

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



Untersuchung fluortensidfreier Löschmittel  
und geeigneter Löschverfahren zur  
Bekämpfung von Bränden häufig  
verwendeter polarer (d. h.  
schaumzerstörender) Flüssigkeiten

# 187

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



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

Forschungsbericht Nr. 187

**Untersuchung fluortensidfreier Löschmittel und  
geeigneter Löschverfahren zur Bekämpfung von  
Bränden häufig verwendeter polarer (d. h.  
schaumzerstörender) Flüssigkeiten**

von

Dipl.-Phys. Karola Keutel

Dipl.-Phys. Mario Koch (Projektleiter)

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge  
Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr -

Heyrothsberge

Februar 2016

## BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: <b>187</b>		Titel des Berichtes: <b>Untersuchung fluortensidfreier Löschmittel und geeigneter Löschverfahren zur Bekämpfung von Bränden häufig verwendeter polarer (d. h. schaumzerstörender) Flüssigkeiten</b>		ISSN: <b>0170-0060</b>	
Autoren: Dipl.-Phys. Karola Keutel, Dipl.-Phys. Mario Koch		durchführende Institution: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr - Biederitzer Straße 5 D-39175 Biederitz / OT Heyrothsberge Abteilungsleiter: Dr. rer. nat. Jan Voigt			
Nummer des Auftrages: <b>86 (3/2014)</b>		auftraggebende Institution: Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung			
Datum des Berichtes: <b>Februar 2016</b>					
Seitenzahl: <b>72</b>	Bilder: *) <b>26</b>	Tabellen: <b>11</b>	Literaturverweise: <b>63</b>		
<b>Kurzfassung:</b> <p>Fluorhaltige Schaumlöschmittel sind bei den Feuerwehren hoch angesehen als Löschmittel für polare Flüssigkeiten. Sie enthalten oberflächenaktive poly- oder perfluorierte Chemikalien. Dadurch wird die Löschwirkung gesteigert und eine Rückzündung verhindert. Seit Juni 2011 dürfen Perfluorooctanesulfonic Acid (PFOS)-haltige Schaumlöschmittel in Feuerwehren nicht mehr vorhanden sein. Damit begannen Forschungseinrichtungen und Unternehmen, mit der Suche und Erforschung alternativer Möglichkeiten PFOS in Feuerlöschschäumen zu ersetzen. Diese Aktivitäten sind nicht abgeschlossen. Jedoch existieren bei den deutschen Feuerwehren bisher kaum Erfahrungen mit solchen Schaumlöschmitteln.</p> <p>Derzeit besteht die Meinung, dass die zur Verfügung stehenden Ersatzstoffe im Vergleich mit fluortensidhaltigen Schaumlöschmitteln ein schlechteres Löschvermögen besitzen. Unklar ist, ob die Ergebnisse der DIN EN 1568-4-Prüfungen auf andere häufig verwendete, brennbare, polare Flüssigkeiten und Handelsprodukte übertragen werden können.</p> <p>In diesem Bericht werden sechs fluorfreie alkoholbeständige Schaumlöschmittel an fünf polaren Brennstoffen getestet und einem allgemein verwendeten AFFF-AR Schaumlöschmittel gegenübergestellt. Die hier dargestellten Ergebnisse sollen aufzeigen, ob diese verfügbaren fluorfreien Löschschaummittel tatsächlich Alternativen zu dem altbewährten fluorhaltigen AFFF-Schaumlöschmittel darstellen.</p>					
<b>Schlagwörter:</b> Schaumlöschmittel, polare Flüssigkeiten, fluorfrei, Kleinlöschversuche, Löszeit, Rückbrandbeständigkeit, Viskosität, Leitfähigkeit, Drainage, Verschäumung					

\*) Farbseiteninformationen des Forschungsberichtes auf CD-ROM können bei Kostenerstattung von 5 € beim IBK Heyrothsberge, Abteilung Forschung - IdF -, Biederitzer Str. 5, 39175 Biederitz / OT Heyrothsberge, abgefordert werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>1</b>
Abkürzungen	3
Symbole	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>7</b>
<b>2 GRUNDLAGEN</b>	<b>9</b>
2.1 Feuerlöschschäume	9
2.2 Wirkungsweise Schaum	11
2.3 Problematik des Fluors in Feuerlöschschäumen	12
2.4 Normen	14
<b>3 BRENNSTOFFE UND SCHAUMMITTELKONZENTRAT</b>	<b>16</b>
3.1 Polare brennbare Flüssigkeiten	16
3.2 Auswahl der polaren Brennstoffe	17
3.3 Datenerhebung zur Schaummittelumstellung bei deutschen Feuerwehren	19
3.4 Auswahl der fluorfreien alkoholresistenten Schaumlöschmittel	21
<b>4 EXPERIMENTELLER AUFBAU</b>	<b>23</b>
4.1 Szenario für Schaumlöschversuche	23
4.2 Versuchsdurchführung	25
4.3 Bestimmung der Beurteilungskriterien	26
<b>5 ERGEBNISSE DER SCHAUMLÖSCHMITTELUNTERSUCHUNG</b>	<b>28</b>
5.1 Ausgewählte Eigenschaften des Schaummittelkonzentrats	28
5.2 Ausgewählte Eigenschaften der Schaummittellösung	33
5.3 Ergebnisse der Kleinlöschversuche	36
5.4 Bewertung der Umweltverträglichkeit	48
<b>6 VERGLEICHENDES FAZIT ZU DEN UNTERSUCHTEN LÖSCHSCHAUMMITTELN</b>	<b>50</b>
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>51</b>
<b>LITERATUR</b>	<b>54</b>
<b>ANHANG</b>	<b>I</b>
A1: Spezifikation Isopropanol	i

A2:	Spezifikation Aceton	ii
A3:	Spezifikation N-Methyl-2-Pyrrolidon	iii
A4:	EG-Sicherheitsdatenblattauszug von TAMOIL/HEM (E10)	iv
A5:	EG-Sicherheitsdatenblattauszug von Greenline (E85)	v
A6:	Ergänzungsgrafiken zur Viskosität	vi
A7:	NMR-Spektrum für Schaumlöschmittelprobe 2	vii
A8:	Normierte Kontrollzeiten	viii
A9:	25 % Rückbrandzeit ohne NMP	ix

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AFFF	Aqueous Film Forming Foam (wasserfilmbildende Schaummittel)
AR	Alkoholresistent, speziell alkoholbeständige Schaummittel
ATR-FTIR Spektroskopie	Attenuated Total Reflection Fourier Transformed Infrared, dt.: abgeschwächte Totalreflexion Fourier-Transformations-Infrarot Spektroskopie
CAFS	Compressed Air Foam System (Druckluftschaumerzeugungssystem)
EU	Europäische Union
E10	Kraftstoff Super E10
E85	Kraftstoff Bioethanol E85
FFFP	Filmbildende Fluorproteinschaummittel
FP	Fluor-Proteinschaummittel
MBS	Mehrbereichsschaummittel
NMR Spektroskopie	Nuclear-Magnetic-Resonance, dt.: Kernresonanzspektroskopie
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P	Proteinschaummittel
PFC	Poly- oder perfluorierte Chemikalien
PFOA	Perfluorooctansäure
PFOS	Perfluorooctansulfat
PTF	Perfluortenside
S	Synthetische Schaummittel
VwVwS	Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe
WGK	Wassergefährdungsklasse

## Symbole

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
$\rho_{\text{Schaummittellösung}}$	Dichte der Schaummittellösung
$\mu$	Dipolmoment eines Moleküls
$\sigma$	Leitfähigkeit
a	Regressionskonstante
b	Regressionsgewicht
D	Schergefälle
$m_{\text{Schaummittellösung}}$	Masse der Schaummittellösung

p	Druck
q <sub>i</sub>	Punktförmige Teilladung
q	Wärmestromdichte
r	Abstand
R <sup>2</sup>	Korrelationskoeffizient/Bestimmtheitsmaß
t <sub>90 %</sub>	90 %-Kontrollzeit
t <sub>99 %</sub>	99 %-Kontrollzeit
t <sub>Lösch</sub>	Löschzeit
T	Temperatur
T <sub>F</sub>	Flammpunkt
T <sub>S</sub>	Siedetemperatur
T <sub>Z</sub>	Zündtemperatur
V <sub>Schaummittellösung</sub>	Volumen der Schaummittellösung
V <sub>Schaumvolumen</sub>	Schaumvolumen
VZ	Verschäumungszahl
x	Unabhängige Variable
x	Prozentuale Zumischung
y	Abhängige Variable



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schaummittelklassen in Normen	10
Abbildung 2: Strukturformel der PFOA	13
Abbildung 3: Strukturformel des PFOS	13
Abbildung 4: Entwicklung des Biokraftstoffverbrauchs im Verkehrssektor der EU [37]	17
Abbildung 5: Verbreitung der Schaummittel bei den Feuerwehren.	20
Abbildung 6: Schematischer Aufbau des Szenarios für Kleinlöschversuch	23
Abbildung 7: Experimenteller Aufbau bei den Kleinlöschversuchen	23
Abbildung 8: Beispiel für den Versuchsablauf eines Kleinlöschversuchs	25
Abbildung 9: Dynamische Viskosität als Funktion des Schergefälles für die untersuchten Schaumlöschmittel bei einer Temperatur von 10 °C	29
Abbildung 10: Dynamische Viskosität als Funktion der Temperatur T bei einem Schergefälle $D = 375 \text{ s}^{-1}$ für die untersuchten Schaumlöschmittel	29
Abbildung 11: Leitfähigkeit als Funktion der Zumischung für die untersuchten Schaumlöschmittel	31
Abbildung 12: Brandkontroll- und Löschzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff Aceton	37
Abbildung 13: Brandkontroll- und Löschzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff Isopropanol	38
Abbildung 14: Brandkontroll- und Löschzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff NMP	39
Abbildung 15: Brandkontroll- und Löschzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff E10	40
Abbildung 16: Brandkontroll- und Löschzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff E85	40
Abbildung 17: Vergleich der normierten Löschzeiten der fluorfreien Schaumlöschmittel für die fünf Brennstoffe	41
Abbildung 18: Gemittelte 25 %-Rückbrandzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für die fünf Brennstoffe	42
Abbildung 19: Vergleich der normierten 25 %-Rückbrandzeiten der fluorfreien Schaumlöschmittel für die fünf Brennstoffe	43
Abbildung 20: Empor gestiegene Gasblasen im Schaum	44
Abbildung 21: Geisterflammen beim Einstellen des Rückbrandgefäßes	44
Abbildung 22 : Zylinderbildung des Schaums um Rückbrandgefäß	45
Abbildung 23: Zylinderbildung des Schaums im Infrarotbild	45

Abbildung 24 : Rückbrand durch Schaumschicht	46
Abbildung 25 : Beginnender Rückbrand durch zerstörte Schaumschicht	46
Abbildung 26 : Rückbrand nach zerstörter Schaumschicht beim NMP	47

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Normen zur Beurteilung von Schaummitteln	14
Tabelle 2: Elektrische Dipolmomente verschiedener Flüssigkeiten [34-35]	16
Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Brennstoffe und ihrer Eigenschaften	18
Tabelle 4: Gegenüberstellung von fluorfreien alkoholbeständigen Schaumlöschmitteln und dem Referenzschaumlöschmittel	22
Tabelle 5: Ergebnisse der linearen Regression für die Leitfähigkeiten der untersuchten Löschschaummittel	32
Tabelle 6: Ermittelte Verschäumungszahlen für die untersuchten Schaumlöschmittel	34
Tabelle 7: Ermittelte Wasserhalb- und Wasserviertelzeit für die untersuchten Schaumlöschmittel	35
Tabelle 8: Auftreten von Geisterflammen beim Einstellen des Rückbrandgefäßes	44
Tabelle 9: Zylinderbildung für die verschiedenen Schaumlöschmittel-Brennstoff-Kombinationen	45
Tabelle 10: Rückbrand durch Schaumschicht	47
Tabelle 11: Gegenüberstellung der ermittelten Schaumlöschmitteleigenschaften	50

# 1 Einleitung

In der Brandbekämpfung werden neben Wasser auch Schaumlöschmittel eingesetzt. Diese können in fluorhaltige und fluorfreie Schaumlöschmittel unterschieden werden. Insbesondere stellen Brände mit polaren Flüssigkeiten, d. h. hydrophilen Flüssigkeiten, eine Herausforderung beim Löschen dar. Standardmäßig verwendete Schäume können sich in polaren Flüssigkeiten auflösen und/oder werden von ihnen zersetzt.

Zurzeit sind fluorhaltige Schaumlöschmittel (Aqueous Film Forming Foam – AFFF, Aqueous Film Forming Foam alcohol resistant – AFFF-AR, Filmbildende Fluor-Proteinschaummittel – FFFP) weit verbreitet bei den Feuerwehren, welche die Möglichkeit bieten, polare Flüssigkeiten zu löschen. Sie enthalten oberflächenaktive poly- oder perfluorierte Chemikalien (PFC), die häufig als Perfluortenside (PFT) bezeichnet werden. Als Folge ihrer Eigenschaft, dünne Filme auszubilden, unterdrücken sie bei brennenden Oberflächen oder geschmolzenen Oberflächen die Bildung von Emulsionen aus Brennstoff und Schaum. Dadurch wird die Löschwirkung gesteigert und zugleich eine Rückzündung verhindert.

Perfluoroktansäure (Perfluorooctane Acid – PFOA) und Perfluoroktansulfonsäure (Perfluorooctanesulfonic Acid – PFOS) sind die wesentlichen perfluorierten Chemikalien. PFOA wird in geringen Mengen in Schaumlöschmitteln eingesetzt und PFOS wurde bis vor einigen Jahren in Schaumlöschmitteln verwendet. Seit Juni 2011 dürfen PFOS-haltige Schaumlöschmittel auch in den Beständen der Feuerwehren nicht mehr vorhanden sein [1]. Der Ersatz von PFOS erfolgte durch sogenannte Fluortelomere, welche teil- oder polyfluorierte Chemikalien sind.

Poly- und perfluorierte Chemikalien wurden wissenschaftlich in Gewässern und Sedimenten ebenso wie in Lebewesen nachgewiesen [2-6]. In der Natur sind sie generell sehr schwer oder gar nicht abbaubar. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass diese Chemikalien langfristig den Menschen und die Umwelt nachhaltig negativ beeinträchtigen. Auf Grund ihres Umweltverhaltens ist anzunehmen, dass fluortensidhaltige Schaumlöschmittel in absehbarer Zeit nicht mehr eingesetzt werden.

Seit der Bekanntgabe der EU-Richtlinie [1] begannen nationale und internationale Forschungseinrichtungen sowie ein Großteil der Unternehmen, welche Feuerlöschschäume in ihrem Portfolio aufweisen, mit der Suche und Erforschung alternativer Möglichkeiten PFOS in Feuerlöschschäumen zu ersetzen. Diese Aktivitäten sind derzeit nicht abgeschlossen, sondern halten weiterhin an [7-10]. Sie werden in Deutschland forciert durch die Bestrebungen [11-14] vom Umweltbundesamt (UBA), dem deutschen Feuerwehrverband (DFV), dem Werkfeuerwehrverband Deutschland e. V. (WFV Deutschland), der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland (AGBF Bund) und der Innenministerkonferenz (IMK) über dieses Problem aufzuklären und den deutschen Feuerwehren optimale Arbeitsmittel zur Brandbekämpfung in die Hand zu geben.

