfte und *Lösungen mit Schaummittel Y* in der rechten Diagrammhälfte) sind entsprechend gekennzeichnet. Ein Vergleich der Diagrammsäulen in Abbildung 15 zeigt, dass die Premixe, welche mit dem Schaummittel Y hergestellt wurden, eine durchgängig kürzere Benetzungszeit aufweisen als die Premixe, welche das Schaummittel X beinhalten. Demnach sind die Benetzungszeiten unter Verwendung des Schaummittels Y bei gleicher Zumischrate um 17 % bei vollentsalztem Wasser, 20 % bei Meerwasser und 30 % bei Süßwasser kürzer.

Im Vergleich der untersuchten Wasserarten hat vollentsalztes Wasser schaummittelunabhängig die längsten Benetzungszeiten. Die künstlich hergestellten Gewässer Süßwasser und Meerwasser zeigen jeweils erkennbar kürzere Benetzungszeiten auf. Während bei den X-Schaummittellösungen mit einem steigenden Mineralgehalt im Wasser eine Abnahme der Benetzungszeit einhergeht, kann dieser Verlauf bei den Y-Schaummittellösungen nicht beobachtet werden.

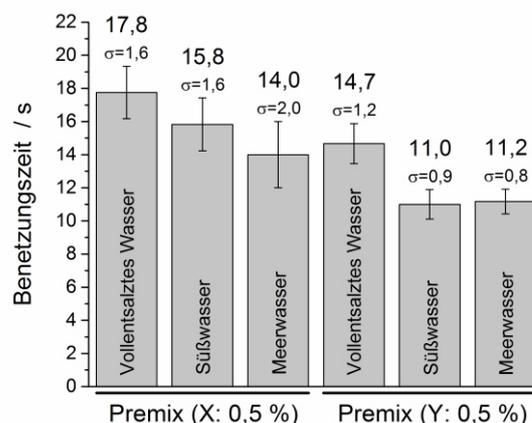


Abbildung 15: Benetzungszeiten verschiedener Wasserarten mit einer Schaummittelzumischrate von $ZR(X) = ZR(Y) = 0,5\%$

Die Änderung der Benetzungszeiten durch eine Erhöhung der Schaummittelzumischrate in vollentsalztem Wasser mit einer Temperatur von $\vartheta = 20\text{ °C}$ ist in Abbildung 16 veranschaulicht. Die Wahl der Zumischraten richtet sich dabei nach den Herstellerangaben für die untersuchten Schaummittel: 0,1 % für Netzwasser, 0,3 bis 0,5 % für die Erzeugung von Schaum zur Feststoffbrandbekämpfung und 1,0 % für die Erzeugung von Schaum zur Flüssigkeitsbrandbekämpfung. Aus Abbildung 16 geht hervor, dass sich die Benetzungszeiten mit einer steigenden Zumischrate verkürzen. Die ausgeprägtesten Änderungen der Benetzungszeiten werden schon bei einer Erhöhung der Zumischrate von 0,1 auf 0,3 % erreicht. Sowohl der X- als auch der Y-Premix verkürzen die Benetzungszeiten dabei um über 80 %. Eine weitere Erhöhung der Zumischrate von 0,3 auf 0,5 % bringt in beiden Fällen eine Verkürzung um mehr als 60 % mit sich. Die nächste Messreihe mit einer Zumischrate von 1,0 % zieht ebenfalls eine 60 (X) bis 70 % (Y) kürzere Benetzungszeit nach sich, wendet dafür jedoch auch einen doppelt so hohen Schaummittelanteil auf. Eine Erhöhung der Zumischrate auf 3,0 % führt zum sofortigen Absinken des Testgewebes. Auch aus diesem Diagramm geht hervor, dass das Schaummittel Y in allen getesteten Zumischbereichen kürzere Benetzungszeiten aufweist als das Schaummittel X.

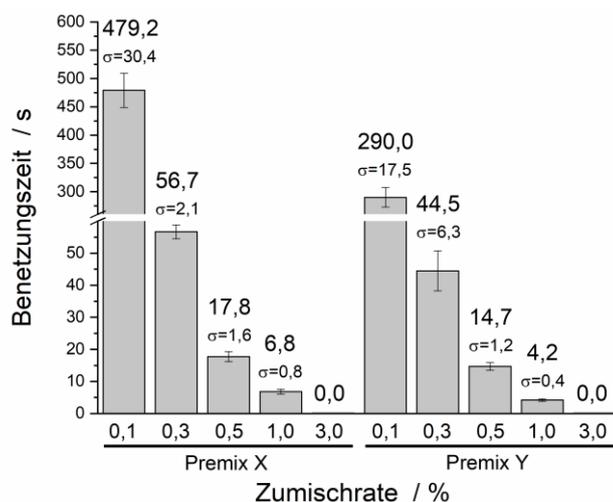


Abbildung 16: Benetzungszeiten von vollentsalztem Wasser mit Zumischraten von $ZR(X) = ZR(Y) = 0,1 - 3,0\%$

Fazit aus den Tauchnetzversuchen

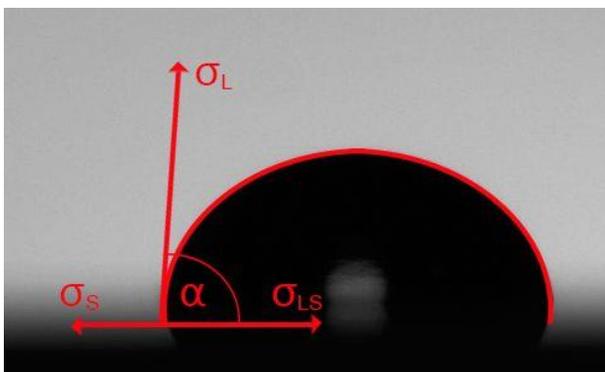
Aus den Tauchnetzversuchen geht hervor, dass eine steigende Schaummittelzumischrate im Wasser kürzere Benetzungszeiten der Lösung hervorruft. Die Versuchsdaten offenbaren für diese Versuchsreihe schaummittelunabhängig eine optimale Zumischrate von 0,5 %. Das Schaummittel Y weist durchgängig kürzere Benetzungszeiten auf, weshalb die Annahme getroffen werden kann, dass ein Y-Premix einen Schaum erzeugt, der schneller und tiefer in den Brandstoff eindringt und somit ein effizienteres sowie nachhaltigeres Löschergebnis in der Feststoffbrandbekämpfung erzielt. Die Unterschiede der Benetzungszeiten von Süßwasser und Meerwasser sind so gering, bzw. liegen im Bereich

der Standardabweichung, dass hinsichtlich dieser beiden Wasserarten keine deutliche Differenz in der Löscheffizienz zu erwarten ist. Lediglich die Löscheffizienz von vollentsalztem Wasser in Verbindung mit dem Schaummittel Y kann unter dem Durchschnitt liegen.

3.2 Kontaktwinkelanalyse

Die der Messreihe zugrunde gelegte Theorie besagt, dass sich Tenside an den Grenzflächen zwischen Flüssigkeit und Gasphase bzw. zwischen Flüssigkeit und Feststoff anlagern und somit deren Energien und damit verbunden auch den Kontaktwinkel der Tropfen beeinflussen. Der Zusammenhang zwischen Kontaktwinkel und Grenzflächenenergien ist in Abbildung 17 veranschaulicht. Darin ist die Größe des Kontaktwinkels α abhängig von drei Kräften: der *Oberflächenenergie des Festkörpers* σ_s , der *Oberflächenenergie der Flüssigkeit* σ_L sowie der *Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper* σ_{sL} . Der auf die Probenplatte aufgebraute Tropfen beginnt unmittelbar nach dem Aufsetzen, sich so lange auszubreiten, bis die genannten Kräfte miteinander im Gleichgewicht stehen [59,60].

Nach einer Schaummittelzugabe verringern die im Schaummittel enthaltenen Tenside die intermolekularen Wechselwirkungen in der Flüssigkeit. Nun sind die Wechselwirkungen zwischen Feststoff und Flüssigkeit größer als die Wechselwirkungen zwischen den Flüssigkeitsmolekülen untereinander. Folglich breitet sich der Tropfen nach einer Schaummittelzugabe weiter aus.



- σ_s : Oberflächenenergie Festkörper
- σ_L : Oberflächenenergie Flüssigkeit
- σ_{sL} : Grenzflächenenergie zw. Flüssigkeit und Festkörper
- α : Kontaktwinkel

Young-Gleichung:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sigma_s - \sigma_{sL}}{\sigma_L} \quad (4)$$

Abbildung 17: Dreiphasenkontakt eines auf einer Festkörperoberfläche aufliegenden Flüssigkeitstropfens mit Veranschaulichung der Grenzflächenenergien

Die dynamischen Kontaktwinkel von Tropfen verschieden stark konzentrierter Lösungen aus vollentsalztem Wasser und dem Schaummittel Y sind in Abbildung 18 gezeigt. Die abgebildeten Kurvenverläufe sind Mittelwerte von jeweils zehn Einzelmessungen pro Lösung. Zusätzlich zu den nach Herstellerangaben üblichen Zumischraten wurden hier Zwischenkonzentrationen untersucht, um die Herabsetzung der Oberflächenenergie einer Flüssigkeit durch Erhöhung der Tensidzugabe detaillierter aufzeigen zu können. Ähnlich

wie bei der Untersuchung der Netzfähigkeit erzielt eine Erhöhung der Zumischrate von 0,1 auf 0,3 % auch beim Herabsetzen der Oberflächenenergie einer Flüssigkeit den größten Effekt. Eine Erhöhung der Zumischrate von 0,1 auf 0,3 % bringt einen um 22 % geringeren Anfangskontaktwinkel mit sich. Jede weitere Erhöhung der Zumischrate hat mit 1 bis 6 % einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Anfangskontaktwinkel eines Tropfens. Auch die Unterschiede im dynamischen Verlauf sind dann nicht mehr so ausgeprägt. Je höher die Zumischrate, desto geringer ist der erstmalig nach dem Aufsetzen des Tropfens erfasste Kontaktwinkel und desto niedriger ist der angestrebte Kontaktwinkel zwischen Tropfen und Probenplatte zu der Zeit $t = x$, bei der sich alle Kräfte im Dreiphasensystem im Gleichgewicht befinden.

Ein Tropfen erfährt die wesentlichsten Änderungen seines Kontaktwinkels in den ersten 100 Millisekunden nach dem Aufsetzen auf die Probenplatte aus Glas. Dieser Vorgang ist in Abbildung 19 beispielhaft an der 0,5%igen Lösung aus vollentsalztem Wasser und dem Schaummittel Y dargestellt. Nach einer Verweildauer von 100 ms auf der Probenplatte nimmt der Kontaktwinkel des Tropfens im Vergleich zu seinem Anfangswert um $0,55^\circ$ ab. In den nächsten beiden Zeitschritten ist nur noch eine Abnahme von $0,37^\circ/100$ ms bzw. $0,34^\circ/100$ ms zu verzeichnen.

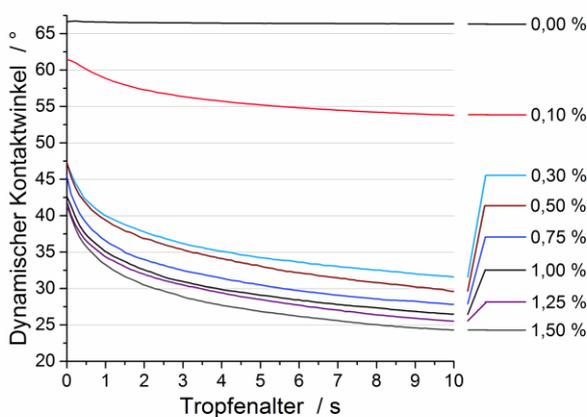


Abbildung 18: Dynamischer Kontaktwinkel von Tropfen aus vollentsalztem Wasser und dem Schaummittel Y in Abhängigkeit der Zumischrate auf Glas

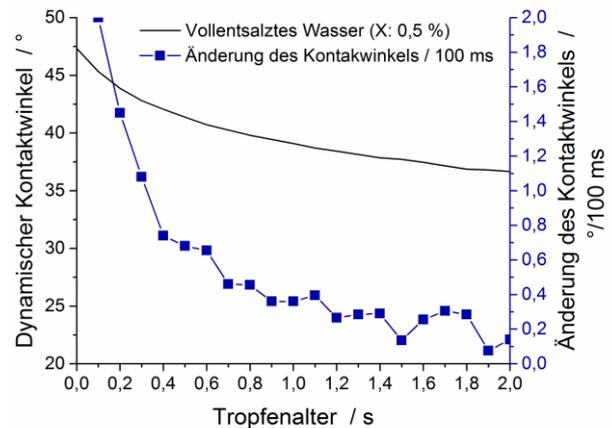


Abbildung 19: Änderung des dynamischen Kontaktwinkels pro 100 ms in einer 0,5%igen Lösung aus vollentsalztem Wasser und Schaummittel Y auf Glas

Die Abhängigkeit zwischen Zumischrate und Tropfengewicht zum Zeitpunkt des Tropfenabrisses von der Dosiernadel ist in Abbildung 20 aufgezeigt. Es zeigt sich, dass bis zu einer Zumischrate von 1,0 % das Einzeltropfengewicht exponentiell sinkt. Bedingt ist dieser Zusammenhang dadurch, dass eine Erhöhung der Schaummittelzumischrate die intermolekularen Wechselwirkungen in der Flüssigkeit senkt. Infolgedessen ist eine Abnahme der Oberflächenspannung des Tropfens zu beobachten, wodurch sich der Tropfen zeitiger, d.h. mit einem geringeren Volumen, von der Dosiernadel löst. Eine

weitere Erhöhung der Zumischrate über 1,0 % hinaus bringt keine wesentliche Änderung des Tropfenabrissegewichtes mehr mit sich.

Gemäß der Theorie der Young Gleichung (4) ist der Kontaktwinkel unabhängig von der Größe eines Tropfens [65]. Das veränderte Tropfenvolumen infolge der Abnahme der Oberflächenspannung hat also keinen Einfluss auf den Kontaktwinkel. Jegliche systematische Kontaktwinkeländerung ist demzufolge allein auf die Änderung der Ober- und Grenzflächenenergien durch die Tensidzugabe zurückzuführen.

Die Kontaktwinkelgrenzwerte der Tropfen auf der Probenplatte zu der Zeit $t = x$ zeigen in Abhängigkeit der Zumischrate ein vergleichbares Verhalten auf. Eine exponentielle Kurvenanpassung mit Korrelationskoeffizienten von $r < -0,97$ der originalen Messkurven aus Abbildung 18 mit der Datenverarbeitungssoftware Origin ergibt exponentiell sinkende Kontaktwinkelgrenzwerte bei steigender Zumischrate (siehe blaue Säulen in Abbildung 20). Auch hier sind bei Zumischraten von über 1,0 % nur noch geringfügige Veränderungen zu erkennen. Mit Hilfe der DataPhysics-Bildverarbeitungssoftware SCA20 wurde die Zeit berechnet, welche die Tropfen benötigen, um bis zur Hälfte ihrer maximalen Ausdehnung zu zerfließen. Diese als *Zerflusshalbwertszeit* bezeichnete Größe ist in Abbildung 20 in Form von schwarzen Säulen dargestellt. Da bis auf eine Ausnahme alle Messwerte qualitativ mit dem Verlauf der Kontaktwinkelgrenzwerte und Tropfengewichte übereinstimmen, ist bei der Halbwertszeitmessung der 0,3%igen Lösung ein Messfehler anzunehmen. Eine logische Korrektur dieses Wertes ist im Diagramm als schwarz schraffierte Fläche gekennzeichnet. Bei einer 0%igen Zumischrate ist kein Zerfließen festzustellen, weshalb an dieser Stelle keine Halbwertszeit angegeben werden kann.

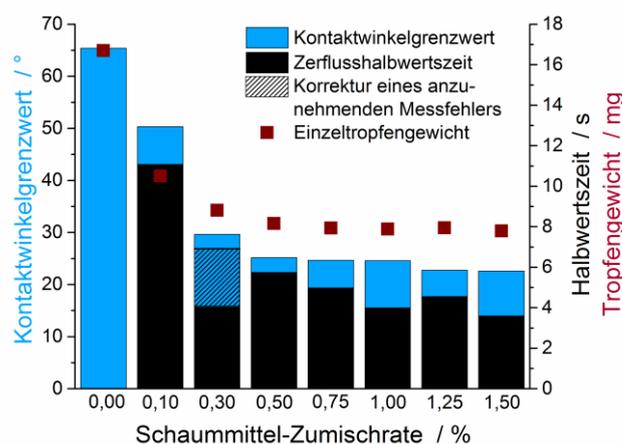


Abbildung 20: Tropfencharakteristik von vollentsalztem Wasser und dem Schaummittel Y in Abhängigkeit der Zumischrate auf Glas

Die gemessenen Anfangskontaktwinkel (Mittelwerte aus jeweils 10 Messungen) der Tropfen unmittelbar nach dem Auftreffen auf die Probenplatten sind in Abbildung 21 zusammengestellt. Sie präsentiert die Messdaten in Abhängigkeit aller verwendeten Probenplatten, Gewässerarten und Schaummittel in 0,5%iger Konzentration. Diese Daten

liefern keine Aussagen zum Verhalten der Kontaktwinkel bei zu- oder abnehmenden Oberflächenrauheiten gemäß Wenzel [66], da sich die untersuchten Rauheitsgrade auf unterschiedliche Materialien verteilen. Die Materialien *Edelstahl*, *Glas* und *Polystyrol* dienen vielmehr dem Ausschluss von Zufallsergebnissen, wie sie bei der Verwendung von nur einem Probenmaterial hätten entstehen können. Erkennbar ist, dass die Gewässertypen auf allen Probenplatten eine vergleichbare Abstufung der Kontaktwinkel aufweisen. Somit können die gemessenen Kontaktwinkelunterschiede der Lösungen eindeutig auf den Einfluss der Wasserarten zurückgeführt werden.

Vollentsalztes Wasser zeigt jeweils den größten Kontaktwinkel auf, gefolgt von Süßwasser und letztlich Meerwasser. Anhand der Messdaten sind keine Effektivitätsunterschiede zwischen den Schaummitteln X und Y erkennbar.

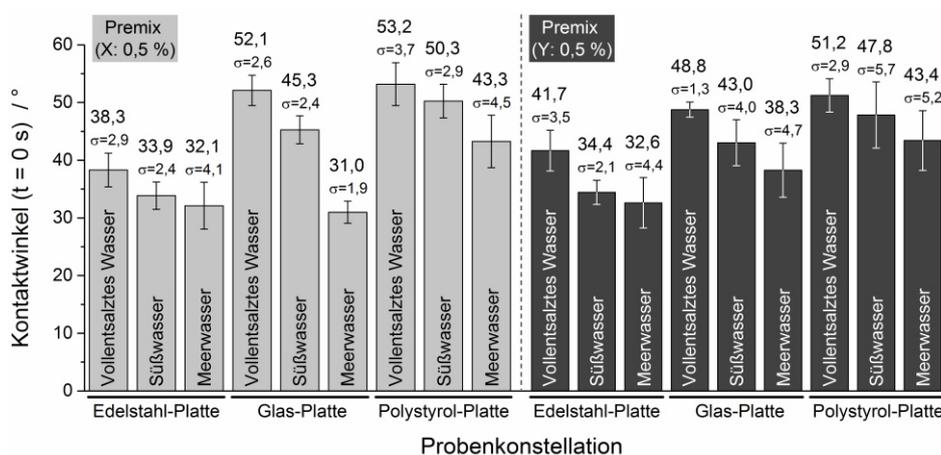


Abbildung 21: Kontaktwinkel zwischen Tropfen und Probenplatte zur Zeit $t = 0 \text{ s}$ in Abhängigkeit der Wasserart und der Probenplatte

Fazit aus den Kontaktwinkelmessungen

Die Kontaktwinkelmessungen ergeben, dass eine Steigerung der Zumischrate zu einer Verringerung des Kontaktwinkels (sowohl Anfangs- als auch Grenzwert) führt und das Zerfließen des Tropfens beschleunigt. Folglich steigt die Netzfähigkeit der Lösung durch eine Erhöhung der Zumischrate an. Die wesentlichste Auswirkung einer erhöhten Zumischrate ist die geringere Tropfenmasse, welche durch eine niedrigere Oberflächenspannung des Tropfens und deshalb durch ein zeitigeres Abreißen an der Austrittsöffnung hervorgerufen wird. Die größte durch Tensidzugabe hervorgerufene Änderung des Tropfenkontaktwinkels erfolgt in den ersten 100 ms nach Auftreffen des Tropfens auf einer festen Oberfläche. Diese beiden Eigenschaften, *geringe Tropfengröße* und *sofortige Oberflächenausdehnung*, bilden bei der Brandbekämpfung einen wesentlichen Vorteil der mit Tensiden versehenen Tropfen gegenüber reinen Wassertropfen.

Die Kontaktwinkelanalyse der Tropfen aus verschiedenen Gewässertypen lässt die Annahme zu, dass die untersuchten Schaummittel keine Effektivitätseinbußen bei der Brandbekämpfung mit Meerwasser aufzeigen werden.

3.3 Outdoor-Mischkrippenbrandversuche

Zur Bestimmung der charakteristischen Brandeigenschaften der neuentwickelten Mischbrandkrippe wurde ein Freibrandversuch durchgeführt. Die Krippe brannte dabei über einen Zeitraum von 30 Minuten ohne Brandbekämpfungsmaßnahmen. Eine wärmeisolierte Waage erfasste die Massenverlustrate während des Abbrandes. Multipliziert mit dem durchschnittlichen Krippenheizwert von $\overline{H_K} = 21,12 \text{ MJ/kg}$ (während der Zündung mit n-Heptan) bzw. $\overline{H_K} = 20,12 \text{ MJ/kg}$ (während der Brandentwicklungsphase nach Erlöschen der Heptanlache) berechnet sich daraus die Wärmefreisetzungsrate (engl.: Heat release rate, HRR) der Mischbrandkrippe.

Der Massenverlauf der Mischbrandkrippe während des ungehinderten Abbrandes sowie ihre Wärmefreisetzungsrate, deren Kurvenverlauf mit einem Savitzky-Golay Filter geglättet wurde, sind in Abbildung 22 dargestellt. Aus ihr geht hervor, dass die Beflammung des Krippenkörpers mit n-Heptan 170 s andauerte. Im Anschluss entwickelte sich der Brand über eine Dauer von weiteren 330 s. Die Vollbrandphase setzte 500 s nach der Zündung ein und dauerte bis ca. 1.200 s nach der Zündung an. In diesem Zeitraum wurde eine durchschnittliche Wärmefreisetzungsrate von $\dot{Q} = 1,81 \text{ MW}$ erreicht. Die Abklingphase begann 1.200 s nach der Zündung und endete mit dem Stopp der messtechnischen Erfassung 1.700 s nach der Zündung.

Die ebenfalls geglätteten charakteristischen Temperaturkurven der Mischbrandkrippe während des ungehinderten Abbrandes sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Temperaturen über der Krippe waren besonders unbeständig, da Verwirbelungen am Outdoor-Versuchsstand die Flammen oftmals in verschiedene Richtungen drückten. Im Krippenzentrum erreichten die Temperaturen Werte bis zu 1.250 °C. Die einzelnen Thermoelemente an der Krippenoberfläche wiesen ebenfalls windbedingt schwankende Werte auf. Der Mittelwert aller acht Temperaturmessstellen an der Krippenoberfläche, inklusive der auf der Krippenoberseite und Krippenunterseite, erzeugt dahingegen einen vergleichsweise beständigen Graphen zur Beschreibung der durchschnittlichen Krippenoberflächentemperatur. Die durchschnittliche Krippenoberflächentemperatur erreichte während der Vollbrandphase Werte von 680 bis 840 °C.

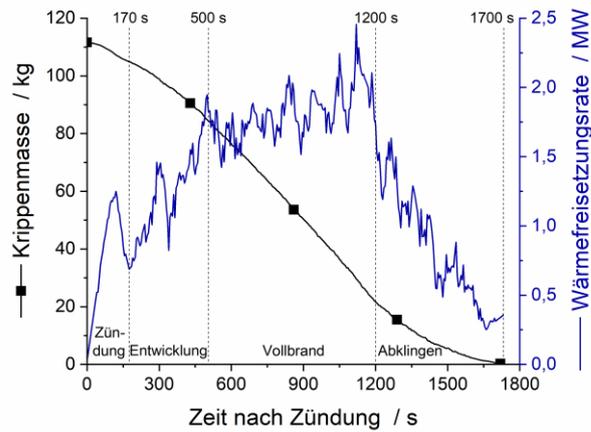


Abbildung 22: Massenänderung und Wärmefreisetzungsrate der Mischbrandkrippe während des ungehinderten Abbrandes [39]

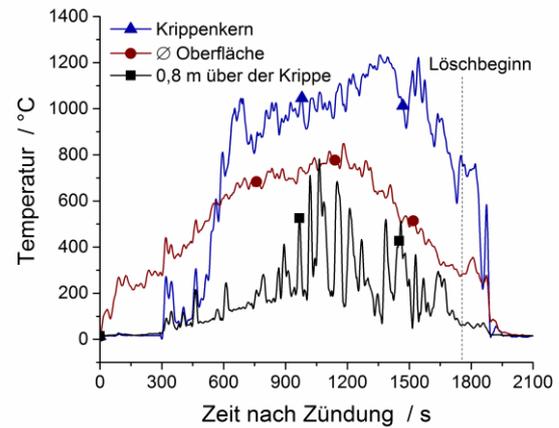


Abbildung 23: Charakteristische Temperaturkurven der Mischbrandkrippe während des ungehinderten Abbrandes [39]

Für die Tests zur Untersuchung der Löschmittelwirksamkeit von Wasser, Netzwasser und CAF wurden unterschiedliche Strahlformen für die einzelnen Löschmedien verwendet, um jeweils beste Voraussetzungen für eine hohe Löscheffizienz zu schaffen. CAF wurde als Vollstrahl und die Löschmittel Wasser sowie Netzwasser als Sprühstrahl appliziert. Diese Art der Ausbringung orientiert sich an der allgemeinen Vorgehensweise der Feuerwehren weltweit. Ein Sprühstrahl verteilt den Löschmittelstrom in feine Tropfen. So entsteht bei gleichbleibender Wassermenge eine größere Gesamtoberfläche. In anderen Worten: Im Sprühstrahl ausgebrachtes Wasser hat ein hohes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis. Wang et al. [67] zeigen in ihrem Beitrag *Optimization of water mist droplet size by using CFD modeling for fire suppressions* eine steigende Effektivität des Wärmetransportes von der Flamme zum Wassertropfen mit der Abnahme der Tropfengröße auf. Dadurch wird eine effektive Verdampfung der Tropfen und folglich eine schnelle Abkühlung des Brandstoffes bewirkt. CAF hat aufgrund seiner feinen, dünnwandigen Blasenstruktur ein sehr großes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis und kann daher ohne Effektivitätseinbußen im Vollstrahl ausgebracht werden. Darüber hinaus wird von der Ausbringung des CAF als Sprühstrahl abgeraten, da die Blasenstruktur des Schaumes im Wesentlichen von den Hindernissen wie z.B. Einbauten, Drallkörper und Biegungen in einem Strahlrohr abhängt und dadurch beeinträchtigt wird. Umso größer die Störungen im Löschmittelstrom sind, desto geringer ist die erzielte Verschäumungszahl [39].

Die Temperaturkurven aller Löschvorgänge ohne einen Mindestlöschabstand sind in Abbildung 24 dargestellt. Diese Kurven sind Mittelwerte der Messdaten aller Thermoelemente an der Krippenoberfläche (T07 - T12) sowie der Thermoelemente T01 (Krippenunterseite), T02 (Krippenkern) und T03 (Krippenoberseite) und geben somit die Durchschnittskrippentemperatur (im Folgenden *Krippentemperatur* genannt) eines jeden Versuchsdurchganges wieder.

Obwohl die Krippentemperaturen zu Beginn der Löschmaßnahmen ca. 100 °C auseinanderlagen, zeigten sich im Verlauf der Löscharbeiten eindeutig erkennbare Wirksamkeitsunterschiede der Löschmittel auf. Der in Abbildung 24 dargestellte Temperaturabfall in den ersten 40 s des Löschvorganges beruht hauptsächlich auf der Kühlung der Krippenaußenseiten und ist in allen Versuchen ähnlich ausgeprägt. Danach zeigen die Temperaturkurven von CAF (X) und CAF (Y) weiterhin einen intensiven Temperaturabfall auf, während Wasser und Netzwasser einen wesentlich geringeren Kühleffekt aufweisen. Die signifikanten Temperaturanstiege in den Kurven von Wasser, Netzwasser und CAF (Y) bei $t \approx 70$ s folgen aus Löschunterbrechungen, die nötig waren, um zur Ausgangsposition (Löschseite 1, gemäß Abbildung 7) des Angriffstrupps nach einer vollständigen Umrundung des Brandobjektes zurückzukehren. Die beiden unverschäumten Löschmittel im Sprühstrahl konnten die Kerntemperatur der Krippe nach einmaliger Umrundung noch nicht nachhaltig senken, sodass in diesen Fällen der Temperaturanstieg besonders ausgeprägt war. Die kritische Temperaturgrenze von 100 °C unterschritten sie erst nach 167 s (Netzwasser) bzw. 184 s (Wasser). Die beiden Druckluftschäume benötigten zum Erreichen dieses Schwellwertes mit 81 bis 84 s gerade einmal die Hälfte der Zeit [39].

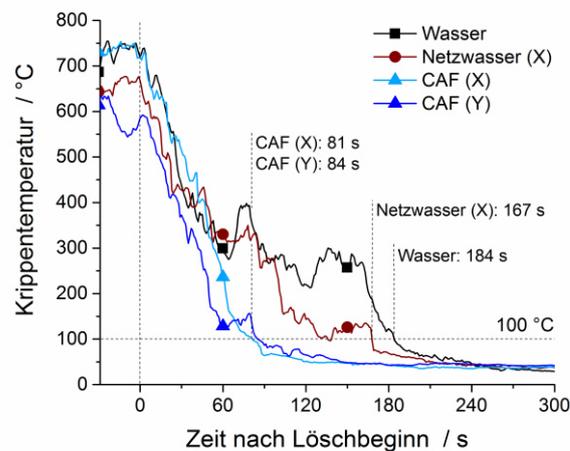


Abbildung 24: Krippentemperatur während aller Löschvorgänge ohne Mindestlöscharabstand [39]

Die Verläufe der Krippentemperatur während der Löschvorgänge mit einem Mindestlöscharabstand werden in Abbildung 25 gezeigt. Die Löscharabstände waren an die Wurfweiten der Löschmittel angepasst und betrugen für das im Sprühstrahl ausgebrachte Wasser und Netzwasser $s = 0,50$ m und für die im Vollstrahl applizierten Druckluftschäume $s = 1,00$ m. Der Löscharversuch mit CAF (X) unterschritt schon nach 77 s die kritische Temperatur von 100 °C. Die Unterbrechung der Löschmittelapplikation, während der Angriffstrupp die Position wechselte, ließ die Temperatur noch einmal ansteigen, bevor sie mit gezielten Löscharstößen nach 122 s dauerhaft unter die 100 °C Grenze

gebracht wurde. Die CAF (Y) Kurve ist aufgrund eines Pumpendefekts nur der Vollständigkeit halber im Diagramm aufgenommen, zeigt jedoch nicht den Kühlverlauf, der bei einwandfreier Pumpenfunktion zu erwarten gewesen wäre. Eine Filterverschmutzung beeinträchtigte das Austrittsmoment und die Durchflussrate des Löschmittels so sehr, dass in diesem Fall der CAF nicht bis zum Krippenkern vordringen konnte und die erwartete Kühlwirkung ausblieb.