Die gegenwärtigen Produkte der Schaumhersteller versprechen fluorfrei zu sein. Jedoch existieren bei den deutschen Feuerwehren bisher kaum Erfahrungen mit solchen Schaumlöschmitteln. Gleichfalls bewerten entsprechende Studien entweder

nur wenige Schaumlöschmittel [15] oder sie beziehen sich auf ausgewählte Brennstoffe, die den Einsatzszenarien von speziellen Prüfnormen wie in [16] genügen.

Derzeit besteht die Meinung, dass die zur Verfügung stehenden Ersatzstoffe im Vergleich mit fluortensidhaltigen Schaumlöschmitteln zumindest mit den zur Prüfung [17] verwendeten Stoffen Aceton und Isopropanol ein schlechteres Löschvermögen besitzen. Unklar ist, ob die Ergebnisse der Prüfungen mit Aceton und Isopropanol auf andere häufig verwendete, brennbare, polare Flüssigkeiten und Handelsprodukte übertragen werden können. Ebenso scheinen unterschiedliche Verfahren zur Schaumerzeugung Einfluss auf das Prüfungsergebnis zu haben.

In diesem Bericht werden sechs fluorfreie alkoholbeständige Schaumlöschmittel an fünf polaren Brennstoffen getestet und einem allgemein verwendeten AFFF-AR Schaumlöschmittel gegenübergestellt. Die hier dargestellten Ergebnisse sollen aufzeigen, ob diese verfügbaren fluorfreien Löschschaummittel tatsächlich Alternativen zu dem altbewährten fluorhaltigen AFFF-Schaumlöschmittel darstellen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Feuerlöschschäume

Feuerlöschschäume gehören zur Gruppe der heterogenen Dispersionsysteme mit zweiphasigen Strukturen (gasförmig und flüssig). Die gasförmige Phase besteht in den meisten Fällen aus Luft. Spezielle Erzeugungsformen von Feuerlöschschäumen verwenden für die gasförmige Phase auch ein Inertgas (z. B. Stickstoff beim Druckluftschaumsystem) oder das bei dem Brand entstehende Rauchgas (wie bei dem Heißschaumlöschverfahren). Die flüssige Phase besteht dagegen aus dem Schaummittelkonzentrat, welches gemäß den Angaben des Herstellers und damit bezogen auf das Brandmedium anteilig zwischen 1 % bis 6 % der anwendbaren Schaummittellösung beträgt. Bei einem prozentualen Anteil der Löschmittellösung unterhalb von 1 % entsteht kein Schaum, sondern kann nur als Netzmittel Verwendung finden.

Im Allgemeinen setzen sich Schaummittelkonzentrate aus verschiedenen Bestandteilen zusammen. Dabei spielt der Anwendungszweck eine wesentliche Rolle. Der Hauptbestandteil ist der Schaumbildner. Hierzu zählen die chemischen Substanzen wie Proteine und Tenside, welche die Oberflächeneigenschaften der Schaummittellösung derart beeinflussen, dass eine Verschäumung möglich ist. Ein weiterer Bestandteil sind die sogenannten Funktionsadditive, welche unterschiedliche Schaumeigenschaften positiv beeinflussen. Fluortenside steigern die Löscheffizienz. Fluorpolymere und alternative Polymerschichtbildner steigern die Fließfähigkeit des Schaums und seine Widerstandsfähigkeit gegen Brennstoffeinflüsse. Zu diesen Funktionsadditiven gehören auch Dispergiermittel oder Lösungsvermittler als Entmischungshemmer des Schaummittelkonzentrats, Schaumstabilisierungsmittel zur Verlängerung der Wasserhalbwertszeit, Konservierungsstoffe oder Korrosionsinhibitoren sowie Frostschutzmittel.

Bei der Schaumerzeugung können die Gasblasen kugelförmig oder polyederförmig abhängig von den enthaltenen Tensiden ausgebildet werden. Diese Tenside bestimmen die Eigenschaften der Phasengrenzen und damit deren Ausbildung. Die Schaumblasen bilden sich bei Kugelschaum kugelförmig und unabhängig voneinander aus. Dahingegen besitzt der Polyederschaum Schaumblasen mit polyedrischer Form, welche durch Lamellen an den Phasengrenzen getrennt sind. Bei der Erzeugung der meisten Löschschäume weisen diese eine Kugelschaumstruktur auf, welche mit zunehmender Zeit in eine Polyederschaumstruktur übergeht [18].

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Feuerlöschschäumen werden zur Klassifizierung herangezogen. So werden Feuerlöschschäume hinsichtlich ihrer chemischen Eigenschaften eingeteilt, welches in den verschiedenen Normen eingeflossen ist. In erster Linie wird nach dem Schaumbildner in zwei Gruppen unterschieden. Die Schaumbildner werden in die auf natürlichen Proteinen (z. B. Tierabfälle) oder auf synthetisch erzeugten Tensiden (wie perfluorierte Tenside)

basierenden Schaumlöschmittel eingeteilt. Eine weitere Untergliederung erfolgt auf der Grundlage weiterer Eigenschaften, wie der Fähigkeit einen Film zwischen dem Schaum und dem Brennstoff auszubilden, der Fähigkeit gegenüber wasserlöslichen Brennstoffen beständig zu sein oder fluorhaltige Inhaltsstoffe zu besitzen. Diese Gruppierungen sind für die taktische Brandbekämpfung feuerwehrtechnisch relevant. Die Schaummittelklassifikation (vgl. Abbildung 1) in Normen:

- Proteinschaummittel (P)
- Fluor-Proteinschaummittel (FP)
- Synthetische Schaummittel (S auch MBS – Mehrbereichsschaummittel)
- Alkoholbeständige Schaummittel (AR – Alkoholresistent)
- Wasserfilmbildende Schaummittel (AFFF – Aqueous Film Forming Foam)
- Filmbildende Fluorproteinschaummittel (FFFP)

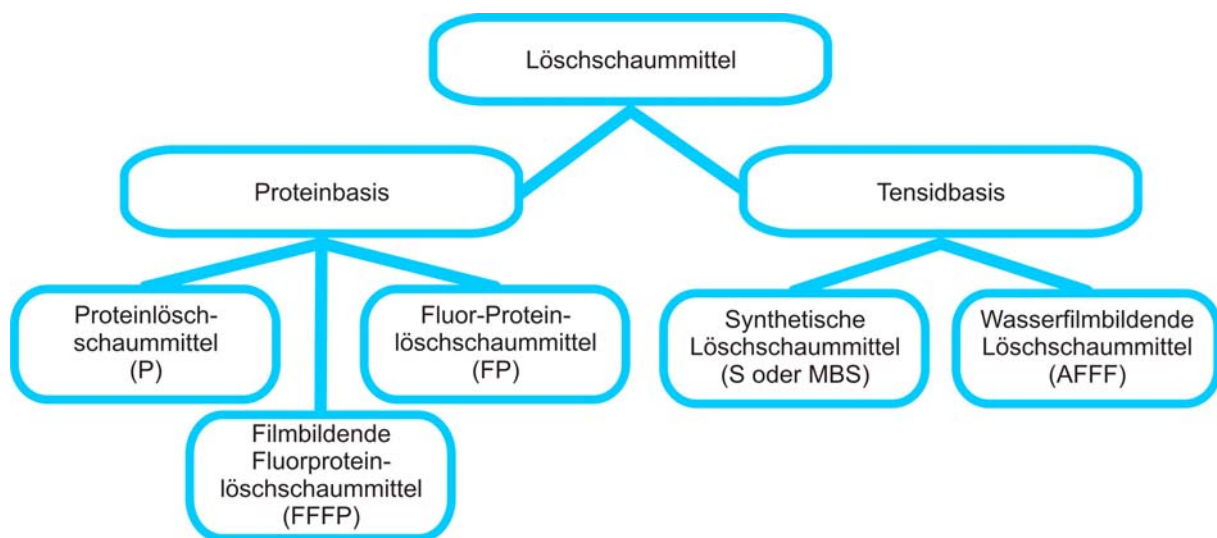


Abbildung 1: Schaummittelklassen in Normen

Weiterhin werden Schaummittel ebenso nach ihrer Löschleistung eingeteilt. Hierauf wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Die Verschäumungszahl VZ ist eine weitere Größe, nach der Feuerlöschschäume unterteilt werden. Sie gibt das Verhältnis zwischen dem erzeugten Schaumvolumen  $V_{\text{Schaumvolumen}}$  und dem dafür eingesetzten Volumen der Schaummittellösung  $V_{\text{Schaummittellösung}}$  an. Dieses Verhältnis ist sehr schwer direkt messbar. Durch zwei Annahmen kann eine Berechnungsformel hergeleitet werden. Die erste Annahme setzt die Masse der eingesetzten Schaummittellösung  $m_{\text{Schaummittellösung}}$  gleich der Masse des Schaums  $m_{\text{Schaum}}$  (Vernachlässigung der Luftmasse im Schaum) und die zweite Annahme setzt die Dichte der Schaummittellösung  $\rho_{\text{Schaummittellösung}}$  gleich dem Wert von  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Anpassung der Dichte bei Zugabe von prozentual kleinen Anteilen von Schaummittelkonzentrat zum Wasser). Dadurch ergibt sich folgende Berechnungsformel:

$$VZ = \frac{V_{\text{Schaum}} \cdot \rho_{\text{Schaummittellösung}}}{m_{\text{Schaummittellösung}}} = \frac{V_{\text{Schaum}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{m_{\text{Schaum}}} \approx \frac{V_{\text{Schaum}}}{m_{\text{Schaum}}} \quad (1).$$

Feuerlöschschäume werden über die Verschäumungszahl in folgende drei Gruppen eingeteilt:

1. Schwerschaum:  $VZ < 20$ ;
2. Mittelschaum:  $20 \leq VZ \leq 200$ ;
3. Leichtschaum:  $200 < VZ$ .

Diese Einteilung ist notwendig, da sich die Feuerlöschschäume hinsichtlich wesentlicher Eigenschaften wie in ihrer Erzeugungs- und Ausbringtechnik, in ihrer Schaumblasengröße, in ihrem Ausbreitungsvermögen und ihrer Löschwirkung unterscheiden.

Unterteilungen der Feuerlöschschäume nach ihrer Viskosität, ihrer Verwendbarkeit mit Meerwasser und anderen Eigenschaften ist möglich, wird jedoch kaum praktiziert.

## 2.2 Wirkungsweise Schaum

Der Verbrennungsprozess von flüssigen Brennstoffen basiert auf vier Grundbedingungen, welche erfüllt sein müssen. Diese vier Bedingungen sind:

1. Brennbarkeit der Flüssigkeit
2. Verfügbarkeit und Nachströmung von Sauerstoff zur Flüssigkeitsoberfläche
3. Ausreichendes Konzentrationsverhältnis in der Gas-/Dampfphase der brennbaren Flüssigkeit zum Sauerstoff und
4. Hohe Temperatur der brennbaren Flüssigkeit (Brennpunkt) bzw. der Umgebung oberhalb der Flüssigkeit (Zündtemperatur).

Zur Unterbindung eines Weiterbrennens der Flüssigkeit muss mindestens eine der vier Bedingungen unzureichend gegeben sein.

Feuerlöschschäume können aufgrund ihrer verschiedenen Wirkmechanismen mit unterschiedlicher Effektivität die Verbrennung einer Flüssigkeit unterbrechen. Welcher Wirkmechanismus maßgeblich in den Verbrennungsprozess eingreift, ist abhängig von der Klassifizierung des Feuerlöschschaums. Grundsätzlich sind die Wirkmechanismen des Feuerlöschschaums:

- Trenneffekt: Ausbildung einer geschlossenen Schaumdecke auf der brennbaren Flüssigkeit unterbindet die Sauerstoffzufuhr;
- Deckeffekt: Unterbindung einer weiteren Gasfreisetzung von der Flüssigkeit in die Verbrennungszone durch die geschlossene Schaumdecke (Diffusionsbarriere);
- Kühleffekt: Kühlung der Flüssigkeitsoberfläche durch die Freisetzung des im Schaum enthaltenen Wassers;
- Dämmeffekt: Unterbindung des Wärmeaustausches durch die geschlossene Schaumdecke (Wärmebarriere);
- Verdrängungseffekt: Verdrängung des Sauerstoffs und der freigesetzten, brennbaren Gas/Dämpfe der Flüssigkeit durch Flutung bei räumlich begrenzten Objekten.

Der Effekt der Benetzung von Oberflächen spielt beim Löschen von Flüssigkeitsbränden keine Rolle.

Verschiedene Eigenschaften der Schaummittellösung und des Schaums können Hinweise zu den möglichen Wirkmechanismen geben. Auf die Möglichkeit einer Filmbildung weist der Spreitungskoeffizient der Schaummittellösung hin. Die Oberflächenspannung der Schaummittellösung ist ein Maß für die Stabilität der erzeugten Schaumblasen des Schaums. Die Verschäumungszahl ist ein Indiz für die Größe der Schaumblasen und dem Wassergehalt des Feuerlöschschaums. Die Wasserhalbwertszeit ist nicht nur ein Maß für die Beständigkeit eines Schaums, sondern gibt gleichfalls an, in welchem Zeitraum 25 % bzw. 50 % der im Schaum enthaltenen Menge an Schaummittellösung vom Schaum abgegeben wurde.

Allerdings genügt die alleinige Bestimmung dieser Kenngrößen nicht, da Wechselwirkungsmechanismen sowohl bei der Schaumerzeugung (z. B. Schaumerzeugungsgerät beeinflusst die Verschäumungszahl) als auch bei der Schaumaufbringung (wie Änderung der Grenzflächenspannung und damit Änderung des Spreitungskoeffizienten).

### **2.3 Problematik des Fluors in Feuerlöschschäumen**

Fluor-Kohlenstoff-Verbindungen sind sehr stabile organische Verbindungen. Untergruppen dieser Fluor-Kohlenstoff-Verbindungen sind die Gruppen der poly- und perfluorierten organischen Verbindungen. Diese Verbindungen bestehen dabei aus verschiedenen langen Kohlenwasserstoffketten, bei denen die Wasserstoffatome teilweise (polyfluoriert) oder vollständig (perfluoriert) durch Fluoratom ersetzt sind. Perfluortenside bestehen aus perfluorierten Kohlenwasserstoffen. Die perfluorierte Gruppe (Kohlenstoffkette) besitzt hydrophobe Eigenschaften (Wasser abweisend),



wohingegen die Kopfgruppe (SO<sub>3</sub>H) hydrophil ist. Mit diesem amphiphilen<sup>1</sup> Charakter werden diese Substanzen zum Tensid. Neben dem hydrophoben Charakter der perfluorierten Gruppe weist diese ebenso lipophobe Eigenschaften (Abweisen von Fetten, Ölen, unpolaren Verbindungen) auf. So können diese Verbindungen in Abhängigkeit von ihrer Konzentration infolge dieses amphiphilen Charakters Oberflächenspannungen sehr gut senken. Eine hohe thermische als auch chemische Stabilität [2] ergibt sich aufgrund des enthaltenen Fluors. Einige eignen sich dadurch hervorragend für die Beimischung in Schaummittelkonzentraten, um deren Leistungsfähigkeit zu erhöhen.

Nachteilig wirkt sich die hohe Stabilität dieser fluorhaltigen Verbindungen jedoch auf den Abbau bzw. die Zersetzung dieser Stoffe aus. Ein natürliches Vorkommen von perfluorierten Verbindungen existiert nicht. Durch ihren amphiphilen Charakter lassen sie sich des Weiteren gut in Wasser lösen und können dadurch dem biologischen Kreislauf ungestört folgen, ohne dass sie abgebaut oder zersetzt werden. Zz. sind keine biologischen Prozesse bekannt, die perfluorierte Verbindungen abbauen können. Auch die Beständigkeit gegen ultraviolette Strahlung (Sonnenlicht) führt zur weiteren Erhöhung der Persistenz dieser Verbindungen.

Speziell die Stoffe Perfluorooctansulfat (PFOS) und die Perfluorooctansäure (PFOA) mit ihrem breit gefächerten Anwendungsspektrum sind im letzten Jahrzehnt in den Mittelpunkt des Interesses gerückt, weil ihre negativen Einflüsse auf die Umwelt und auf Lebewesen festgestellt wurden. Nicht nur in Feuerlöschschaummitteln (speziell im AFFF) wurden beide Stoffe verwendet, sondern ebenso um Materialien vor Fetten, Ölen und Wasser zu schützen oder als Hilfsmittel bei der Polymerenherstellung. In den Abbildung 2 und 3 sind beide Stoffe in ihrer Strukturformel dargestellt.

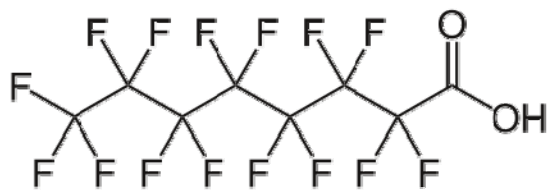


Abbildung 2: Strukturformel der PFOA



Abbildung 3: Strukturformel des PFOS

Mittels der europäischen Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH-/Chemikalienverordnung) [19] sowie der Stockholm-Konvention [20] wurden bisher regulatorische Maßnahmen ergriffen. PFOS und dessen Derivate wurden in beiden Dokumenten als persistente organische Schadstoffe identifiziert und dementsprechend reglementiert. PFOA wurde vor kurzem erst auf die Kandidatenliste der REACH-Verordnung für besonders besorgniserregende Stoffe gesetzt.

<sup>1</sup>In der Literatur werden Amphiphilie definiert als Verbindungen, deren Moleküle sowohl lipophil und lipophob als auch hydrophile und hydrophobe Gruppen besitzen. Zu den Amphiphilen gehören z.B. die Tenside. In unserem Fall gilt der amphiphile Charakter nur für die hydrophile und hydrophobe Ausrichtung.

Daraus folgen die Bestrebungen, auf fluoridierte Tenside in Schaummitteln für die Brandbekämpfung zu verzichten oder diese durch geeignete Alternativen zu ersetzen. Federführend sind international die verschiedenen Hersteller der Schaummittel, aber auch Institutionen, wie das Wehrwissenschaftliche Institut in Zusammenarbeit mit der Universität zu Köln forschen mit verstärktem Interesse auf diesem Gebiet. Unterstützung erfahren diese durch die Stellungnahmen von namhaften Vereinen und Organisationen wie die des Deutschen Feuerwehrverbandes und der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland [11], der Werkfeuerwehrverband Deutschland e. V. [12] und des Umweltbundesamtes [13].

## 2.4 Normen

Im Allgemeinen dient eine Norm zur Sicherstellung für die Qualität und Mindestleistung von Produkten und besitzt einen Empfehlungscharakter, auf den sich ein interessierter Kreis durch Mitarbeit in einem Normenausschuss geeinigt hat. In den unterschiedlich existierenden Normen für Schaumlöschmittel werden die Anforderungen dargelegt, die ein Schaumlöschmittel erfüllen sollte, um ein nutzbares Mindestlöschvermögen zu besitzen. Unter Berücksichtigung der von dem Hersteller angegebenen Konzentration zur Erzeugung des Schaumlöschmittels kann dem Anwender eine Grundsicherheit gegeben werden. Diese bedeutet jedoch nicht, dass die Löschtests eine reale Brandsituation widerspiegeln und demzufolge die nach dieser Norm geprüften Schaumlöschmittel in jedem Brandfall am effektivsten löschen.

Eine Auswahl der zz. auf der Welt existierenden Normen zu der hier zu untersuchenden Problemstellung ist in der Tabelle 1 aufgeführt. Die Gültigkeitsbereiche dieser Normen und deren Prüfvorschriften sind sehr unterschiedlich. In einigen Fällen sind die Normen identisch und/oder verweisen aufeinander.

Tabelle 1: Normen zur Beurteilung von Schaummitteln

Norm	Anwendungsbereich	Geltungsbereich
DIN EN 1568-4:2010 [17]	Schwerschäume auf polaren Flüssigkeiten	33 europäische CEN-Mitgliedsstaaten
ISO 7203-3:2011 [21]	Schwerschäume auf polaren Flüssigkeiten	162 weltweite Mitgliedsstaaten (inklusive der CEN-Mitglieder)
ICAO Doc 9137 – AN/898 Part 1 (2014) [22]	Rettungswesen und Brandbekämpfung, inklusive polare Flüssigkeiten	International Civil Aviation Organization (ICAO, dt.: Internationale Zivilluftfahrtorganisation), 191 weltweite Mitgliedsstaaten (Flughäfen)

IMO MSC. 1/Circ. 1312 (2009) [23]; MSC./Circ. 582 (1992) [24]; MSC./Circ. 799 (1997) [25]	Brandbekämpfung mit Schaum (auch Schwerschaum) aus ortsfesten Anlagen auf Schiffen (auch chemische Tankschiffe)	International Maritime Organization (IMO, dt.: Internationale Seeschiffahrts-Organisation), 171 Mitgliedsstaaten und 3 assoziierte Mitgliedsstaaten
MIL-F-24385F (1992, letzte Änderung 1994) [26]	Feuerlöschmittel, AFFF-Flüssigkonzentrat für Frisch- und Seewasser	U.S. Government, Department of Defense (dt.: Regierung der USA, Verteidigungsministerium), USA (Militär)
NFPA 11 [27], NFPA 1150 (2016) [28]	Standard für Schwerschaum und Schaumzusammensetzung	National Fire Protection Association (NFPA, dt.: Nationale Brandschutzvereinigung), USA
UL 162 (1994) [29]	Standard für Schaumerzeugung und Flüssigkonzentraten	UL LLC. (Underwriters Laboratories, dt.: Garantie Untersuchungsstelle), weltweit aktive, unabhängige Organisation zur Prüfung spezifischer Ansprüche
GOST 6948-81 (1982) [30], GOST R 51114-97 (2014) [31]	Schaummittel, Automatische Schaumbrandbekämpfungsanlagen – Testmethoden	Gossudarstwenny Standart (GOST, dt.: Staatlicher Standard der Sowjetunion, übernommen von der Russischen Föderation, Föderale Agentur für technische Regulierung und Metrologie), Russische Föderation
FM Approval Standard Class Number 5130 (2014) [32]	Schaumlöschsysteme (auch für Schwerschaum und zur Brandbekämpfung auf polaren Flüssigkeiten)	FM Global® (Factory Mutuals Global, dt.: Fabrikversicherungsverein auf Gegenseitigkeit amerikanisches Industriesachversicherungsunternehmen), weltweit
VdS 3124 (2013) [33]	Richtlinie für Schaummittel – Anforderungen und Prüfmethode	VdS Schadenverhütung GmbH (VdS: Vertrauen durch Sicherheit, Tochtergesellschaft des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.), BRD

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde aufgrund der Bedeutung für die deutschen Feuerwehren die Norm DIN EN 1568-4 [17] ausgewählt. Diese basiert zudem auf der Norm ISO 7203-3. In diesen beiden Normen sind zwei Löschszenarien dargestellt und beschrieben. Um die zeitlichen Aufwendungen für die Untersuchungen zu minimieren, wurde das Szenario des Kleinlöschversuches für eine Beurteilung der verfügbaren Löschschaummittel ausgewählt. Mit diesem Szenario ist eine Testserie für ein Schaummittel mit einem Brennstoff zügig umsetzbar.

### 3 Brennstoffe und Schaummittelkonzentrat

#### 3.1 Polare brennbare Flüssigkeiten

Man unterscheidet bei Flüssigkeiten nach polaren (lösen sich in polaren Lösungsmitteln z. B. Wasser) und unpolaren (lösen sich nicht in Wasser) Flüssigkeiten. Diese Unterscheidung ist eine charakteristische chemisch-physikalische Eigenschaft bei Flüssigkeiten. Grundsätzlich sind die Moleküle einer reinen Flüssigkeit definitionsgemäß nach außen elektrisch neutral, jedoch sind die Ladungsverteilungen innerhalb der Moleküle häufig nicht zentrosymmetrisch.

Die Einteilung nach einer polaren oder unpolaren Flüssigkeit erfolgt auf Grundlage des Dipolmomentes der einzelnen Moleküle einer Flüssigkeit. Das Dipolmoment  $\mu$  eines Moleküls einer Flüssigkeit wird im einfachsten Fall berechnet über den Abstand zweier entgegengesetzter gleicher punktförmiger Teilladungen  $q_i$  im Abstand  $r$  voneinander zu  $\mu = q_i \cdot r$ .

Die Tendenz der Assoziation ergibt sich aus den verschiedenen zwischenmolekularen Wechselwirkungen. So bewirken Dispersionskräfte (Londonsche Dispersionskräfte) den Zusammenhalt bei unpolaren Flüssigkeiten und Dipol-Dipol-Wechselwirkungskräfte sowie teilweise auch Wasserstoffbrückenbindungen den Zusammenhalt bei polaren Flüssigkeiten.

Tabelle 2: Elektrische Dipolmomente verschiedener Flüssigkeiten [34-35]

Stoff	Elektrisches Dipolmoment in D
Ethanol	1,69
n-Methyl-2-Pyrrolidon	4,1
Propan-2-on (Aceton)	2,88
Propan-2-ol (Isopropanol)	1,66
Wasser	1,85

Einige Stoffklassen beinhalten verschiedene Bindungstypen. Die Alkohole besitzen sowohl unpolare Kohlenwasserstoffketten als auch polare – OH-Gruppen. Aus diesem Grund sind Alkohole sowohl in polaren als auch in unpolaren Flüssigkeiten löslich. In Abhängigkeit der Länge und Anzahl der polaren und unpolaren Gruppen nimmt die Löslichkeit in den entsprechenden Flüssigkeiten zu bzw. ab. Diese Aussagen treffen äquivalent auch auf alle anderen Kohlenwasserstoffe mit zusätzlichen polaren oder ionischen Gruppen zu (z. B. Ketone und organische Säuren). Stoffe die sowohl in polaren als auch unpolaren Flüssigkeiten löslich sind, werden als amphiphil bezeichnet. Durch Zugabe von amphiphilen Stoffen zu

unpolaren Stoffen erhalten diese eine konzentrationsabhängige Löslichkeit für polare Stoffe.

### 3.2 Auswahl der polaren Brennstoffe

Für die Umsetzung des Projektes wurden ausschließlich Brennstoffe betrachtet, die unter Standardbedingungen (Temperatur  $T = 298 \text{ K}$ , Druck  $p = 101325 \text{ Pa}$ ) den Zustand flüssig besitzen. Eine Berücksichtigung von Feststoffen, die während der Wärmeeinwirkung bei der Verbrennung sich verflüssigen, fand nicht statt.

Die Auswahl der polaren, brennbaren Flüssigkeiten für die Untersuchungen des Löschvermögens der Löschschaummittel erfolgte anhand eines Kriteriums. Dieses Kriterium gilt als erfüllt, wenn die Flüssigkeit als Reinstoff oder Gemisch handelsüblich ist und in ihrer Herstellung als eigenständiger Stoff oder als Grundstoff für andere Produkte und/oder in ihrer Verwendung und/oder ihrem Transportaufkommen innerhalb Deutschlands verhältnismäßig häufig auftritt.

Aus der Vielzahl der möglichen polaren, brennbaren Flüssigkeiten wurden fünf Flüssigkeiten als Brennstoff für das Testszenario Kleinlöschversuche in Anlehnung an die DIN EN 1568-4 [17] ausgewählt. Die ersten zwei Brennstoffe ergaben sich aus der Durchführungsbestimmung der DIN EN 1568-4. In dieser Bestimmung werden die beiden Flüssigkeiten Isopropanol (Propan-2-ol) und Aceton (Propan-2-on) als Brennstoff für die Kleinlöschversuche definiert. Da die auszuwählenden Schaumlöschmittel in Deutschland von jeder Feuerwehr erwerbbar sein sollten, müssen diese gemäß der DIN EN 1568-4 eine Zertifizierung hierfür nachweisen. Damit sollte für diese beiden Brennstoffe ein nachweisbares Löschvermögen existieren. Beide Stoffe erfüllen das oben genannte Kriterium. Sie werden nicht nur als eigenständiges Lösungsmittel industrieübergreifend eingesetzt, sondern sind oftmals ebenso Bestandteil anderer Lösungsmittel.

Entwicklung des Biokraftstoffverbrauchs (flüssig und Biogas) im Verkehrssektor der Europäischen Union (EU-28) (in Tsd. Tonnen Öläquivalent)

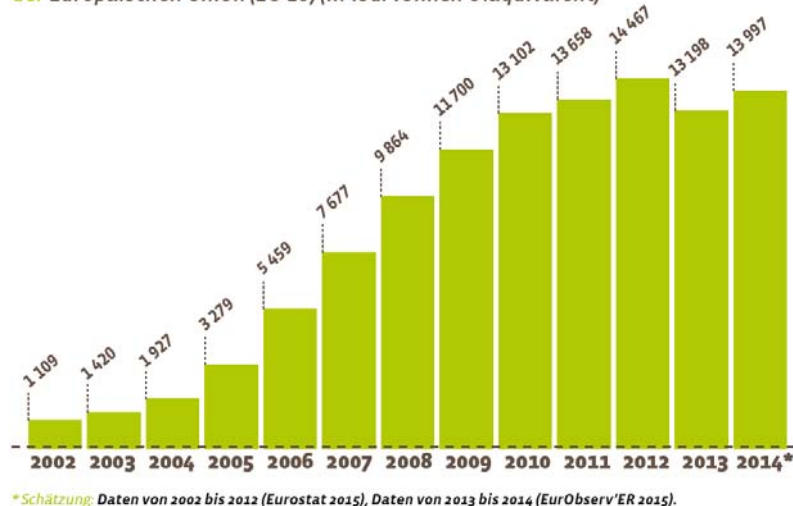
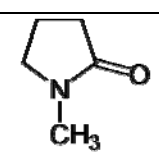


Abbildung 4: Entwicklung des Biokraftstoffverbrauchs im Verkehrssektor der EU [37]

Ein weiteres Lösungsmittel, welches als Brennstoff in Betracht gezogen wurde, ist Ethanol. Als Energieträger wird Ethanol bzw. seit dem letzten Jahrzehnt Bioethanol den Kraftstoffen gemäß der EG-Richtlinie 2003/30/EC [36] beigemischt. Der Verbrauch von Biokraftstoff hat sich in den letzten fünf Jahren auf einem Niveau von  $13685 \cdot 10^3$  t Öläquivalent in der EU eingeppegelt (vgl. Abbildung 4). Konkret für Deutschland wurden im Jahr 2013 im Verkehrssektor 777730 t Öläquivalent Bioethanol [37] verbraucht. Dieses Bioethanol wird sowohl im Kraftstoff E10 als auch im Kraftstoff E85 eingesetzt und dient maßgeblich zum Betreiben von Kraftfahrzeugen. Aus diesem Grund wurden beide Kraftstoffe, E10 und E85, als Brennstoff für die Untersuchungen zum Lösungsvermögen ausgewählt.

Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Brennstoffe und ihrer Eigenschaften

Trivialname	IUPAC-Name/ Handelsname	Dichte in g/cm <sup>3</sup> bei T = 20 °C	T <sub>S</sub> in °C	T <sub>F</sub> in °C	T <sub>Z</sub> in °C	Strukturformel
Isopropanol	Propan-2-ol	0,784-0,786 (vgl. A1)	82	12	425	$  \begin{array}{c}  \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\    \quad   \quad   \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\    \quad   \quad   \\  \text{H} \quad \text{OH} \quad \text{H}  \end{array}  $
Aceton	Propan-2-on	0,789-0,795 (vgl. A2)	56	<-20	527,5	$  \begin{array}{c}  \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \\    \quad    \quad   \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\    \quad \quad   \\  \text{H} \quad \quad \text{H}  \end{array}  $
NMP	N-Methyl-2-Pyrrolidon	1,024-1,044 (vgl. A3)	203	86	265	
E10	Super E10	0,720-0,775 (bei 15 °C, vgl. A4)	30-215	<-20 o.c.	-	Gemisch mit Ethanol $  \begin{array}{c}  \text{H} \quad \text{H} \\    \quad   \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\    \quad   \\  \text{H} \quad \text{H}  \end{array}  $
E85	Bioethanol E85	0,785 (vgl. A5)	ca. 70 °C (abhängig vom Ottokraftstoff)	<-20	390	Gemisch mit Ethanol $  \begin{array}{c}  \text{H} \quad \text{H} \\    \quad   \\  \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\    \quad   \\  \text{H} \quad \text{H}  \end{array}  $

Der fünfte Brennstoff ist N-Methyl-2-pyrrolidon (kurz NMP). Diese Flüssigkeit ist stark polar und gleichfalls ein Lösungsmittel (insbesondere für schwerlösliche Stoffe), welches zur Herstellung von Membranen in der Pharma- und Agro-Industrie sowie als Prozesschemikalie in der Elektronik- und Raffinerieindustrie verwendet wird.

In der Tabelle 3 wurden die ausgewählten Brennstoffe hinsichtlich einiger Eigenschaften und ihrer Strukturformel zusammengestellt.

### **3.3 Datenerhebung zur Schaummittelumstellung bei deutschen Feuerwehren**

Im Allgemeinen stellt sich in Deutschland die statistische Datenerhebung zum Feuerwehrwesen insgesamt als schwierig dar. Deshalb können die in diesem Punkt aufgeführten Daten nur als Stichproben erachtet werden.

Im Rahmen der Voruntersuchungen einer am Institut für Brand- und Katastrophenschutz, Abteilung Forschung – IdF – durchgeführten Masterarbeit [38] wurden mehrere Feuerwehren bundesweit befragt. Es wurden alle Berufsfeuerwehren der Landeshauptstädte, der Stadt Frankfurt am Main und der kreisfreien Städte des Landes Sachsen-Anhalt angeschrieben. Weiterhin wurden die Teilnehmer der jährlich stattfindenden Weiterbildung der Kreisbrandmeister des Landes Sachsen-Anhalt am IBK gebeten, an der Datenerhebung für ihre Kreise mitzuwirken. Der zugesendete bzw. übergebene Fragenkatalog enthielt Fragen zu den vorhandenen Schaummitteln und deren Verwendung. Die ausführlichen Ergebnisse sind in [38] dargestellt. An dieser Stelle wird eine Zusammenfassung dieser Datenerhebung gegeben.

Der Fragenkatalog enthielt folgende Fragen:

- (1) Können Sie eine Aussage zur Häufigkeit von Einsätzen in ihrer Feuerwehr treffen, in welchen Löschschaum eingesetzt wird? (evtl. auch Schaummenge)
- (2) Benutzen Sie verschiedene Schaummittel für polare und unpolare Flüssigkeiten? Welche? (Name/Hersteller)
- (3) Gab es in ihrem Bereich in den letzten Monaten einen größeren Brand/Unfall, der einen Schaumeinsatz erforderte? (Art des Einsatzes, Löscherfolg, Schaummenge)
- (4) Ist ihre Feuerwehr bereits im Besitz von fluorfreien Schaummitteln zur Bekämpfung von Bränden polarer Flüssigkeiten?  
Wenn ja, welche? (Name/Hersteller)  
Welche Motivation führte zur Beschaffung?  
Haben Sie bereits Einsatzerfahrungen mit diesen Schaummitteln gesammelt? (Art des Einsatzes, Löscherfolg, Schaummenge).

Auf diese Datenerhebung haben insgesamt 20 Feuerwehren von 41 angefragten Feuerwehren geantwortet. Die Feuerwehren der Großstädte und kreisfreien Städte antworteten zu 89,5 %, wohingegen die Antwortquote von den Kreisbrandmeistern bei 13,6 % lag. Dadurch konnte keine Differenzierung zwischen den Städten und Landkreisen erfolgen.

Die erste Frage wurde mit vier verschiedenen Aussagen beantwortet, dabei wurden

- die eingesetzten Schaummittelmengen pro Jahr angegeben,
- die genutzte Schaummittelmenge bei 0,1 % Zumischung auf dem Fahrzeug (Netzmittel),
- die Anzahl der Einsätze und
- direkte Einsatzbeispiele angegeben.

Die mittlere eingesetzte Schaummenge lag bei 300 bis 2000 l pro Jahr. Allerdings antworteten in dieser Art auf die erste Frage insgesamt 7 Feuerwehren. Anhand der Daten der zweiten Antwortvariation wurde abgeschätzt, dass 54 Einsätze pro Jahr in Städten erfolgen, bei denen Schaumlöschmittel eingesetzt werden. Diese Angabe ist jedoch aufgrund des geringen Stichprobenumfangs sehr ungenau. Durch die zweite Antwortart wurde festgestellt, dass das Schaumlöschmittel am häufigsten als Netzmittel verwendet wurde. Auf die Einsatzbeispiele, die gleichfalls eine Antwort auf die dritte Frage darstellen, wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Die zweite Frage wurde ausführlicher durch die Feuerwehren beantwortet. Letztlich verwenden 15 Feuerwehren fluorfreie Schaummittel, wovon bei 2 Feuerwehren diese für polare Flüssigkeiten einsetzbar sind. Eine Übersicht zu den in den Feuerwehren vorhandenen Schaummitteln ist in der Abbildung 5 ersichtlich.

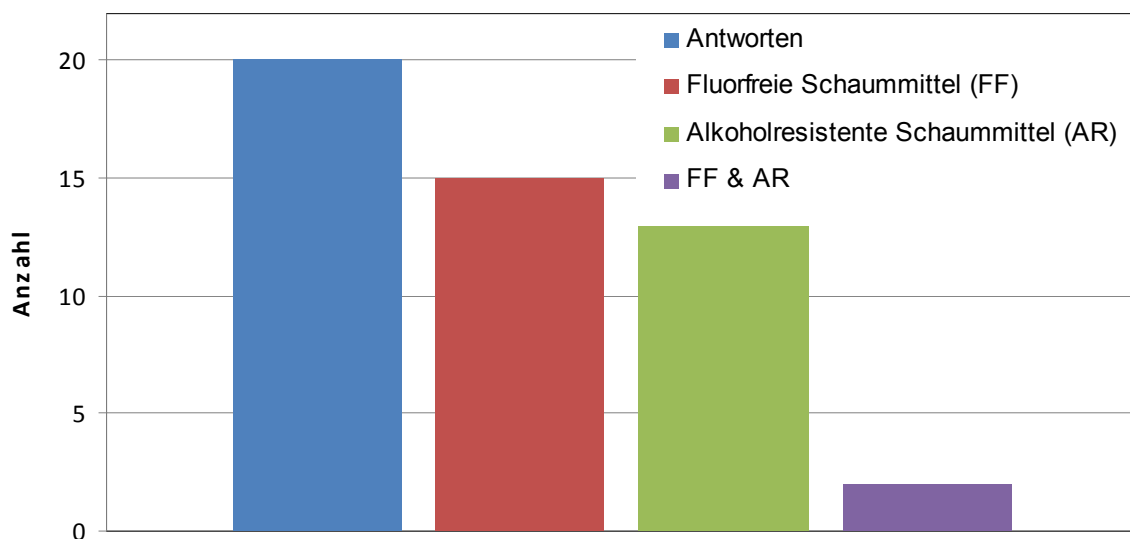


Abbildung 5: Verbreitung der Schaummittel bei den Feuerwehren.

Die Einsatzerfahrungen mit den fluorfreien Schaumlöschmitteln behandelt die vierte Frage. Die Feuerwehren, welche fluorfreie alkoholresistente Schaumlöschmittel vorhalten, hatten bis zum Zeitpunkt der Befragung keine Brandbekämpfung, bei dem dieses Schaumlöschmittel auf polaren Flüssigkeiten eingesetzt wurde. Dadurch konnten keine Aussagen über die Löschwirksamkeit getroffen werden. Jedoch lagen Einsätze dieser Schaumlöschmittel auf unpolaren Flüssigkeiten vor, weil das Standardschaumlöschmittel nicht zur Verfügung stand. Nach Aussage des Kameraden der Feuerwehr traten bei dem Einsatz Schwierigkeiten bei der Schaumerzeugung in der Art auf, dass die Schaumqualität nicht ausreichend war.



Ebenso wurde bemängelt, dass dieses Schaumlöschmittel nicht als Netzmittel verwendet werden konnte. Die Einsatzerfahrungen der Feuerwehren, welche die fluorfreien nicht alkoholresistenten Schaumlöschmittel vorhalten, waren alle positiv.

Die Beschaffung bzw. anstehende Beschaffung von fluorfreien alkoholresistenten Schaumlöschmitteln bei den Feuerwehren begründet sich zum einen durch die Umsetzung der unter Punkt 2 genannten Richtlinie und damit verbunden der Lösung der durch die poly- und perfluorierten Tensiden verursachten Umweltproblematik und zum anderen durch die Anpassung der Schaumlöschmittelkonzepte an die aktuelle Situation durch revidierte Gefahrenabwehrpläne. Insbesondere finden darin die angestiegenen Mengen bei der Erzeugung, dem Transport, der Lagerung und der Verarbeitung von polaren Flüssigkeiten (z. B. E10) im Ausrückebereich ihre Berücksichtigung und erfordern die Beschaffung geeigneter Löschmittel.

### **3.4 Auswahl der fluorfreien alkoholresistenten Schaumlöschmittel**

Infolge der EU-Richtlinie 2006/122/EG [1] begannen die europäischen Marktführer, auf dem Gebiet der Schaumlöschmittel fluorfreie Alternativen zu entwickeln. Diese Entwicklung ist bis dato nicht abgeschlossen. Über Neu- und Weiterentwicklungen dieser Marktführer existieren aus wettbewerbsrechtlichen Gründen keine Informationen vor der Markteinführung. Dass diese Entwicklungen noch anhalten, bestätigen u. a. die Bestrebungen vom WIS Munster in Kooperation mit der Universität zu Köln [9-10]. Die Schwierigkeit bei diesen Bemühungen liegt darin, dass deutsche Feuerwehren von der universellen Einsatztauglichkeit von Schaumbildnern für fluorhaltige Mehrbereichsschäume überzeugt sind. Die Entwickler von Schaumlöschmitteln versuchen, diesem Anspruch gerecht zu werden, welches aufgrund der Eliminierung des Fluorgehalts in den Schaumbildnern sich schwierig gestaltet. Dadurch hat sich bis dato eine Unterscheidung zwischen fluorfreien Schaumlöschmitteln für unpolare und polare Flüssigkeiten herauskristallisiert.

Die nachfolgende Auswahl beschränkt sich auf fluorfreie alkoholbeständige Schaumlöschmittel, die mit gewöhnlicher Technik der deutschen Feuerwehren verwendet werden können. D. h. in die Auswahl wurden keine Löschmittel einbezogen, die als Zusatzstoff für Löschwasser (Netzmittel) verwendet werden können oder auf gelartiger Basis beruhen. Ebenso wurden Schaumlöschmittel, welche ein spezielles Equipment zur Erzeugung des Löschschaumes wie CAFS benötigen, in der Auswahl nicht berücksichtigt.

Für die Auswahl von fluorfreien Schaumlöschmitteln für polare Flüssigkeiten (alkoholresistent) wurde eine internationale Marktanalyse durchgeführt. Dabei wurden zu diesem Zeitpunkt sieben Schaumlöschmittel (vgl. Tabelle 4) gefunden. Davon wurden sechs alkoholresistente und fluorfreie Schaumlöschmittel ausgewählt. Weiterhin wurde zu Vergleichszwecken ein gegenwärtig häufig verwendetes alkoholresistentes aber fluorhaltiges Schaumlöschmittel (AFFF-AR) hinzugewählt.

Die Tabelle 4 enthält die zum Zeitpunkt der Marktanalyse verfügbaren fluorfreien Schaumlöschmittel und das Vergleichsschaumlöschmittel.