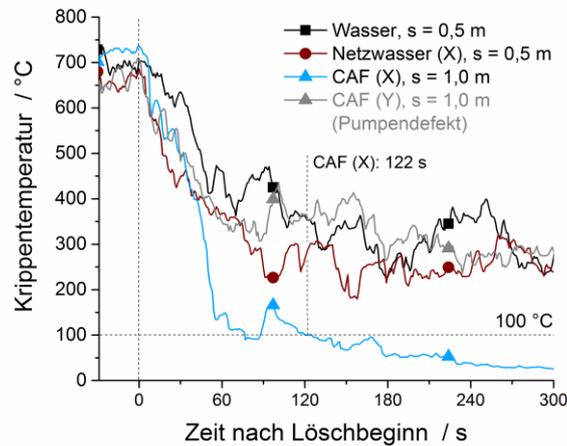


Abbildung 25: Krippentemperatur während der Löschvorgänge mit Mindestlöschaabstand s

Die Kurvenverläufe zeigen deutlich, dass ein ausschließlich aus der Ferne applizierter Sprühstrahl nicht effektiv ist. Aufgrund ihres geringen Austrittsmomentes kühlten die Wassertropfen des Sprühstrahls zwar die Krippenaußenseiten, drangen jedoch nicht bis in den Krippenkern vor. Beide Sprühstrahlversuche (Wasser und Netzwasser) schafften es nicht, mit dem zur Verfügung stehenden Löschmittelvolumen von $V = 50 \text{ l}$ die Flammen zu löschen. Das im Sprühstrahl ausgebrachte Wasser drang nicht in das Material ein und verdampfte ausschließlich an der Krippenoberfläche. Große Teile des Löschmittelvolumens liefen wegen der schlechten Benetzungseigenschaften von Wasser ungenutzt ab. Folglich stieg die Temperatur einer soeben gelöschten Krippenseite direkt nach dem Seitenwechsel wieder an. Dieser Anstieg ist in Abbildung 26, welche den Temperaturverlauf an der Löschseite 1 während der Löschvorgänge mit Mindestlöschaabstand veranschaulicht, deutlich erkennbar [39].

Ähnlich wie beim Wasserlöschversuch wurde die Krippentemperatur auch beim Netzwasserversuch schnell, aber nicht nachhaltig herabgesetzt. Aufgrund der geringeren Oberflächenspannung des Netzwassers [38] drang dieses teilweise in die Oberfläche des Brandstoffes ein und kühlte dort etwas effizienter als Wasser, sodass die wiederholten Temperaturanstiege beim Löschseitenwechsel weniger intensiv ausfielen [39].

Die anhaftenden Eigenschaften von CAF ermöglichten es dem Löschmittel, bis zu seiner vollständigen Verdampfung auf der Brandlast zu bleiben. Der Anteil an ungenutzt abfließendem Wasser wurde so bis auf ein Minimum reduziert. Die homogene

Blasenstruktur des CAF erlaubt es dünnen, aber stabilen, Schaumschichten, die Krippentemperatur effizient herabzusetzen und die Brandlastoberfläche zu versiegeln, sodass keine Gase aus dem Material emittieren können. Die Rückzündungswahrscheinlichkeit wird dadurch deutlich gesenkt. Kleine Temperaturanstiege nach dem Löschseitenwechsel wurden mit wenigen gezielten Löschstößen unterdrückt [39].

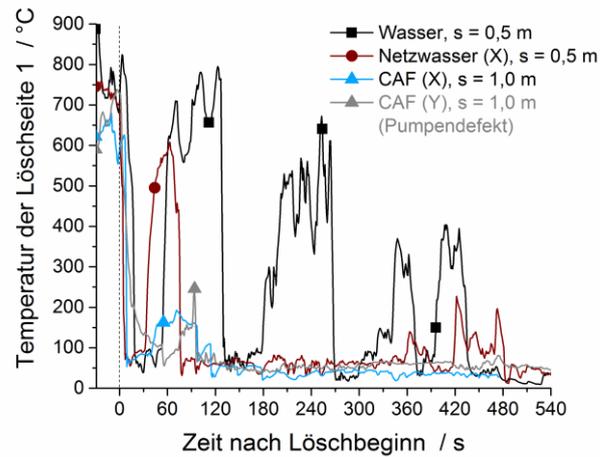


Abbildung 26: Temperatur im Mittelpunkt der Löschseite 1 während der Löschvorgänge mit Mindestlöscharabstand s [39]

Die Auswertung der Wärmeflussaufnehmer-Daten stellt eine weitere Möglichkeit zur Analyse der Löschmitteleffizienz dar. Eine Beurteilung der Löscheffizienz erfolgt in diesem Fall über die Zeit, die der Löschangriff benötigt, um die vom Brandobjekt ausgehende Wärmestrahlung auf den Wert $\dot{Q}_{rad} = 0 \text{ kW/m}^2$ herabzusetzen. Die Wärmestrahlungsdiagramme der Löschvorgänge ohne bzw. mit Mindestlöscharabstand sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt. Ähnlich wie bei der Temperaturmessung zeigen auch die Wärmestrahlungsdaten, dass lediglich die Löschvorgänge ohne Mindestabstand (Abbildung 27) bei allen untersuchten Löschmitteln zur vollständigen Löschung des Brandes führten. Die unverschäumten Löschmedien benötigten mit 117 s (Netzwasser) und 170 s (Wasser) deutlich länger, um die Wärmestrahlung einzudämmen als die Druckluftschäume CAF (X) mit 54 s und CAF (Y) mit 68 s.

Beim Löschvorgang aus der Ferne (Abbildung 28) wies nur das Löschmittel CAF (X) eine erfolgreiche Eindämmung der Wärmestrahlung auf. Die CAF (Y) Kurve unterliegt dem zuvor erwähnten Einfluss des Pumpendefektes. Dieser Versuch löschte genauso wie Wasser die Flammen nicht mit dem zur Verfügung stehenden Löschmittelvolumen. Der Netzwasserversuch erreichte das vollständige Erliegen der Wärmestrahlung nach 264 s Löschprozedur.

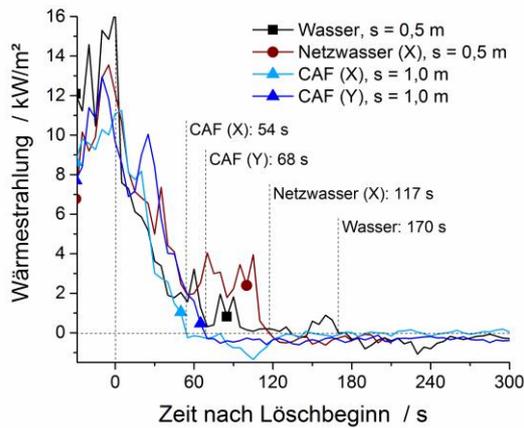


Abbildung 27: Wärmestrahlung während der Löschvorgänge ohne Mindestabstand s

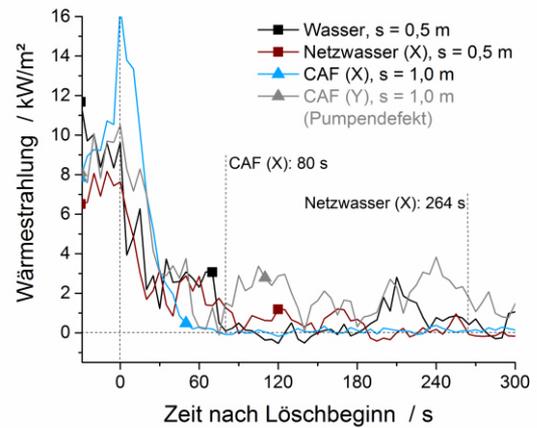


Abbildung 28: Wärmestrahlung während der Löschvorgänge mit Mindestabstand s

Abbildung 29 zeigt einen Ausschnitt der Wärmeflussaufnehmer-Daten, aufgezeichnet während der ersten 40 s aller Löschvorgänge mit Mindestlöscharabstand. Die in diesem Zeitraum relativ gleichmäßig fallenden Kurven wurden linear angepasst (Korrelationskoeffizient $r < -0,87$) und die Gefälle der daraus resultierenden Geraden ermittelt. Es wird deutlich, dass die Druckluftschäume ein größeres Gefälle der Wärmestrahlungsintensität verursachten als Wasser und Netzwasser. Somit kann den Druckluftschäumen auch anhand der Wärmestrahlungsverläufe eine bessere Löschwirkung zugeschrieben werden.

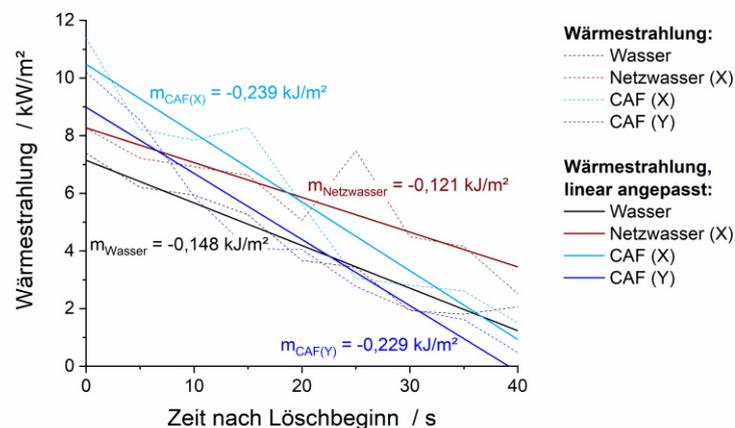


Abbildung 29: Lineare Anpassung der Wärmestrahlung während der Löschvorgänge ohne Mindestabstand s

Fazit aus den Outdoor-Mischkripenbrandversuchen

Die Outdoor-Löschversuche an Mischbrandkripen stellen eindeutige Wirksamkeitsunterschiede der untersuchten Löschmedien heraus. Die Druckluftschäume erreichen die Testkriterien für einen gelöschten Brand wesentlich früher als die unverschäumten Löschmittel Wasser und Netzwasser. Dabei erweist sich das hohe Austrittsmoment der Druckluftschäume als großer Vorteil. Die hohe kinetische Energie am Strahlrohraustritt beförderte die Schäume auch aus sicherer Entfernung problemlos ins Kripeninnere, wo

sie sich aufgrund ihrer geringen Fließspannung gut ausbreiteten [29]. Da Class A Schäume darauf ausgelegt sind, Feststoffe zu penetrieren, weisen sie sehr gute Benetzungseigenschaften auf [30]. Die getesteten Druckluftschäume dringen also in die Feststoffoberfläche ein und absorbieren dort durch Verdampfen große Mengen der Wärmeenergie des Feuers. Sobald die Materialtemperatur unter 100 °C sinkt und die Verdampfung zum Erliegen kommt, haftet der Schaum an der Oberfläche. Seine einheitliche Blasengrößenverteilung ermöglicht eine stabile Schaumschicht, welche dank ihrer kleinen Blasengrößen eine geringe Drainagerate aufweist [30]. Der anhaftende weiße Schaum schirmt Wärmestrahlung ab und schützt somit vor Rückzündungen. Zudem verfügt er auch bei turbulenten Flammen über eine gute Sichtbarkeit, wodurch eine koordinierte Strahlrohrführung erleichtert wird. Der Löschwasserverbrauch bei der CAF-Brandbekämpfung war unter Versuchsbedingungen bis zu 55 % niedriger als bei einem reinen Wasser-Löschvorgang [39].

Die als Sprühstrahl ausgebrachten Löschmittel Wasser und Netzwasser boten ebenfalls eine große Reaktionsoberfläche, büßten durch die Zerstäubung an der Düse jedoch an kinetischer Energie ein. Folglich drangen die Tropfen nicht mehr bis zum Krippenkern vor. Ein Wasser- oder Netzwasservollstrahl erreichte den schwer zugänglichen Krippenkern leichter als ein Sprühstrahl, war dort jedoch aufgrund der größeren Tropfenform und der geringeren Reaktionsoberfläche zwischen Wasser und Wärmequelle weniger effektiv und nicht in der Lage, ohne zusätzlichen Wasserverbrauch vergleichbare Löschergebnisse zu erzielen. Der löschwirksame Wasseranteil eines Vollstrahls wird in [68] auf 5 bis 10 % geschätzt. Überschüssiges Löschwasser läuft ungenutzt ab und verursacht oftmals erhebliche Gebäudeschäden.

3.4 Indoor-Mischkrippenbrandversuche

Die Untersuchung der Löschmittel unter Verwendung von feuerwehrtechnischem Equipment im Indoor-Bereich brachte höhere Durchflussraten mit sich. Die im Vergleich zum Versuchslöschgerät der Outdoor-Mischkrippenbrandversuche größere Applikationsrate ließ für diese Versuchsreihe kürzere Löscheziten erwarten. Die zeitlichen Verläufe der Krippentemperaturen (Abbildung 30) und der Temperaturen in der Heißgasschicht des Raumes (Abbildung 31) bestätigen diese Annahme.

Die dicht beieinanderliegenden Temperaturverläufe und die große Temperaturdifferenz zu Löschbeginn lassen kaum eine Einstufung der Löschmitteleffizienz zu. Die schnellste Kühlung des Brandobjektes erreichte der in Abbildung 30 als *CAF (X) 2* betitelte Löscheckversuch. Der Knick im Kurvenverlauf, 10 s nach Löschbeginn, resultiert aus einer Unterbrechung des in Abbildung 9 festgelegten Löscheckweges. Aus Gründen des Eigenschutzes musste der Trupp zu diesem Zeitpunkt den Löscheckstrahl von der Löscheckseite 2 abwenden, um die brennende Deckenkonstruktion zu löschen. Auch in dieser Zeit nahm

die Krippentemperatur weiterhin ab, was auf die Verdampfung des bereits aufgetragenen CAF zurückzuführen ist. Nach dem Löschen der Deckenkonstruktion sind die Flammen in der Krippe ebenfalls erloschen, ohne die Löschseiten 3 und 4 direkt mit Löschmittel beaufschlagt zu haben. 30 s nach Löschbeginn verursachten zwei kurze Löschmittelstöße zur Bekämpfung verbleibender Glutnester auf Löschseite 4 den zweiten Knick in der Temperaturkurve. Das Feuer galt als gelöscht, doch der minimale Wasserverbrauch hatte eine vergleichsweise hohe Krippentemperatur nach der Brandbekämpfung zur Folge [39].

Die erwähnte Unterbrechung des Löschweges zur Kühlung der Deckenkonstruktion ist auch in Abbildung 31, welche die Temperaturen in der Heißgasschicht wiedergibt, zu erkennen. Der Kurvenverlauf des Versuches CAF (X) 2 erfährt 12 s nach Löschbeginn einen leicht erhöhten Temperaturabfall, welcher auf die Löschmittelapplikation im Deckenbereich zurückzuführen ist. Die Raumtemperatur nach Versuchsende war aufgrund des eingesparten Löschmittelvolumens gegenüber dem Versuch CAF (X) 1 jedoch vergleichsweise hoch.

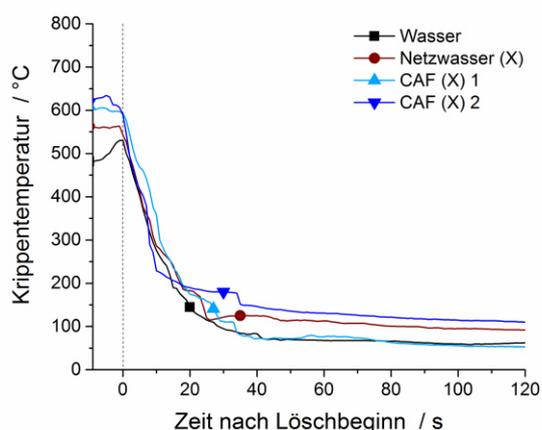


Abbildung 30: Krippentemperatur während der Löschvorgänge [39]

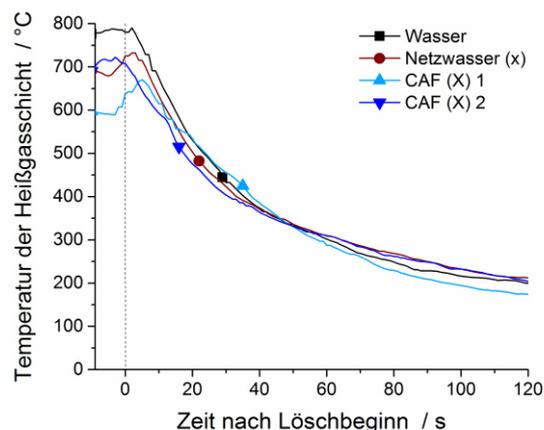


Abbildung 31: Temperatur in der Heißgasschicht während der Löschvorgänge

Hinsichtlich der Löschzeiten und des Löschwasserverbrauches, welche in Tabelle 15 zusammengefasst sind, ist unter den Löschmitteln eine Wirksamkeitstendenz erkennbar. Unter den Versuchsbedingungen zeigten beide CAF-Versuche, dass sie das Potenzial haben, Brände in kürzerer Zeit und mit weniger Wasservolumen bekämpfen zu können. Der Netzwasserlöschvorgang benötigte etwas mehr Zeit und Löschwasservolumen. Die Löschung mit Wasser stellte sich als am wenigsten effizient heraus.

Tabelle 15: Löschzeiten und Löschmittelverbrauch während der Indoor-Brandbekämpfung

Löschmittel	Löschzeit	Wasserverbrauch
Wasser	70	49
Netzwasser	55	28
CAF (X) 1	45	k.A.*
CAF (X) 2	50	23

* Verfälschter Wert durch unentdecktes Leck in der Steigleitung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Rauchgasanalyse mittels FTIR-Spektroskopie in Abhängigkeit der Löschmedien und deren Auswirkungen auf die Rauchgaszusammensetzung während der Indoor-Löschvorgänge analysiert. Die Konzentrationsverläufe der gemessenen Rauchgase (Ammoniak, Benzol, Cyanwasserstoff, Ethen, Ethin, Formaldehyd, Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Distickstoffmonoxid) zeigen keine auf die Löschmittel rückführbaren Unterschiede auf. Die Konzentrationsverläufe von Chlorwasserstoff (HCl), Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄) unterscheiden sich in Abhängigkeit der Löschmedien.

Die CO₂-Emission in Abhängigkeit des Löschmediums ist exemplarisch in Abbildung 32 wiedergegeben. Der Kurvenverlauf der CO- und CH₄-Konzentrationen ist qualitativ ähnlich. Unabhängig von der Art des Löschmittels nahm die Konzentration aller drei Rauchgase mit Löschbeginn unverzüglich ab. Im Löschangriff mit Wasser, Netzwasser und CAF (X) 2 verlaufen die Konzentrationskurven auch 30 s nach Löschbeginn ähnlich. Die Kurve CAF (X) 1 setzt sich von den anderen Kurven ab und zeichnet sich durch eine erkennbar geringere Konzentration aus, welche auf die vergleichsweise schnelle Brandunterdrückung zurückzuführen ist. Je schneller das Feuer gelöscht wird, desto eher kommt die thermische Zersetzung des Brandstoffes zum Erliegen und desto eher wird die Freisetzung von Pyrolysegasen unterbunden. In Hinblick auf die Löschzeiten aus Tabelle 15 kann geschlussfolgert werden, dass die kurzen Löschzeiten der CAF-Löschvorgänge eine niedrigere Rauchgasfreisetzung als die Löschvorgänge mit Wasser und Netzwasser zur Folge haben. Die Unterdrückung der Rauchgasfreisetzung wird zudem durch die gasdichte Eigenschaft einer flächendeckenden CAF-Schicht auf der Brandstoffoberfläche unterstützt [29].

Dass der Löschvorgang CAF (X) 2 erkennbar höhere CO₂-, CO- und CH₄-Konzentrationen als der Löschvorgang CAF (X) 1 und stellenweise sogar als die Löschvorgänge mit Wasser oder Netzwasser aufzeigte, liegt in der Löschtaktik begründet. In den Versuchen mit Wasser und Netzwasser wurden alle vier Löschseiten mit Löschmittel beaufschlagt. Im Versuch CAF (X) 2 wurden dahingegen nur die ersten beiden Löschseiten vollständig und die Löschseite 4 teilweise beaufschlagt. Das Feuer kam zu großen Teilen indirekt durch die Löschung der Deckenkonstruktion zum Erliegen. Die nicht direkt beaufschlagten

Krippenteile verfügten weiterhin über hohe Materialtemperaturen und erhielten die Rauchgasproduktion aufrecht [39].

Das Konzentrationsprofil von Chlorwasserstoff während der Löschvorgänge und in den drei Minuten danach ist in Abbildung 33 gezeigt. Chlorwasserstoffgas resultierte aus der Pyrolyse der 2,9 kg PVC, welche in der Mischbrandkrippe verbaut wurden. Die Konzentration des Gases im Raum stieg während der Brandentwicklung leicht an, blieb jedoch über den gesamten Brandverlauf unter 50 ppm. Während der Löschvorgänge schwankte die HCl-Konzentration um ± 25 ppm, danach stieg sie über einen längeren Zeitraum signifikant an. Die niedrigste Konzentration wurde im Versuch CAF (X) 1 erreicht, in welchem die gesamte Krippe mit CAF beaufschlagt wurde. Dadurch wurden fast alle Pyrolysegase an ihrer Freisetzung gehindert. Die zweitniedrigste HCl-Konzentration war im Wasserversuch zu verzeichnen, bei dem sich das leicht lösliche Chlorwasserstoffgas im Wasser löste und nicht als Gas in die Umgebungsluft gelangte. Das bedeutet, dass eine Reduzierung des Löschwasservolumens eine höhere HCl-Konzentration in der Umgebungsluft bewirken kann. Die größten HCl-Konzentrationen waren in den Versuchen mit Netzwasser und CAF (X) 2 zu verzeichnen. Begründet ist das im niedrigen Wasserverbrauch (siehe Tabelle 15) und in der hohen Krippentemperatur nach dem Löschvorgang (siehe Abbildung 30), welche gemeinsam die Bildung des Pyrolysegases steigerten. Die bereits beschriebene indirekte Brandlöschung im Versuch CAF (X) 2 brachte die höchste freigesetzte Menge an Chlorwasserstoffgas mit sich. Thermogravimetrische Analysen [69] belegen, dass die thermische Abspaltung von Chlorwasserstoffgas von Polyvinylchlorid ab Umgebungstemperaturen von 220 °C beginnt. Im Versuch CAF (X) 2 lag die Krippenkerntemperatur nach den Löscharbeiten bei 230 °C und sank um 6 °C pro Minute [39].

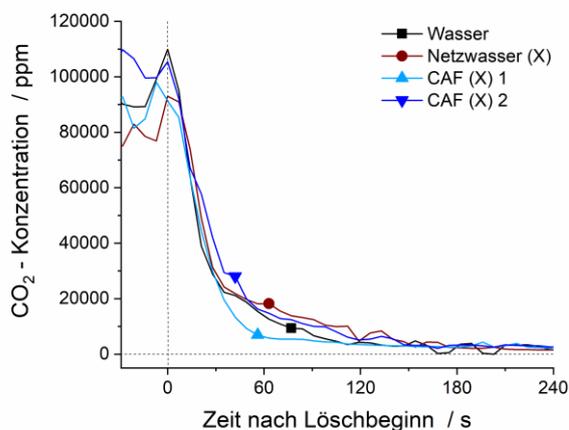


Abbildung 32: CO₂-Konzentration im Brandraum während der Löschvorgänge [39]

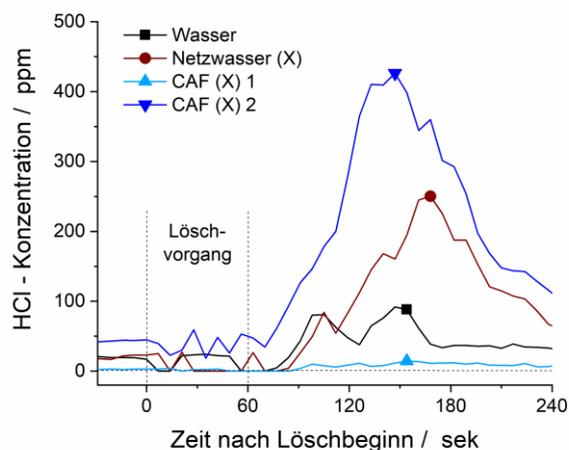


Abbildung 33: HCl-Konzentration im Brandraum während und nach den Löschvorgängen [39]

Fazit aus den Indoor-Mischkrippenbrandversuchen

Die Indoor-Löschversuche an Mischbrandkrippen lassen den Schluss zu, dass Druckluftschäume das Potenzial haben, Brände unter den getesteten Bedingungen schneller zu löschen als Wasser oder Netzwasser. Sie senken die Materialtemperatur und formen eine Barriere zwischen Luftsauerstoff und Brandstoff. Zudem verdünnt die, durch die hohe Verdampfungsrate des Schaumes bedingte, intensive Wasserdampfbildung die Sauerstoffkonzentration im Bereich des Brandes [70]. So bringt CAF das Feuer durch eine Kombination der Löscheffekte zum Erliegen. Der Hauptlöscheffekt von CAF bei Feststoffbränden ist der Kühleffekt [39].

Es zeigte sich, dass Brände mit CAF auch indirekt über eine Applikation auf aufgeheizte Oberflächen, die nicht zum Brandobjekt gehören, bekämpft werden können. Intensive Raumbrände können somit von außen durch gezielte Löschstöße auf heiße Wände oder Decken eingedämmt werden, bevor der Angriffstrupp eine Restablösung im Rauminnen vornimmt. Die Versuche verdeutlichen, dass die Faktoren *Löschtaktik* und *Löschdauer* wesentlichen Einfluss auf die Rauchgasfreisetzung haben. Beide Punkte beeinflussen, wie schnell die Materialtemperatur herabgesetzt und die Pyrolyseprozesse in der Brandlast unterbunden werden können. Bei ausreichender und direkter Applikation kühlten alle getesteten Löschmittel die Materialtemperatur so weit herab, bis die Pyrolyse zum Erliegen kam. CAF baute zudem auf den abgekühlten Oberflächen eine physische Barriere auf, welche entflammbare Gase aus tiefer gelegenen Materialschichten darin hinderte, sich mit dem Luftsauerstoff zu vermischen. Somit begrenzt CAF die Rauchgasfreisetzung und die Rückzündungsgefahr auf ein Minimum [39].

3.5 Indoor-Holzrippenbrandversuche

Mit der Untersuchung der Löscheffizienz der Löschmedien Wasser, Netzwasser, NAF und CAF knüpfte diese Versuchsreihe an die zuvor beschriebenen Mischkrippenbrandversuche an. Zur Herstellung des Netzwassers und der Schäume wurden jeweils die Schaummittel X und Y herangezogen.

Die Löschversuche mit den besten Ergebnissen eines jeden Löschmediums unter Verwendung des Schaummittels Y sind in Abbildung 34 zusammengestellt. Die darin abgebildeten Krippenkerntemperaturen sind rechnerisch ermittelte Durchschnittswerte aus allen sieben in der Krippe installierten Thermoelementen. Die Zeitachse ist in die zwei Bereiche *systematische Löschung* und *individuelle Löschung* unterteilt. Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, begannen die Löschvorgänge jeweils mit einer systematischen Löschmittelapplikation und gingen nach 120 s in einen individuellen Löschvorgang über. Grau gestrichelte Kurven beschreiben die Temperaturverläufe während der Observationsphase nach dem Löschvorgang.

Das in diesem Rahmen herausgestellte Wirksamkeitsranking ist vergleichbar mit dem der vorherigen Untersuchungen an Mischbrandkrippen. Reines im Vollstrahl appliziertes Wasser zeigte im Direktvergleich die geringste Kühlwirkung. Die bessere Netzfähigkeit des Netzwasservollstrahls verhalf dem Löschmittel dazu, in ungefähr gleicher Löschzeit eine ca. 100 °C geringere Krippenkerntemperatur zu erreichen.

Der zusätzlich in die Untersuchung mit einbezogene NAF zeigte ein effektives Kühlverhalten, konnte seine volle Wirkung im Rahmen dieser Versuchsreihe jedoch nicht entfalten. Unter den Versuchsbedingungen wies NAF eine geringfügig höhere Verschäumungszahl als CAF und ein annähernd so ausgeprägtes Haftverhalten auf. Das der Verschäumung mittels Injektorprinzip geschuldete niedrigere Austrittsmoment bewirkte, dass ein Großteil des NAF an den Außenseiten bzw. an den Enden der Krippenkanäle der sich drehenden Krippe haften blieb. Unmittelbar nach dem Auftreffen expandierte der Schaum aufgrund der heißen Oberfläche und versperrte dadurch teilweise die engen Krippenkanäle, noch bevor sie sich optimal zur Angriffsrichtung ausrichteten. Nachfolgendes Löschmittel gelang so nur noch anteilhaft zum Krippenkern. So zeichnete sich die Brandbekämpfung mit NAF (X) und NAF (Y) in jeweils zwei von drei Versuchen durch längere Löschzeiten oder zeitnahe Rückzündungen aus.

CAF verfügt wegen seiner homogenen Blasenstruktur über ein noch besseres Haftvermögen als NAF, gelangte aber aufgrund seines großen Austrittsmoments trotz teilweise verstopfter Krippenkanäle einfacher zum Krippenkern [17]. Die in den Abschnitten 3.3 und 3.4 erläuterten Eigenschaften von CAF begünstigten auch in dieser Versuchsreihe ein effizientes Löschverhalten [8].