Tabelle 4: Gegenüberstellung von fluorfreien alkoholbeständigen Schaumlöschmitteln und dem Referenzschaumlöschmittel

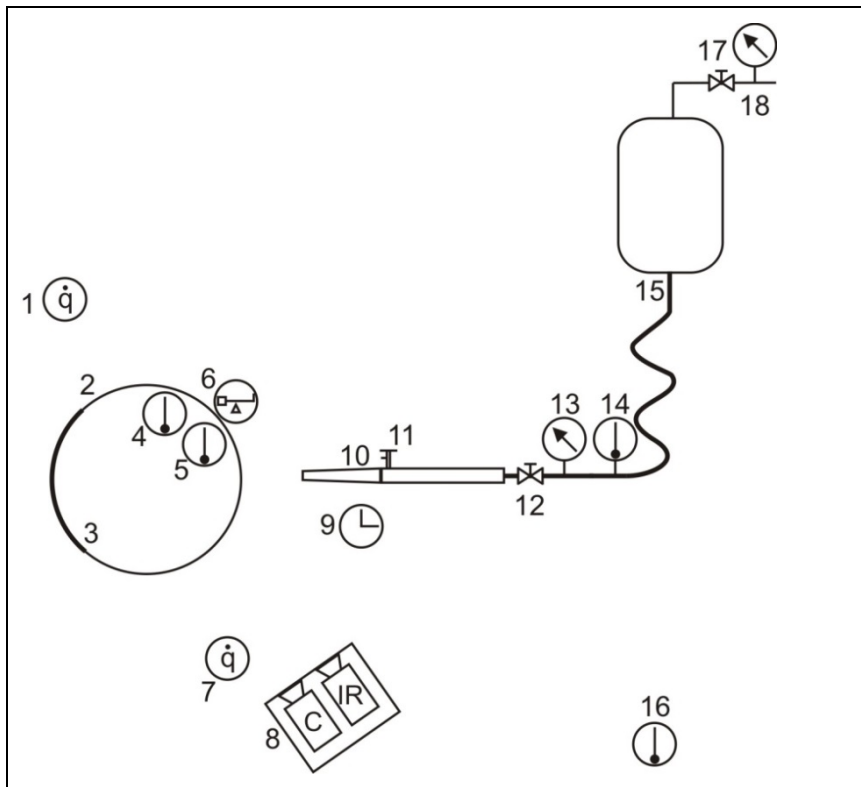
Hersteller/Lieferant	Produkt	Löschvermögen nach [17] in Verwendung mit Leitungswasser
Auxquimia S.A.U., Spanien	Unipol-FF 3/6	I A (Aceton); II A (Isopropanol)
Bio-Ex SAS., Frankreich via Leader GmbH, Deutschland	Ecopol (3x3)	I A
Dafo Fomtec AB (Schweden) via Fritz Massong GmbH (Deutschland)	Fomtec® Enviro 3x3 Ultra	I A (Aceton); I B (Isopropanol)
Eau et Feu (Frankreich) via Angus Fire Ltd. (Großbritannien)	Foam Master 3F 6%	I A (Aceton); II C/A (Isopropanol)
Fabrik chemischer Präparate von Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG, Deutschland	MOUSSOL® FF 3/6 F-5	I A
Orchidee International GmbH	Orchidex BlueFoam 3x3	I A (Aceton); II B (Isopropanol)
Solberg Scandinavian AS (Norwegen) via ILRT GmbH (Deutschland)	Re-Healing™ RF 3x6 ATC™	Keine Angabe
Fabrik chemischer Präparate von Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG, Deutschland	Vergleichsmittel (AFFF) MOUSSOL®-APS LV 3/3, F-15	I C

In den nachfolgenden Untersuchungen werden die sechs verwendeten fluorfreien und das fluorhaltige Schaumlöschmittel mittels Ziffern anonymisiert. Entsprechende Auskünfte über die Zuordnung können am Institut für Brand- und Katastrophenschutz, Abteilung Forschung – IdF – unter Angabe des Zwecks abgefordert werden. Den Herstellern wird ausschließlich die Ziffer ihres Produktes genannt.

## 4 Experimenteller Aufbau

### 4.1 Szenario für Schaumlöschversuche

Das Szenario für die Schaumlöschversuche wurde, wie im Punkt 2.4 beschrieben, anhand der relevanten Normen ausgewählt und in Anlehnung an die DIN EN 1568-4 Anhang I: Kleinlöschversuche [17] durchgeführt. Hierzu wurde im Brandraum 4 des Brandhauses des Institutes für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge das Szenario aufgebaut. In der Abbildung 6 ist der schematische Aufbau dargestellt.



Legende:

- 1 Wärmeflussensor 2
- 2 Brandwanne
- 3 Prallblech
- 4 Thermoelement Brennstoff
- 5 Thermoelement Flamme
- 6 Brandwaage
- 7 Wärmeflussensor 1
- 8 Brandraumkamera (visuell und infrarot)
- 9 Stoppuhr
- 10 Stelleinheit Schaummassestrom
- 11 Schwerschaumrohr für Kleinversuche
- 12 Absperrhahn
- 13 Manometer Schaummittellösung
- 14 Thermoelement Schaummittellösung
- 15 Premixdruckbehälter
- 16 Thermoelement Umgebung
- 17 Absperrhahn Druckluft
- 18 Manometer Druckluft

Abbildung 6: Schematischer Aufbau des Szenarios für Kleinlöschversuch

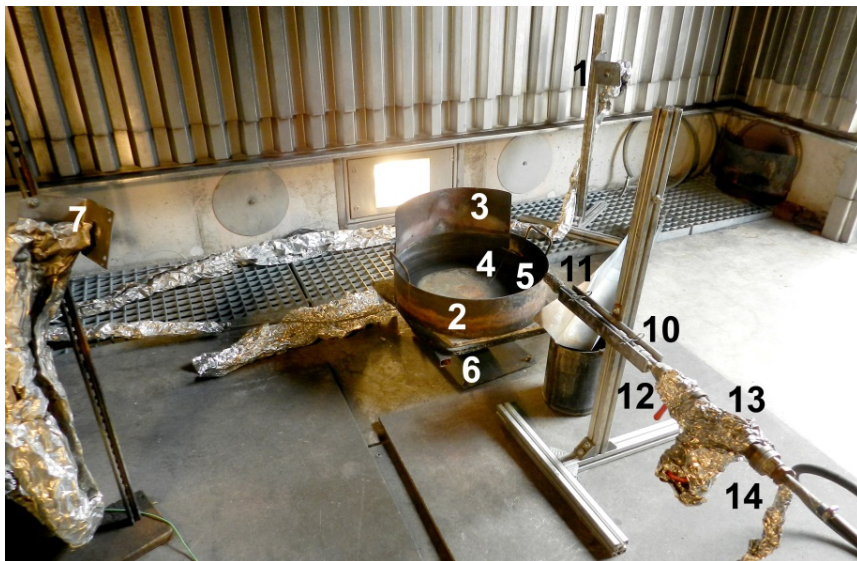


Abbildung 7: Experimenteller Aufbau bei den Kleinlöschversuchen

Eine runde Brandwanne (2) mit einem Innendurchmesser von 0,565 m wurde auf einer Brandwaage (6) mittig positioniert und mit zwei Thermoelementen bestückt, so dass eins der beiden immer die Brennstofftemperatur (4) und das andere oberhalb des Brennstoffs die Temperatur (5) erfasste. Alle in den Kleinlöschversuchen verwendeten Thermoelemente waren Mantelthermoelemente vom Typ K (Toleranzklasse 2). Auf den Rand der Brandwanne wurde ein Prallblech (3) gesteckt, wodurch die Gesamthöhe beginnend am Wannenboden bis zur oberen Kante des Prallblechs 0,30 m betrug. Die Schaumöffnung des Schwerschaumrohrs (11, gemäß DIN EN 1568-4, Anhang I) wurde waagrecht auf die Mitte des Prallblechs ausgerichtet und 0,15 m höher als der obere Brandwannenrand angeordnet (vgl. Abbildung 7). Damit wurde eine indirekte Schaumaufgabe realisiert.

Das verwendete Rückbrandgefäß besaß einen Außendurchmesser von 90 mm (Innendurchmesser: 81 mm) und eine Gesamthöhe von 145 mm (maximale Füllhöhe: 115 mm). An dem Rückbrandgefäß war ein Bügel befestigt, so dass dieses mittels eines langen Metallhakens in die Mitte der Brandwanne gestellt werden konnte.

Die Schaummittellösung (Premix) wurde gemäß der Angabe des jeweiligen Herstellers mit Brunnenwasser hergestellt, wobei sich die prozentuale Zumischung auf die Masse bezog. Mittels eines Rührwerkes wurde die Schaummittellösung 4 min vermischt und anschließend in den Druckbehälter (15) umgefüllt. Dieser wurde mit trockener Druckluft beaufschlagt, so dass am Schaumrohr ein Druck von 7 bar (13) anlag. Der Druck wurde mit einem Manometer digital erfasst. An der gleichen Stelle wurde ebenso die Temperatur der Schaummittellösung (14) mittels eines Thermoelements gemessen. Ein weiteres Thermoelement (16) wurde im Brandraum, 4,5 m konzentrisch von der Brandwanne entfernt, zur Erfassung der Umgebungstemperatur befestigt.

Am Schwerschaumrohr befand sich eine Stelleinheit für den aus der Schaumrohröffnung austretenden Schaum. Vor jedem Versuch wurde über diese Stelleinheit der Schaummassenstrom voreingestellt bzw. nachreguliert, indem vor jedem Versuch die Schaummasse nach 30 s Schaumausbringung gemessen wurde. Die Vorgabe nach [17] für den Massenstrom betrug  $(1,625 \pm 0,025)$  kg/min. Des Weiteren befand sich ein Absperrhahn zwischen dem Manometer und dem Schaumrohr, um die Zeitvorgaben exakt einhalten zu können. Die Zeitvorgaben wurden anhand einer analogen Uhr vorgegeben und durch die digitale Erfassung der Messwerte (Temperatur, Druck, Wärmestrom) überprüft.

Zusätzlich wurden zwei Wärmeflussensoren (1, 7) diametral im Abstand von 2,40 m zueinander und in Höhe von 0,85 m angeordnet, so dass ihre Messfläche im Winkel von  $45^\circ$  auf die Brandwannenmitte ausgerichtet war. Ebenso wurde jedes Experiment mittels einer Wärmebildkamera und einer Videokamera überwacht und aufgezeichnet. Der Blickwinkel der Kameras war gleichfalls auf die Brandwanne ausgerichtet. Alle Messsensoren (Thermoelemente, Manometer, Wärmeflussensoren) wurden über ein Feldbussystem digital mit einer Messwerterfassungssoftware auf einem Messrechner erfasst und aufgezeichnet.

## 4.2 Versuchsdurchführung

Zuerst wurde der Premix wie im Punkt 4.1 beschrieben hergestellt. Danach wurde der Massenstrom am Schaumrohr bestimmt und ggf. nachreguliert. Unmittelbar darauf erfolgte die Befüllung der trockenen und sauberen Brandwanne mit 9 l des für den Test vorgesehenen Brennstoffs. Gleichfalls wurden 300 ml desselben Brennstoffs in das trockene und saubere Rückbrandgefäß eingegossen. Im Anschluss wurden die Aufzeichnungen der Messwerte und der Kameras gestartet.

Die Durchführungsvorschrift sieht vor, dass der Brennstoff 2 min brennt und danach die Schaumaufgabe beginnt. Diese hält für eine Dauer von 2 min an. Wird innerhalb dieser Zeitspanne der Brand nicht vollständig gelöscht, besteht die Möglichkeit, für weitere 2 min Schaum aufzugeben.

Nach Beendigung der Schaumaufgabe wird der Brennstoff im Rückbrandgefäß gezündet und 1 min nach dem Ende der Schaumaufgabe in die Mitte der Brandwanne mittels des Metallhakens gestellt. Der Metallhaken wurde nach der Einbringung entfernt. Der brennende Brennstoff im Rückbrandgefäß muss dabei schaumfrei bleiben. Nach dem Rückzünden des Brennstoffs in der Brandwanne wurde das Experiment beendet. In einigen Fällen wurde der Versuch nach einer Zeitdauer von 1 h seit dem Einstellen des Rückbrandgefäßes und ohne erfolgte Rückzündung abgebrochen.

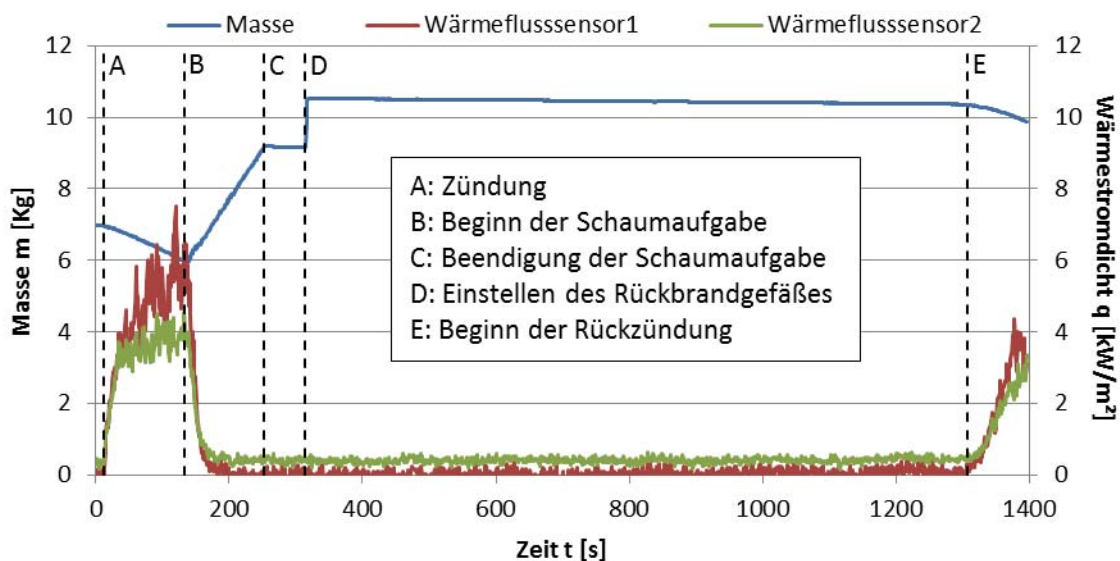


Abbildung 8: Beispiel für den Versuchsablauf eines Kleinlöschversuchs

In der Abbildung 8 ist ein Beispiel für einen Versuchsablauf anhand der erfassten Messsignale für die Masse und die Wärmeströme dargestellt. In der Darstellung sind der Beginn der Zündung (A), der Beginn der Schaumaufgabe (B), deren Beendigung (C), das Einstellen des Rückbrandgefäßes in die Brandwanne (D) und der Beginn der Rückzündung (E) zu erkennen. Dies wird durch die Kurvenverläufe der Masse und der Wärmeströme widerspiegelt.

Anhand der gewonnenen Messwerte und des Videomaterials erfolgte die Bestimmung der für die Kleinlöschversuche wesentlichen Parameter:

- die Zeit der 90%-igen Löschung (90 %-Kontrollzeit)
- die Zeit der 99%-igen Löschung (99 %-Kontrollzeit) und
- die Zeit der vollständigen Löschung der Flüssigkeitsoberfläche sowie
- die Zeit bis zum Rückbrand von mehr als 25 % der Flüssigkeitsoberfläche.

Die Rückbrandzeit wurde entgegen der Angaben in der DIN EN 1568-4 [17] verkürzt und ist damit nur in diesem Bericht vergleichbar. Für die Rückbrandzeit wurde nicht die Zeit gestoppt, bei der die Flüssigkeitsoberfläche vollständig rückgezündet ist, sondern die Zeit, bei der die Rückzündung der Flüssigkeitsoberfläche 25 % der gesamten Flüssigkeitsoberfläche betrug. Ursächlich für diese Anpassung war die daraus gewonnene Zeitverkürzung zwischen den einzelnen Löschversuchen, welche besonders beim Brennstoff NMP markant waren.

Je Brennstoff und Schaumlöschmittel wurden drei Versuche durchgeführt, um eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Jeder Versuch pro Brennstoff-Schaumlöschmittel-Kombination wurde entsprechend einzeln ausgewertet.

### **4.3 Bestimmung der Beurteilungskriterien**

Zur Beurteilung von Schäumen existieren mehrere Kenngrößen, die Aussagen über das Schaumkonzentrat, den erzeugten Schaum und über die Löschwirksamkeit des Schaumes treffen können. Einige dieser Kenngrößen sind in der DIN EN 1568-4 [17] verankert andere wiederum nicht.

Um die Güte des Schaumkonzentrats bewerten zu können, werden der prozentuale Sedimentationsgehalt, die Viskosität und der pH-Wert des Schaumkonzentrats bestimmt. In einigen anderen Normen (bspw. [32]) wird zudem die Leitfähigkeit gemessen, wenn das Schaummittelkonzentrat prozentual in dem für die Schaumherstellung zu verwendendem Wasser aufgelöst wird. In diesem Bericht werden zur Beurteilung der einzelnen Schaummittel hinsichtlich des Konzentrates die Viskosität des Schaumkonzentrates und der bestimmte Leitwert bei prozentualer Schaummittelzugabe herangezogen. Der prozentuale Sedimentationsgehalt wurde von Fuhrmann [38] ohne und mit Alterung des Schaumkonzentrats gemäß der DIN EN 1568-4 [17] untersucht.

Unabhängig von den vorgegebenen Kenngrößen des Schaumkonzentrats werden diese auf ihren Gehalt an Fluor untersucht. Die Forderung an die erworbenen Schaumlöschmittel, fluortensidfrei zu sein, bedeutet jedoch, dass z. B. nach [1] eine Konzentration kleiner als 0,005 Massen-% PFOS im Stoff enthalten sein kann. Hieraus werden Rückschlüsse auf die Umweltverträglichkeit bei Verwendung des Schaumlöschmittels im Einsatzfall gezogen.

Zur Beurteilung des erzeugten Schaums werden Kenngrößen wie der Spreitungskoeffizient und die Oberflächenspannung der Schaummittellösung sowie die Verschäumungszahl und die Wasserhalb-/Wasserviertelzeit des Schaums ermittelt. Nachfolgend wird auf die Bestimmung des Spreitungskoeffizienten und der Oberflächenspannung aus zeitlichen Gründen verzichtet. Dahingegen werden die Verschäumungszahl und die Wasserhalb-/Wasserviertelzeit der erzeugten Schäume untersucht, um die Qualität des jeweiligen Schaumes zu gewährleisten.

Das wesentlichste Beurteilungskriterium ist das Löschvermögen der erzeugten Schäume. Dieses setzt sich aus den Kenngrößen zusammen, wie sie im Punkt 4.1 (Löschzeiten, Rückbrandzeit) genannt wurden. In diesem Bericht werden die vier Zeiten einzeln pro Versuch ermittelt, ohne dass hieraus folgende Verallgemeinerungen auf das Löschvermögen gezogen werden. Das in [17] genannte Löschvermögen bezieht sich auf Schaumlöschversuche mit Brandwannen von einem Durchmesser mit 1,48 m.

## 5 Ergebnisse der Schaumlöschmitteluntersuchung

### 5.1 Ausgewählte Eigenschaften des Schaummittelkonzentrats

Alle ausgewählten Schaumlöschmittel sind für Deutschland gemäß [17] zugelassen. Weiterhin wurden die zu untersuchenden Schaumlöschmittel im Zeitraum von Dezember 2013 bis April 2015 produziert. Die Lagerung der Schaumlöschmittelkanister erfolgte in einem trockenen Raum bei einer durchschnittlichen Raumtemperatur von 22 °C. Die Herstellerangaben für die maximale Lagerungstemperatur der einzelnen Schaumlöschmittel liegen zwischen 40 °C – 60 °C (vgl. [39-45]). Das Referenzschaummittel (alkoholbeständiger AFFF) besitzt für alle nachfolgenden Untersuchungen die Bezeichnung Schaumlöschmittel Probe 1.

Das Ergebnis des prozentualen Sedimentationsgehalts der Schaumlöschmittelproben ohne und mit Alterung ergab, dass alle Proben der einzelnen Schaumkonzentrate durch ein 180 µm-Sieb ohne nachweislichen Sedimentationsanteil dispergierten [38].

#### **Viskosität**

Alle Schaumlöschmittelproben wurden in Abhängigkeit vom Schergefälle für unterschiedliche Temperaturen mit dem Rheometer Physika MCR 301 (Firma Anton Paar) gemäß dem Anhang D der DIN EN 1568-4 [17] untersucht. Der variierte Temperaturbereich umfasste in 10 °C-Schritten den Temperaturbereich von -10 °C bis 20 °C. Die minimale Einsatztemperatur (s. [39-45]) der untersuchten Schaumlöschmittel begrenzte bei einigen Schaumlöschmitteln diese Untersuchung, da unterhalb der minimalen Einsatztemperatur diese, zu sehr hoher Viskosität übergingen und ggf. ihren Aggregatzustand von flüssig zu fest änderten.

In der Abbildung 9 wurde die dynamische Viskosität in Abhängigkeit vom Schergefälle für alle untersuchten Schaumlöschmittelproben bei einer Probertemperatur von 10 °C dargestellt. Die Probe 1 ist das Vergleichsschaumlöschmittel und zählt zu den newtonschen Fluiden aufgrund der nahezu konstanten dynamischen Viskosität trotz Erhöhung des Schergefalles. Alle anderen abgebildeten Proben sind nicht newtonsche Fluide. Für die Schaumlöschmittelproben 2-7 ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Schergefälle die dynamische Viskosität sinkt. Alle fluorfreien Schaumlöschmittel weisen ein ähnliches Verhalten auf (vgl. Anhang A6).

Die dynamische Viskosität der Schaumlöschmittel hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Schaumstabilität. So ist die Schaumlebensdauer direkt proportional zur dynamischen Viskosität [46]. D. h., je höher die dynamische Viskosität eines Schaumes ist, desto länger bleibt der Schaum bestehen, sofern keine äußeren Einflüsse (wie Wärmestrahlung) ihn zerstören. Des Weiteren nimmt die Stabilität von Schaumlamellen mit steigender Oberflächenviskosität zu [47] und die Drainagezeit erhöht sich [46].



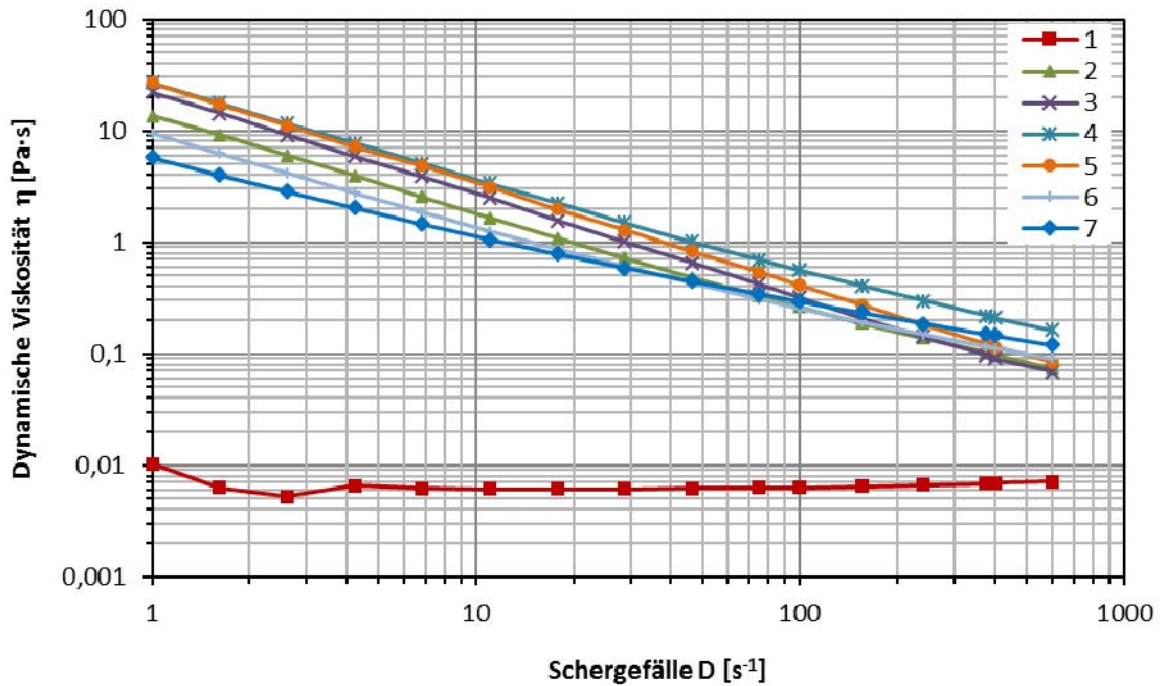


Abbildung 9: Dynamische Viskosität als Funktion des Schergefälles für die untersuchten Schaumlöschmittel bei einer Temperatur von 10 °C

Bei der Betrachtung der Kurvenschar für die vier Messtemperaturen pro Probe eines Schaumlöschmittels konnte festgestellt werden, dass für die Proben 2, 3 und 5 sich diese Kurven nahezu unabhängig von der Messtemperatur verhalten (vgl. [38]). Im Gegensatz dazu nahm für die Proben 4, 6 und 7 die dynamische Viskosität bei höheren Schergefällen mit zunehmender Temperatur stärker ab.

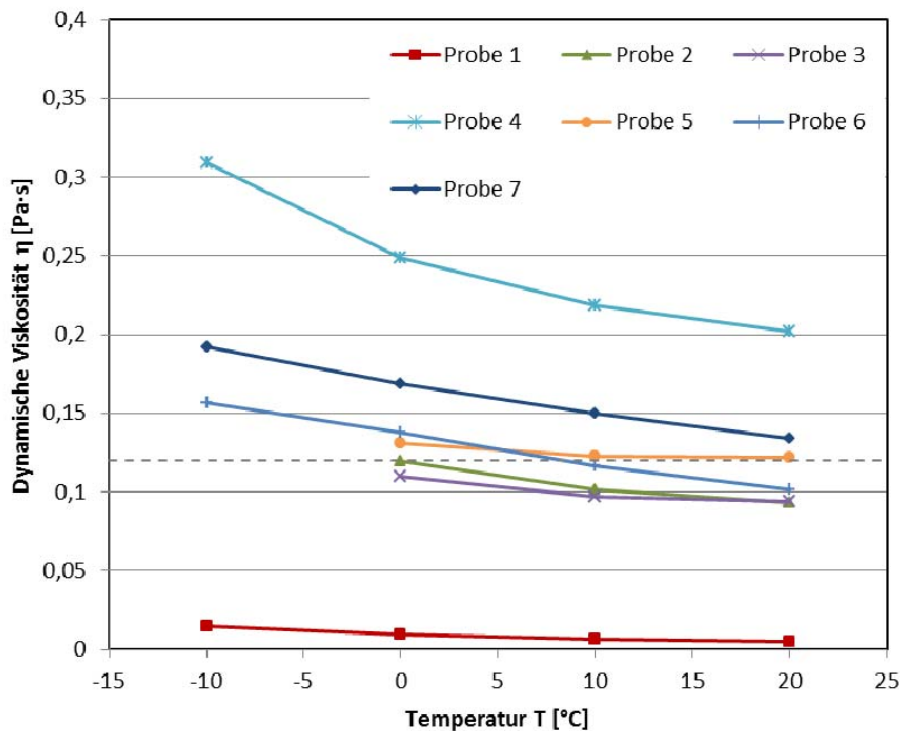


Abbildung 10: Dynamische Viskosität als Funktion der Temperatur T bei einem Schergefälle  $D = 375 \text{ s}^{-1}$  für die untersuchten Schaumlöschmittel

Nach [17] erfolgt eine Einteilung der Schaummittel in newtonsche und pseudoplastische Schaumlöschmittel. Demnach müssen Hersteller ihre Produkte kennzeichnen, wenn bei der minimalen Einsatztemperatur und einem Schergefälle von  $375 \text{ s}^{-1}$  die dynamische Viskosität  $\eta \geq 120 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  beträgt. In Abbildung 10 ist die jeweilig gemessene dynamische Viskosität der untersuchten Schaumlöschmittelproben für ein Schergefälle von  $375 \text{ s}^{-1}$  in Abhängigkeit von der Messtemperatur dargestellt. Die in dem Diagramm enthaltene grau gestrichelte Gerade stellt den Grenzwert für die Zuordnung zu den pseudoplastischen Schaummitteln dar. Die ermittelten vier pseudoplastischen Schaumlöschmittel haben dieses auf ihren Produkten gemäß der DIN EN 1568-4 [17] vermerkt. Das Schaumlöschmittel 3 ist nicht pseudoplastisch ebenso wie das Vergleichsschaummittel. Die gemessene dynamische Viskosität des Schaumlöschmittels 2 beträgt bei einer Messtemperatur  $T = -0,0059 \text{ }^\circ\text{C}$  der Probe eine dynamische Viskosität  $\eta$  von  $120 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Demnach handelt es sich um ein pseudoplastisches Schaumlöschmittel. Der Messfehler für die Temperatur beträgt  $\pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ . Für die dynamische Viskosität beträgt der Messfehler  $\pm 0,012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Unter Berücksichtigung dieser Messfehler ist es möglich, dass die dynamische Viskosität bei einem Schergefälle von  $375 \text{ s}^{-1}$  noch unterhalb des Grenzwertes liegt und damit dieses Schaumlöschmittel 2 nicht pseudoplastisch ist. Somit müsste der Hersteller dieses Schaummittels nicht deklarieren. Der Hersteller dieses Schaumlöschmittels hat weiterhin die Probe mit einer minimalen Einsatztemperatur von  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  angegeben, womit die Verwendung des Schaumes im Einsatzfall bei dieser Temperatur vermutlich vermieden wird.

### ***Leitfähigkeit***

Die Bestimmung der Leitfähigkeit ist nach [17] nicht gefordert, jedoch verlangen im internationalen Bereich verschiedene Richtlinien [32, 48], diese in Abhängigkeit von der zugemischten Konzentration des Schaumlöschmittels zu ermitteln. Dadurch können Zumischraten überprüft werden. Die Modernisierung von Schaumlöschanlagen mit elektronischen Zumischsystemen erfordert häufig die Kennlinie der Leitfähigkeit als Eingangswert für die Parametrisierung solcher Systeme.

Die Bestimmung der Leitfähigkeit wurde nachfolgend gemäß [32] durchgeführt. Hierzu wurde  $1 \text{ kg}$  Wasser in einem Becherglas unter prozentualer Schaumlöschmittelzugabe erst mit einem Glasstab verrührt und anschließend mit einem Leitfähigkeits- und Temperaturmessgerät HI 99300 (Firma Hanna Instruments) vermessen. Die Zugabe des Schaumlöschmittels erfolgte mit einer Schrittweite von  $1 \%$ . Zur Verringerung des Messfehlers wurde die prozentuale Zugabe des Schaumlöschmittels bis  $8 \%$  durchgeführt, obgleich im Allgemeinen keine höhere Zumischung als  $6 \%$  von Schaumlöschmitteln zur Schaumerzeugung angewendet wird.