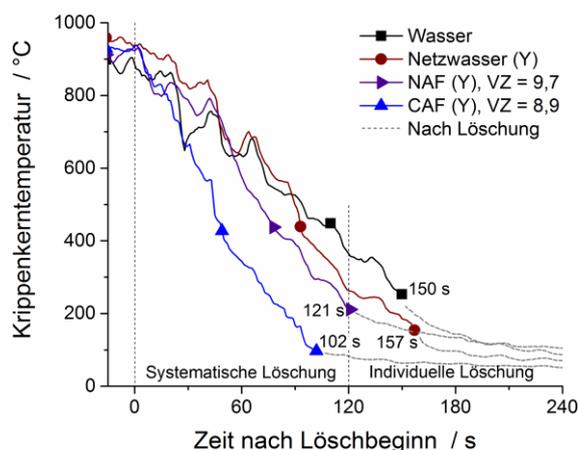


Abbildung 34: Krippenkerntemperatur während der Löschvorgänge mit verschiedenen Löschmitteln [8]

Ein wesentlicher Bestandteil der Versuchsreihe war die Untersuchung der Effizienz verschiedener Strahlformen bei der Anwendung von unverschäumten Löschmitteln. Wie in zahlreichen Literaturstellen [43,67,71] und Lehrunterlagen [72,73,74] beschrieben,

steigert der kleine Tropfendurchmesser eines Sprühstrahls den Wärmetransport von der Flamme zum Löschwasser. Dadurch erhöht sich die Verdampfungseffektivität, was eine schnelle Abkühlung des Brandobjektes zur Folge haben sollte.

Jedoch war anhand der Löschmedien Wasser und Netzwasser (X) zu erkennen, dass der Sprühstrahl mit kleinen Tropfengrößen die Krippentemperatur nicht annähernd so effizient kühlte wie ein Vollstrahl derselben Löschmittel mit größeren Tropfen (siehe Abbildung 35). Der Theorie der gesteigerten Verdampfungsrate stehen die Praxiskomplikationen der Löschmittelapplikation gegenüber. Während ein aus der Ferne applizierter Vollstrahl den Krippenkern problemlos erreichte und unverzüglich abkühlte, unterdrückte ein Sprühstrahl aus ähnlicher Entfernung die Flammen nur an den Krippenaußenseiten. Der konische Sprühstrahl besaß einen Sprühwinkel von 20° . Bei einer Löschdistanz von $s = 0,50 \text{ m}$ traf er kreisförmig mit einem Durchmesser von $d = 0,18 \text{ m}$ auf die Krippe auf. War der Strahl ideal im rechten Winkel auf die Krippe und zentral auf einen Krippenkanal ausgerichtet, gelangten 30 % ($\dot{V} = 0,4 \text{ l/min}$) des angewandten Löschmittels ins Krippeninnere. Dieser Anteil reichte nicht aus, um das Feuer wirksam zu bekämpfen. Um die gesteigerte Verdampfungsrate des Sprühstrahls effektiv nutzen zu können, musste also sein Abstand zum Brandherd verringert werden.

Während des individuellen Löschvorganges wurde auf den Mindestlöschabstand verzichtet. So gelangten bis zu 100 % des angewandten Löschmittels ins Krippeninnere. In diesem Fall wurde die Krippentemperatur wesentlich schneller abgesenkt. Die Kühlkapazität des Sprühstrahls überstieg dann die Kühlkapazität des Vollstrahls. Wurde der Löschabstand des Vollstrahls reduziert, war keine Steigerung seiner Kühlkapazität zu verzeichnen. Ein Grund dafür ist das kleine Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis des Löschmittels und die damit verbundene geringe Verdampfungsrate. Der große im Krippenkern ankommende Wasseranteil konnte nicht schnell genug umgesetzt werden und floss bei weitem sowie bei kurzem Löschabstand zu gleichen Teilen ab. Abfließendes Löschmittel aus den oberen Krippenschichten passierte tiefergelegene Schichten, wo es weiter umgesetzt wurde [8].

Die Löschzeiten in Abbildung 35 schreiben dem Netzwasser (X) eine bessere Wirksamkeit als reinem Wasser zu. Bei Beendigung des Löschangriffes mit Netzwasser (X)-Vollstrahl nach 132 s lag die Temperatur des Wasser-Vollstrahlversuches noch 193°C über dem Netzwasserwert. Der Temperaturwert des Netzwasser (X)-Sprühstrahls lag beim Einstellen der Löscharbeiten nach 204 s 73°C unter dem Wasserwert. Jede mit Wasser-Sprühstrahl gelöschte Krippe erfuhr zwischen 135 s und 154 s nach Beendigung der Löscharbeiten eine Rückzündung. Die mit Wasser-Vollstrahl und Netzwasser-Sprühstrahl sowie Netzwasser-Vollstrahl gelöschten Krippen blieben im Zeitraum der Beobachtungsphase rückzündungsfrei.

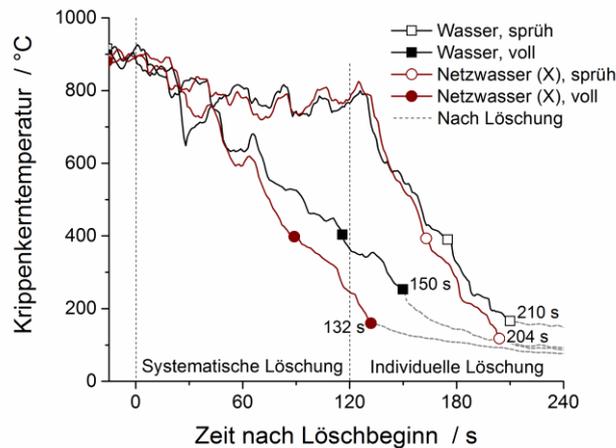


Abbildung 35: Krippenkerntemperatur während der Löschvorgänge mit Wasser und Netzwasser in Abhängigkeit der Strahlform [8]

Die Kühlkapazitäten der Löschmittel Wasser, Netzwasser (X) und Netzwasser (Y) sind in einem Säulendiagramm in Abbildung 36 gegenübergestellt. Jedes darin enthaltene Löschmittel wurde in drei Applikationsarten untergliedert: Sprühstrahl ($s = 0,00\text{ m}$), Sprühstrahl ($s = 0,50\text{ m}$) und Vollstrahl ($s = 0,50\text{ m}$). Grundlage für die in Abbildung 36 angegebenen Werte bilden die Steigungen linearer angepasster Temperaturverläufe aus den entsprechenden Löschversuchen. Diese Steigungen besitzen die Einheit [K/s] und entsprechen der Kühlrate der Löschmittel. Gemäß Gleichung (5) lässt sich aus dem Quotienten von Kühlrate und Applikationsrate die Kühlkapazität eines Löschmittels berechnen.

$$\text{Kühlrate [K/s]} / \text{Applikationsrate [l/s]} = \text{Kühlkapazität [K/l]} \quad (5)$$

Alle linearen Anpassungen der für Abbildung 36 verwendeten Temperaturgraphen verfügen über einen Korrelationskoeffizienten von $r < -0,95$. Die gezeigten Werte sind Mittelwerte aller drei Löschversuche pro Setup.

Die Löschversuche zeigen, dass die Kühlkapazität eines Sprühstrahls weniger vom Löschmittel als vom Löscharabstand abhängt. Erkennbar ist dieser Sachverhalt in Abbildung 35 sowie in Abbildung 36. War der Löscharabstand zu groß, bewegten sich die Kühlkapazitäten von reinem Wasser (41 K/l) und Netzwasser (X) (46 K/l) im gleichen Bereich. Erst bei einer angemessenen Anpassung des Löscharabstandes, sodass der Sprühstrahl auch ins Krippeninnere gelangte, zeichnete sich ein deutlicher Wirksamkeitsunterschied ab. Der Wasser-Sprühstrahl erfuhr eine Steigerung seiner Kühlkapazität auf 313 K/l und der Netzwasser (X)-Sprühstrahl sogar eine Steigerung auf 365 K/l. Damit war Netzwasser im Sprühstrahl unter Versuchsbedingungen 15 % effizienter als Wasser. Mit angepasstem Löscharabstand führten letztlich auch die Sprühstrahl-Löschversuche zur vollständigen Löschung des Feuers. Unabhängig des

Löschabstandes war der Netzwasser (X)-Vollstrahl (275 K/l) 25 % effizienter als der Wasser-Vollstrahl (208 K/l). Die soeben beschriebene Abhängigkeit der Effizienz von Strahlform und Löschabstand wird durch die in Abbildung 36 gezeigten Kühlkapazitäten von Netzwasser (Y) bestätigt.

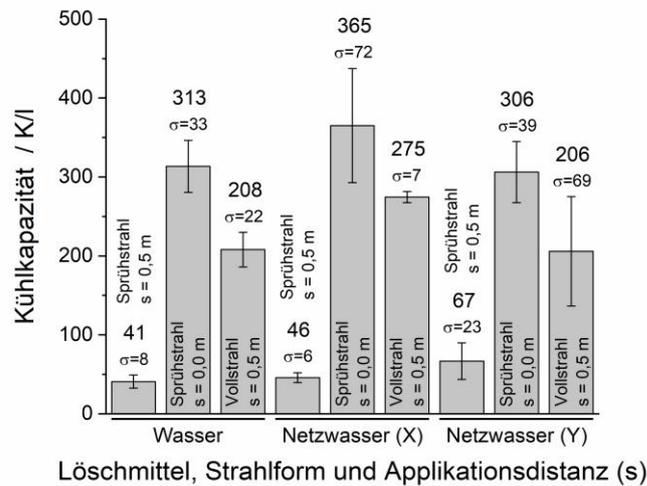


Abbildung 36: Kühlkapazitäten von Wasser und Netzwasser in Abhängigkeit der Strahlform und der Applikationsdistanz

Ein weiterer Bestandteil dieser Versuchsreihe war die Ermittlung der Kühlkapazitäten der jeweils im Vollstrahl ausgebrachten Löschmittel Wasser, Netzwasser, NAF und CAF in Abhängigkeit des Schaummittels, der Verschäumungszahl und Zumischrate. Die Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 37 dargestellt.

Die Zahlenwerte resultieren wieder aus den Steigungen der linearen Anpassungen der erfassten Krippentemperaturkurven während des systematischen Löschvorganges. Bis auf die Lösversuche mit trockenem CAF (X) ($r = -0,87$) liegen die Korrelationskoeffizienten alle im Bereich von $r < -0,95$.

Wasser war zur Bekämpfung der Versuchsbrandlast ein angemessenes Löschmittel, stellte sich aber im Vergleich zu anderen Löschmedien als nicht sehr effizient heraus, wie aus Abbildung 37 hervorgeht. Unter Zugabe geringer Anteile Schaummittel ließ sich die Effizienz von Wasser spürbar steigern. Schon 0,5 % des Schaummittels X genügte, um die Kühlkapazität des Wassers um 25 % anzuheben. Auch die Zugabe von 0,5 % des Schaummittels Y hob bei einzelnen Versuchen die Kühlkapazität um den gleichen Wert an. Der dargestellte Mittelwert fällt jedoch aufgrund der hohen Standardabweichung der Einzelversuche wesentlich geringer aus.

Die Kühlkapazität der Luftschäume NAF (X) und NAF (Y) war ebenfalls relativ niedrig, was, wie eingangs des Kapitels erläutert, der Kombination einer hohen Haftfähigkeit, geringer kinetischer Austrittsenergie und enger Krippenkanäle geschuldet war [8].

CAF (X) und CAF (Y) wurden jeweils unter vier unterschiedlichen Aspekten getestet. Beide Druckluftschäume wurden einmal als trockener CAF (VZ \approx 11 - 14), einmal als herkömmlicher CAF (VZ \approx 8 - 9), einmal als nasser CAF (VZ \approx 5) und einmal als CAF mit erhöhter Zumischrate, also einer 1,0%igen anstelle einer 0,5%igen Zumischung untersucht. Die Variation der VZ wurde durch manuelles Einstellen der Druckluftzufuhr zur Mischkammer erreicht. Für einen CAF der VZ \approx 8 - 9 kann in diesem Fall die Bezeichnung *herkömmlich* vergeben werden, da die auch in anderen Untersuchungen getesteten Druckluftschäume für gewöhnlich dieser Verschäumungszahl entsprechen [29,34,39]. Unter den zugrundeliegenden Versuchsbedingungen wurden die maximalen Kühlkapazitäten von 299 K/l (CAF (X)) und 331 K/l (CAF (Y)) von nassen bzw. herkömmlichen Druckluftschläumen erreicht. Mit diesen Werten versprechen sie eine um 1/3 bessere Kühlkapazität als reines Wasser. Die großen Vorteile der nassen und herkömmlichen Druckluftschäume gegenüber den trockenen Druckluftschläumen liegen in ihrem höheren kühlfähigen Wasseranteil und in ihrer geringen Fließspannung, die es ihnen ermöglicht, sich einfacher auf der Brandstoffoberfläche auszubreiten als höher expandierte Schäume [29].

Die trockenen Druckluftschäume erzielten in dieser Versuchsreihe die niedrigsten Kühlkapazitäten. CAF (X) wurde im ersten Durchgang mit einer Verschäumungszahl von VZ \approx 14 getestet, um Parallelen zu den drei Versuchen mit CAF (Y), welche mit der gleichen Verschäumungszahl stattfanden, zu schaffen. Das Feuer konnte so jedoch nicht unter Kontrolle gebracht werden, weshalb für die beiden CAF (X) Folgeversuche eine Verschäumung von VZ \approx 11 angesetzt wurde. Dennoch war der Flüssigkeitsvolumenstrom von $\dot{V} = 1,07 \pm 0,03 \text{ l/min}$ zu niedrig, um eine effiziente Kühlung der Krippenkern-temperatur zu erreichen. Zusätzlich fachte der Luftanteil im Löschstrahl Glutnester im Auftreffbereich der Krippe an. Nach Beendigung des Löschvorganges erfuhr jede der mit trockenem CAF gelöschten Krippen einen stetigen Temperaturanstieg. Rückzündungen während der Beobachtungsphase waren jedoch nur in den CAF (Y) Versuchen zu verzeichnen, was in erster Linie auf die höhere Verschäumungszahl und somit auf den geringeren Wasseranteil zurückzuführen ist.

Die Verdopplung der Zumischrate auf 1,0 % bewirkte beim Schaummittel X eine höhere Kühlkapazität, welche 39 K/l über der Kühlkapazität des 0,5%igen Schaumes mit vergleichbarer Verschäumungszahl lag.

CAF (Y) verhielt sich bei der Erhöhung der Zumischrate gegenteilig. Die 1,0%igen CAF (Y)-Einzelversuche erfuhren eine größere Streuung der Löschergebnisse und die mittlere Kühlkapazität lag 68 K/l unter der des vergleichbaren 0,5%igen Schaumes.

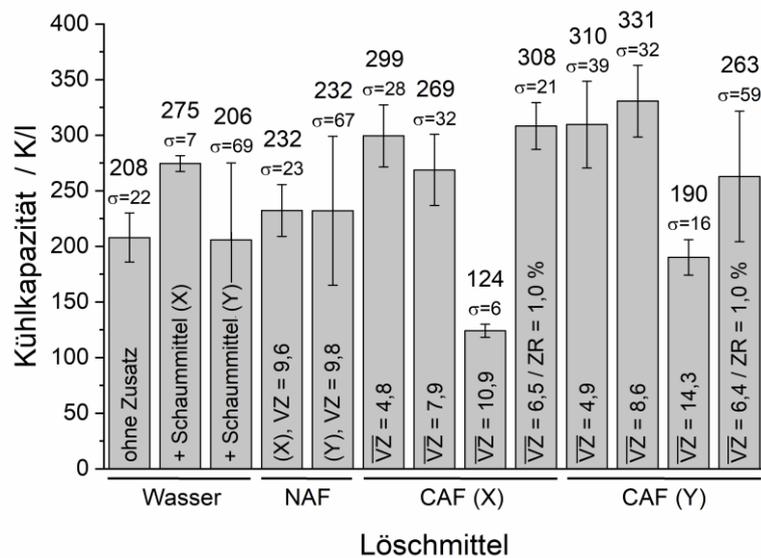


Abbildung 37: Kühlkapazitäten unterschiedlicher Löschmedien im Vollstrahl während des systematischen Löschvorganges

Mit dem Auswiegen der Krippenabbrand- und der Löschmittelapplikationsrate entstanden zusätzliche Daten, die weitere Einblicke in die Effizienzunterschiede der Löschmittel geben. Dazu muss die Massenänderung der Krippe im fortgeschrittenen Brandstadium beobachtet werden. Die Abbrandrate der Holzkrippe in der Vollbrandphase betrug durchschnittlich $\overline{m_{vb}} = -0,0316 \text{ kg/s}$ und kann in einem Diagramm in diesem Zeitraum als monoton fallende Gerade dargestellt werden. Mit einsetzenden Löschmaßnahmen addierte sich zum konstanten Massenverlust der Krippe ein kontinuierlicher Löschmittelvolumenstrom hinzu, welcher in Abhängigkeit des Löschmittels mit $\dot{V} = +0,0168 \text{ kg/s}$ (CAF, trocken) bis $\dot{V} = +0,0258 \text{ kg/s}$ (CAF, nass) dem Massenverlust auf der Waage entgegenwirkte. Durch Erwärmen und Verdampfen des aufgebrauchten Wassers wurde dem Feuer so viel Energie entzogen, dass die Abbrandrate der Krippe geringer wurde und letztlich den Wert Null annahm. In der Löschphase, in der die Einflüsse *Massenabbrand*, *Löschmittelauftrag* und *Löschmittelverdampfung* gleichzeitig wirkten, geht die monoton fallende Abbrandkurve allmählich in die Form einer Parabel über. Der Scheitelpunkt der Parabel markiert den Zeitpunkt, in dem erstmalig die hinzukommende Masse des aufgebrauchten Löschmittels gleich der abgehenden Masse durch Abbrand und Verdampfung ist. Die Position des Scheitelpunktes auf der x-Achse des Diagrammes bildet also ein Maß für die Effizienz des Löschmittels bei der Brandbekämpfung, wobei ein zeitig eintretender Scheitelpunkt eine hohe Effizienz bedeutet.

Im Folgenden wird die zuvor beschriebene Methodik auf die Waagedaten der Löschversuche mit verschiedenen Löschmedien angewandt. Die ermittelten Zeiten des Auftretens des Gleichgewichtes zwischen auftreffenden und abgehenden Massenströmen werden in Abbildung 38 gezeigt. Je früher dieser Zustand auftritt, desto höher ist die

Energie, die dem Feuer durch das Löschmittel entzogen wird. Die Daten bestätigen weitestgehend die in Abbildung 34 gezeigte Tendenz der Löschmittelwirksamkeit und die in Abbildung 37 aufgezeigten Kühlkapazitäten.

Demnach entzog Netzwasser beider Schaummitteltypen dem Feuer mehr Energie als reines Wasser. Diese Effektivitätssteigerung ist der geringeren Oberflächenspannung des Netzwassers, welche das Eindringverhalten in das Brandgut erhöht und den Anteil ungenutzt abfließenden Löschwassers minimiert, zuzuschreiben.

Die zu Beginn des Abschnittes 3.5 erläuterten Einsatzgrenzen des Löschmittels NAF spiegeln sich auch in den Waagedaten wider. NAF erreichte in Einzelversuchen zwar bessere Werte als Wasser und Netzwasser, war im Mittel aber nicht besser als die unverschäumten Löschmedien.

Gemäß der Waagedaten zeigt CAF mit geringer Verschäumung die höchste Wirksamkeit in dieser Versuchsreihe. Er erreichte schon nach 35 s (CAF (X)) bzw. nach 39 s (CAF (Y)) das Massenstromgleichgewicht. Kurz dahinter lagen die Druckluftschäume mit herkömmlicher Verschäumungszahl: 39 s (CAF (X)) bzw. 42 s (CAF (Y)). Die trockenen Druckluftschäume schnitten hier aufgrund ihres geringen Wasseranteils besonders schlecht ab. Ein klarer Effizienzunterschied zwischen 0,5%igem CAF und 1,0%igem CAF kann anhand dieser Methodik nicht ausgemacht werden.

Die Analyse der Massenstromgleichgewichte ergibt eine ähnliche Wirksamkeitstendenz wie die Analyse der Kühlkapazitäten. Geringe quantitative Abweichungen im Vergleich der Schaummittelwirksamkeit resultieren aus den jeweiligen Schwächen der Analysemethoden. So kann es vorkommen, dass bei der Ermittlung der Kühlkapazität die Thermoelemente unterschiedlich beaufschlagt wurden oder dass beim Auswiegen des Löschvorganges Ungenauigkeiten durch die manuelle Applikation auftraten.

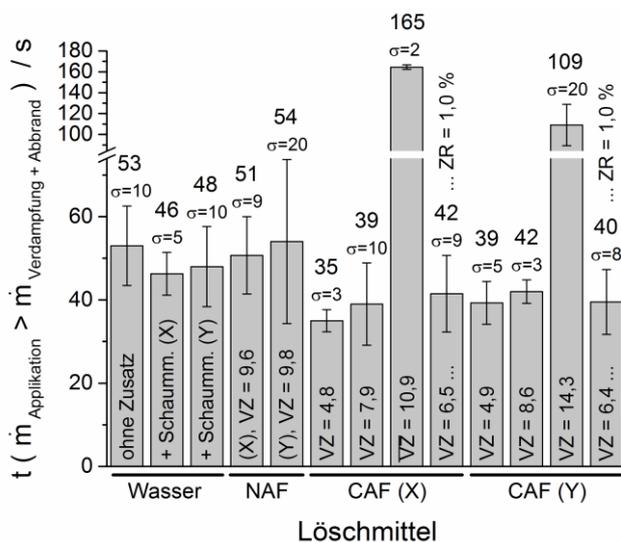


Abbildung 38: Zeitpunkte des Gleichgewichtes zwischen aufkommenden und abgehenden Massenströmen als Maß für die Eindämmung der Brandenergie bei Löschversuchen mit verschiedenen Löschmedien

Fazit aus den Indoor-Holzrippenbrandversuchen

Die Strahlformuntersuchung dieser Versuchsreihe bestätigt die Literaturangaben [43,67,71] zu den Auswirkungen der Tropfengröße auf den Löscherfolg. So zeigt sie, dass kleinere Wassertropfen einen größeren Wärmeübergang von der Flamme zum Löschmittel ermöglichen, wodurch die Verdampfungsrate des Löschmittels angehoben wird. Das im Vergleich zu einem Vollstrahl geringe Austrittsmoment des Sprühstrahls wirkt sich negativ auf seine Wurfweite und seine Fähigkeit, bis zum Brandherd durchzudringen bzw. Oberflächen aufzubrechen, um Glutnester zu kühlen, aus. Damit die maximale Effizienz des Sprühstrahls zielführend genutzt werden kann, muss also die Applikationsdistanz reduziert werden.

Beide getesteten Schaummittel bewirkten eine Steigerung der Kühlkapazität von Wasser. Wie die Ergebnisse der Benetzungstests (Abschnitt 3.1) vermuten ließen, erzielten mit Schaummittel Y versehene Löschmittel durchschnittlich bessere Löscherfolge. Die Kühlkapazität eines mit 0,5 % Schaummittel versehenen Vollstrahls lag bis zu 25 % über der Kühlkapazität eines reinen Wasservollstrahls. Eine weitere Aufbereitung dieses Premixes zum CAF bewirkte eine im Mittel 37 % bessere Kühlkapazität als Wasser. CAF zeigte dank seiner Vorteile *hohe kinetische Energie, große Wurfweite* und *Kombination von Löscheffekten* im Vergleich zu den anderen getesteten Löschmedien kürzere Löscheziten, niedrigere Krippenkerntemperaturen und höhere Kühlkapazitäten. Zudem fiel beim Einsatz von CAF weniger kontaminiertes Löschwasser an, sodass geringere Folgeschäden an Infrastruktur und Umwelt zu erwarten sind. Von der Anwendung trockener Druckluftschäume zur Bekämpfung von Klasse A-Bränden wird dringend abgeraten, da ein hoher Luft- und ein geringer Wasseranteil im Schaum die Löschung von Feststoffbränden erheblich verzögern.

Eine höhere Zumischrate von 1,0 % rief unter Versuchsbedingungen keine deutliche Effizienzsteigerung des CAF hervor. So wurden die wesentlichen leistungsbestimmenden Kriterien *Verschäumungszahl, Löschezit* und *Kühlkapazität* durch die Verdopplung der üblichen Zumischrate nur in Einzelfällen positiv beeinflusst. Von einer Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses kann in diesem Fall nicht gesprochen werden [8].

3.6 Outdoor-Heizöllachenbrandversuche

Mit den Outdoor-Heizöllachenbränden wurde die Wirksamkeit der bereits mehrfach bei Feststoffbränden getesteten Druckluftschäume (Abschnitt 3.3 bis 3.5) auch bei der Flüssigkeitsbrandbekämpfung untersucht. Die Löschmittelapplikation variierte dabei in den Parametern *Schaummittel, Zumischrate* und *Methodik*. Aus den erfassten Lösch- und Rückbrandzeiten wurde in der anschließenden Analyse ein Ranking der effizientesten Löschkonstellationen erstellt.

Die Temperaturverläufe des Thermoelements T01, welches sich mittig der Brandlache und 0,10 m über dem Flüssigkeitsspiegel befand, sind in Abbildung 39 dargestellt. Während des Löschangriffes bildete sich eine Schaumdecke auf der brennbaren Flüssigkeit aus und dämmte die Flammenbildung nach und nach ein, wodurch sich die Temperatur am Thermoelement senkte. Die so erfassten Temperaturkurven erlauben Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der angewandten Löschvorgänge. In erster Linie sind in Abbildung 39 die Löschvorgänge mit direkter Applikation der Löschmittel CAF (X) und CAF (Y) mit jeweils 0,5%iger und 1,0%iger Zumischrate gezeigt. Demnach weist CAF schaummittelunabhängig bei 1,0%iger Zumischrate eine bessere Temperatursenkung auf. Während der Unterschied bei CAF (X) nicht ganz so deutlich ausfällt, beginnt der 1,0%ige CAF (Y) schon nach ca. 30 s des Löschvorganges, sich klar vom 0,5%igen CAF (Y) abzusetzen.

Zudem ist in Abbildung 39 der Temperaturverlauf des Versuches Nr. 6, in welchem unter sonst identischen Rahmenbedingungen eine indirekte Applikation des Löschmittels angewandt wurde, zu sehen. Dabei wurde die Angriffsrichtung beibehalten, der Löschanstand aber soweit verringert, dass das Löschmittel mittig auf das rückseitig angebrachte Prallblech traf und von dort aus auf die brennende Flüssigkeit ablief. Im Versuch 6 war bis zum Aufbrauchen des gesamten zur Verfügung stehenden Löschmittelvolumens kein Löscherfolg zu verzeichnen. Ein Grund dafür waren mäßige Windböen, welche Verwirbelungen am Versuchsstand verursachten und den Löschangriff zu großen Teilen unter Gegenwind stattfinden ließen.

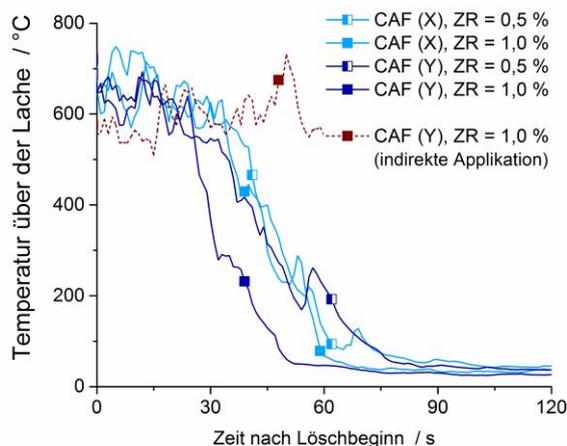


Abbildung 39: Temperaturen über der Lache während der Löschvorgänge mit unterschiedlichen Zumischraten

Versuch Nr. 7 (nicht im Diagramm abgebildet) fand ebenfalls unter indirekter Aufbringung statt. Allerdings wurde der Angriffswinkel so verändert, dass der Löschangriff mit dem Wind erfolgt. Der Löschrstrahl traf dabei nicht mehr im rechten Winkel, sondern in einem Winkel von 55 bis 60 ° auf das Prallblech. In diesem Fall wurde nach 107 s eine 99%ige Brandkontrolle erreicht. Im Vergleich zur Löschanzeit des Referenzversuches mit ähnlicher

Verschäumungszahl, aber direkter Applikation, entspricht dieser Zeitwert einer Hinauszögerung des Löscherfolges von 50 s.

Das schlechte Abschneiden der für gewöhnlich empfohlenen sanften Aufbringung des Löschschaumes durch die indirekte Applikation [50] liegt im ungleichen Verhältnis zwischen Brandleistung und Applikationsrate begründet. Die nach Gleichung (6) und mit der spezifischen Abbrandrate von $\dot{m}'' = 0,035 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ [75] berechnete Wärmefreisetzungsrate des Heizöl-Lachenbrandes betrug $\dot{Q} = 4,72 \text{ MW}$. Der aus diesem Wert und der Durchflussrate des Versuchslöschgerätes ($\dot{V} = 9,80 \pm 0,80 \text{ l}/\text{min}$) ermittelte, spezifische Flüssigkeitsvolumenstrom dieser Versuchsreihe lag damit bei $\dot{v} = 2,07 \pm 0,17 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{MW})$. Es floss also so wenig Löschmittel, dass der größte Nachteil der direkten Applikation (ein Aufbrechen der Schaumschicht) nahezu ausblieb. Dahingegen verdampfte ein Großteil des Löschmittels bei der indirekten Applikation auf seinem Weg durch die ungleich größere Flammenfront und an dem heißen Prallblech, bevor es auf die brennende Flüssigkeitsoberfläche auffließen konnte.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= A \cdot \dot{m}'' \cdot \chi \cdot H_i \\ \dot{Q} &= 4,52 \text{ m}^2 \cdot 0,035 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s} \cdot 0,7 \cdot 42,6 \text{ MJ}/\text{kg} \\ \underline{\underline{\dot{Q} &= 4,72 \text{ MW}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Die Löschung von Flüssigkeitsbränden in kreisförmigen Wannen bringt beim Erreichen einer fast vollständigen Brandunterdrückung oftmals eine erhebliche Verzögerung durch letzte Flammenercheinungen am Wannenrand mit sich. Aus diesem Grund wurde bei der Messung der Löschzeit dieses Phänomen nicht berücksichtigt und der Zeitpunkt einer 99%igen Brandkontrolle als wahre Löschzeit angenommen. Bei der Bestimmung der Rückbrandzeit hat es sich als praktikabel erwiesen, die Zeit zu messen, bis der Rückbrand 25 % der ursprünglichen Brandfläche eingenommen hat [49].