In Abbildung 11 sind die gemessenen Leitfähigkeitskennlinien für die sieben untersuchten Schaumlöschmittel in Abhängigkeit von der prozentualen Zumischung

dargestellt. Gemäß [17] können die hiernach zertifizierten Schaumlöschmittel einen pH-Wert zwischen 6,0 und 9,5 besitzen. Die Hersteller geben auf ihren Produktdatenblättern [39-45] pH-Werte zwischen 6,5 und 8,5 an. Grundsätzlich kann angenommen werden, dass die Leitfähigkeit mit zunehmender prozentualer Zumischung steigt. Die Kurvenverläufe in Abbildung 11 weisen insgesamt für alle Schaumlöschmittel eine Zunahme der Leitfähigkeit mit zunehmender Zumischung auf. Einen besonders starken Anstieg der Leitfähigkeit wurde bei der Schaumlöschmittelprobe 6 verzeichnet. Oberhalb einer Zumischung von 5 % konnten keine weiteren Leitfähigkeitswerte gemessen werden, da bei der Zumischung von 6 % des Schaumlöschmittels die Messgrenze von 3999  $\mu\text{S}$  des Messgerätes erreicht wurde. Diese Messung wurde mehrfach wiederholt, ohne dass eine Änderung des Kurvenstieges zu verzeichnen war. Es wird vermutet, dass diese Probe Bestandteile enthält, die im gelösten Zustand einen erhöhten Beitrag zur Leitfähigkeit liefert. Eine Schnellprüfung des pH-Wertes mit Lackmuspapier entsprach den Angaben des Herstellers.

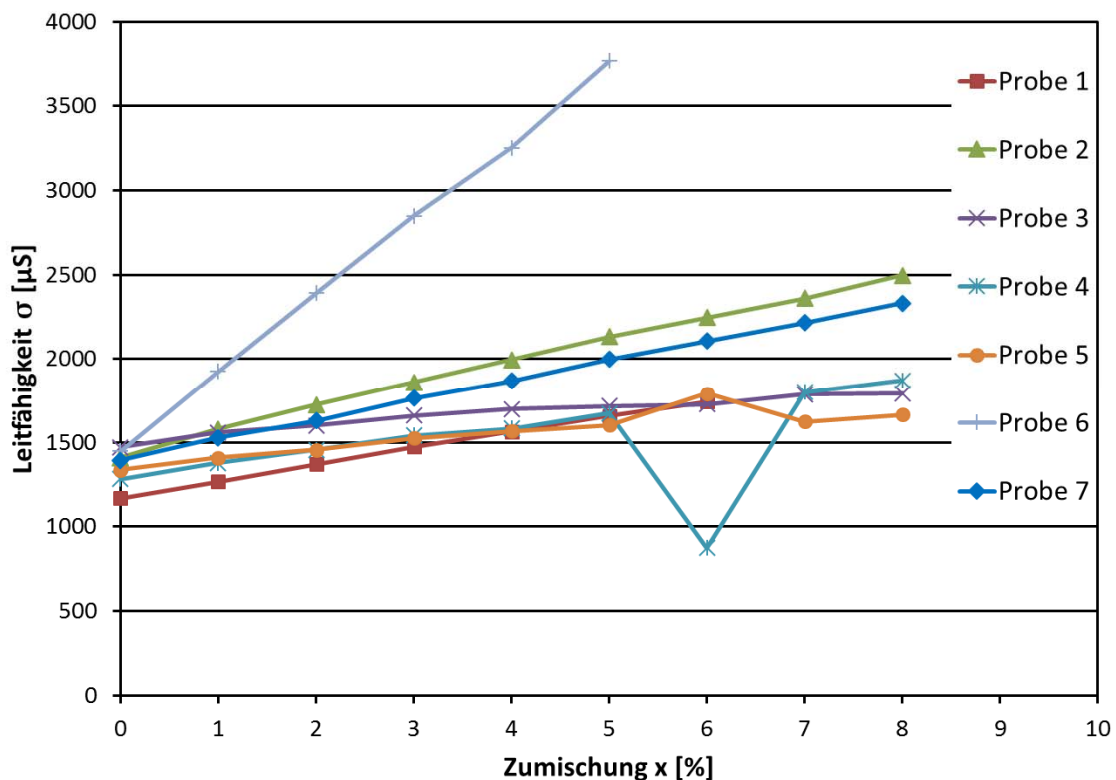


Abbildung 11: Leitfähigkeit als Funktion der Zumischung für die untersuchten Schaumlöschmittel

Bei den Leitfähigkeitsmessungen der Schaummittellösungen für die Proben 4 und 5 bei einer Zumischung von 6 % des Schaumlöschmittelkonzentrats wurden Messwerte der Leitfähigkeit ermittelt, die stark im Vergleich zu den anderen Messwerten dieser Messreihe abweichen. Diese Abweichung wird auf den Einfluss von Luftpneinschlüssen in der Mischung zurückgeführt. Beim Hinzufügen des Schaumlöschmittels in das Wasser und auch bei der Durchmischung mit dem

Glasstab können solche Luft einschließen entstehen. Beide abweichenden Werte werden in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit für geringe Konzentrationen bei Flüssigkeiten ist im Allgemeinen linear. Für die in Abbildung 11 aufgezeigten Messkurven der temperaturkompensierten Werte der Leitfähigkeit wurde eine lineare Regression durchgeführt und in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der linearen Regression für die Leitfähigkeiten der untersuchten Löschschaummittel

Probe	Lineare Regressionsgerade $y = a + b \cdot x$		Korrelationskoeffizient $R^2$	Temperatur T in °C
	a in $\mu\text{S}$	b in $\mu\text{S} \cdot \%^{-1}$		
1	1175,0	96,250	0,9988	19,0
2	1444,8	133,270	0,9973	26,1
3	1516,8	37,967	0,9444	28,6
4	1303,9	71,703	0,9956	22,1
5	1376,4	39,248	0,9349	22,0
6	1458,7	458,600	0,9993	25,0
7	1404,3	116,480	0,9994	20,2

In der Abbildung 11 ist erkennbar, dass die Leitfähigkeit des Brunnenwassers ohne Schaumlöschmittel nicht konstant ist, sondern einem Schwankungsbereich von 1169  $\mu\text{S}$  bis 1472  $\mu\text{S}$  aufweist. Ursächlich hierfür wird der gelöste Salz- und Mineraliengehalt im Brunnenwasser angenommen. Zum Tagesbeginn bestand im Brunnenwasser ein Gleichgewicht und im Tagesverlauf je nach Brunnenwasserabnahme und Grundwasserzuströmung rief dieser zugunsten der leicht löslichen Salze sowie Mineralien ein Ungleichgewicht hervor.

### **Fluorgehalt**

Die Grundanforderung an die sechs ausgewählten Löschschaummittel war, keine Fluortenside zu enthalten. Das Vergleichsschaummittel dagegen konnte Fluortenside beinhalten und wurde infolgedessen nicht in diese Untersuchung einbezogen. Bei diesen sechs Schaumlöschmitteln handelt es sich um synthetische Schaummittel. Die Schaumbildung resultiert aus den enthaltenen Tensiden. Daneben sollten weitere Inhaltsstoffe z. B. Schaumstabilisatoren enthalten sein, wie sie im Punkt 2.1 aufgeführt wurden.

Die Auswertung der Produkt- und Sicherheitsdatenblätter der zu untersuchenden Schaumlöschmittel lieferte verschiedene Inhaltsstoffe. Den Hauptbestandteil bilden

dabei natürliche und künstliche Tenside. Am häufigsten wurde das nichtionische Tensid 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol angegeben (vier Hersteller). Ähnliche Stoffe wie 3-Butoxypropan-2-ol gaben die anderen Produzenten an. Zuckertenside wie Alkyl polyglycoside zählten bei einigen Herstellern ebenso zu den Bestandteilen. Daneben wurden Ethandiol und verschiedene Glycolverbindungen angegeben. Diese Substanzen können als Frostschutzmittel und im Falle des Ethandiol auch als Korrosionsschutzmittel im Schaumlöschmittel fungieren. Weiterhin wurden Polymere auf Glukosebasis (Polymerisierungseigenschaft des Zuckers bei Wärmeeinwirkung) angegeben, welche vermutlich die Polymerschicht bei Schaumaufgabe auf die brennende Flüssigkeit ausbilden.

Mit einem Messverfahren der Spektroskopie wurden die Schaumlöschmittelkonzentrate in der Ausgangskonsistenz auf Fluorhaltigkeit untersucht. Dieses Messverfahren war die Kernresonanzspektroskopie (NMR, Bruker DPX 400 der Firma Bruker Corporation).

Bei der NMR-Spektroskopie wurde zur Untersuchung der Fluorhaltigkeit ein Standard (NaF) herangezogen, der Fluor enthielt. Eine quantitative Aussage über den Fluoranteil liefert diese Analyse jedoch nicht. Hierzu müsste die genaue Fluorverbindung bekannt sein. Von den sechs untersuchten Schaumlöschmittelproben zeigte die Probe 2 einen Fluoranteil. Im Anhang A7 ist das zugehörige Spektrum dargestellt.

## **5.2 Ausgewählte Eigenschaften der Schaummittellösung**

Für alle zu untersuchenden Schaumlöschmittel wurden sowohl die Verschäumungszahl VZ und die Wasserhalb-/viertelzeit in Anlehnung an die DIN EN 1568-4 [17] bestimmt. Hierzu wurde mit dem für die Kleinlöschversuche angegebenen Schaumrohr bei einem anliegenden Druck von 7 bar der erzeugte Schaum auf eine Schaumrutsche (s. [17]) gegeben und in entsprechenden angefeuchteten Messzylindern aufgefangen. Über die so gewonnenen Proben wurden die Verschäumungszahl und das Drainageverhalten ermittelt. Diese Untersuchungen wurden für jedes Schaumlöschmittel zweimal durchgeführt.

### ***Verschäumung***

In der Tabelle 6 sind die experimentell bestimmten Verschäumungszahlen VZ für die untersuchten Schaumlöschmittel zusammengestellt. Im Allgemeinen wird die Verschäumungszahl durch das Schaumrohr bauartbedingt beeinflusst und kann nicht eingestellt werden. Trotzdem wird an dieser Stelle ein relativer Vergleich mit den von den Herstellern angegebenen Verschäumungszahlen durchgeführt, da die zu untersuchenden Schaumlöschmittel alle mit dem gleichen Schaumrohr und unter dem gleichen Druck während der Experimente verschäumt wurden.

Die ermittelten Verschäumungszahlen liegen im Bereich der Schwerschäume. Die Verschäumungszahl der Schaumlöschmittel-Probe 2 weicht deutlich von den

anderen Schaumlöschmittel-Proben ab. Im Vergleich mit der Angabe des Herstellers liegt diese Verschäumungszahl signifikant darunter. Aber auch die Schaumlöschmittel-Proben 4 und 5 liegen unter der vom Hersteller angegebenen Verschäumungszahl.

Tabelle 6: Ermittelte Verschäumungszahlen für die untersuchten Schaumlöschmittel

Schaumlöschmittel- Probe	Verschäumungszahl VZ
1	7,76:1
2	3,97:1
3	7,37:1
4	5,84:1
5	6,01:1
6	7,19:1
7	8,00:1

Für vier der Schaumlöschmittel-Proben wurde ein Bereich für die Verschäumungszahl bzw. der Terminus „größer als“ angegeben. Die Schaumlöschmittel-Proben 3 und 6 liegen leicht unterhalb des von ihrem Hersteller angegebenen Bereiches. Die anderen beiden Schaumlöschmittel-Proben liegen innerhalb des angegebenen Bereichs.

Die Schaumlöschmittel-Probe 7 muss gesondert betrachtet werden. Für die Erzeugung der Schäume wurde, wie erwähnt, Brunnenwasser verwendet. Bei der Erzeugung des Schaumes mit dem Schaumlöschmittel 7 konnte hiermit kein stabiler Schaum erzeugt werden. Aus diesem Grund wurden alle weiteren Untersuchungen mit dem Schaumlöschmittel 7 unter Verwendung von Leitungswasser hergestellt. Damit ist dieses Schaumlöschmittel nicht adäquat mit den anderen untersuchten Schaumlöschmitteln vergleichbar. Der Einfluss der Wasserqualität auf die Verschäumungszahl wurde von Kretschmar untersucht und dargelegt [49]. Somit wird dieses Löschmittel für die weiteren Betrachtungen der Wasserhalb-/viertelzeit sowie der Brand- und Löschversuche ausgeschlossen.

### ***Wasserhalb-/viertelzeit***

Die Ergebnisse für die Drainagezeiten der untersuchten Schaumlöschmittel wurden in Tabelle 7 zusammengestellt. Ebenso wie bei der Bestimmung der Verschäumungszahl wurde für die Ermittlung der Drainagezeiten Brunnenwasser für die Schaumherstellung verwendet. Ausgenommen hiervon war das Schaumlöschmittel 7 aufgrund der o. g. Schauminstabilität.

Im Gegensatz zur Forderung in der DIN EN 1568-4 [17] wurde für die Ermittlung der Wasserhalbzeit (WHZ) und der Wasserviertelzeit (WVZ) eine Abweichung von 20 % nicht als Wiederholungskriterium angewendet. Zur Beurteilung der erfassten

Drainagezeiten wurde die Vorschrift 5130 von FM Global [32] zugrunde gelegt. Danach wird für die erfassten Messpunktpaarungen (Zeit, Drainagevolumen) eine lineare Regression durchgeführt. Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  des Geradenausgleichs für die Drainagezeiten ist ein Maß für die Genauigkeit der Regression. Dieser Korrelationskoeffizient muss für den Geradenausgleich einen Wert von  $\geq 0,95$  besitzen.

Tabelle 7: Ermittelte Wasserhalb- und Wasserviertelzeit für die untersuchten Schaumlöschmittel

Probe	Lineare Regressionsgerade $y = a + b \cdot x$		Korrelationskoeffizient $R^2$	WHZ [mm:ss]	gemittelte WHZ [mm:ss]	WVZ [mm:ss]	gemittelte WVZ [mm:ss]
	a [ml]	b [ml/s]					
1 A	-12,66694	0,26783	0,98214	08:04	07:51	04:25	04:11
1 B	-4,25214	0,25997	0,97988	07:38		03:57	
2 A	-18,65995	0,11284	0,98928	36:35	35:14	19:40	19:11
2 B	-25,72729	0,12292	0,96289	33:52		18:41	
3 A	2,93103	0,0067	0,54642	-	-	-	-
3 B	-0,03561	0,00712	0,56	-	-	-	-
4 A	-2,1164	0,0873	0,97889	24:07	24:56	12:15	12:23
4 B	3,53585	0,07932	0,97274	25:45		12:30	
5 A	-1,78462	0,00923	0,67893	-	-	-	-
5 B	10,07123	0,00712	0,56	-	-	-	-
6 A	-25,16585	0,19241	0,97697	18:10	21:36	10:10	11:26
6 B	-19,17989	0,13492	0,98433	25:02		12:42	
7 A	-5,54598	0,02563	0,88016	-	-	-	-
7 B	-6,10564	0,02728	0,93077	-	-	-	-

Anhand der Tabelle 7 ist ersichtlich, dass für die Schaumlöschmittel 3, 5 und 7 dieser Korrelationskoeffizient unterhalb des geforderten Wertes liegt. Trotz mehrfacher Wiederholungen der Bestimmung der WHZ/WVZ mit diesen Schaumlöschmitteln wurde keine höhere Genauigkeit mit der Punkteschar erzielt. Ursächlich ist bei den Schaumlöschmittelproben der geringe bis hin zu keinem Ausfall von Wasser aus dem erzeugten Schaum. D. h. im Fall der Probe 7 fielen in den ersten 9 min 10 ml Wasser

aus. Im Gegensatz dazu fielen bspw. bei der Schaumlöschmittelprobe 6 im gleichen Zeitraum 75 ml aus. Diese erzeugten Schäume der Schaumlöschmittel 3, 5 und 7 gaben kaum Wasser ab.