Die Lösch- und Rückbrandzeiten der Versuchsnummern 1 bis 5 sowie das Ergebnis einer Berechnung aus diesen beiden Werten zur Ermittlung der Löscheffizienz sind als Säulendiagramm in der Abbildung 40 dargestellt. Dabei wurden der kürzesten erfassten Löschzeit und der längsten gemessenen Rückbrandzeit jeweils ein Effizienzwert von 100 % zugeordnet. Die Effizienzwerte aller anderen Lösch- und Rückbrandzeiten wurden anhand dieser Werte über den Dreisatz bestimmt. Die in Abbildung 40 rot dargestellte Gesamteffizienz des Löschvorganges bildet sich aus dem Mittelwert der jeweiligen Effizienzen von Lösch- und der Rückbrandzeit.

Unabhängig vom verwendeten Schaummittel zeigt Abbildung 40 für die Druckluftschäume mit 1,0%iger Zumischrate bessere Ergebnisse. Während sich beim Schaummittel Y die Löschzeiten bei einer Anhebung der Zumischrate kaum veränderten, stieg die

Rückbrandzeit der Schaumdecke bei einer erneuten Brandeinwirkung um 1/3 im Vergleich zu den Schäumen mit 0,5%iger Zumischrate an. Unter Verwendung des Schaummittels X steigerte die höhere Zumischrate die Rückbrandzeit ebenfalls um 1/3 und kürzte darüber hinaus die Löschzeit um 30 % ein.

Ein Vergleich der Säulen 3 und 4 zeigt, dass eine niedrige Verschäumungszahl die Löschzeit aber auch die Rückbrandzeit anhebt. Vergleichbare Löschbedingungen unter den beiden angewandten Schaummitteltypen finden sich in den Säulen 2 und 5. Stehen sich diese beiden Säulen gegenüber, so ist festzustellen, dass Schaummittel Y unter den Versuchsbedingungen eine höhere Löscheffizienz aufweist.

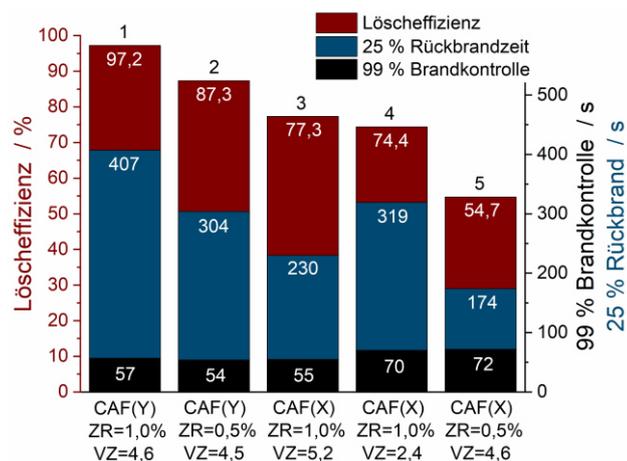


Abbildung 40: Berechnung der Löscheffizienz anhand der charakteristischen Zeiten der 99 % Kontrolle und des 25 % Rückbrandes

Fazit aus den Outdoor-Heizöllachenbrandversuchen

Unter den getesteten Bedingungen zeigte die direkte Löschmittelapplikation bessere Werte als die indirekte Löschmittelapplikation, da sich der geringe spezifische Flüssigkeitsvolumenstrom von $\dot{v} = 2,07 \pm 0,17 \text{ l/min} \cdot \text{MW}$ bei der direkten Aufbringung kaum auf die geschlossene Schaumdecke auswirkte. Dahingegen verdampfte das Löschmittel bei der indirekten Aufbringung zu großen Teilen, bevor es sich über der brennenden Lache ausbreiten konnte.

Eine Zumischrate von 1,0 % bei der Bekämpfung von unpolaren Flüssigkeitsbränden übersteigt zwar die Herstellerangaben der beiden getesteten Schaummittel, wirkte sich jedoch in beiden Fällen positiv auf die Rückbrandzeit der Schaumdecke aus.

Ein Vergleichsversuch mit taktischer Strahlrohrführung (Versuch Nr. 8) erreichte eine 99%ige Brandkontrolle in der Hälfte der Zeit, die die statischen Löschversuche benötigten. Damit unterstrich dieser Versuch die große Bedeutung des situationsangepassten Löschens.

3.7 Indoor-Heptanlachenbrandversuche

In Anlehnung an die Outdoor-Heizöllachenbrandversuche wurde mit dieser Versuchsreihe zunächst die Auswirkung einer Verdopplung der Zumischrate von 0,5 auf 1,0 % auf den Löscherfolg untersucht. Dazu wurde auf die Daten eines Thermoelementes zurückgegriffen, welches sich in einer Höhe von $h = 0,40 \text{ m}$ über dem Flüssigkeitsspiegel und in einem Abstand von $s = 0,05 \text{ m}$ zum Prallblech befand. Mit Hilfe dieses Thermoelementes wurde die Temperatur der über dem Flüssigkeitsspiegel befindlichen Gasschicht gemessen, welche sich in Abhängigkeit der Löschmittelwirksamkeit während des Löschvorganges absenkte. Sämtliche Löschvorgänge dieser Versuchsreihe fanden unter Anwendung der indirekten Applikation statt, da Vorversuche mit direkter Applikation eine problematische Schaumbewegung auf der Flüssigkeitsoberfläche aufwiesen, wodurch wiederholt keine 100 % Brandkontrolle erreicht wurde.

Die Temperaturverläufe während der Löschvorgänge mit CAF (X) und CAF (Y) bei jeweils 0,5%iger und 1,0%iger Zumischrate sind in Abbildung 41 dargestellt. Ähnlich wie bei den Outdoor-Löschversuchen zeigte CAF (Y) auch hier eine etwas bessere Löschwirkung. CAF (X) mit hoher Zumischrate erzielte von Beginn an eine deutliche Temperatursenkung und bewegte sich damit in den Bereichen beider CAF (Y)-Löschversuche. Die Temperaturkurve von CAF (X) mit einer Zumischrate von 0,5 % erfährt zu Beginn lediglich eine leichte Temperatursenkung, bevor sie 20 s nach Löschbeginn rapide abfällt und am Ende des Löschvorganges das niedrigste Temperaturlevel einnimmt. Ihre Temperatursenkung zwischen der 20. und 35. Sekunde beträgt durchschnittlich 46 K/s und ist damit mehr als doppelt so stark wie die Temperatursenkungen der anderen drei Kurven, welche in dieser Zeit alle einen durchschnittlichen Wert von 19 bis 21 K/s annehmen.

Eine Videoanalyse erklärt das Temperaturverhalten dieser vier Löschversuche. Sobald der Schaum auf das Prallblech traf und von dort aus ablief, schob sich in der Brandwanne, vom hinteren Wannrand ausgehend, ein Schaumteppich über die Heptanlache. Dieser Vorgang dauerte ca. 5 s an und ist in Abbildung 41 deutlich am steil abfallenden Kurvenverlauf zu Beginn der Löschvorgänge zu erkennen. Der so erzeugte Schaumteppich dämmte die Intensität der Flammen ein, war jedoch nicht stark genug, um sie sofort zu ersticken. Alles weitere vom Prallblech abfließende Löschmittel lief auf den schon bestehenden Schaumteppich auf und verstärkte ihn, bis er letztlich in der Lage war, die Heptanlache und die aus ihr austretenden brennbaren Dämpfe gasdicht abzudecken. Mit einer Verschäumungszahl von 7,8 ist der 0,5%ige CAF (X) der am niedrigsten expandierte Schaum dieser Vergleichsreihe. In der Videoaufnahme ist zu erkennen, dass sich die Schaumdecke bei Löschbeginn zwar genauso schnell auf die Lache schob, aber über einen längeren Zeitraum ein instabiles und wässriges Verhalten zeigte. Erst ab der 20. Sekunde deckte der Schaumteppich den Brand wirksam ab.

Die zugehörigen Schaumqualitäten zu den in Abbildung 41 gezeigten Löschvorgängen sind in Abbildung 42 veranschaulicht. In der ersten Bildspalte ist die vergleichsweise wenig verschäumte Schaumstruktur des 0,5%igen CAF (X)-Versuches zu sehen. Speziell am senkrechten Wannenrand fällt auf, dass die Versuche in den Bildstreifen 2 bis 4 (von links) einen sichtbar voluminöseren Schaum vorwiesen. Die vierte Bildspalte zeigt den 1,0%igen CAF (Y)-Versuch, welcher bei allen drei Durchgängen auch nach Ablauf der normierten Löschzeit mit schwierig zu löschenden Flammerscheinungen am vorderen Wannenrand zu kämpfen hatte.

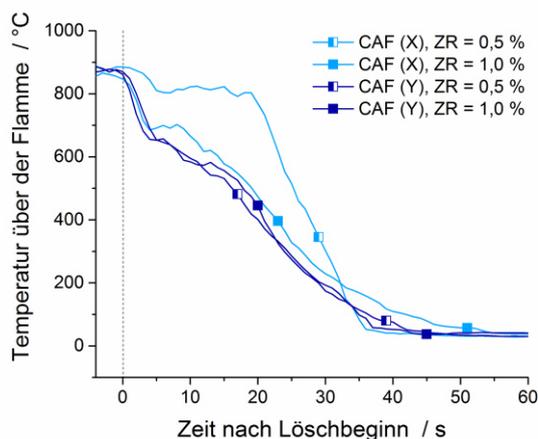


Abbildung 41: Temperatur über der Flamme während der Löschvorgänge mit unterschiedlichen Zumischraten

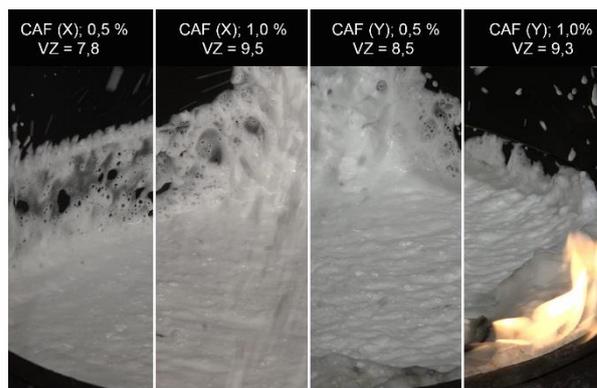


Abbildung 42: Schaumqualitäten während der Löschvorgänge mit unterschiedlichen Zumischraten

Aufgrund der Überschreitung der normierten Löschzeit konnten für die 1,0%igen CAF (Y) Lösversuche keine vergleichbaren Rückbrandtests durchgeführt werden. Die Rückbrandtests für CAF (X) ergaben für Schäume mit einer Zumischrate von 1,0 % eine durchschnittlich 40 s längere Rückbrandzeit als für Schäume mit einer Zumischrate von 0,5 %.

Genau wie bei den Holzkrippenbrandversuchen wurden auch im Rahmen der Heptanlachenbrandversuche die Auswirkungen der Verschäumungszahl auf den Löscherfolg untersucht. In den Fokus der Untersuchungen rückten die Bereiche $VZ = 4 - 5$ (CAF-nass), $VZ = 7 - 9$ (CAF-medium) und $VZ = 10 - 13$ (CAF-trocken). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Veränderung der Verschäumungszahlen in diesen Bereichen auf die Zeitdauer bis zum Erreichen der 99%igen Brandkontrolle unter Verwendung des Schaummittels X nur einen geringen Einfluss hat. Die mittleren Löschzeiten von CAF (X) lagen mit 36,6 bis 38,3 s alle in einem knappen Zeitfenster von weniger als 2 s. In der Reihe der CAF (Y)-Versuche liegt CAF-nass mit 37,3 s zwischen CAF-medium (33,8 s) und CAF-trocken (39,3 s).

Wie aus Abbildung 43 für CAF (X) und Abbildung 44 für CAF (Y) hervorgeht, haben die Verschäumungszahlen mehr Einfluss auf die Rückzünd- und Rückbrandzeit von CAF als

auf dessen Löschzeiten. Diese Abbildungen zeigen die Massenänderung in der Brandwanne über die Dauer des Rückbrandtests ab dem Einstellen des Rückbrandgefäßes zum Zeitpunkt 0 s. Dem Rückbrandtest ging immer ein exakt 90-sekündiger Löschvorgang voraus. Das Rückbrandgefäß war in jedem Fall mit der gleichen Menge n-Heptan befüllt und wurde immer zum gleichen Zeitpunkt entzündet, sodass die Masse des Rückbrandgefäßes beim Einstellen in die Schaumdecke stets die gleiche war. Vor diesem Hintergrund ist der Massenunterschied zwischen dem während des Löschvorganges aufgetragenen CAF-nass, CAF-medium und CAF-trocken deutlich zu erkennen. Der Massenunterschied wurde durch die unterschiedlichen Anteile von Wasser und Luft in den Schäumen hervorgerufen.

Nach dem Einstellen des heißen Rückbrandgefäßes in die Mitte der geschlossenen Schaumdecke begannen sich deren Schaumblasen zu erhitzen und zu verdampfen. Dieser Vorgang ist als linearer Massenabfall zu erkennen. Die Graphen verfügen in ihrem Verlauf über jeweils ein Symbol, welches den Zeitpunkt der Rückzündung der nach und nach wieder freiwerdenden Heptanlache markiert. Im Fall von CAF (X) liegen die Rückzündungszeiten in den Versuchen mit gleichen Verschäumungszahlen eng beieinander. Die Rückzündungszeitpunkte zeigen deutlich, dass nasser Schaum die geringste und trockener Schaum die höchste Rückzündzeit hat. Bei CAF (Y) liegen die Rückzündzeiten etwas weiträumiger verteilt. Dennoch ist deutlich erkennbar, dass nasser Schaum die geringste Rückzündzeit aufzeigt. Der trockene CAF (Y) hat eine durchschnittlich 6 s längere Resistenz gegen eine erneute Brandeinwirkung als CAF-medium. Aufgrund der Verteilung der einzelnen Rückzündzeiten bei trockenem CAF (Y) kann bei diesem Schaum nicht eindeutig von einer höheren Rückzündzeit gesprochen werden.

Nach der Rückzündung des n-Heptans in der Brandwanne erfolgte die weitere Zerstörung, der sogenannte Rückbrand, der schützenden Schaumdecke und somit auch die Ausdehnung des Brandes. Währenddessen fiel die von der Waage erfasste Masse der Heptan-Schaum-Schichtung immer stärker ab. Sobald die Brandausdehnung 100 % der Heptanlache einnahm, erfolgte der abschließende Löschvorgang, welcher in den Diagrammen als plötzlich einsetzender, steiler Masseanstieg erkennbar ist. Der Zeitraum der Brandausdehnung von der Rückzündung (markiert durch Symbol) bis zum vollständig ausgedehnten Brand (markiert durch plötzlichen Kurvenanstieg) variierte je nach Verschäumungszahl. Bei CAF (X) ist deutlich erkennbar, dass die Zerstörung der Schaumdecke am langsamsten bei nassem Schaum vonstattenging, gefolgt von CAF-trocken und letztlich CAF-medium.

Trotz der Streuung der Rückzündzeiten zeigt CAF (Y) das gleiche Verhalten bei der Brandausbreitung in Abhängigkeit zu der Verschäumungszahl.

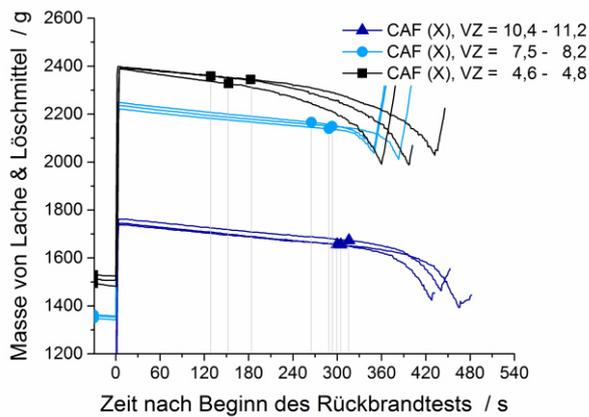


Abbildung 43: Vergleich des Rückzünd- und Rückbrandverhaltens von CAF (X) in Abhängigkeit der VZ

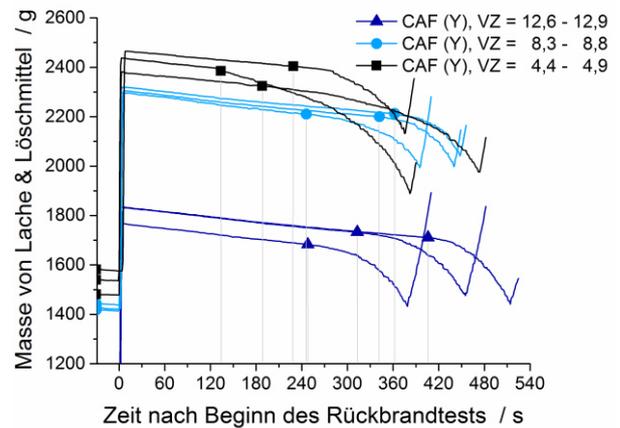


Abbildung 44: Vergleich des Rückzünd- und Rückbrandverhaltens von CAF (Y) in Abhängigkeit der VZ

Fazit aus den Indoor-Heptanlachenbrandversuchen

Die Löschversuche an Heptanlachenbränden zeigen, dass eine Erhöhung der Schaummittelzumischrate von 0,5 auf 1,0 % unter den Versuchsbedingungen keine Auswirkungen auf die Löschzeit hat. Eine Änderung der Zumischrate beeinflusste das Lösch- und Rückzünd- sowie Rückbrandverhalten des Schaumes höchstens indirekt durch eine höhere Verschäumungszahl bei gleicher Justierung der Löschanlage. Eine höhere Verschäumungszahl kann jedoch auch technisch ohne Kostenmehraufwand durch Einstellungen am Löscherät erreicht werden. Somit ist eine Erhöhung der Zumischrate für die Löschleistung beim vorliegenden Setup als wirkungsarm und unwirtschaftlich zu bewerten.

Gerade unter Verwendung des Schaummittels Y wirkte sich eine Veränderung der Verschäumungszahl im Bereich von $VZ = 4$ bis $VZ = 13$ auf die Löschzeiten der Versuchsbrandlachen aus. Der Einfluss der VZ auf die Löschzeiten von CAF (X) war vernachlässigbar. Vielmehr wirkten sich die Verschäumungszahlen aber auf die Rückzünd- und Rückbrandzeit der Schaumdecken aus. Rückbrandtests ergaben, dass nasser CAF bei direktem Kontakt mit dem heißen Rückbrandgefäß am ehesten eine Rückzündung der Lache zuließ. Die weitere Zerstörung der Schaumdecke durch die Ausbreitung der Flamme ging jedoch vergleichsweise langsam voran. Dahingegen hielt trockener CAF die Rückzündung lange zurück, zerfiel jedoch merklich schneller, sobald die Rückzündung einmal eingetreten war. CAF-medium erzielte die kürzesten Löschzeiten und darüber hinaus Rückzündzeiten, welche nah an die Bestleistungen des trockenen Schaumes herankommen. Aus diesem Grund kann der medium verschäumte Bereich bei CAF als am wirksamsten eingestuft werden. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die CAF-medium Schaumdecke unter Versuchsbedingungen am schnellsten zerfällt, sobald sie einmal beschädigt ist.

3.8 Reifenbrandversuche

Die Reifenbrandversuche dienten der Untersuchung der Löschwirksamkeit von CAF unter schwierigen Bedingungen. Sowohl die Geometrie der Brandlast als auch ihre materielle Beschaffenheit stellten hohe Ansprüche an alle Aspekte des Löschmittels. Es wurde eine starke Kühlwirkung benötigt, um die Stapeldurchschnittstemperatur von bis zu 600 °C abzusenken. Gute Fließeigenschaften waren gefordert, um versteckte Glutnester zu erreichen. Nicht zuletzt war eine gute Haftfähigkeit notwendig, um nicht von der glatten Oberfläche des Brennstoffes abzurutschen, wenn es darum ging, mit einer geschlossenen Schaumdecke die Brandlast vom Luftsauerstoff zu trennen. Darüber hinaus stellte der sich im Brandverlauf verflüssigende Kautschukanteil die Anforderung an das Löschmittel, eine Mischung aus Feststoff- und Flüssigkeitsbrand bekämpfen zu können. Mit den Reifenbrandversuchen wurde im Realmaßstab unter Verwendung von feuerwehrtechnischem Equipment getestet, inwiefern das Löschmittel CAF in Abhängigkeit verschiedener Verschäumungszahlen diesen Ansprüchen gerecht wird.

Zur Gegenüberstellung der Temperaturverläufe der Brand- und Löscheversuche mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen wurde aus allen im Reifenstapel installierten Thermoelementen (siehe Abbildung 13) für jeden Versuch eine Durchschnittstemperatur im Reifenstapel gebildet. Diese Durchschnittstemperaturen während der Brand-, Lösche- und Beobachtungsphase sind in Abbildung 45 veranschaulicht. Zudem gibt die Grafik die Rückzündungszeitpunkte der einzelnen Versuche an. Die messtechnische Erfassung von vergleichbaren Temperaturdaten erwies sich durch die zunehmende Instabilität des Reifenstapels im Brandverlauf als schwierig. Schon in der Vorbrennphase sackte der Reifenstapel zusammen und schloss die Messspitzen vereinzelter Thermoelemente ein. So sind im nachstehenden Temperaturdiagramm nicht alle Rückzündungen in der Beobachtungsphase als solche zu erkennen. Auf der anderen Seite resultierten auch die hohen Temperaturen nach dem Löschevorgang der Versuche 01 und 05 aus Messungen der abgeschirmten Thermoelemente, welche sich in diesen Fällen in der Nähe von schwer erreichbaren Glutnestern befanden.

In den einzelnen Versuchen nahmen die Stapeltemperaturen während der Vorbrennphase aufgrund des Windeinflusses und des ungleichmäßigen Zusammensackens der Reifen unterschiedliche Verläufe an. Unabhängig von der jeweiligen Verschäumungszahl erfuhren sie über die ersten 60 s des Löschevorganges eine Abkühlung von durchschnittlich 250 °C. Ihre Verläufe in der Beobachtungsphase sind in erster Linie durch die Dauer der Löschemittelapplikation und die Endlage der Thermoelemente bestimmt. Das lokale Auftreten von Rückzündungen wurde nicht immer von den installierten Thermoelementen erfasst und hatte damit eine untergeordnete Auswirkung auf den Temperaturverlauf. So

ist auf den ersten Blick keine Abgrenzung zwischen den unterschiedlichen Verschäumungszahlen auszumachen.

Bei der Betrachtung der Rückzündungshäufigkeit und der Zeitpunkte des Auftretens von Rückzündungen fällt auf, dass sowohl die Löschversuche mit geringer VZ (hell- und dunkelrote Markierungen), als auch die Löschversuche mit hoher VZ (hell- und dunkelblaue Markierungen), häufiger und zeitiger rückzündeten als die Löschversuche mit einer mittleren Verschäumung (schwarze bzw. graue Markierungen). Aus den Löschversuchen mit trockenen und nassen Schäumen resultierten jeweils fünf Rückzündungen, wovon vier innerhalb der ersten 15 Minuten nach dem Löschvorgang auftraten. Dahingegen zeigten die Löschversuche mit mittlerer VZ lediglich drei Rückzündungen hauptsächlich in der zweiten Hälfte der halbstündigen Beobachtungsphase auf.

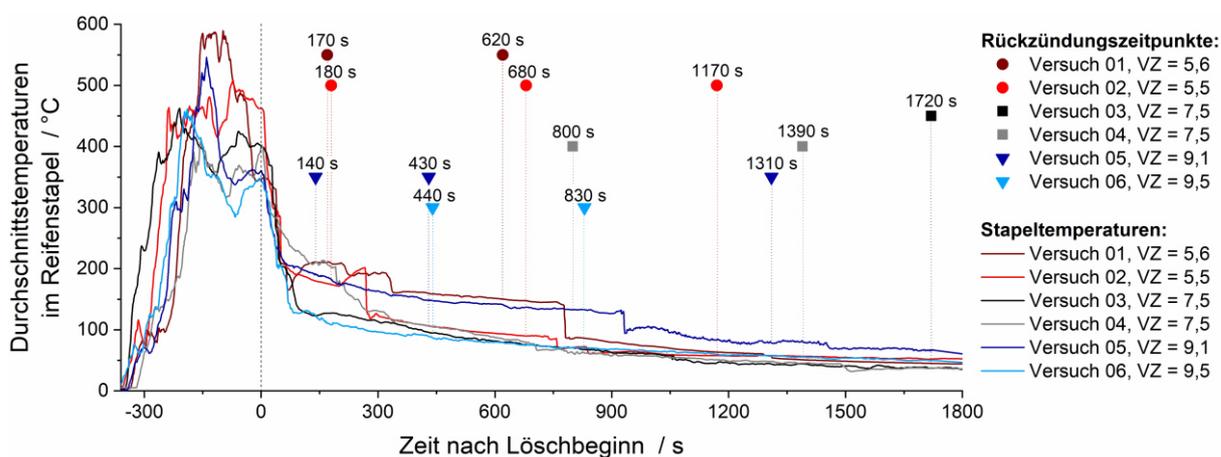


Abbildung 45: Durchschnittstemperaturen im Reifenstapel und Rückzündungszeiten der Löschversuche mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen

Nachfolgend werden die Daten der Wärmeflussaufnehmer betrachtet. Sie erfassen die Wärmestrahlung des Feuers während der Vorbrennphase und über die Dauer des Löschvorganges. Am aussagekräftigsten sind die Daten in den ersten 30 s der Löscharbeiten. In diesem Zeitraum kam es bei der Umsetzung des Löschmittels auf den heißen Oberflächen des Brandstoffes zu einer ausgeprägten Wasserdampfbildung. Der Prozess der Wasserdampfbildung entzieht dem Brand sehr viel Energie. Der Wasserdampf selbst absorbiert einen Großteil der vom Brand ausgehenden Wärmestrahlung [76]. Bedingt durch diese beiden Effekte verzeichneten die Wärmeflussaufnehmer zu Löscheintritt einen deutlichen Rückgang der Wärmestrahlung, woraus im Folgenden die Effizienz der Löschsäume abgeschätzt wird.

Die in Abbildung 46 gezeigten durchschnittlichen Rückgänge der Wärmestrahlung resultieren aus linearen Anpassungen der Wärmestrahlungsverläufe in den ersten 30 s des Löschvorganges. Eine Säule symbolisiert dabei immer den Mittelwert aus zwei

CAF-Löschversuchen mit einer vergleichbaren VZ. Aus dem Säulendiagramm geht hervor, dass CAF mit hoher und mittlerer VZ doppelt so wirksam in der Brandunterdrückung ist wie CAF mit geringer VZ. Der Unterschied des Wärmestrahlungsrückganges zwischen CAF-trocken und CAF-medium ist relativ gering und liegt im Bereich der Standardabweichung.

In Ergänzung zu den in Abbildung 46 dargestellten Wärmestromdaten zeigt Abbildung 47 Momentaufnahmen aus den, zu den entsprechenden Versuchen gehörenden, Videoaufzeichnungen. In diesem Bilderdiagramm ist die Wasserdampfbildung während des voranschreitenden Löschangriffes innerhalb der ersten 30 s der Applikation zu erkennen. Je mehr Wasserdampf gebildet wird, umso mehr Löschmittel wird umgesetzt und desto mehr Wärmeenergie wird dem Feuer entzogen. Die Voraussetzung für die Entstehung von Wasserdampf ist eine Materialtemperatur von mindestens 100 °C. In der Reihe der Löschvorgänge mit niedriger Verschäumungszahl ist die Wasserdampfbildung erst im letzten Drittel des betrachteten Zeitraumes zu sehen. Der Grund dafür ist, dass die vorherrschende Windrichtung während der Vorbrenndauer die Flammen von der Angriffsseite des Reifenstapels wegdrückte und diese Seite somit kaum am Brandprozess beteiligt war. Die Oberflächentemperatur der Reifen auf dieser Seite lag unter 100 °C, was daran zu erkennen ist, dass gleich zu Beginn des Löschangriffes der Schaum auf der Reifenoberfläche liegen blieb und sich kein Wasserdampf bildete. Erst mit einem Seitenwechsel des Angriffstrupps nach 20 s wurde der eigentliche Brandherd erreicht. Dann kam das Löschmittel in Kontakt mit den heißen Oberflächen und begann sofort zu verdampfen. Die eigentliche Eindämmung der Wärmestrahlung setzte also erst 20 s nach Löschbeginn ein. Ein ähnlicher Brand- und Löschverlauf war auch im Wiederholungsversuch mit dieser Verschäumungszahl zu beobachten. Das erklärt den in Abbildung 46 dargestellten niedrigen Rückgang der Wärmestrahlung beim Einsatz von CAF mit geringer VZ. Eine durch die niedrige Verschäumungszahl bedingte, evtl. tatsächlich geringere, Löscheffizienz des CAF kann aufgrund der vorgenannten Problematik nicht festgestellt werden.

Während der anderen beiden Versuchsdurchgänge bildeten sich schon in den ersten 10 s des Löschvorganges große Mengen Wasserdampf. Anhand der Bilder aus der 30. Sekunde der Löschvorgänge mit niedriger und mittlerer VZ ist zu erkennen, dass die Angriffsseite des Reifenstapels beim Löschangriff mit CAF-medium stärker vom Brandverlauf betroffen war. Die dadurch wesentlich heißere Reifenoberfläche ermöglicht eine zeitigere und ausgeprägtere Umsetzung des Löschmittels.

Die Bilder des CAF mit der VZ = 9,3 zeigen 20 s nach Löschbeginn noch eine erhebliche Flammenbildung, weshalb die Wirksamkeit des Löschmittels mit dieser VZ etwas geringer zu bewerten ist als die Wirksamkeit des CAF mit der VZ = 7,5. Das voluminöse

Erscheinungsbild des Wasserdampfes in der Reihe des CAF mit der $VZ = 9,3$ ist hauptsächlich durch Verwirbelungen am Versuchsstand bedingt.

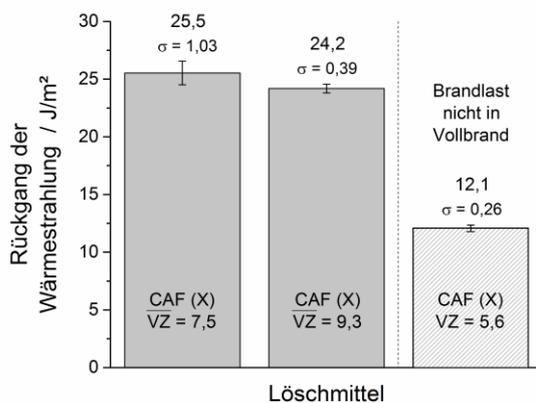


Abbildung 46: Rückgang der Wärmestrahlung während der ersten 30 s der CAF-Löschvorgänge mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen



Abbildung 47: Momentaufnahmen aus den Videoaufzeichnungen während der ersten 30 s der CAF-Löschvorgänge mit unterschiedlichen Verschäumungszahlen

Fazit aus den Reifenbrandversuchen

Die Beobachtungen während der Löschversuche lassen die Aussage zu, dass CAF im Bereich der getesteten Verschäumungszahlen von $VZ = 5 - 9$ den hohen Anforderungen der Versuchsbrandlasten gerecht wird.

Das unter thermischer Einwirkung instabile Verhalten und das nicht vorherbestimmbare Zusammensacken des Reifenstapels erschwerten die Bewertung des Brand- und Löschvorganges mittels im Stapel installierter Sensoren so sehr, dass keine vergleichbaren Daten aus diesen Messungen gewonnen werden konnten. Unter diesem Aspekt war die Anwendung von berührungsloser Messtechnik, wie zum Beispiel Wärmeflussaufnehmern, zielführend. Ihre Messungen ergaben, dass unter Versuchsbedingungen die Verschäumungszahlen $VZ \approx 7$ bzw. $VZ \approx 9$ eine hohe Effizienz bei der Brandbekämpfung vorweisen. Die Messdaten schreiben der $VZ \approx 5$ eine deutlich geringere Löscheffizienz zu. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass diese Werte unter dem Einfluss eines gehemmten Brandverlaufes stehen.

Eine Videoanalyse zeigt bei der Applikation von CAF mit der $VZ \approx 5$ nahezu keine erkennbare Wasserdampfbildung auf der Angriffsseite des Reifenstapels, was dafürspricht, dass die Temperatur des Stapels auf dieser Seite zu gering und damit nicht vergleichbar mit den anderen Löschversuchen war. Die intensivste Wasserdampfbildung war beim CAF-Löschvorgang mit der $VZ \approx 7$ schon in den ersten Sekunden der Applikation zu erkennen. Zudem zeigte dieser Löschvorgang in seinem Verlauf die geringsten Flammerscheinungen auf. Daraus kann geschlossen werden, dass die $VZ \approx 7$ die wirksamste der getesteten Verschäumungszahlen ist. Die Zählung der lokalen

Rückzündungen im Reifenstapel nach dem Löschvorgang bestätigen dieses Ergebnis. Unter Anwendung des CAF mit der $VZ \approx 7$ traten nur drei Rückzündungen auf. Im Vergleich dazu waren bei den Druckluftschäumen mit der $VZ \approx 5$ bzw. mit der $VZ \approx 9$ jeweils fünf Rückzündungen zu verzeichnen.

3.9 Transformatorenbrandversuche

Die Versuchsreihe der Transformatorenbrände bewertet neben dem Löschvermögen von CAF und NAF bei Fließbränden auch die Kombinierbarkeit von CAF und ABC-Löschpulver in Ausnahmesituationen, wie sie beispielsweise bei schlecht zugänglichen Brandherden auftreten können. Der Nachbau einer Transformatorenstation mit einer durch simulierte Trümmerteile abgeschirmten Brandlast hinter dem Transformator stellte ebendieses Szenario nach. Der Pulverlöscher kam dann zum Einsatz, wenn der Angriffstrupp den Brand mit CAF zwar eindämmen konnte, damit aber keinen Erfolg bei der Restablöschung des versteckten Brandherdes erzielte. Zwischen der CAF-Applikation und dem Aufbringen des Löschpulvers vergingen nur wenige Sekunden, weshalb im Feuerwehrjargon bei einem solchen Löschvorgang von einem *kombinierten Einsatz* der Löschmedien gesprochen wird.

Die Löschwirkung des ABC-Löschpulvers beruht auf heterogener Inhibition. Dabei geben die bei der Verbrennung freiwerdenden Radikale, die für ein Fortlaufen der Verbrennungsreaktion notwendig sind, ihre Energie an die kühlen Oberflächen der Pulverpartikel ab. Wird die Flamme von einer dichten Pulverwolke umhüllt, bringt diese, auch als *Wandeffekt* bekannte, reaktionskettenbrechende Wirkung den Verbrennungsvorgang in kurzer Zeit zum Erliegen [72].

Der kombinierte Einsatz von Löschpulvern und -schäumen ist jedoch nicht in jedem Fall bedenkenlos möglich, da handelsübliche ABC-Pulver hauptsächlich aus Ammoniumphosphat und Ammoniumsulfat bestehen und über Zusatzstoffe auf Silikonbasis verfügen, die das Pulver hydrophobieren.

Sowohl das Salzgemisch als auch die silikonhaltigen Zusatzstoffe sind für ihre schaumzerstörende Wirkung bekannt. Deshalb wird bei einer kombinierten Applikation von Schaum und Pulver zur Verwendung spezieller schaumverträglicher Löschpulver geraten. Hinzukommt die mechanische Wirkung der Pulverteilchen beim Auftreffen auf den Schaum. Auch unter Anwendung schaumverträglicher Löschpulver durchdringen sie die Schaumblasen und zerstören diese [31]. In Einsätzen, bei denen es auf eine möglichst langanhaltend geschlossene Schaumdecke ankommt (z.B. bei erhöhter Rückzündungsgefahr durch heiße Oberflächen oder Funkenflug), spielt diese Schwächung der Schaumdecke eine entscheidende Rolle.

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag in der Temperaturerfassung während der Löschvorgänge mit NAF (VZ = 8,8), CAF-nass (VZ = 5,3), CAF-trocken (VZ = 11,3) sowie während des kombinierten Einsatzes von CAF-medium (VZ = 8,5) und ABC-Pulver. Bei der Applikation von NAF, CAF-nass und CAF-trocken war kein Einsatz von Pulverlöschern vorgesehen. Diese Löschversuche zielten auf eine vollständige Löschung des Brandes mit den gegebenen Löschmitteln ab.

Die im abgeschirmten Bereich des Versuchsaufbaus (siehe Abbildung 14) aufgezeichneten Temperaturverläufe während besagter Löschvorgänge sind in Abbildung 48 wiedergegeben. Im NAF-Löschversuch kam das Feuer im hinteren Bereich der Transformatorenstation nach 73 s mit durchgängiger Applikation zum Erliegen. Beim Einsatz von CAF-nass war die Wasserdampfbildung so groß, dass durch die starke Sichtbehinderung nach 22 s keine Flamme mehr zu erkennen war. Nach einer kurzen Unterbrechung wurde der Löschvorgang fortgesetzt, da sich im hinteren Bereich des Nachbaus eine Flammenbildung abzeichnete. In diesem, wie auch im CAF-trocken Löschversuch, stellte sich dieser Bereich als schwierig zu löschen heraus. Dort kam es häufiger zu Rückzündungen.

Die erste Löscherunterbrechung im Versuch mit CAF-trocken im Zeitraum von 15 bis 32 s nach Löschbeginn war einer Störung in der Löschmittelversorgung geschuldet. Die Durchschnittstemperatur des Feuers lag zu Beginn der Unterbrechung ca. 30 % unter ihrem Ausgangswert. Im Wesentlichen kam diese Temperaturabsenkung durch das Benetzen der rechten Transformatorseite, an der die Thermoelemente zur Bestimmung der Gehäuse- und der Lachentemperatur angebracht waren, zustande. In der Zeit ohne Applikation wurde der bereits aufgebrauchte Schaum umgesetzt, was die erneute Ausbreitung des Brandes hemmte. Mit dem Wiedereinsetzen des Löschmittelstromes wurde der Brand bis zur vollständigen Niederschlagung der Flammenbildung bekämpft.

Bei der Verwendung von CAF-medium war von vornherein eine effiziente Brandunterdrückung wahrzunehmen. Bereits nach 13 s war durch die Wasserdampfbildung keine Flammenbildung mehr zu erkennen. Nach einer kurzen Pause wurden die im hinteren Bereich wieder aufkommenden Flammen durch eine 5-sekündige Applikation niedergeschlagen. Wie auch in den anderen CAF Versuchen war die Energie im abgeschirmten Bereich so hoch, dass sich die versteckte Brandlast erneut entzündete. Daraufhin wurden vier gezielte Stöße aus einem ABC-Pulverlöcher in Richtung des abgeschirmten Bereiches abgegeben, wodurch das Feuer letztlich endgültig erlosch.

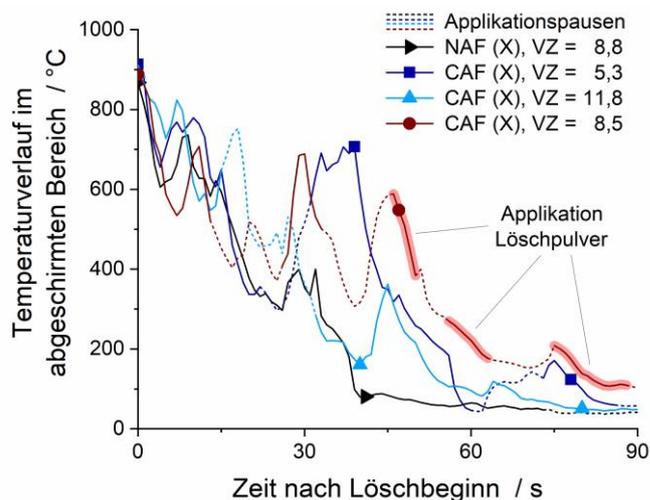


Abbildung 48: Temperaturverläufe der Versuche mit unterschiedlichen Schaumlöschmitteln

Die Auswirkung des kombinierten Löschvorganges mit CAF-medium und ABC-Pulver auf die Temperaturverläufe ist in Abbildung 49 detaillierter aufgezeigt. Die farbigen Kurven zeigen die Temperaturverläufe im abgeschirmten Bereich in drei unterschiedlichen Höhen. Alle drei Thermoelemente verzeichneten über den Zeitraum der CAF-Applikation einen deutlichen Temperaturrückgang. Die Videoanalyse zeigt kurz vor der Anwendung des Pulverlöschers eine intensive Rückzündung im Bereich der versteckten Brandlast, was auch anhand der Spitzen im Verlauf der Temperaturkurven zu erkennen ist. Der Einsatz des Löschpulvers brachte im bodennahen Bereich, in dem sich die Brandlast befand, eine Temperatursenkung auf 67 °C (Flüssigkeitsspiegel) bzw. 101 °C (Flüssigkeitsspiegel + 0,30 m) mit sich. Die durch den Konvektionsstrom bedingte hohe Temperatur im oberen Bereich der Abschirmung wurde durch den vierten Pulverstoß auf 276 °C gesenkt. Danach war der Löschangriff beendet. Es traten keine weiteren Rückzündungen auf.

Zusätzlich beinhaltet Abbildung 49 Informationen über den Temperaturverlauf im Inneren des mit Öl gefüllten Transformators. Die grauen Kurven veranschaulichen die Öltemperaturen in unterschiedlichen Tiefen. Die Öltemperatur stieg bis zum Löschbeginn und wenige Sekunden darüber hinaus an. Erst als der Lachenbrand unterdrückt und die Kühlrippen des Transformators ausreichend mit CAF benetzt waren, stellte sich ein leichter Temperaturrückgang im Transformatorenöl ein. Der Ölspiegel erfuhr eine ungleich höhere Abkühlung, da Löschmittel durch die, für die Versuche angelegten, Druckentlastungsöffnungen ins Innere des Transformators gelang und sich dort auf die Flüssigkeit legte. Je nach Einstrahlwinkel kam es auch zur vorübergehenden Vermischung der Flüssigkeiten. Der Pulverangriff übte keinen Einfluss auf die Öltemperatur aus.

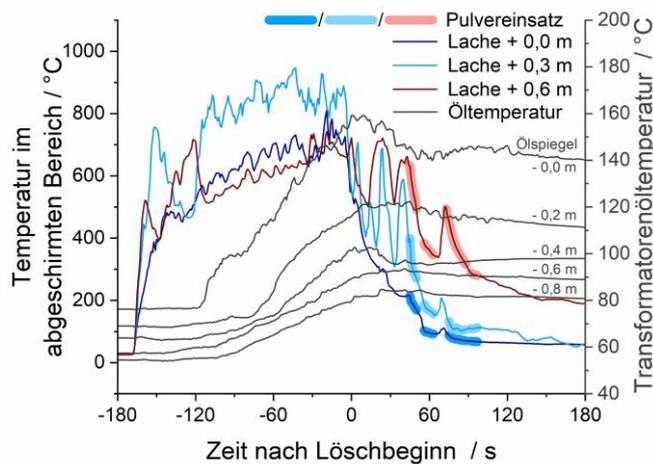


Abbildung 49: Temperaturverlauf im Transformatorenöl und im abgeschirmten Bereich während des kombinierten Löschangriffes

Parallel zu den Löschanversuchen wurden die Auswirkungen einer Pulverapplikation auf eine CAF-Schicht in einer gesonderten Stahlwanne mit den Abmessungen 500 mm x 500 mm x 60 mm (L x B x H) untersucht. Der für diese Betrachtung herangezogene Schaum wurde unter Verwendung einer Zumischrate von 0,5 % des Schaummittels Y erzeugt. Er hatte eine Verschäumungszahl von $VZ = 8,0$.

Die 5-sekündige Applikation des Löschpulvers fand direkt auf die mit CAF gefüllte Wanne in einem Auftreffwinkel von $\alpha \approx 25^\circ$ und aus einer Entfernung von $s = 3\text{ m}$ zur Schaumoberfläche statt. Dabei erfassten hochauflösende Filmaufnahmen die Struktur und die Höhe der Schaumschicht über einen Zeitraum von 15 Minuten. Momentaufnahmen dieser Aufzeichnungen veranschaulichen in Abbildung 50 die schaumzerstörende Wirkung durch mechanische und chemische Einflüsse des Löschpulvers. Es ist zu erkennen, dass die ursprünglich 6 cm hohe CAF-Schicht in den ersten 15 Sekunden des Versuches um 2 cm zusammenfiel. Der genaue Anteil der durch mechanische Einflüsse eingebüßten Schaumhöhe konnte aufgrund der starken Pulverwolkenbildung und der damit einhergehenden Sichtbehinderung nicht bestimmt werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass ein Großteil dieser Höhenabnahme durch die auf die Schaumschicht auftreffenden Pulverpartikel während der direkten Applikation hervorgerufen wurde.

Das hydrophobe Löschpulver bildete eine geschlossene Schicht auf der Schaumoberfläche und begann in der Folgezeit die Lamellen der Schaumstruktur anzugreifen. Dabei wurden die Wasser-Luft-Grenzflächen zerstört, was dazu führte, dass viele kleine Schaumblasen zu wenigen großen Schaumblasen zusammenwuchsen, bevor diese dann in sich zusammenfielen. Beim Zusammenfallen großer Blasen kam es dann zur spontanen Rissbildung in der Pulverschicht. Dieser Prozess wiederholte sich mit jeder weiteren

Schaumblase, bis sich ca. 5 Minuten nach der Pulverapplikation kleine Pulverinseln auf der Schaumschicht abzeichneten. Zwischen diesen Pulverinseln kamen unberührte Schaumstrukturen zum Vorschein. Mit dem Auftreten der Pulverinseln ging die Bildung großer Blasen zurück. Die Schaumzerstörung fand dann hauptsächlich unter den Pulverinseln und in unmittelbar angrenzenden Regionen statt. So fiel die Schaumschicht unter den chemischen Einflüssen des Löschpulvers innerhalb von 15 Minuten um weitere 3 cm in sich zusammen.



Abbildung 50: Zerstörung der CAF-Schicht bei direkter Applikation von ABC-Löschpulver

In einer Referenzwanne mit einer CAF-Füllung der gleichen Eigenschaften sank die Schaumschicht ohne Einfluss von Löschpulver innerhalb von 30 Minuten um ca. 1 cm ab. Bei visueller Betrachtung der von da an obersten Schaumschicht war bis zu einer Tiefe von ungefähr 1,5 cm ein sehr trockener und großblasiger Schaum wahrzunehmen.

Fazit aus den Transformatorenbrandversuchen

Aus den Transformatorenbrand-Löschversuchen kann geschlossen werden, dass eine Anwendung von Löschpulver den versteckten Brandherd erfolgreich bekämpfen kann, ohne die zuvor aufgebrachte Schaumschicht so sehr anzugreifen, dass eine Rückzündung der Öllache erfolgt. Eine nähere Betrachtung der Auswirkungen einer direkten Applikation herkömmlichen ABC-Löschpulvers auf eine CAF-Schicht zeigt, dass die Struktur der aufgebrachten Schaumschicht sichtlich angegriffen wird. Allein durch die mechanische Einwirkung der auf die Schaumschicht auftreffenden Pulverpartikel wurden im Versuch innerhalb von 5 Sekunden 2 cm der Schaumschicht unwiderruflich zerstört. Die Unverträglichkeit des Salzgemisches sowie die silikonbasierten Zusatzstoffe im Löschpulver sorgten innerhalb von 15 Minuten für eine Abnahme der Schichthöhe um weitere 3 cm. Unter diesen Umständen ist die Aufrechterhaltung des Trenneffektes einer im Vergleich zu NAF ohnehin schon dünnen CAF-Schicht gefährdet.

Beobachtungen im Versuchsstand zeigen, dass die windgetragenen Pulverwolken sich auch in relativ großer Entfernung zum eigentlichen Einsatzort negativ auf die

Drainagezeiten einer Schaumschicht auswirkten. So fiel die Schichthöhe einer Referenzschaumprobe innerhalb einer halben Stunde lediglich um ca. 1 cm ab. Allein in den 60 Sekunden nach einer Pulverapplikation in einer Entfernung von $s = 8,00 \text{ m}$ war dahingegen eine Abnahme der Schichthöhe um 2 cm zu verzeichnen.

Hinsichtlich der Verträglichkeit und der Tatsache, dass unter den Testbedingungen auch die versteckte Brandlast mit CAF gelöscht werden konnte, sobald ein angemessener Mehraufwand an Zeit und CAF aufgebracht wurde, ist der Nutzwert einer kombinierten Applikation von CAF und herkömmlichen ABC-Löschpulver als gering zu bewerten. Kann dennoch nicht auf den kombinierten Einsatz dieser beiden Löschmittel verzichtet werden, empfiehlt es sich, ausschließlich auf schaumverträgliches Löschpulver mit der Kennzeichnung *SV* zurückzugreifen [31].

4 Fehleranalyse

Dieses Kapitel befasst sich mit der Einschätzung der Qualität und Aussagekraft der Messdaten aus den vorangegangenen Untersuchungen. Damit bildet es die Grundlage zur Bestimmung der Gültigkeit der aus den Messdaten gezogenen Schlüsse. Denn jedes Ergebnis einer durchgeführten Messung erfährt trotz aller Sorgfalt eine Verfälschung u.a. durch die Unvollkommenheit des Messgegenstandes, der Messgeräte, der Messverfahren sowie durch Einflüsse der Umwelt und Beobachter [77]. Aufgrund dieser auf die Messungen einwirkenden Einflüsse treten Messabweichungen auf, welche es verhindern, den wahren Wert der Messgröße zu ermitteln. Gemäß [78] kann aus Messdaten lediglich der Schätzwert y für den wahren Wert der Messgröße Y sowie die Messunsicherheit $u(y)$ gewonnen werden. Deshalb ist die Angabe der Messunsicherheit unabdingbar, wenn es um die Bestimmung der Aussagekraft einer Messung geht. Diese Messunsicherheit zu untersuchen, ihre Größe und Ursachen zu bestimmen, sind Gegenstand der Fehleranalyse [79].

Zwei grundlegende Begrifflichkeiten bei der Bewertung der Qualität von Messergebnissen sind *Präzision* und *Genauigkeit*. Während die Präzision ein Maß für die Übereinstimmung mehrerer Messwerte untereinander ist, beschreibt die Genauigkeit eine Abweichung der Messwerte zum wahren Wert. Diese beiden Eigenschaften unterliegen zwei Arten von Messabweichungen: *methodische Fehler* und *zufällige Fehler*. Die methodischen Fehler beeinflussen die Genauigkeit einer Messung, wohingegen zufällige Fehler sich auf die Präzision der Messdaten auswirken [79]. Methodische und zufällige Fehler werden im Folgenden getrennt voneinander betrachtet, um deren jeweilige Tragweite zu verdeutlichen.

4.1 Methodische Fehler

Methodische Fehler verursachen eine einseitig gerichtete Abweichung eines Messwertes von seinem wahren Wert. Auch bei wiederholter Messung unter identischen Bedingungen nehmen sie einen konstanten Wert an. Folglich können methodische Fehler in der Versuchsdurchführung durch die Wiederholung einer Einzelmessung nicht erkannt werden [80].

4.1.1 Versuchsplanung und -durchführung

Wahl der Löschwasserquelle

Die große Versuchsbandbreite mit ihren unterschiedlichen Anforderungen an den Versuchsaufbau und an das Equipment erforderte stellenweise eine überregionale Versuchsdurchführung. Damit ging automatisch die Nutzung verschiedener Wasser-

quellen für die Löschversuche einher. Zur Bestimmung des Einflusses der Wasserquelle auf die Löschversuche wurden Benetzungstests mit Leitungswasserproben der Versuchsstandorte Berlin und Hamburg durchgeführt. Die Gewässer wurden mit den Schaummitteln X und Y zu 0,3%igen bzw. 0,5%igen Lösungen bei 20 °C angerührt und auf ihre Benetzungszeiten an je sechs bis acht Baumwollpads gemäß Kapitel 2.1.1 untersucht. Die Ergebnisse dieser Tests sind in Abbildung 51 veranschaulicht.

Nach Angaben der Reblu GmbH [81], als Ansprechpartner für Umweltanalysen, beträgt die Wasserhärte am Standort Berlin 17,4 °dH (= 3,1 mmol Calciumcarbonat je Liter) und am Standort Hamburg 16,6 °dH (3,0 mmol Calciumcarbonat je Liter). Messunsicherheiten und periodische Schwankungen im Härtegrad sind auch hier nicht auszuschließen. Beide Standorte verfügen demnach über hartes Leitungswasser. Dennoch wiesen die Benetzungstests mit Berliner Leitungswasser durchgängig 25 bis 40 % kürzere Benetzungszeiten auf als die Lösungen mit Hamburger Leitungswasser.

Die quantitative Gültigkeit der Daten aus der Bestimmung der Netzfähigkeit einer Wasser-Schaummittellösung auf Leitungswasserbasis ist auf Grundlage dieser Erkenntnis nur im regionalen Bereich gegeben. Dennoch ist auch überregional eine qualitative Übereinstimmung der Versuchsergebnisse zu erwarten.

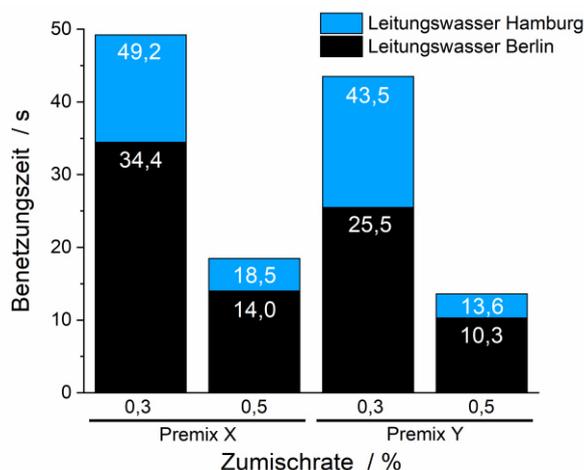


Abbildung 51: Benetzungszeiten von 0,3%igen und 0,5%igen Lösungen der Schaummittel X und Y in Abhängigkeit des verwendeten Leitungswassers bei 20 °C

Spezifischer Flüssigkeitsvolumenstrom

Kleinmaßstäbliche Brandversuche sind ein probates und unabdingbares Mittel zur Bestimmung der Effektivität eines Löschmittels. Oftmals kommen bei diesen Brandversuchen nach den Anhängen der DIN EN 3-7 [13] und DIN EN 1568-3 [49] genormte Bemessungsbrände oder daran angelehnte Brandobjekte zum Einsatz. Wichtig bei dieser Art Löschversuch ist ein Flüssigkeitsvolumenstrom, welcher der zu erwartenden Brandleistung angepasst ist. Zu große Volumenströme besitzen meist eine hohe kinetische Energie, welche ursächlich für eine ungewollte Zerstörung des Brandobjektes sein kann.

Darüber hinaus sind sie ungeeignet für Versuche, mit denen Unterschiede im Löschverhalten verschiedener Löschmedien festgestellt werden sollen. In aller Regel verursachen die für ein Brandobjekt zu groß gewählten Volumenströme ein sofortiges Erlöschen der Brandlast ohne erkennbare Unterschiede in wichtigen Löschparametern. Dahingegen führen unterdimensionierte Volumenströme für gewöhnlich zu ausbleibendem Löscherfolg.

Temperaturverläufe der Löschmedien Wasser, Netzwasser und CAF aus jeweils drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen spezifischen Flüssigkeitsvolumenströmen sind in Abbildung 52 gezeigt. Darin sind immer die drei zu einem spezifischen Volumenstrom gehörigen Löschversuche in Farben der gleichen Farbgruppe abgebildet. Es fällt auf, dass die in Grautönen gezeigten Temperaturkurven aus der Versuchsreihe der Indoor-Holzrippenbrände mit einem spezifischen Volumenstrom von $\dot{v} = 2,80 \pm 0,30 \text{ l/min} \cdot \text{MW}$ deutlich erkennbare Unterschiede in der Löscheffizienz der verschiedenen Löschmittel aufzeigen. Ähnlich klare Unterschiede gehen aus den rötlichen Temperaturkurven der Outdoor-Mischrippenbrandversuche mit einem spezifischen Volumenstrom von $\dot{v} = 5,40 \pm 0,44 \text{ l/min} \cdot \text{MW}$ hervor. Die in blau gehaltenen Kurven stellen die Temperaturverläufe der Indoor-Mischrippenbrandversuche dar. Ihr großer spezifischer Flüssigkeitsvolumenstrom von $\dot{v} \approx 35,90 \text{ l/min} \cdot \text{MW}$ kühlte die Brandobjekte in kurzer Zeit sehr stark ab. Mit ihrer Hilfe konnte allen drei Löschmitteln ein Löscherfolg attestiert werden. Eine Differenzierung der Löschwirkung anhand feiner Temperaturkurvenunterschiede, wie sie aus den anderen beiden Versuchsreihen hervorgehen, ist jedoch nicht möglich. Hinzu kommt, dass das individuelle Geschick des Strahlrohrführers bei der Verwendung eines so hohen spezifischen Volumenstromes einen größeren Einfluss auf das Löschergebnis ausübt. So wurden in diesem Fall in jeder Sekunde, die das Strahlrohr länger geöffnet ist als im Vergleichsversuch, ca. 600 ml Flüssigkeit zusätzlich ausgebracht.

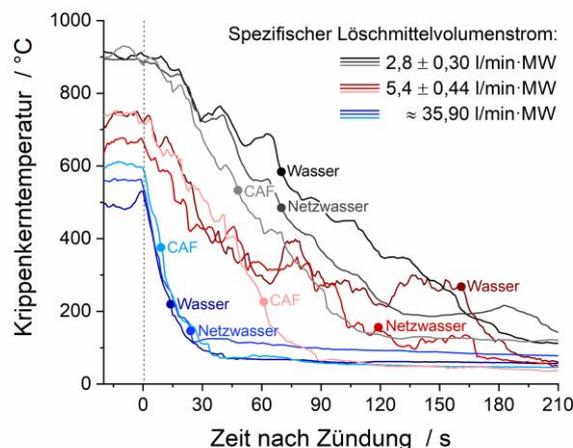


Abbildung 52: Temperaturverläufe von Löschversuchen mit unterschiedlichen spezifischen Löschmittelvolumenströmen

4.1.2 Verfremdung der Messdaten durch Verunreinigungen

Die nachstehenden Diagramme zeigen die Messkurven von Kontaktwinkelmessungen einer Lösung aus künstlichem Süßwasser gemäß [49] und 0,3 % des Schaummittels Y auf einer Probenplatte aus Glas (Abbildung 53) und auf einer Probenplatte aus Edelstahl (Abbildung 54) über einen Zeitraum von $t = 5$ s. Die Messung des Kontaktwinkels der zu untersuchenden Flüssigkeit wurde in allen Fällen mit mindestens zehnfacher Wiederholung durchgeführt. Anschließend wurde aus den erfassten Werten ein, sich dem wahren Wert annähernder, Mittelwert gebildet. Kleinste Verunreinigungen durch Staubkörner oder Probenrückstände verursachten teils schwankende und fehlerbehaftete Messwerte. Die in den Diagrammen blaugefärbten Kurven resultieren aus Messungen, welchen in Anlehnung an [57] eine akribische Reinigung mit Ethanol und eine anschließende Trocknungszeit von exakt einer Minute vorausging. Sie zeigen über eine Versuchsdauer von $t = 5$ s eine geringere mittlere Standardabweichung ($\bar{\sigma}_{blau} = 1,5 - 1,6^\circ$) auf als die rotgefärbten Kurven ($\bar{\sigma}_{rot} = 5,7 - 6,5^\circ$), welche ebenfalls mit sorgfältiger Reinigung, aber ohne definierte Trocknungszeiten erfasst wurden. Vier Sekunden nach dem Aufsetzen des Tropfens auf die Probenplatte betragen die Abweichungen der gemittelten Kontaktwinkel zwischen den beiden Messmethoden $\Delta\phi_{4s} = 28 - 39\%$. Diese Differenzen zeigen, dass sowohl eine gründliche Reinigung der Probenplatten und Dosierhilfen als auch ein zeitlich genau definierter Versuchsablauf nicht zu vernachlässigen sind.

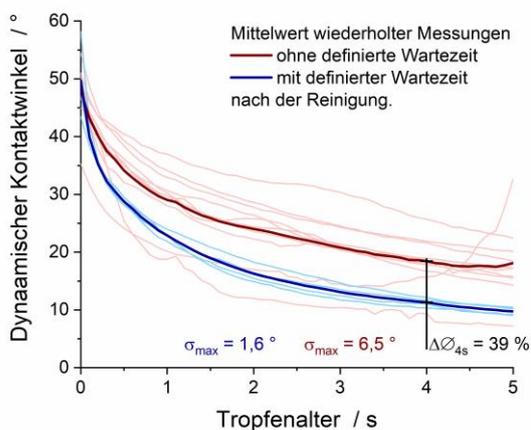


Abbildung 53: Wiederholte Messung von Kontaktwinkeln auf Glas mit und ohne definierter Wartezeit nach der Plattenreinigung

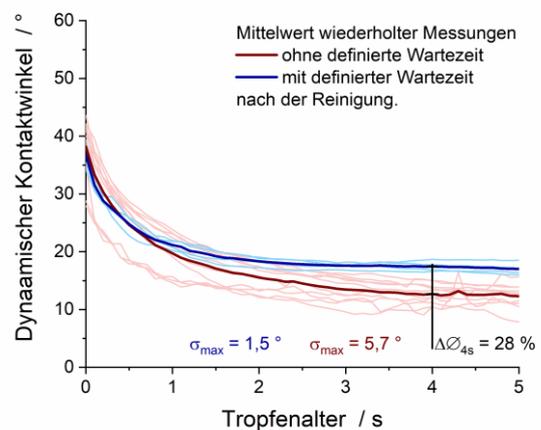


Abbildung 54: Wiederholte Messung von Kontaktwinkeln auf Edelstahl mit und ohne definierter Wartezeit nach der Plattenreinigung

Nachfolgend aufgelistete Versuchsreihen unterlagen in einigen Punkten einem erhöhten Risiko der Messwertverfälschung durch Verunreinigungen. Um dieses Risiko zu senken, sind folgende Anmerkungen bei der Wiederholung der Versuchsreihen zu beachten.

- Alle Löschversuche mit unterschiedlichen Löschmedien aus demselben Löschgerät: Das Löschgerät sowie die verwendeten Leitungen und Armaturen müssen bei jedem Wechsel des Löschmediums gründlich gespült werden, um Verunreinigungen durch Rückstände zu vermeiden.
- Bestimmung des Tauchnetzvermögens: Die Vorbereitung der Baumwollpads darf nur unter Verwendung von Handschuhen und fettfreiem Werkzeug erfolgen. Für die Herstellung des Premixes empfiehlt sich die Verwendung unbenutzter Einwegpipetten und gründlich gereinigter Behältnisse.
- Alle Rauchgasmessungen: Das FTIR-Spektrometer und alle verwendeten Leitungen müssen unmittelbar nach ihrer Nutzung ausreichend mit Stickstoff gespült werden.

4.1.3 Messgeräteabweichung

Eine Messgeräteabweichung beschreibt die Abweichung des Ausgabesignals eines Messgerätes zum wahren Wert. Diese Abweichung wird allein durch das Messgerät verursacht und kann im Rahmen einer Kalibrierung ermittelt und durch eine Justierung möglichst klein gehalten, aber nicht auf null gesetzt werden.

FTIR-Spektrometer

Mit dem während der Brandversuche angewandten FTIR-Spektrometer können bis zu 13 unterschiedliche Rauchgaskomponenten erfasst werden. Bei der Analyse der Daten sind die beiden stoffabhängigen Größen *Limit of Detection* (L_D) und *Limit of Quantification* (L_Q) zu berücksichtigen. Das Limit of Detection (dt. Nachweisgrenze) gibt den kleinsten Wert an, bis zu welchem die gemessene Komponente gerade noch zuverlässig nachgewiesen werden kann. Das Limit of Quantification (dt. Bestimmungsgrenze) bezeichnet die kleinste Konzentration eines Stoffes, die quantitativ mit einer festgelegten Präzision bestimmt werden kann. Demzufolge hat die Bestimmungsgrenze eine höhere Genauigkeit als die Nachweisgrenze.

Beide Limits wurden für das FTIR-Spektrometer in Anlehnung an ISO 19702 [82] anhand 14-fach aufgenommener Spektren berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Die Teilnahme an einem europäischen Ringversuch [83] zur Vergleichbarkeit der Messungen von FTIR-Spektrometern unterschiedlicher Firmen schreibt dem während der Brandversuche angewandten FTIR-Spektrometer eine hohe Messgenauigkeit bei der Detektion der Brandgase CO und CO₂ zu. Demnach liegt die Abweichung des Spektrometers zum europäischen Durchschnitt bei -1,02 mg/m³ ($\approx 0,87$ ppm) für CO bzw. bei -0,96 mg/m³ ($\approx 0,52$ ppm) für CO₂.

Tabelle 16: Mittelwert, Standardabweichung, Limit of Detection und Limit of Quantification des während der Brandversuche angewandten FTIR-Spektrometers

Rauchgaskomponente		Mittelwert [ppm]	σ [ppm]	LD [ppm]	LQ [ppm]
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	-2,08	3,45	8	32
CO	Kohlenstoffmonoxid	0,58	1,16	4	12
CH ₄	Methan	0,82	7,48	23	76
C ₂ H ₄	Ethen	-0,64	1,43	4	14
NO	Stickstoffmonoxid	-2,11	6,62	18	64
NO ₂	Stickstoffdioxid	0,56	1,66	6	17
SO ₂	Schwefeldioxid	0,59	2,52	8	26
HBr	Bromwasserstoff	-0,43	3,05	9	30
HCl	Chlorwasserstoff	2,29	4,07	15	43
NH ₃	Ammoniak	0,28	0,32	3	8
HCN	Cyanwasserstoff	7,13	5,52	24	62
HF	Fluorwasserstoff	-11,78	4,40	1	32

Thermoelemente und Datenlogger

Die in allen Brandversuchen verwendeten Mantelthermoelemente des Typs K verfügen nach Angaben des Herstellers Omega [84] im relevanten Messbereich von 0 bis 1.250 °C über eine Fehlertoleranz von 0,75 % des Messwertes, mindestens aber über 2,2 K.

Die Messunsicherheiten der verwendeten Omega-USB-Datenlogger TC-08 wurden mittels einer Kalibrierung herausgestellt und sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Tabelle 17: Messunsicherheiten der USB-Datenlogger TC-08 für die Temperaturmessung

Kalibriergerät	TC-08 (1)	TC-08 (1)	TC-08 (2)	TC-08 (2)
Soll-Wert [°C]	Ist-Wert [°C]	Unsicherheit [°C]	Ist-Wert [°C]	Unsicherheit [°C]
100,0	98,7 - 99,2	1,5	98,5 - 99,0	1,5
200,0	198,6 - 199,1	1,5	198,4 - 198,9	2,0
300,0	298,6 - 299,1	1,5	298,4 - 298,8	2,0
400,0	398,5 - 399,0	1,5	398,4 - 398,8	2,0
500,0	498,5 - 499,0	1,5	498,3 - 498,8	2,0
600,0	598,4 - 598,9	2,0	598,3 - 598,7	2,0
700,0	698,3 - 698,8	2,0	698,2 - 698,6	2,0
800,0	798,2 - 798,7	2,0	798,1 - 798,5	2,0
900,0	898,1 - 898,6	2,0	898,0 - 898,4	2,0
1.000,0	998,0 - 998,5	2,0	997,9 - 998,3	2,5
1.100,0	1.097,9 - 1.098,4	2,5	1.097,7 - 1.098,2	2,5
1.200,0	1.197,8 - 1.198,3	2,5	1.197,6 - 1.198,1	2,5
1.300,0	1.297,6 - 1.298,2	2,5	1.297,4 - 1.298,0	3,0

Waagen

Die beiden verwendeten Waagen zur Erfassung der Krippen- und Lachenmassen sowie der Abbrand- und Applikationsraten wurden auf ihre Präzision bei Messgrößen, die annähernd den üblichen Versuchsaufbauten entsprachen, getestet. Ihre Standardabweichungen finden sich neben den wichtigsten technischen Daten zu den Messgeräten in Tabelle 18.

Tabelle 18: Technische Daten und Standardabweichungen der Waagen

Waage	Max. Wägebereich [kg]	Ablesbarkeit [kg]	Standardabweichung [kg]		
			bei 30 kg	bei 50 kg	bei 140 kg
Sartorius CW1P1-150IG-I	150,000	0,005	0,0020	0,0026	0,0053
Kern DS 150K1	150,000	0,001	0,0007	0,0011	0,0045

Wärmeflussaufnehmer und Datenlogger

Die vorliegenden Kalibrierzertifikate [85] der beiden Schmidt Boelter- und des Gardon Gauge-Sensorkopfes schreiben den Wärmeflussaufnehmern unter Laborbedingungen eine Messunsicherheit von 1,5 % zu.

Die Daten der Wärmeflussaufnehmer werden über das Messdatenerfassungssystem Agilent 34970A aufgenommen. Bei einer einjährigen Kalibrierperiode verfügt dieser Datenlogger während der Verarbeitung von Gleichstromsignalen gemäß Datenblatt [86] über eine Grundgenauigkeit von 0,004 %.

4.1.4 Datenaufbereitung und Datenauswertung

Abgesehen von fahrlässig verschuldeten Fehlern, wie sie beispielsweise durch das versehentliche Vertauschen von Datensätzen entstehen, wird die Datenaufbereitung und -auswertung immer dann zu einer Fehlerquelle, wenn Datensätze angepasst werden oder es verschiedene Möglichkeiten gibt, diese zu interpretieren.

Fehler durch Anpassung von Kurvenverläufen

In dieser Arbeit wird in den Kapiteln 3.3 *Outdoor-Mischkrippenbrandversuche*, 3.5 *Indoor-Holzrippenbrandversuche* und 3.8 *Reifenbrandversuche* auf die analytische Methode der Kurvenanpassung zurückgegriffen. Dabei wurden geradlinig erscheinende Messkurven linear angepasst und die daraus gewonnenen Steigungswerte zur Bestimmung von Löscheffizienzen herangezogen. Die Genauigkeit der Steigungswerte und folglich auch das Ranking der Löscheffizienzen der untersuchten Löschmedien hängt maßgeblich vom Korrelationskoeffizienten r ab. Dieser Korrelationskoeffizient lag in nahezu allen vorgenommenen linearen Anpassungen in einem zuverlässigen Bereich von $r < -0,95$. Die einzige Ausnahme bildete ein Löschversuch mit trockenem CAF (X) mit einem

Korrelationskoeffizienten von $r = -0,87$ (siehe 3.5 Indoor-Holzkippenbrandversuche). Aufgrund der Beobachtungen im Versuchsstand und anhand der Videoanalyse ist die mit diesem Steigungswert ermittelte Löscheffizienz dennoch als glaubhaft zu bewerten.

Fehler durch alternative Interpretationsmöglichkeiten

Die Interpretation eines mehrfach durchgeführten Versuches, bestehend aus entsprechend vielen Datensätzen, bringt unterschiedliche Interpretationsmöglichkeiten mit sich. So können zum Beispiel die in Abbildung 55 dargestellten einzelnen Kurvenverläufe der Kühlkapazitäten aus der Versuchsreihe der Indoor-Holzkippenbr mit einer der folgenden Methoden zusammengefasst werden: Bildung des Mittelwertes aus *allen drei Kurven*, Bildung des Mittelwertes aus den *zwei ähnlichsten Kurven* oder Bildung des Mittelwertes aus den *zwei besten Kurven*. Die Ergebnisse der einzelnen Methoden sind in Tabelle 19 aufgeführt. Sie unterscheiden sich zueinander um bis zu 71 K/l, was einer Differenz von 23 % entspricht. Der Ausgang einer Bewertung hängt demnach maßgeblich von der Datenauswahl zur Berechnung des Mittelwertes ab.

In den beiden Versuchsreihen mit dreifacher Versuchsdurchführung (Kapitel 3.5 *Indoor-Holzkippenbrandversuche* und Kapitel 3.7 *Indoor-Heptanlachenbrandversuche*) wurden die Mittelwerte aus allen drei Versuchen berechnet.

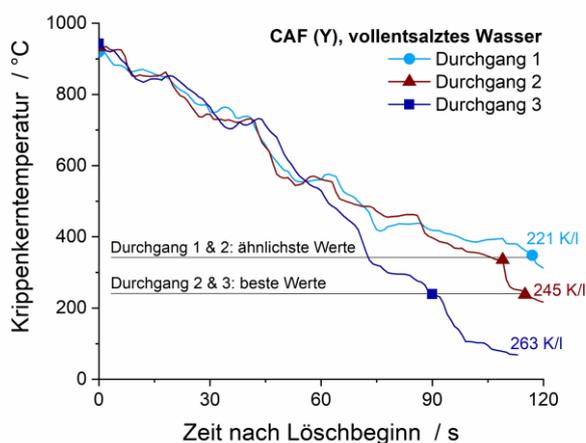


Abbildung 55: Verlauf der Krippenkerntemperatur als Grundlage zur Bestimmung der Kühlkapazität

Tabelle 19: Berechnung der mittleren Kühlkapazität anhand unterschiedlich ausgewählter Daten

Mittelwert aus ...	Kühlkapazität [K/l]	σ [K/l]
... allen 3 Werten	276	76
... den 2 ähnlichsten Werten	233	17
... den 2 besten Werten	304	83

Eine weitere potenzielle Fehlerquelle verbirgt sich im Kapitel 3.5 *Indoor-Holzkippenbrandversuche*, wo die Löscheffizienz der Löschmedien *Wasser*, *Netzwasser*, *NAF* und *CAF* anhand zweier verschiedener Methoden untersucht wurde. Zum einen erfolgte die Analyse der Temperaturdaten, um die Kühlkapazität der Löschmedien (Abbildung 37) zu ermitteln und zum anderen wurden Waagedaten herangezogen, um die Zeitpunkte des Auftretens der Massenstromgleichgewichte im Löschverlauf (Abbildung 38) zu bestimmen. Beide Methoden zeigen weitestgehend die gleichen Wirksamkeitstendenzen

der getesteten Löschmittel auf. Jedoch sind gerade beim Vergleich der Wirksamkeit der Schaummittelkonzentrate leichte quantitative Abweichungen festzustellen, welche durch die jeweiligen Schwächen der Analysemethoden (z.B. durch direkte Beaufschlagung der Thermoelemente, Löschmittelverluste oder variierende Volumenströme) verursacht wurden. Die durch diese Fehlerquellen hervorgerufenen Abweichungen der beiden Analysemethoden können in erster Linie durch eine größere Wiederholungszahl und durch einen vollautomatischen Löschvorgang minimiert werden.

4.2 Zufällige Fehler

Zufällige Fehler bewirken, dass die numerischen Resultate einer wiederholten Messung trotz identischer Bedingungen in einem gewissen Streubereich liegen. In der Regel verteilen sich die Messwerte y_i unter Einfluss eines zufälligen Fehlers $u(y)$ um einen arithmetischen Mittelwert \bar{y} [80]. Gleichung (7) dient der Berechnung des arithmetischen Mittelwertes einer Messreihe mit n Durchläufen. Betrag und Vorzeichen des zufälligen Fehlers $u(y)$ einer jeden Messung ergeben sich aus Gleichung (8) und unterliegen dabei zufallsbedingten statistischen Schwankungen.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

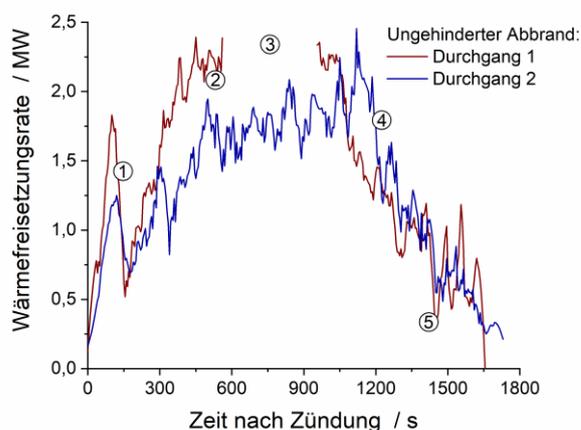
$$u(y) = y_i - \bar{y} \quad (8)$$

Melcher et al. [87] zeigen in ihren Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von originalmaßstäblichen Brandversuchen, dass Brandverläufe immer den Gesetzen der Natur und damit dem Einfluss zufälliger Fehler unterliegen. Solche Brandversuche sind auch durch ein noch so gut durchdachtes Versuchsdesign nicht vollständig zu kontrollieren. Um das Risiko fehlerhafter Schlüsse auf Basis einer einzelnen Messung zu vermeiden, ist es von großer Bedeutung, Brand- und Löschversuche mehrfach zu wiederholen.

Jedoch ist eine hohe Wiederholungsrate nicht immer umzusetzen. So war zum Beispiel die Herstellung der neuentwickelten Mischbrandkrippen für die Untersuchung der Löschwirksamkeit von CAF mit einem großen Kostenaufwand verbunden. Das führte im Rahmen des Projektbudgets zu einer geringen Fertigungstückzahl von 14 Mischbrandkrippen. Um die neuartigen Krippen eingehend zu charakterisieren und anschließend mit deren Hilfe die Einflüsse von Löschmittel, Löschdistanz und Schaummittel in einer Outdoor- sowie in einer Indoor-Brandversuchsreihe zu untersuchen, mussten Einschränkungen in der Versuchsanzahl vorgenommen werden.

Die Wärmefreisetzungsraten (HRR) zweier identischer Mischbrandkrippen sind in Abbildung 56 gezeigt. Sie resultieren aus Berechnungen auf Basis der Waagedaten von

zwei identischen Brandversuchsdurchgängen ohne Löschmaßnahmen. Dass sich die beiden Kurvenverläufe dennoch unterscheiden, weist auf die Präsenz zufälliger Fehler in der Datenerfassung der beiden Brandversuche hin. In *Punkt 1* des Diagrammes unterscheiden sich die Wärmefreisetzungsraten zur Zeit der Zündung durch eine Heptanlache um $\approx 35\%$. Im *Punkt 2* ist der ca. zweiminütige Ansatz einer Vollbrandphase zu erkennen, deren Wärmefreisetzungsraten rund 20% über der des Vergleichsversuches liegt. Kurz darauf, im *Punkt 3*, fällt die Messtechnik aus. *Punkt 4* steht symbolisch für unterschiedlich lange Zeiträume, über die sich die Brandphasen in den beiden Durchgängen erstrecken. Auch die Verfälschung der Messkurven durch Fremdeinwirkungen, wie zum Beispiel eine Notlöschung zum Funktionserhalt der von Brandschutt bedrohten Messtechnik, erkenntlich in *Punkt 5*, kann mittels mehrfacher Messung reduziert werden.



Auffälligkeiten beim Vergleich der Messdaten einer zweifachen Versuchsdurchführung:

- 1: Unterschiedliche HRR während der Zündung
- 2: Unterschiedliche maximale HRR
- 3: Ausfall der Messtechnik
- 4: Unterschiedlich lang andauernde Brandphasen
- 5: Datenverfälschung durch Fremdeinwirkung

Abbildung 56: Differenzen der Messdaten bei wiederholten Versuchsdurchgängen am Beispiel der ungehinderten Abbrände zur Charakterisierung der Mischbrandkrippen

Selbst ein dreifach durchgeführter Versuch stellt keine Garantie für ein eindeutiges Ergebnis dar. Mit einer Erhöhung der Wiederholungsanzahl kann das Risiko einer zufallsbedingten Messabweichung lediglich minimiert aber nicht ausgeschlossen werden. Es gilt, die Wiederholungsrate situationsangepasst in gründlicher Abwägung des Aufwand-Nutzen-Faktors festzulegen.

Im Folgenden sind alle in dieser Arbeit behandelten Versuchsreihen ohne bzw. mit nur wenigen Wiederholungsversuchen aufgelistet. Ihre Ergebnisse unterliegen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit dem Einfluss eines zufälligen Fehlers.

- Outdoor-Mischkrippenbrandversuche (keine Wiederholungen)
- Indoor-Mischkrippenbrandversuche (keine Wiederholungen)
- Outdoor-Heizöllachenbrandversuche (keine Wiederholungen)
- Reifenbrandversuche (eine Wiederholung)
- Transformatorenbrandversuche (eine Wiederholung)

4.2.1 Technische Defekte

Der Punkt *Technische Defekte* wird an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber aufgenommen. Während der Versuchsdurchführungen kam es gelegentlich zu technischen Defekten, welche Geräteausfälle und folglich auch Datenverluste verursachten. Diese Verluste haben jedoch keine wesentlichen Auswirkungen auf die Aussagekraft der Versuchsreihen. Eine Verfälschung der Messdaten durch technische Defekte lag lediglich an drei Stellen vor:

- Outdoor-Mischkrippenbrandversuche: Ein verstopfter Filter im Versuchslöschgerät verminderte das Austrittsmoment und die Durchflussrate des Löschmittels im CAF (Y)-Löschversuch mit Mindestlöscharstand (Kapitel 3.3).
- Indoor-Mischkrippenbrandversuche: Eine Leckage in der Steigleitung zum Versuchsraum im sechsten Stock verfälschte die Wasserverbrauchsdaten im ersten CAF-Versuch (Kapitel 3.4).
- Transformatorenbrandversuche: Eine Störung in der Löschmittelversorgung nahm Einfluss auf das Löschergebnis im Versuch CAF-trocken (Kapitel 3.9).

Auf alle Fehler wird an entsprechender Stelle hingewiesen (siehe Abbildung 25, Tabelle 15 und Abschnitt 3.9).

4.2.2 Witterungseinflüsse

Brand- und Löschversuche im Freigelände bergen ein hohes Risiko der Messunsicherheit durch zahlreiche Witterungseinflüsse. Beispielsweise sind die Messdaten eines Wärmeflussaufnehmers durch Sonneneinstrahlung beeinflussbar. Diese Querempfindlichkeit kann aber durch eine geschützte Positionierung der Messtechnik minimiert werden. Auch Niederschläge, die den Brand- und Löscharlauf beeinflussen würden, können in den meisten Fällen einfach umgangen werden. Schwieriger wird es bei der Umgebungstemperatur. Sie kann sich in Extremfällen wie bei besonders hohen oder sehr niedrigen Temperaturen auf das Verhalten des Löschmediums auswirken. Als einer der größten Störfaktoren bei der Versuchsdurchführung im Freiland ist der Wind anzusehen. Er ist nahezu allgegenwärtig und beeinflusst jeden Brandverlauf. Somit minimiert er jegliche Chance auf Reproduzierbarkeit. Ein gutes Beispiel dafür ist die auf 500 s angesetzte Vorbrennzeit für die Outdoor-Mischkrippenbrände. Diese Zeitspanne war rechnerisch notwendig, um das Einsetzen der Vollbrandphase vor dem Löscharbeginn zu erreichen. Doch unter Windeinfluss beschleunigte sich die Brandausbreitung in den meisten Fällen, sodass die Befehle zum Löscharbeginn fast immer im Zeitraum von 285 bis 390 s nach der Zündung gegeben wurden. In einem Versuch mit mäßigem und konstantem Wind aus der Angriffsrichtung startete der Löscharvorgang erst 540 s nach der Zündung. Die erzielten Vorbrennzeiten schwankten also mit einer Standardabweichung von fast 80 s um den Mittelwert von 362 s. Rein optisch betrachtet mag der Brandfortschritt in den meisten Versuchen ähnlich sein. Aus technischer Sicht ist anzumerken, dass die nicht

reproduzierbare Brandentwicklung einen ungleichmäßigen Massenabbrand der einzelnen Materialien zur Folge hatte und damit ungleiche Voraussetzungen für die Bewertung der Löscheffizienz unterschiedlicher Löschmittel geschaffen wurden.

Die Einflüsse der Windverhältnisse am Versuchsstand zeigen sich besonders deutlich bei der Betrachtung der Messdaten des FTIR-Spektrometers. In den nachfolgenden Diagrammen gemäß [88] sind jeweils die CO-Konzentrationen während der Entwicklungsphasen der Mischkrippenbrände in der Outdoor- (Abbildung 57) und Indoor-Versuchsreihe (Abbildung 58) dargestellt. In Abbildung 57 ist weder eine Systematik noch eine Übereinstimmung im Verlauf der Konzentrationskurven zu erkennen. Über den abgebildeten Zeitraum liegt eine mittlere Standardabweichung von $\bar{\sigma} = 8 \%$ vor. In der 273. Sekunde nach der Zündung wird der Maximalwert der Standardabweichung von $\sigma_{max} = 35 \%$ erreicht. Zu dieser Zeit wird im Versuch 2 eine maximale CO-Konzentration von $C_{max} = 991 \text{ ppm}$ gemessen, währenddessen die durchschnittliche Konzentration aller Versuche bei $\bar{C} = 140 \text{ ppm}$ liegt. Demzufolge beträgt die Ungenauigkeit der Rauchgasmessung in dieser Versuchsreihe $u = 708 \%$. Quantitativ reproduzierbare Aussagen zu den freigesetzten Rauchgasen sind unter den unkontrollierbaren Bedingungen eines Freilandversuches also nicht möglich.

Die Konzentrationskurven der Indoor-Mischkrippenbrände aus Abbildung 58 zeigen ähnliche Standardabweichungen auf. Die mittlere Standardabweichung über die gesamte Vorbrenndauer beträgt $\bar{\sigma} = 9 \%$. Die maximale Standardabweichung von $\sigma_{max} = 31 \%$ wird in der 357. Sekunde gemessen. Die maximale Konzentration zu dieser Zeit liegt bei $C_{max} = 8528 \text{ ppm}$ bei einem Versuchsreihen-Durchschnitt von $\bar{C} = 3976 \text{ ppm}$. Daraus ergibt sich für die Rauchgasmessung in dieser Versuchsreihe eine Messungenauigkeit von $u = 214 \%$. Sie ist im Vergleich zu den Outdoor-Mischkrippenbränden deutlich geringer, da der Versuchsstand in einem Brandraum aufgebaut wurde. Die verbleibende Messungenauigkeit resultierte hauptsächlich aus den Strömungsverhältnissen im Versuchsstand, welche durch die Ventilationsöffnungen des Brandraumes hervorgerufen wurden.

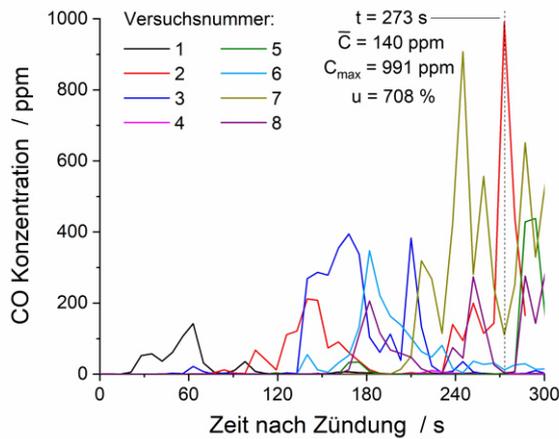


Abbildung 57: Reproduzierbarkeit der Gasmessung während der Brandentwicklungsphase bei Outdoor-Mischkrippenbränden gemäß [88]

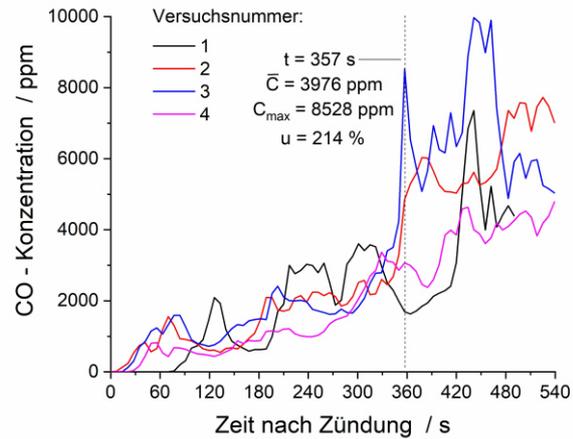


Abbildung 58: Reproduzierbarkeit der Gasmessung während der Brandentwicklungsphase bei Indoor-Mischkrippenbränden gemäß [88]

Die Temperaturmessung war ebenso vom Windeinfluss betroffen. Der einfachste Weg, die Ungenauigkeit bei der Temperaturmessung zu senken, ist die Bildung eines Mittelwertes aus den Daten mehrerer Temperaturmessstellen. Die aus acht Messstellen gebildeten mittleren Krippentemperaturen während der Brandentwicklungsphasen von Mischkrippenbränden im Freiland werden in Abbildung 59 gezeigt. Wie aus ihr hervorgeht, unterliegt in einem Freilandversuch selbst der Temperaturmittelwert einer großen Ungenauigkeit. Die mittlere Standardabweichung über die gesamte Vorbrenndauer beträgt $\bar{\sigma} = 12\%$. Die maximale Standardabweichung tritt 240 s nach der Zündung auf und liegt bei $\sigma_{max} = 19\%$. Aus dem Temperaturdurchschnitt von $\bar{\vartheta} = 539\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einem minimalen Messwert zu dieser Zeit von $\vartheta_{min} = 319\text{ }^{\circ}\text{C}$ ergibt sich eine Messungenauigkeit von $u = 41\%$.

Dem gegenübergestellt sind die Temperaturkurven der Indoor-Holzrippenbrände in Abbildung 60. Darin sind beispielhaft die Temperaturverläufe während der Brandentwicklungsphasen von acht Versuchen dieser Versuchsreihe gezeigt. Der windgeschützte Aufbau des Versuchstandes in einem Brandraum mit einer natürlichen Ventilationsöffnung und einer maschinellen Entrauchung senkt die mittlere Standardabweichung der Temperaturen während der Vorbrennphase auf $\bar{\sigma} = 4\%$. Die maximale Standardabweichung liegt in diesem Fall nur noch bei $\sigma_{max} = 7\%$. Zu der Zeit $t = 100\text{ s}$, kurz vor dem Erlöschen der Heptanlache, kommt es zu einer maximalen Messungenauigkeit von $u = 18\%$. Im späteren Brandverlauf ($t = 480\text{ s}$) treten weniger Schwankungen auf. Die Messungenauigkeit liegt dann bei durchschnittlich $u = 5\%$.

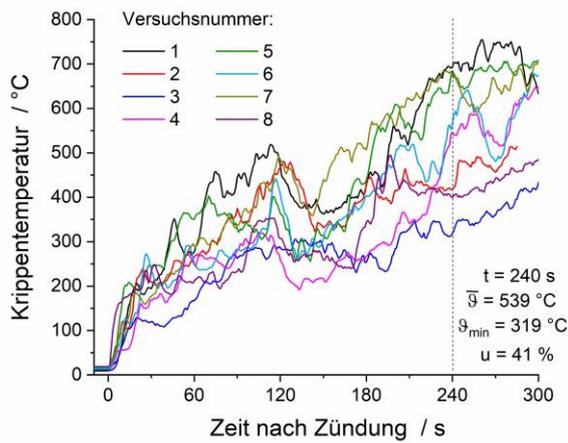


Abbildung 59: Reproduzierbarkeit der Temperaturentwicklung bei Outdoor-Mischkrippenbränden

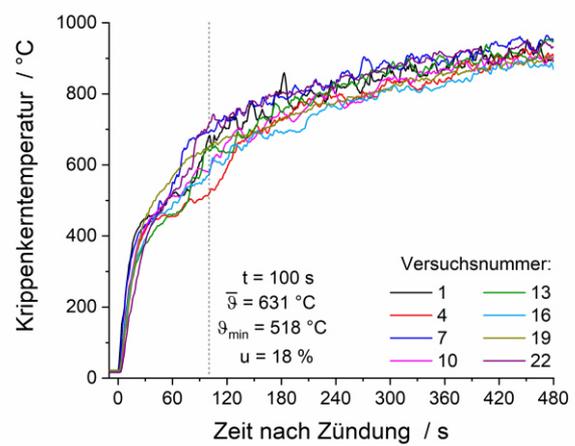


Abbildung 60: Reproduzierbarkeit der Temperaturentwicklung bei Indoor-Holzkippenbränden

2004 führte die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung eine interne Untersuchung der Ungenauigkeit von Wärmestrahlungsmessungen im Freiland durch. Demnach beläuft sich der Messfehler an einem Tag mit ruhiger Wetterlage allein durch Witterungseinflüsse im Extremfall auf bis zu 50 %. Da sich die einzelnen Fehler durch die Einflussfaktoren *Wind*, *Temperatur*, *Luftfeuchtigkeit* und *Sonneneinstrahlung* bzw. *Bewölkung* unabhängig voneinander in positive sowie in negative Richtung erstrecken können, heben sie sich stellenweise gegenseitig auf, sodass im Durchschnitt eine Messungenauigkeit von bis zu 30 % vorliegt [89]. Bei Löschversuchen von Feststoffbränden im Freien kommt hinzu, dass sich durch Verwirbelungen am Versuchsstand das umgesetzte Löschmittel in Form von Wasserdampf mal mehr und mal weniger zwischen Brandobjekt und Wärmeflussaufnehmer legt. Da Wasserdampf in Abhängigkeit seiner Wolkendichte die vom Brandobjekt ausgehende Wärmestrahlung absorbiert, können durch diese Verwirbelungen Ungenauigkeiten im Messergebnis entstehen.

4.2.3 Beobachtereinflüsse

Als Beobachter wird in diesem Zusammenhang jede Person verstanden, die in irgendeiner Art und Weise Einfluss auf den Ausgang einer Messung und deren Ergebnis nimmt. Demnach zählen im Rahmen der Versuchsdurchführung in erster Linie Protokollanten, Strahlrohrführer und Befehlsgeber zu dieser Personengruppe. Sie beeinflussen das Messergebnis durch unterschiedliche Eigenschaften und Fähigkeiten, wie zum Beispiel Aufmerksamkeit, Reaktionszeit, Übung, Sehschärfe, Schätzvermögen und Parallaxe. Die genaue Quantifizierung der Beobachtereinflüsse auf die Messwerterfassung ist nahezu unmöglich.

Den größten Einfluss auf die Messwerte eines nichtautomatisierten Löschversuches übt der Strahlrohrführer aus. Der Ausgang einer jeden Brandbekämpfung hängt maßgeblich von seinem Vorwissen und seinem individuellen Geschick ab [43, 90].

Nicht zu vernachlässigen ist der Einfluss des Protokollanten. Speziell bei der Echtzeitablesung eines dynamischen Messwertes (z.B. Ablesen des Waageanzeigenwertes bei der Erfassung des Löschwasserverbrauches) oder bei der subjektiven Bestimmung des Brand- bzw. Löschfortschrittes (z.B. Bestimmung der charakteristischen Löschzeiten *50 % Kontrolle*, *99 % Kontrolle* und *100 % Kontrolle*) kommt es zwangsläufig zur Beeinflussung des Messwertes durch den Beobachter.

4.3 Gesamfehler

Die Untersuchungsgröße *Löscheffizienz von CAF* unterliegt einem, alle Fehlereinflüsse umfassenden, Gesamfehler, welcher unter Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes rechnerisch bestimmt werden kann. Mit der zugrundeliegenden additiven Verknüpfung aller erfassten Messwerte y_i berechnet sich der Gesamfehler $U(y)$ gemäß Gleichung (9) aus der Summe aller methodischen und zufälligen Fehler $u(y_i)$.

$$U(y) = u(y_1) + u(y_2) + \dots + u(y_n) \quad (9)$$

Die *Löscheffizienz von CAF* im Vergleich zu herkömmlichen Löschmedien ist in dieser Arbeit die wesentliche Untersuchungsgröße. Die zu Ihrer Bestimmung herangezogenen Daten stammen von unterschiedlichsten Messmethoden aus diversen Versuchsreihen. Jeder einzelnen Versuchsreihe liegen eigene Rahmenbedingungen wie *Örtlichkeit*, *Witterung*, *Mess- und Löschgerät*, *Löschmittel*, *Prüfkörper*, *Personal*, *usw.* zugrunde, die sich auf den Fehler der jeweiligen Messwerte auswirken.

Die in Kapitel 4 genannten methodischen und zufälligen Fehler sind exemplarisch aufgeführte Beispiele erkannter Fehler, deren Vorzeichen und Größe berechnet werden können. Aus diesen erkannten Fehlern ist es möglich, einen definierten Gesamfehler zu bestimmen. Jedoch werden in der Berechnung nach Gleichung (9) keine unerkannten Fehler, bzw. solche Fehler, deren Wert und Vorzeichen nicht bestimmbar sind, berücksichtigt.

Darüber hinaus ist die Quantifizierung eines Gesamfehlers insofern schwierig, als die Auswertungen einiger Versuchsreihen in Abhängigkeit der verwendeten Messdaten aus z.B. Temperatur-, Wärmestrom- und Zeitmessungen zu unterschiedlichen Teilergebnissen führten, welche allesamt in die qualitative Bewertung der Löscheffizienz einfließen.

Deshalb wird an dieser Stelle darauf verzichtet, einen letztlich unvollständigen Gesamfehler zu berechnen, dessen Aussagekraft der Bewertung der Ergebniszuverlässigkeit keinen Mehrwert verleiht. Anstelle dessen wird darauf hingewiesen, dass

die Fazite der einzelnen Versuchsreihen aus Kapitel 3 aus reiflicher Betrachtung der Untersuchungsergebnisse heraus entstanden. Ihre Kernaussagen bezüglich der Löscheffizienzen der getesteten Löschmedien sind kongruent und fließen in die Schlussfolgerung im Kapitel 5 ein. Somit verfügt diese Schlussfolgerung über eine hinreichende Zuverlässigkeit in der Bewertung der *Löscheffizienz von CAF*. Die Summe aller Fehler mag die Quantität der Ergebnisse in gewissem aber nicht entscheidendem Maße beeinflussen, ändert jedoch nichts an den Schlussfolgerungen bezüglich der Wirksamkeit von CAF gegenüber den anderen getesteten Löschmedien Wasser, Netzwasser und strahlrohrverschäumtem Schaum.

5 Diskussion

5.1 Zusammenfassung

5.1.1 Löscheffizienz in Abhängigkeit von Schaummittel und Zumischrate

Alle in dieser Arbeit aufgeführten Schaumlöschversuche fanden ausschließlich unter Verwendung der beiden erwähnten Schaummittelpräparate statt. Beide Schaummittel werden als Class-A Schaummittel vertrieben und zeichnen sich durch eine ähnlich effektive Wirkungsweise bei der CAF-Herstellung aus. Dennoch ergab der Datenvergleich aus der Bestimmung des Tauchnetzvermögens [58] für beide Schaummittel eine unterschiedliche Netzeffektivität. Für das Schaummittel Y wurden unter Verwendung von vollentsalztem Wasser 17 % kürzere Benetzungszeiten gemessen. In Verbindung mit Meerwasser sind die Benetzungszeiten 20 % und mit Süßwasser 30 % kürzer als bei vergleichbaren Schaummittel-X-Lösungen.

Dieses Bild hat sich auch durch die meisten der durchgeführten Brandversuche gezogen. So bewirkte die höhere Netzfähigkeit der Y-Schaummittellösung bei den Indoor-Holzkrippenbrandversuchen (Kapitel 3.5) ein rascheres Eindringen des im Schaum enthaltenen Flüssigkeitsanteils in das Brandgut. Daraus ging eine größere Tiefenwirkung des Löschmittels und ein zeitigerer Löscherfolg hervor.

Bei den Outdoor-Heizöllachenbrandversuchen (Kapitel 3.6) sowie bei den Indoor-Heptanlachenbrandversuchen (Kapitel 3.7) erzielten Druckluftschäume, die unter Verwendung des Schaummittels Y hergestellt wurden, meist ebenfalls etwas kürzere Löscheziten. Ein Zusammenhang zwischen den besseren Löschergebnissen in der Flüssigkeitsbrandbekämpfung und den kürzeren Benetzungszeiten kann anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht nachgewiesen werden. Vielmehr resultieren die besseren Ergebnisse des CAF (Y) in diesen Versuchen aus der leicht erhöhten Verschäumungszahl, welche auch die Rückzündzeit positiv beeinflusst (Kapitel 5.1.2).

Die im Rahmen dieser Arbeit angestellten Untersuchungen ergeben für eine Erhöhung der Schaummittelzumischrate jeweils kürzere Benetzungszeiten der Schaummittellösungen (Kapitel 3.1) sowie niedrigere Kontaktwinkel der Tropfen (Kapitel 3.2) auf festen und ebenen Auflageflächen. Beide Ergebnisse werden durch eine, sich in Folge der Schaummittelzugabe verringernden, Oberflächenspannung der Wasser-Schaummittellösung bewirkt. Bei der Durchführung der Kontaktwinkelanalyse war zu beobachten, dass die sich an der Dosiernadel ausbildenden Tropfen mit steigender Schaummittelzumischrate aufgrund der geringeren Oberflächenspannung zeitiger, d.h. bei einem niedrigeren Eigengewicht, abrissen. Für den Löschangriff, vor allem unter Verwendung eines Sprühstrahls, bedeutet dies, dass allein die Zugabe von Schaummittel zur Verringerung der Tropfengröße führt.

Die Untersuchungen zur Bestimmung des Tauchnetzvermögens [58] zeigen, dass die Wasser-Schaummittellösung ihre wesentlichste Effizienzsteigerung bei der Erhöhung der Schaummittelzumischrate von 0,1 auf 0,3 % erfuhr. Dabei wurden die Benetzungszeiten um über 80 % gesenkt. Eine weitere Steigerung der Zumischrate auf 0,5 % erforderte ebenfalls einen relativ geringen Mehraufwand an Schaummittel und brachte dafür nochmals um mehr als 60 % kürzere Benetzungszeiten mit sich. Jede weitere Erhöhung der Schaummittelzumischrate bewirkte nur noch geringe Änderungen in den Benetzungszeiten. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde für die beiden getesteten Schaummittel X und Y eine optimale Zumischrate von $ZR = 0,5\%$ bestimmt. Die experimentell ermittelte optimale Zumischrate liegt im Bereich der Angaben in den Produktdatenblättern der Schaummittel. Jede Brandversuchsreihe wurde deshalb vorrangig mit einer Zumischrate von 0,5 % durchgeführt. Einige CAF-Löschversuche fanden dennoch unter Anwendung einer 1,0%igen Zumischrate statt, um die Auswirkungen eines erhöhten Schaummittelanteils auf das Löschergebnis zu untersuchen.

Im Verlauf der Versuchsreihe der Indoor-Holzkruppenbrände konnte jedoch keine eindeutige Effizienzsteigerung des 1,0%igen CAF im Vergleich zum 0,5%igen CAF wahrgenommen werden. Weder die Verschäumungszahl noch die Kühlkapazität oder Löschzeit erfuhren eine durchgängige Änderung, weshalb diese Versuche die Schlussfolgerung zulassen, dass eine 1,0%ige Zumischrate beim CAF-Einsatz in der Bekämpfung einfacher Feststoffbrände keinen höheren Nutzen mit sich bringt.

Bei der Bekämpfung von Heizöllachenbränden mit CAF wurde für beide Schaummittel in 1,0%iger Konzentration eine um 1/3 gesteigerte Rückbrandzeit verzeichnet. Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Versuche ohne Wiederholung durchgeführt wurden und ihre Ergebnisse daher einem zufälligen Fehler unterliegen.

Die Löschversuche an Heptanlachenbränden konnten den positiven Einfluss des 1,0%igen CAF auf das Rückbrandverhalten nicht bestätigen. Dabei erzielte der 1,0%ige CAF (X) durchschnittlich lediglich 5 % längere Rückzündzeiten als der 0,5%ige CAF (X). Dieser Anstieg der Rückbrandzeit ist jedoch auf die Steigerung der Verschäumungszahl, welche die höhere Zumischrate bei gleichen Einstellungen am Versuchslöschgerät mit sich brachte, zurückzuführen. Die CAF (Y) Löschversuche mit hoher Zumischrate erreichten in keinem der drei Durchgänge eine vollständige Löschung des Brandes innerhalb der definierten Applikationszeit. Die dadurch erforderliche Überschreitung der einheitlichen Applikationszeit schloss einen vergleichbaren Rückbrandtest aus.

Die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Zumischrate und Löscheffizienz bzw. Rückbrandzeit waren bisher nur vereinzelt und in geringem Umfang Bestandteil aktueller Forschungen. Die in dieser Arbeit angestellten umfangreichen Untersuchungen zu den Auswirkungen einer erhöhten Zumischrate auf die Löscheffizienz bei Feststoff- und unpolaren Flüssigkeitsbränden generierten Ergebnisse, welche zur Anwendungsoptimierung von Schaummitteln in Abhängigkeit des zu löschenden Brandstoffes beitragen. Gleichzeitig stellen sie eine gute Ausgangsbasis für tiefer greifende Studien über die Auswirkungen der Zumischrate bei ungewöhnlichen Brandlasten dar.

Aufgrund der weitestgehend normgetreuen Versuchsaufbauten ist es ohne Weiteres möglich, zusätzliche Versuche mit Mischbrandlasten oder polaren brennbaren Flüssigkeiten durchzuführen, welche an die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse anknüpfen. So können die gesammelten Erkenntnisse gefestigt bzw. ausgebaut werden, indem zum Beispiel die Heizöllachenbrände im Indoor-Bereich unter mehrmaliger Wiederholung der einzelnen Versuchsdurchgänge durchgeführt werden, um die Auftretenswahrscheinlichkeit des zufälligen Fehlers zu minimieren. Es wird empfohlen, diese Versuche als *Kleinlöschprüfung* gemäß Anhang I der DIN EN 1568-3 [49] auszulegen. Als Löschgerät kann das in Tabelle 8 beschriebene CAFS herangezogen werden.

5.1.2 Löscheffizienz in Abhängigkeit der Verschäumungszahl

In einigen Versuchsreihen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die Auswirkungen der Verschäumungszahl auf das Löschverhalten der Druckluftschäume untersucht. So konnte mit den Löschversuchen an Heizöllachenbränden festgestellt werden, dass bei der Anwendung einer niedrigen VZ im Bereich des Nassschaumes eine längere Dauer bis zum Erreichen der 99%igen Brandkontrolle aber auch eine höhere Rückzünd- und Rückbrandzeit erreicht wurden, als es bei der Anwendung von herkömmlich verschäumtem CAF der Fall war. Diese Löschversuche im Freiland fanden ohne Wiederholung statt, sodass deren Löschergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit einem zufälligen Fehler unterliegen.

Die Löschversuchsreihe an Heptanlachenbränden unter normierten Indoor-Bedingungen und dreifacher Durchführung eines jeden Setups verleiht den Versuchsergebnissen eine höhere Präzision, als sie bei den Heizöllachenbränden zu erwarten ist. Im Vergleich zu den Heizöllachenbränden waren in dieser Versuchsreihe in den Punkten *Löschdauer* und *Rückzündzeit* gegensätzliche Löschergebnisse zu beobachten. So zeigten alle Wiederholungsversuche mit CAF-nass das einheitliche Bild einer kürzeren Rückzündzeit und einer durch die niedrige Verschäumungszahl kaum beeinflussten Löschdauer. Die Rückbrandzeit des nassen Schaums war jedoch auch in dieser Versuchsreihe relativ hoch. CAF-trocken erzielte genau gegenteilige Ergebnisse: eine hohe Rückzünd- und eine geringe

Rückbrandzeit. Die Versuche zeigen, dass das Rückzündverhalten maßgeblich durch die Schichthöhe des Schaumes beeinflusst wird. Durch die Verdampfung des Schaumes an der heißen Oberfläche des Rückbrandgefäßes entstand in beiden Fällen (*CAF-nass* und *CAF-trocken*) um das Gefäß herum ein Krater in der Schaumschicht. Durch sein größeres Volumen neigte der trockene Schaum eher dazu, aus den umliegenden Bereichen in den Krater nachzufließen und die Flüssigkeitsoberfläche länger vor einer Rückzündung zu schützen, als es bei nassem Schaum der Fall war.

Die Rückbrandzeit wiederum wurde sehr stark durch den Wasseranteil des Schaumes bestimmt. Da dieser bei *CAF-nass* höher war als bei *CAF-trocken*, benötigte die Verdampfung des nassen Schaumes mehr Zeit, wodurch eine längere Rückbrandzeit erreicht wurde.

Das Rückzünd- und Rückbrandverhalten von *CAF-medium* kam nah an die Werte des trockenen *CAF* heran. Darüber hinaus zeichnete sich speziell *CAF (Y)-medium* durch kürzere Löschzeiten im Vergleich zu den nassen und trockenen Schäumen aus. Dabei machte es sich *CAF-medium* zunutze, von den guten Fließeigenschaften des *CAF-nass* und dem guten Deckvermögen von *CAF-trocken* zu profitieren.

Warum im Vergleich der unterschiedlichen *CAF (X)-Verschäumungszahlen* keine deutliche Abstufung der Löschzeiten festzustellen ist, konnte auf physikalischer Ebene nicht geklärt werden. Es wird vermutet, dass herstellereigene Funktionsadditive im Schaummittel einen im Rahmen der Versuche nicht beobachtbaren chemischen Einfluss auf den Löscheffekt ausübten.

Standardisierte Feststoff-Bemessungsbrände mit 5A-Holzrippen und einem halbautomatischen Löschvorgang schreiben sowohl *CAF-nass* als auch *CAF-medium* sehr gute Löscheigenschaften zu. *CAF-trocken* sollte dahingegen nicht zum Erstangriff eingesetzt werden. Aufgrund seines geringen Wasseranteils verfügt er über eine geringe Kühlwirkung, welche einen Löscherfolg wesentlich hinauszögert und das Risiko einer Rückzündung anhebt.

Die Versuchsreihe der Reifenbrände soll mit ihrem nicht genormten Aufbau in diese Betrachtung einbezogen werden. Denn hier war auch mit nur einem Wiederholungsversuch pro Setup gut zu erkennen, dass die Reifenstapel nach Löschversuchen mit *CAF-nass* und *CAF-trocken* zeitiger und 40 % häufiger rückzündeten als in Löschversuchen mit *CAF-medium*.

Mit den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit konnten die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Verschäumungszahl und Löschvermögen bei Klasse A- sowie Klasse B-Bränden bestätigt und darüber hinaus ausgebaut und spezifiziert werden. Es hat sich bewiesen, dass sich bei Feststoffbränden der Kühleffekt als Hauptlöscheffekt eines

CAF erweist, und dass daher beim Löschangriff stets ein nasser bis medium verschäumter Schaum zum Einsatz kommen sollte. Auch bei Flüssigkeitsbränden stellte sich CAF-medium aufgrund seiner Fließ- und Deckeigenschaften als am effizientesten heraus.

Es bleibt jedoch zu klären, warum Schäume auf Basis des Schaummittels Y, welches sich durch kürzere Benetzungszeiten auszeichnet, auch in der Flüssigkeitsbrandbekämpfung kürzere Löscheziten erzielten.

Auch das Phänomen, dass eine Veränderung der Verschäumungszahl bei CAF (X) nahezu keine Auswirkung auf die Löschdauer bei Flüssigkeitsbränden besaß, muss in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

In beiden Fällen liegt die Vermutung nahe, dass im Schaummittel enthaltene Funktionsadditive wie Frostschutzzusätze, Konservierungsstoffe und Schaumstabilisatoren einen chemischen Einfluss auf den Löscherfolg ausübten.

5.1.3 Löscheffizienz in Abhängigkeit der zur CAF-Herstellung verwendeten Wasserart

In der vorliegenden Forschungsarbeit befassen sich zwei Versuchsreihen mit den Auswirkungen von unterschiedlichen Wasserarten auf das Leistungsvermögen der zur Herstellung von CAF verwendeten Premixe. Diese Premixe wurden aus den Gewässertypen *vollentsalztes Wasser*, *künstliches Süß-* sowie *künstliches Meerwasser* gemäß DIN EN 1568-3 [49] hergestellt. In Laborversuchen wurden die unverschäumten Premixe der Bestimmung ihrer Netzfähigkeit und einer Kontaktwinkelanalyse unterzogen. Die Versuchsreihen zeigen, dass die Wasser-Schaummittellösungen mit vollentsalztem Wasser jeweils die längsten Benetzungszeiten und größten Kontaktwinkel aufweisen. Süß- und Meerwasser erfuhren durch eine Tensidzugabe eine ausgeprägtere Senkung ihrer Oberflächenspannung und folglich auch ihrer Benetzungszeiten sowie Kontaktwinkel.

Sowohl die Untersuchung der Benetzungszeiten als auch die Kontaktwinkelanalyse ergaben unter Berücksichtigung der ausgeprägten Standardabweichung keine eindeutigen Wirksamkeitsunterschiede zwischen den Premixen auf Süßwasser- bzw. Meerwasserbasis. So kann anhand dieser Arbeit die Annahme getroffen werden, dass die untersuchten Schaummittel keine Effektivitätseinbußen bei der Brandbekämpfung mit Meerwasser aufzeigen werden.

Im Rahmen der kleinmaßstäblichen *Indoor-Holzkrippenbrandversuche* (Kapitel 3.5) und *Indoor-Heptanlachenbrandversuche* (Kapitel 3.7) untersuchte Below [91], inwiefern die Ergebnisse der Laboruntersuchungen am unverschäumten Premix auf die Löscheffizienz des fertigen CAF zu übertragen sind. Es zeigte sich, dass CAF auf Basis von vollentsalztem Wasser sowohl in der Feststoff- als auch in der Flüssigkeitsbrandbekämpfung jeweils über

die geringsten Löscheffizienzen verfügt. Die künstlich hergestellten Süß- und Meerwässer schnitten durchschnittlich besser ab. Ihre Löscheffizienzen während der Indoor-Holzrippenbrandversuche und der Indoor-Heptanlachenbrandversuche lagen ungefähr auf dem Niveau des üblicherweise zum Einsatz kommenden Brunnenwassers.

Künstliches Meerwasser zeigte neben vollentsalztem Wasser den wesentlichsten Unterschied zu allen getesteten Wässern und damit den größten Einfluss auf die Eigenschaften des Löschmittels CAF. Die Verwendung von Meerwasser zog in beiden Brandversuchsreihen gehäuft eine geringere Verschäumung nach sich, was ausschlaggebend für längere Lösch- und geringere Rückzündzeiten war.

Die vorliegende Arbeit stellt im Einklang mit der Untersuchung von Below [91] eine in diesem Umfang einmalige Untersuchung der Tauglichkeit der auf Basis von Class-A-Schaummitteln und verschiedenen Wässern hergestellten Druckluftschäume dar. Die vier thematisch zusammenhängenden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Wassertypen gewähren einen Ausblick auf die möglichen, bei der CAF-Erzeugung zur Anwendung kommenden, Wassertypen und ihr Leistungsvermögen.

Zudem wurden die Labor- und Löschversuche möglichst normgetreu und bewusst mit den künstlich hergestellten Wässern durchgeführt, um eine leicht reproduzierbare Grundlage für weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet zu schaffen.

5.1.4 Auswirkungen der Strahlform auf die Löscheffizienz bei Krippenbränden

Bei der Innenbrandbekämpfung wird dem Löschmittel Wasser unter Verwendung eines Sprühstrahls eine höhere Effizienz zugeschrieben als bei der Ausbringung im Vollstrahl. Die Ursache dafür bildet der effektivere Wärmeübergang von der Flamme zum Löschmittel, der durch die geringe Tropfengröße des Sprühstrahls erreicht wird.

Einerseits bestätigen die Versuche diese Effizienzsteigerung bei der Verkleinerung der Tropfengröße, zeigen aber andererseits auf, dass der bessere Wärmeübergang des Sprühstrahls bei der Löschung von Brandkrippen nur unter bestimmten Voraussetzungen zum Tragen kommt. Das im Vergleich zu einem Vollstrahl geringe Austrittsmoment des Sprühstrahls beeinträchtigt die Wurfweite und die Fähigkeit des Löschmittels, bis zu tiefer gelegenen Glutnestern komplexer Brandobjekte durchzudringen. Die maximale Effizienz des Sprühstrahls wird also nur dann erreicht, wenn die Applikationsdistanz reduziert oder die Durchflussrate erhöht wird.

So ist der unter 2.2.3 beschriebene Löschvorgang mit einem Wassersprühstrahl ($\dot{v} = 1,40 \pm 0,15 \text{ l/min}$) im Abstand von $s = 0,5 \text{ m}$ zu einer 5A-Holzrippe weniger mit einer Innenbrandbekämpfung, als mit der Bekämpfung eines Wohnhausbrandes mittels eines von außen applizierten Sprühstrahls zu vergleichen. Das verschachtelte Krippengerüst glich dabei einem komplexen System aus zahlreichen Gängen und Räumen, welche das Eindringen des Löschwassers erschwerten. 70 % seines Wasservolumens gab

der Sprühstrahl an die Kühlung der Krippenaußenseiten ab. Die verbleibenden 30 % gelangten in den ersten Krippenkanal hinter der Krippenaußenseite, erreichten aber nicht das Krippenzentrum. Das Krippenzentrum stand also weiterhin in Vollbrand und sorgte mit der von ihm ausgehenden Wärmestrahlung dafür, dass der Löscherfolg nicht tiefer als bis in den ersten von vier Krippenkanälen vordrang.

Dahingegen erwies sich der Wasservollstrahl bei der Krippenbrandbekämpfung als sehr effizient. Mit dem ihm zugeschriebenen geringen Anteil an tatsächlich umgesetztem Löschwasser sollte der Vollstrahl ohne deutlich höheren Wasserverbrauch kein vergleichbares Löschergebnis zum Sprühstrahl erzielen können. Die Löschergebnisse zeigten aber, dass der Vollstrahl bei gleicher Applikationsrate und gleichem Löschabstand rund 80 % bessere Kühlkapazitäten bei 20 % geringerem Wasserverbrauch erreichte. Dass dabei nicht mehr ungenutztes Löschwasser in der Wanne unter der Krippe aufgefangen wurde als in einem Sprühstrahlversuch, deutet darauf hin, dass abfließendes Löschwasser aus den oberen Krippenschichten über tiefergelegene Schichten abließ und währenddessen weiter umgesetzt wurde. In diesem Fall ist anzunehmen, dass bei der Krippenbrandbekämpfung unter den Versuchsbedingungen der löschwirksame Anteil des Vollstrahls deutlich über dem in [68] genannten Wert von 5 bis 10 % liegt.

Anhand der Versuche kann festgehalten werden, dass sich Brandkrippen, deren Aufbau nach Anhang I der DIN EN 3-7:2007 erfolgt, für die Bewertung von Löschmitteln verschiedener Arten eignen. Eine verlässliche Charakterisierung der Löscheffizienz von Löschmitteln, die in unterschiedlichen Strahlformen ausgebracht werden, kann jedoch nur erfolgen, wenn Randparameter des Versuchsaufbaus, wie zum Beispiel der Löschabstand oder der Volumenstrom, an die jeweilige Strahlform angepasst werden. Eine Brandkrippe gemäß DIN EN 3-7:2007 stellt aufgrund ihrer komplexen Geometrie hohe Ansprüche an die durchdringende Fähigkeit der zu testenden Löschmittel und ist daher, unter Voraussetzung eines angemessenen Volumenstroms, eher zur Untersuchung eines Vollstrahls geeignet als zur Untersuchung eines Sprühstrahls.

5.2 Limitierung der Untersuchungsergebnisse

Alle in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die beiden verwendeten Class-A-Schaummittel und sind nicht auf andere Schaummittelarten zu übertragen. Jeder Schaummitteltypus ist durch spezielle Zusätze auf ein eigenes Einsatzgebiet abgestimmt. Deshalb werden Druckluftschäume, welche unter Verwendung eines der anderen in Tabelle 1 aufgeführten Schaummittel erzeugt wurden, ein von den vorliegenden Ergebnissen abweichendes Löschverhalten aufzeigen.

Zu Gunsten der Reproduzierbarkeit fanden viele Löschversuche im kleinen Maßstab statt. Die Löschmittelvolumenströme wurden in den meisten Fällen so an die Brandlast angepasst, dass diese nicht gleich beim ersten Löschstoß erlosch, aber zielführend nach und nach gelöscht werden konnte. Diese Anpassung hat zur Folge, dass sich die Löschergebnisse der Bemessungsbrände einzig und allein auf die nachfolgend aufgeführten, spezifischen Flüssigkeitsvolumenströme beziehen.

- Outdoor-Mischkrippenbrandversuche: $\dot{v} = 5,40 \pm 0,44 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{MW})$
- Indoor-Mischkrippenbrandversuche: $\dot{v} \approx 35,90 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{MW})$
- Indoor-Holzrippenbrandversuche: $\dot{v} = 2,80 \pm 0,30 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{MW})$
- Outdoor-Heizöllachenbrandversuche: $\dot{v} = 2,07 \pm 0,17 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{MW})$
- Indoor-Heptanlachenbrandversuche: $\dot{v} = 2,02 \pm 0,04 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{MW})$

Die in dieser Arbeit dargebotenen Aussagen bezüglich der Löschwirkung der getesteten Löschmedien beruhen auf den Versuchsergebnissen und gelten daher lediglich für das jeweilige Versuchssetup. Aufgrund der Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit zahlreichen älteren sowie aktuellen Erfahrungsberichten aus der Einsatzpraxis [2,3,6,92,93] ist jedoch anzunehmen, dass die während des Forschungsprojektes herausgestellten Tendenzen zur Löschwirkung von Wasser, Netzwasser und CAF zu großen Teilen auch allgemeine Gültigkeit besitzen. Vor einer vollständigen Generalisierung der getroffenen Aussagen wird ausdrücklich gewarnt, denn die Wirkung der Löschmedien ist von zahlreichen, den Löschvorgang beeinflussenden, Faktoren (u.a. Geometrie und materielle Zusammensetzung des Brandobjektes, Zusammensetzung des Löschmittels, Volumenstrom, Strahlform, Witterung, Ausbildungsstand des Einsatzpersonals, u.v.m.) abhängig.

Weitere Limitierungen der Untersuchungsergebnisse ergeben sich hauptsächlich aus den, in Kapitel 4 erläuterten, Fehlerquellen des Studiendesigns. So kann zum Beispiel die Beschaffenheit des Leitungs- bzw. Brunnenwassers dafür sorgen, dass sämtliche Löschergebnisse genaugenommen nur regionale Gültigkeit besitzen. Die voneinander bis zu 40 % abweichenden Benetzungszeiten von Schaummittellösungen in Berliner und Hamburger Leitungswasser geben Anlass zur Annahme, dass sich auch Löschergebnisse mit den Wässern aus verschiedenen Regionen unterscheiden. Die Auswirkungen der Wasserbeschaffenheit sollten im Fall eines Löschversuches aber weitaus geringer sein als bei labormaßstäblichen Benetzungstests.

Alle dargestellten Versuche sind so aufgebaut, dass sie möglichst einfach nachgestellt werden können. Die Betrachtung der vielfach angegebenen Standardabweichungen offenbart jedoch, dass jedes Löschergebnis mit einer Ungenauigkeit behaftet ist und dass es

aufgrund der in Kapitel 4 erläuterten Fehlerquellen, selbst bei einer exakten Reproduktion des Setups, zu Abweichungen in den Löschergebnissen kommen wird.

5.3 Schlussfolgerungen

Mit der Auswertung der durchgeführten Labor- und Brandversuchsreihen konnte das Ziel dieser Arbeit, *die Bestimmung der Löschwirkung und -effizienz von Druckluftschäum, umfassend erfüllt werden.*

Alle im Rahmen dieser Arbeit angestellten Untersuchungen, einschließlich der Labortests an den unverschäumten Wasser-Schaummittellösungen und sämtliche Löschversuche, ergaben übereinstimmende sowie plausible Ergebnisse, sodass der Schluss gezogen werden kann, dass das angewandte Forschungsdesign zur Bestimmung der Effizienz des Löschmittels CAF geeignet ist.

In allen Feststoffbemessungsbränden, mit denen die Löscheffizienz von CAF im Vergleich zu der Löscheffizienz von Wasser und Netzwasser untersucht wurde, erreichte CAF die Testkriterien für einen gelöschten Brand wesentlich früher als unverschäumte Löschmedien. Dabei benötigte CAF nur die Hälfte der Zeit, welche mit Wasser oder Netzwasser erforderlich war, um die Krippentemperatur dauerhaft auf unter 100 °C zu senken.

Die Outdoor-Löschversuche an eigens dafür entwickelten Mischbrandkrippen verdeutlichen die Löscheffizienz der getesteten Medien bei komplexen Mischbrandlasten. Der vollständige Löscherfolg mit CAF wurde dabei zwei Drittel früher erreicht als beim Löschvorgang mit Wasser bzw. 50 % eher als beim Löschvorgang mit Netzwasser. Der Löschwasserverbrauch konnte beim CAF-Löschangriff unter Versuchsbedingungen im Gegensatz zu Wasser und Netzwasser jeweils um mehr als die Hälfte gesenkt werden. Auch bei den Indoor-Holzrippenbränden war eine durchschnittlich 50 % höhere Löscheffizienz des Löschmittels CAF im Vergleich zu Wasser und Netzwasser zu beobachten. Die Löschwassereinsparung in dieser Versuchsreihe lag bei Verwendung von CAF bei rund einem Drittel.

Ein wesentliches Merkmal von CAF ist die hohe kinetische Energie des Löschmittels beim Austritt aus dem Strahlrohr. Zusammen mit seiner dünnwandigen Blasenstruktur kombiniert CAF so die Durchschlagkraft eines Wasservollstrahls mit dem hohen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis eines Wassersprühstrahls. Deshalb kann CAF aus relativ großer Entfernung zum Brandherd ohne Leistungseinbußen appliziert werden, was einen erheblichen Sicherheitsgewinn für das Einsatzpersonal mit sich bringt.

Seine kleinen Blasendurchmesser und sein geringes Drainageverhalten verleihen dem CAF eine hohe Stabilität und in dünnen Schichten aufgebracht auch ein gutes Haftvermögen an senkrechten oder über Kopf befindlichen Oberflächen. Poröse Materialien, wie z.B. Holz oder verkohlte Oberflächen einer Brandlast, absorbieren das Löschmittel sehr leicht und speichern es bis zu seiner vollständigen Verdampfung. Durch diesen Vorgang wird der Wärmeübergang vom Brand zum Löschmittel erhöht, die Effizienz des eingesetzten Löschwassers gesteigert und der Anteil des ungenutzt abfließenden, kontaminierten Löschwassers minimiert.

Das Anhaften von CAF an Oberflächen erhöht nicht nur die Sichtbarkeit und erleichtert die koordinierte Strahlrohrführung, es ermöglicht auch das vollflächige Abdecken einer Brandlast. So kann mit einer CAF-Schicht eine gasdichte Barriere zwischen der Brandlast und ihrer Umgebung geschaffen werden. Gefährdete Bereiche werden dabei vor Wärmestrahlung geschützt und vom Brand betroffene Stellen werden daran gehindert, brennbare Gase freizusetzen. Dadurch senkt sich das Entzündungs-, bzw. das Rückzündungsrisiko der Materialien.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die während der Feststoffbrandversuche festgestellte gesteigerte Löscheffizienz von CAF gegenüber den unverschäumten Löschmitteln Wasser und Netzwasser durch eine Kombination der Löscheffekte *Materialkühlung*, *Verdünnung brennbarer Gase* und *Ausbildung einer gasdichten Barriere* zwischen Sauerstoff und Brandstoff hervorgerufen wird.

Über die Feststoffbrände hinaus hat sich das Löschmittel CAF bei Flüssigkeitsbränden und außergewöhnlichen Brandszenarien wie Reifen- und Transformatorenbränden, bei denen ein Löschvorgang mit Wasser oder Netzwasser nicht durchgeführt werden kann bzw. sich als nicht effektiv erweist, bewährt. CAF schwimmt auf der Oberfläche brennender Flüssigkeiten, deckt diese flächig ab und erstickt deren Flammen binnen kurzer Zeit, indem er eine Barriere zwischen Brennstoff und Luftsauerstoff ausbildet. Die erstickende Wirkung des Löschmittels kommt auch bei Brandlasten zum Tragen, die durch ihre komplexe Struktur unzugängliche Brand- bzw. Glutnester beherbergen. Die Versuche mit außergewöhnlichen Brandlasten zeigen, dass sich für den ersten Löschangriff bei einem Brandereignis ein nasser bis medium verschäumter CAF ($VZ = 5 - 9$) als wirksam erweist. In diesem Bereich der Verschäumungszahlen erreicht der Schaum ein gutes Fließverhalten und einen Wasseranteil, der groß genug ist, um eine hohe Kühlwirkung zu erzielen. Nach der Unterdrückung der Flammen kann das Brandobjekt mit trockenem Schaum ($VZ > 10$) abgedeckt werden, um die Barriere zwischen Brandlast und Umgebungssauerstoff auszubauen.

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Löschmitteleffizienz ergeben für das Löschmittel CAF in allen durchgeführten Versuchsreihen eine Überlegenheit gegenüber den anderen getesteten Löschmedien. CAF ist ein vielseitig einsetzbares Löschmittel. Die Schaumerzeugung gelingt sowohl mit üblichem Leitungs- bzw. Brunnen- als auch mit Süß- und Meerwasser [91]. Die nachweislich kürzeren Löschzeiten mit geringerem Löschmittelaufwand minimieren den luft- sowie wassergetragenen Schadstoffeintrag in die Umwelt. Da die eingesetzten Class-A-Schaummittel leicht biologisch abbaubar sind, geht vom Löschmittel CAF in seiner getesteten Zusammensetzung keine höhere Umweltgefährdung als von normalem Löschwasser aus [94]. So verspricht dieses Löschmittel unter Beachtung seiner Einsatzgrenzen einen Zugewinn an Sicherheit für Einsatzpersonal, Bevölkerung, Sachwerte und Umwelt.

5.4 Ausblick

Obwohl die Bestimmung der Effizienz von CAF mit den beschriebenen Methoden zielführend erfolgte und mit der Validierung der Versuchsergebnisse insgesamt eine positive Bilanz zur Tauglichkeit der Untersuchungen gezogen werden konnte, ist das Versuchsdesign, wie nachfolgend erläutert, an einigen Stellen ausbaufähig und durch weiterführende Forschungsansätze zu optimieren.

Die neuentwickelte Mischbrandkrippe erfüllte ihren angedachten Einsatzzweck vollumfänglich und stellte mit ihrer komplexen Geometrie sowie ihrer materiellen Zusammensetzung eine große Herausforderung für die zu untersuchenden Löschmedien dar. Sie verfügte über einen stabilen und transportfähigen Aufbau, der auch beim Auftreffen großer Löschmittelvolumenströme nicht kollabierte. Auf der anderen Seite zeichnete sich die neue Mischbrandkrippe jedoch auch durch einen hohen Konstruktions- und Kostenaufwand aus. Um diese Aufwände zu senken, kann die Anzahl der unterschiedlichen Kunststoffe in der Krippe reduziert werden, was sich in erster Linie auf die Rauchgaszusammensetzung auswirken wird. Statt die Kunststoffe als Streifen in die Krippenkanäle einzuschieben und aufwendig zu fixieren, können sie auch in Form von Stäben in das Krippengerüst integriert werden. Dadurch wird der Konstruktionsaufwand erheblich gesenkt, aber auch das Brandverhalten der Krippe grundlegend geändert. Durch die Einsparungen kann die Stückzahl und somit die Versuchsanzahl erhöht werden, was sich wiederum positiv auf die Aussagekraft der Ergebnisse auswirkt.

Wenn es um die Verlässlichkeit der Daten geht, kommt auch der Einfluss des Strahlrohrführers ins Gespräch. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld der Indoor-Holzrippenbrandversuche an einer vollautomatischen Löschvorrichtung experimentiert, welche allerdings nicht erfolgreich eingesetzt werden konnte. Die mit Hilfe eines Drehtellers in eine gleichmäßige Rotation versetzte Krippe stand dabei einem

Schwenkarm gegenüber, der das Strahlrohr in waagerechter Position einspannte und dieses rhythmisch auf- und ab bewegte. Die vollautomatische Löschvorrichtung besitzt das Potential, erfolgreich eingesetzt werden zu können, wenn das Strahlrohr so ausgerichtet wird, dass der Löschmittelstrahl im rechten Winkel auf die Krippenaußenseite auftrifft. Zudem muss der Mechanismus der Schwenkbewegung so optimiert werden, dass diese im besten Fall keine Totpunkte besitzt und jeder Bereich auf der Vertikalachse gleichmäßig mit Löschmittel beaufschlagt wird. Die Geschwindigkeit der Schwenkbewegung sollte so an die Rotationsgeschwindigkeit des Drehtellers angepasst werden, dass das Brandobjekt in angemessener Weise mit Löschmittel beaufschlagt werden kann.

Im Projektverlauf stellte sich heraus, dass sich Unterschiede in der Wirksamkeit der Löschmedien am ehesten zeigen, wenn der Löschmittelvolumenstrom im Vergleich zur Brandleistung geringgehalten wird. Die Versuchsreihe der Indoor-Mischkrippenbrände erfolgte aus Gründen des Eigenschutzes mit einem deutlich größeren Löschmittelvolumenstrom als üblich. Durch den für die Brandlast überdimensionierten Löschstrahl kam es löschmittelunabhängig umgehend zum Löscherfolg. Wirksamkeitsunterschiede zwischen den Löschmedien konnten so kaum ausgemacht werden. Deshalb sollte bei einer Wiederholung dieser Versuchsreihe mit einer geringeren Applikationsrate gearbeitet werden.

Sofern möglich, sollten sämtliche weiterführende Brandversuche in einem innenliegenden Versuchsstand erfolgen. Wie sich im Laufe des Projektes herausstellte, unterliegen Löschversuche im Freien einem großen zufälligen Fehler durch Witterungseinflüsse. Je nach Ausmaß erschwert dieser Fehler die anschließende Versuchsauswertung oder macht die Versuchsdaten für eine zielgerichtete Analyse unbrauchbar. Die Durchführung der Löschversuche in einem geeigneten Brandraum zeichnet sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit und verlässliche Versuchsergebnisse aus und sollte daher stets Mittel der Wahl sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenabwehr“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates (2010): „Technischer Bericht Druckluftschaum (DLS)“.
- [2] Habermaier (1999): "Einsatz des Compressed Air Foam System bei der Berufsfeuerwehr Augsburg". Berufsfeuerwehr Augsburg, Amt für Brand- und Katastrophenschutz.
- [3] Braun, U. (1998). "Erfahrungsbericht über die Druckluftschaum-Brandbekämpfung (CAFS - Compressed Air Foam System)". Amt für Brand- und Katastrophenschutz, Berufsfeuerwehr Ingolstadt.
- [4] Knorr, T. (2017): „Feuerwehren in Deutschland mit CAFS-Fahrzeugen im Bestand“. Erhebung der Berliner Feuerwehr.
- [5] Taylor, R. G. (1997): „Compressed Air Foam Systems in limited staffing conditions“. Executive Fire Officer Program, National Fire Academy, S. 75-112
- [6] Stern, J. & Routley, J.G. (1996): "Class A Foam for Structural Firefighting". Technical Report Series of U.S. Fire Administration, USFA-TR-083.
- [7] Kim, A. K. & Crampton, G. P. (2009): "Evaluation of the Fire Suppression Effectiveness of Manually Applied Compressed-Air-Foam (CAF) System". Fire Technology 48, S. 549-564.
- [8] Rappsilber, T., Below, P. & Krüger, S. (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, S. 136-145.
- [9] Delichatsios, M. A. (1976): „Fire growth rates in wood cribs“. Combustion and Flame 27, S. 267-278.
- [10] Gross, D. (1962): "Experiments on the burning of cross piles of wood". Journal of Research, National Bureau of Standards 66C, S. 99-105.
- [11] Brein, D. & Schatz, H. (1975): „Modellbrandversuche zur Bestimmung des Brandablaufs von Feststoffbränden“. Forschungsbericht 27, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe.
- [12] McAllister, S. & Finney, M. (2013): "Effect of Crib Dimensions on Burning Rate". Proceedings of the Seventh International Seminar on Fire & Explosion Hazards 2013.
- [13] Deutsches Institut für Normung (2007): DIN EN 3-7 „Tragbare Feuerlöscher - Teil 7: Eigenschaften, Löschleistung, Anforderungen und Prüfungen", Anhang I, Prüfung des Löschvermögens. Europäisches Komitee für Normung, Berlin.
- [14] U. L. Inc (2004): "UL 711 Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers". American National Standards Institute.

- [15] Starke, H., Wienecke, F.-W., Grabski, R. & Schmeißer, R. (1998): „Feinverteiltes Wasser als Volumen und Oberflächenlöschmittel Teil 2“. Bericht 113, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Brandschutzforschung der Bundesländer.
- [16] Kutz, M. & Kohl, K.-J. (2012): „Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil II - Aufbau und Test einer Löschapparatur“. Bericht 167, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Brandschutzforschung der Bundesländer.
- [17] Kim, A. & Crampton, G. (2000): “A New Compressed-Air-Foam Technology”. National Research Council of Canada, Halon Options Technical Working Conference, S. 343–348.
- [18] Wang, X., Liao, Y. & Lin, L. (2009): „Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi-component compressed air foam“. Chinese Science Bulletin 54, S. 492-496.
- [19] Kerber, S. (2011): “Analysis of changing residential fire dynamics and its implications on firefighter operational timeframes”. Fire Technology 48, S.865–870.
- [20] Witkowski, A., Stec, A.A., Hull, T.R. (2016): “Thermal decomposition of polymeric materials”. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Editor: Hurley, M.J., 5. Auflage, Springer Verlag, S. 177–254.
- [21] Bryner, N. P. & Mulholland, G. W. (1991): „Smoke emission and burning rates for urban structures“. Atmospheric Environment 25A, No. 11, S. 2553-2562.
- [22] Madrzykowski, D. & Stroup, D. (1998): “Demonstration of Biodegradable, Environmentally Safe, Non-Toxic Fire Suppression Liquids.” NISTIR 6191, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [23] Quintiere, J. G. & McCaffrey, B. J. (1980): “The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure: Volume I”. NBSIR 80-2054, National Bureau of Standards.
- [24] Bundesverband Technischer Brandschutz (2010): "Löschmittel im Überblick". BrandschutzSpezial Feuerlöschgeräte/ Löschmittel/ Löschwassertechnik.
- [25] Weiß, U. (2009): „Fein zerstäubt“. Chemie Technik, April 2009, S. 76–78.
- [26] Kooij, S., Sijs, R., Denn, M. M., Villermaux, E. & Bonn, D. (2018): “What Determines the Drop Size in Sprays?”. Physical Review X8, 031019, American Physical Society.
- [27] Vries, H. de (2008): "Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum". Einsatzpraxis, 3. Auflage, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Landsberg.
- [28] Messerschmid, R. (2004): „Zerstäubung von Flüssigkeiten in einer nicht angepassten Lavalldüse“. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- [29] Laundess, A. J., Rayson, M. S., Dlugogorski, B. Z., & Kennedy, E. M. (2011): “Small-scale test protocol for firefighting foams DEF(AUST)5706: Effect of bubble size distribution and expansion ratio”. Fire Technology 47, S. 149–162.

- [30] Magrabi, S.A., Dlugogorski, B.Z. & Jameson, G.J. (2002): "A comparative study of drainage characteristics in AFFF and FFFP compressed-air fire-fighting foams". *Fire Safety Journal* 37, S. 21–52.
- [31] Ulrich, H., Gierig, M., Stockerl, R. & Schwarz, J. (2018): „Umweltschonender Einsatz von Feuerlöschschäumen“. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz / Bayerisches Staatsministerium des Innern und für Integration / Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2. Auflage.
- [32] Hegemann, J.E. (2019): „Die 11 größten Irrtümer zu Löschschaum“. *Feuerwehrmagazin*, 10. April 2019. <https://www.feuerwehrmagazin.de/wissen/die-11-groessten-irrtuemer-zu-loeschschaum-60101> (Zugriff: 13.08.2019).
- [33] Deutsches Institut für Normung (2014): EN 16327 „Feuerwehrwesen - Druckzumischanlagen (DZA) und Druckluftschäumenanlagen (DLS)". Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
- [34] Laundess, A.J., Rayson, M. S., Dlugogorski, B. Z. & Kennedy, E. M. (2012): "Suppression performance comparison for aspirated, compressed-air and in situ chemically generated class B foams". *Fire Technology* 48, S. 625–640.
- [35] Zhao, H. & Liu, J. (2016): "The feasibility study of extinguishing oil tank fire by using compressed air foam system". *Procedia Engineering* 135, S. 61–66.
- [36] Braun, U., Orlik, L. & Schumann, U. (2015): "Leistungsbuch Druckluftschäumen". Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenabwehr“ des Technisch-Wissenschaftlichen Beirates, AG Druckluftschäumen.
- [37] Rie, D., Lee, J. & Kim, S. (2016): "Class B Fire-Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air-to-Aqueous Foam Solution Mixing Ratios". *Applied Sciences* 191, S. 1–12.
- [38] Lyckeback, E. & Öhrn, J. (2012): „Investigation on the gas-cooling effects of CAFS“. Universität Lund, Report 5394.
- [39] 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, S. 3-14.
- [40] Sthamer, O. & Gorski, M. (2017): "Schaum gegen Feuer - Leitfaden Schaumkonzept für kommunale Feuerwehren". Fabrik chemischer Präparate von Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG, 3. Auflage. https://www.sthamer.com/de/pdf/prospekte/Feuerwehr_Leitfaden2017_de.pdf (Zugriff 30.06.2020).
- [41] Deutsches Institut für Normung (2005): EN 2 „Classification of fires“. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
- [42] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (1999): Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe – VwVwS, Banz. Nr. 98a.

- [43] Kunkelmann, J. (2014): „Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in ausgebauten Dachgeschossen“. Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Brandschutzforschung der Bundesländer, Bericht 169.
- [44] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union (2006): „Richtlinie 2006/122/EG“. Amtsblatt der Europäischen Union, S. 372/32-372/34.
- [45] Umweltbundesamt (2009): „Per- und polyfluorierte Chemikalien; Einträge vermeiden – Umwelt schützen“. Hintergrundpapier des Umweltbundesamtes. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3812.pdf> (Zugriff 30.06.2020)
- [46] Umweltbundesamt (2013): "Fluorhaltige Schaumlöschmittel umweltschonend einsetzen". Ratgeber des Umweltbundesamtes. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/fluorhaltige_schaumloeschmittel_version_21.6.2013a.pdf (Zugriff 30.06.2020)
- [47] Vries, H. de (2000): „Untersuchungen zur Optimierung der Bekämpfung von Feststoffbränden mit Wasser und Schaum im mobilen Einsatz der Feuerwehren“. Dissertation D 468, Bergische Universität – GH Wuppertal.
- [48] Staatliche Feuerweherschule Würzburg (2016): „Winterschulung 2015/2016, Brandbekämpfung mit Schaum“. Sonderdruck zur Brandwacht 6/2015.
- [49] Deutsches Institut für Normung (2018): EN 1568-3 „Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil 3: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwertschaum zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten“, Anhang H, Bestimmung des Löschvermögens. Europäisches Komitee Für Normung, Brüssel.
- [50] Braun, U. (2010): "Druckluftschaum". Die Roten Hefte (211), 1. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
- [51] National Fire Protection Association (2010): NFPA 11 "Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam", Quincy.
- [52] Innenministerium und Landesbranddirektor des Landes Baden-Württemberg (2006): „Bericht zum Einsatz „Tübingen, Reutlinger Straße 34/1“ am 17. Dezember 2005“. <http://atemschutzunfaelle.de/download/Unfaelle/u20051217-tuebingen-bericht-unfallkommission.pdf>, (Zugriff 19.06.2019).
- [53] Föhl, A. & Schaaf, J. (2008): "Untersuchung der Haltbarkeit von Druckluftschaum führenden Feuerweherschläuchen unter Wärmebeaufschlagung im Vergleich zu Wasser führenden". Bericht 150, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- [54] Braun, U. (2014): Brandschutz Deutsche Feuerwehrzeitung 2/14. „Brandbekämpfung mit Druckluftschaum“, S. 102 – 108.

- [55] Demel, J.T. (2006): „Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von in Löschfahrzeugen eingebauten Druckluftschäumen bei Brandeinsätzen unter besonderer Berücksichtigung des Unfallschutzes“. Hausarbeit, Berufsfeuerwehr Hagen. <https://www.demel-net.de/assets/Uploads/PDFs/Einsatzmoeglichkeiten-Druckluftschaum.pdf> (Zugriff: 19.06.2020)
- [56] Deutsches Institut für Normung (2000): EN 1772 „Bestimmung des Tauchnetzvermögens“. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
- [57] Deutsches Institut für Normung (2014): DIN 55660-6 „Beschichtungsstoffe – Benetzbarkeit – Teil 6: Messung des dynamischen Kontaktwinkels“. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [58] Below, P. (2017): „Bestimmung des Tauchnetzvermögens“. Kooperation in Versuchsplanung und Versuchsdurchführung.
- [59] Wesch, A., Dahmen, N., Ebert, K. & Schön, J. (1997): „Grenzflächenspannungen, Tropfengrößen und Kontaktwinkel im Zweiphasensystem H₂O/CO₂ bei Temperaturen von 298 bis 333 K und Drücken bis 30 MPa“. Chemie Ingenieur Technik 69, S. 97-99.
- [60] Lauth, G.J. & Kowalczyk, J. (2016): „Einführung in die Physik und Chemie der Grenzflächen und Kolloide“. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- [61] Braun, C. (2016): „Entwicklung und Festlegung eines Bemessungsbrandes auf Basis einer neuartigen Mischbrandkrippe in Vorbereitung auf Brandversuche mit Druckluftschäumen“. Masterarbeit, Otto-von-Guericke- Universität, Magdeburg.
- [62] U. L. Inc (2004): „UL 711 Rating and Fire Testing of Fire Extinguishers“. American National Standards Institute.
- [63] Micro Foam Unit, CAF-Attack-Air. <https://www.micro-foam-unit.com/produkte/schaumtrainer-cafs-attack-air/> (Zugriff 21.09.2018).
- [64] Büthe, N. (1999): „Elastomerbrände - Modellbrandversuche, Analytik und Bewertung“. Dissertation, Universität Hannover.
- [65] Krüss (2007): „Praxis der Kontaktwinkelmessung (2)“. Technical note TN312d. https://www.kruss-scientific.com/fileadmin/user_upload/website/literature/kruss-tn312-de.pdf (Zugriff 12.07.2019).
- [66] Wenzel, R. N. (1936): „Resistance of solid surfaces to wetting by water“. Industrial and Engineering Chemistry 28, S. 988-994.
- [67] Wang, Z., Wang, W. & Wang, Q. (2016): „Optimization of water mist droplet size by using CFD modeling for fire suppressions“. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 44, S. 626–632.
- [68] Wieder, M., Smith, C.M. & Brakhage, C. (1996): „Principles of Foam Fire Fighting“. International Fire Service Training Association, Fire Protection Publications.
- [69] Huggett, C. & Levin, B.C. (1987): „Toxicity of the pyrolysis and combustion products of poly (vinyl chlorides): a literature assessment“. Fire and Materials 11, S. 131–142.

- [70] HM Fire Service Inspectorate Publications Section (2000): "Fire Service Manual, Volume 1 – Fire Service Technology, Equipment and Media. Firefighting Foam – Technical". The Stationery Office, London.
https://www.ukfrs.com/sites/default/files/2017-09/Fire%20Service%20Manual_Volume%201%20-%20Fire%20Service%20Technology%20Equipment%20and%20Media%20-%20Firefighting%20Foam_Technical.pdf (Zugriff 19.06.2020).
- [71] Husted, B.P., Holmstedt, G. & Hertzberg, T. (2004): "The physics behind water mist systems". Proceedings of International Water Mist Association Conference 2004.
- [72] Rempe, A. (2004): „Praxishandbuch für den betrieblichen Brandschutz“. WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, Grundwerk einschließlich 42. Aktualisierungs- und Ergänzungslieferung.
- [73] Ratz, B. (2016): „Brennen und Löschen“. Lehrvortrag, Berufsfeuerwehr Jena.
http://www.feuerwehr-jena-goeschwitz.de/uploads/data/tflehrgang2016/Brennen_und_Loeschen_JENA.pdf (Zugriff 09.08.2019).
- [74] McDonough, J. (2018): „The Science of Water Extinguishment“.
<https://www.firehouse.com/operations-training/hoselines-water-appliances/article/12395735/the-science-of-water-extinguishment-international-innovations-john-mcdonough> (Zugriff 09.08.2019).
- [75] Steinauer, B., Mayer, G. & Kündig, P. (2007): „Brandversuche in Straßentunneln - Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung“. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau B57.
- [76] DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (2012): Statuspapier „Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung“.
https://dechema.de/processnet_media/auswirkungsbetrachtungen.pdf (Zugriff 18.06.2020).
- [77] Deutsches Institut für Normung (1972): DIN 1319 „Grundbegriffe der Meßtechnik – Begriffe für die Fehler beim Messen“. Ausschuss für Einheiten und Formelgrößen (AEF) im Deutschen Normenausschuss (DNA).
- [78] Deutsches Institut für Normung (1996): DIN 1319 „Grundlagen der Meßtechnik – Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße Meßunsicherheit“. Normenausschuss für Einheiten und Formelgrößen (AEF) im Deutschen Institut für Normung e.V.
- [79] Blüm, P. (2002): „Einführung zur Fehlerrechnung im Praktikum“. Skript, Universität Karlsruhe.
<http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/allgemeines/script-Fehleranalyse.pdf> (Zugriff 26.06.2019).
- [80] Maul, C. & Dammeyer, T. (2012): „Messfehler, Fehlerberechnung und Fehlerabschätzung“. Skript, TU Braunschweig.
<https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/pci/fehlerrechnung.pdf> (Zugriff 01.07.2019).

- [81] Reblu GmbH: „Test Wasserhärte“. <http://www.wasserhaerTE-deutschland.de/> (Zugriff 01.08.2019)
- [82] International Organization for Standardization (2015): ISO 19702 “Guidance for sampling and analysis of toxic gases and vapours in fire effluents using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy”.
- [83] Dubois, A. (2015): „Inter-Laboratory comparison related to railway French and European fire tests“. Eurocomparison 2015 Report, Certifer, Valenciennes.
- [84] Newport Electronics GmbH: „Thermoelement-Referenztabellen Typ K, Nickel-Chrom und Nickel-Aluminium“. <https://www.omega.de/temperature/Z/pdf/z204-205iec.pdf> (Zugriff 10.07.2019).
- [85] Medtherm Corporation (2016): „Certificate of calibration No. 19790-1, 19790-2, 19790-3“
- [86] Agilent Technologies (2011): „Agilent 34970A Messdatenerfassungs- / Schalt-System“. Produktinformation. <https://manualzz.com/doc/706431/agilent-34970a-messdatenerfassungs---schalt-system> (Zugriff 11.07.2019)
- [87] Melcher, T., Zinke, R., Trott, M. & Krause, U. (2016): “Experimental investigations on the repeatability of real scale fire tests”. Fire Safety Journal 82, S. 101–114.
- [88] Krüger, S., Raspe, T. & Rappsilber, T. (2017): „Quantitative Rauchgasanalyse mittels FTIR-Spektroskopie - Anforderungen, Kalibrierung, Reproduzierbarkeit“. Tagungsband, 5. Magdeburger Brand- und explosionsschutztag, Block 1.2.1.
- [89] Rudolph, M. (2019), Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Fachbereich 2.2 - Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme. Interview mit einem Experten in der Wärmestrahlungsmessung, Berlin, 02.08.2019, durchgeführt von Rappsilber, T..
- [90] Föhl, C.A. (2004): „Ermittlung der Anforderungen an Druckluftschaumsysteme im Löscheinsatz“. Brandschutzforschung der Bundesländer, Forschungsbericht 140, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe.
- [91] Below, P. (2018): „Indoor-Holzkippenbrandversuche und Indoor-Heptanlachenbrandversuche: Untersuchung des Einflusses der zur CAF-Herstellung verwendeten Wasserart auf die Löscheigenschaften“. Kooperation in Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung. Daten zur späteren Verwendung in der bislang unveröffentlichten Dissertation „Parameter der Schaumerzeugung und deren Einfluss auf die Löschwirkung“.
- [92] Berliner Feuerwehr (2014): „Jahresbericht 2013“. <https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/Publikationen/Jahresberichte/jahresbericht2013.pdf> (Zugriff: 23.08.2019).
- [93] Orlik, L. (2017): „Wo hakt es bei Druckluftschaumeinsätzen – Auswertung des Forschungsprojektes AERIUS zu CAFS-Einsätzen in Berlin“. https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/Forschung/aerius/AERIUS_Auswertung_CAFS_Einsaetze_Berlin.pdf (Zugriff: 26.08.2019).

- [94] Darbanan, A. F. (2020): „Environmental impacts of firefighting foams“. Unveröffentlichte Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.