Unter dem Punkt 5.1 wurde darauf verwiesen, dass sich die Drainagezeit mit steigender Oberflächenviskosität verlängert. Bei Betrachtung der dynamischen Viskosität für diese drei Schaumlöschmittel und unter der Berücksichtigung einer Umgebungstemperatur oberhalb von 20 °C kann diese Aussage nur bedingt bestätigt werden. In der Abbildung 10 liegen die Werte der dynamischen Viskosität bei einem Schergefälle von  $375 \text{ s}^{-1}$  und einer Messtemperatur von 20 °C für die Proben 5 und 7 der Schaumlöschmittel in unmittelbarer Nähe, jedoch liegt das Messergebnis von der Schaumlöschmittelprobe 3 wesentlich tiefer als die Messpunkte der beiden anderen Schaumlöschmittelproben. Eine Interpolierung der Werte für die dynamische Viskosität bei Temperaturen oberhalb von 20 °C nähert die Werte nur für die Schaumlöschmittelproben 5 und 7, jedoch nicht für die Probe 3 an.

Bei einem Vergleich der Drainagezeiten mit den Angaben der Hersteller der Schaumlöschmittel wird festgestellt, dass in zwei Fällen die gemittelte WVZ (vgl. Tabelle 7) leicht höher und in zwei Fällen leicht unter den Herstellerangaben liegt. Die vermuteten hohen WHZ und WVZ für die drei nicht bestimmbareren Proben der Schaumlöschmittel bestätigen sich durch die Herstellerangabe nur in einem Fall. Der Hersteller gibt in seinem Produktblatt für die WVZ Werte  $> 1 \text{ h}$  an. Damit erklärt sich bei einer Probe die Schwierigkeit, die WHZ und die WVZ zu bestimmen. Für die beiden anderen Schaumlöschmittelproben liegen die Herstellerangaben in dem Bereich der in der Tabelle 7 ermittelten mittleren WHZ und WVZ. Eine Ursache für dieses Verhalten ist zz. nicht geklärt.

### **5.3 Ergebnisse der Kleinlöschversuche**

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden mit dem Versuchsaufbau aus Punkt 4.1 und gemäß der Durchführungsbeschreibung aus Punkt 4.2 gewonnen.

Insgesamt wurden mehr als 105 Experimente mit verschiedenen Brennstoff-Schaumlöschmittel-Kombinationen durchgeführt. Jede Brennstoff-Schaumlöschmittel-Kombination wurde dreimal mindestens wiederholt. Die gemessene Zeit pro Brennstoff-Schaumlöschmittel-Kombination wurde für die erfolgreichen Versuche gemittelt. Diese gemittelten Werte werden in den folgenden Diagrammen zur Darstellung verwendet.

#### ***Kontrollzeiten und Löschzeit***

In den Abbildungen 12 – 16 wurden die gemittelten Kontroll- und Löschzeiten für den jeweiligen Brennstoff dargestellt. Die Schaumlöschmittel wurden in den Diagrammen mit Probe 1 – 6 bezeichnet und besitzen die gleiche Farbgebung zum besseren Vergleich. Die Probe 1 ist dabei das Vergleichsschaumlöschmittel (alkoholbeständiger AFFF-Schaum). Die Probe 7 wird nachfolgend nicht weiter



betrachtet, da sie mit Leitungswasser erzeugt wurde und damit nicht mit den anderen Schaumlöschmitteln vergleichbar ist.

Für die Brennstoffe Aceton und Isopropanol war aufgrund der Zertifizierung der Schaumlöschmittel nach der DIN EN 1568-4 [17] zu erwarten, dass alle Schaumlöschmittel diese beiden Brennstoffe hinreichend löschen. Dabei gilt gemäß [17], dass das angewendete Schaumlöschmittel zuerst innerhalb von 120 s den Brennstoff löschen kann. Wenn dieses Zeitfenster zu kurz ist, besteht die Möglichkeit, direkt im Anschluss an die ersten 120 s für weitere 120 s den zu untersuchenden Schaum aufzugeben, bis dieser die Brennstoffoberfläche gelöscht hat.

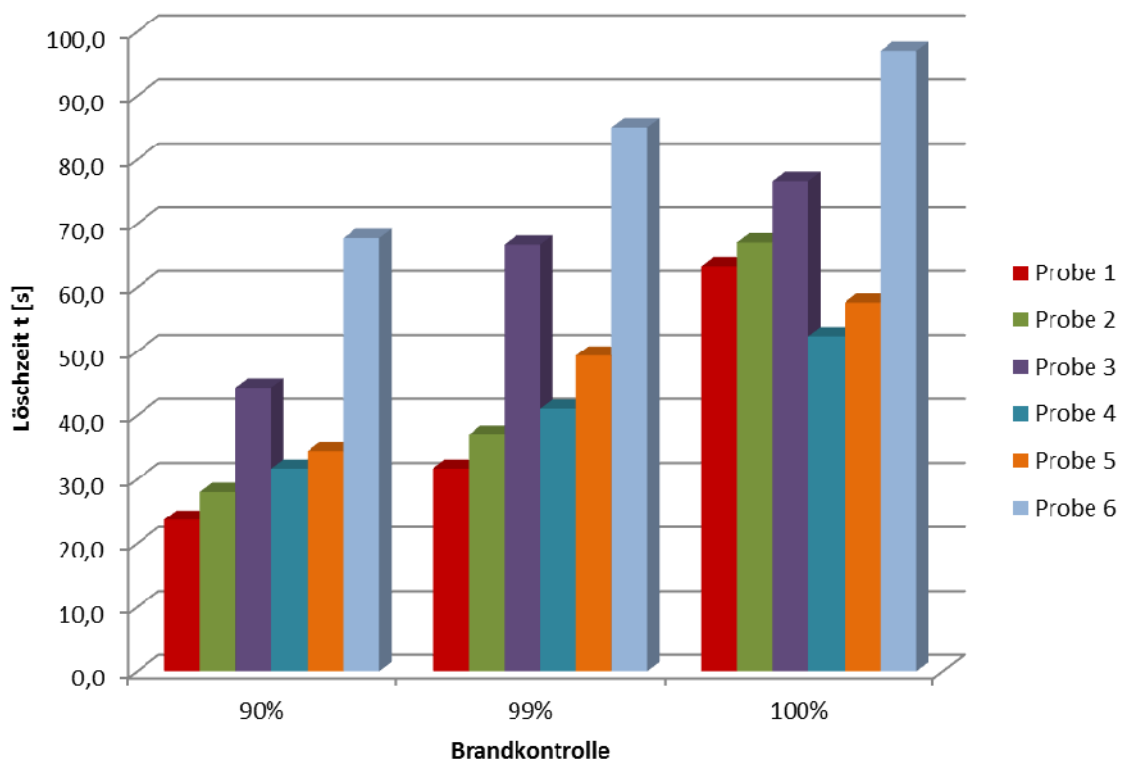


Abbildung 12: Brandkontroll- und Löschezit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff Aceton

Alle angewendeten Schaumlöschmittel auf den Brennstoff Aceton (vgl. Abbildung 12) löschten diesen innerhalb der ersten 120 s. Auffällig ist, dass bei den ermittelten Kontrollzeiten für 90 % und 99 % der Brennstoffflächenabdeckung das zeitliche Verhalten der angewendeten Schaumlöschmittel sich ähnelt, wobei das Vergleichsschaumlöschmittel (Probe 1-AFFF) die kürzeste Zeit aufweist. Zwei Schaumlöschmittel, die Probe 3 und die Probe 6, fallen auf, da für sie längere Kontrollzeiten gemessen wurden. Dieses ähnliche Verhalten verändert sich bei der gemittelten Löschezit. Die kürzeste gemittelte Löschezit besaß das Schaumlöschmittel 4, gefolgt vom Schaumlöschmittel 5. Danach löschten das Vergleichsschaumlöschmittel und die Proben 2 sowie 3. Das Schaumlöschmittel 6 zeigt die höchste Löschezit mit 97,0 s für den Brennstoff Aceton. Die Zeitdifferenz zwischen den Schaumlöschmitteln 4 und 3 betrug 24,4 s.

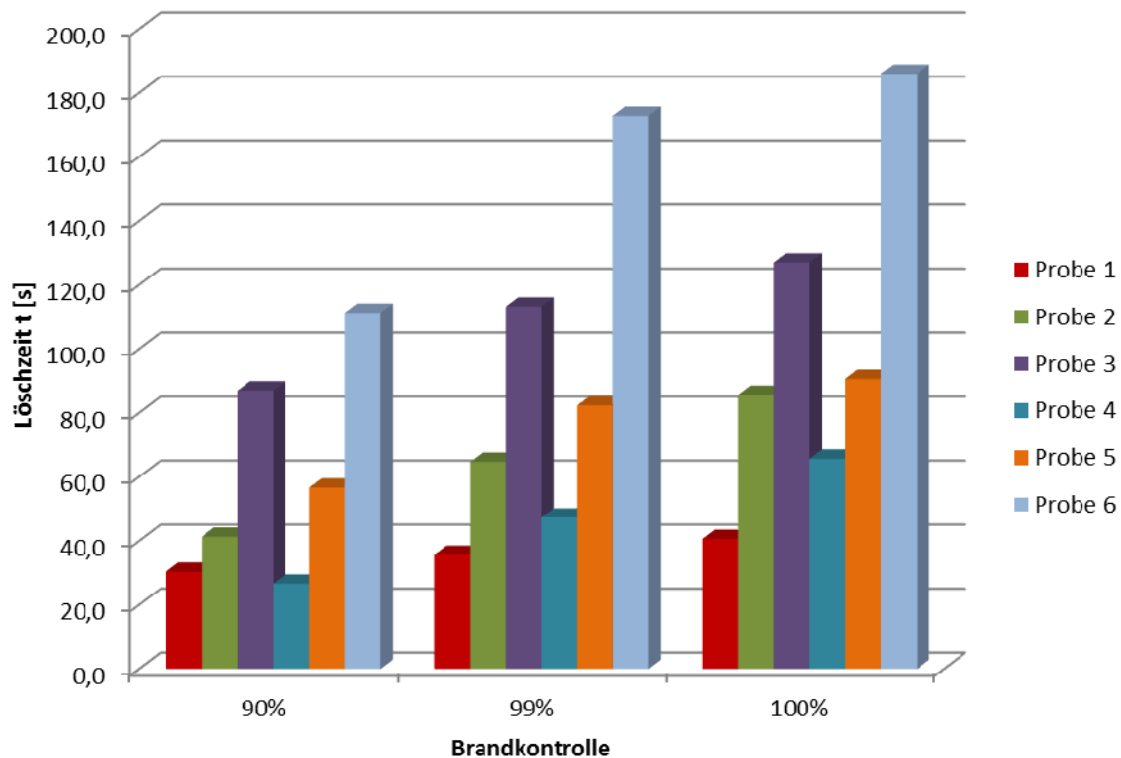


Abbildung 13: Brandkontroll- und Löschzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff Isopropanol

Für den Brennstoff Isopropanol wurde festgestellt, dass im zeitlichen Verhalten sowohl für die Kontrollzeiten als auch für die Löschzeit alle Schaumlöschmittel sich im Verhältnis zueinander bei den Kontrollzeitpunkten ähnlich verhielten, wobei das Vergleichsschaumlöschmittel (Probe 1 – AFFF) am schnellsten die 99 % Brandflächenabdeckung und die Löschung erzielte. Lediglich die Schaumlöschmittelprobe 4 war bei der 90 % Kontrollzeit 3,6 s schneller als das Vergleichsschaumlöschmittel. Die Schaumlöschmittel 2-6 benötigten mehr Zeit, um die entsprechenden Kontrollpunkte zu erreichen. Insbesondere bei der Löschzeit überschritten die Schaumlöschmittel 3 ( $t_{\text{Lösch}} = 127,0 \text{ s}$ ) und 6 ( $t_{\text{Lösch}} = 186,0 \text{ s}$ ) die ersten 120 s (Vorgabe gemäß [17]). Beide Schaumlöschmittel lagen bei der Löschzeit jedoch innerhalb der Grenze von  $t_{\text{Lösch}} = 240 \text{ s}$ . Das Vergleichsschaumlöschmittel löschte im Mittel nach 40,7 s die brennende Oberfläche. Das schnellste fluorfreie Schaumlöschmittel folgte mit einer mittleren Löschzeit von 65,7 s.

Der Brennstoff NMP, welcher das größte Dipolmoment aufwies und damit der polarste der verwendeten Brennstoffe ist, konnte von allen Schaumlöschmitteln am schnellsten im Vergleich zu den anderen getesteten Brennstoffen gelöscht werden. Einen wesentlichen Einfluss besitzen die höheren Temperaturen (vgl. Tabelle 3) dieses Brennstoffes, ebenso wie weitere physikalische stoffspezifische Kenngrößen z. B. Wärmeleitkoeffizient und spezifische Wärmekapazität. Infolgedessen ließ sich der Brennstoff nicht nur schwer entzünden, sondern die Durchwärmung des Brennstoffes erfolgte im Vergleich zu den anderen verwendeten Brennstoffen wesentlich langsamer. Dadurch bedingt, erfolgte ein langsamer Übergang von der

Flüssigphase in die Gasphase und somit eine langsamere Brennstoffzufuhr für die Verbrennung. Der aufgebrauchte Löschschaum wirkte damit schnell das gewünschte Ziel. In der Abbildung 14 ist deutlich zu erkennen, dass innerhalb von ca. 30 s (Probe 4:  $t_{\text{Lösch}} = 32,3$  s und Probe 3:  $t_{\text{Lösch}} = 32,0$  s) die brennende Oberfläche gelöscht war. Das Vergleichsschaumlöschmittel löschte mit  $t_{\text{Lösch}} = 21,3$  s am schnellsten. Für die Kontrollzeiten liegen die gemittelten Zeiten in einem Zeitfenster von 9,3 s für die 90 %-Kontrollzeit und von 11,3 s für die 99 %-Kontrollzeit.

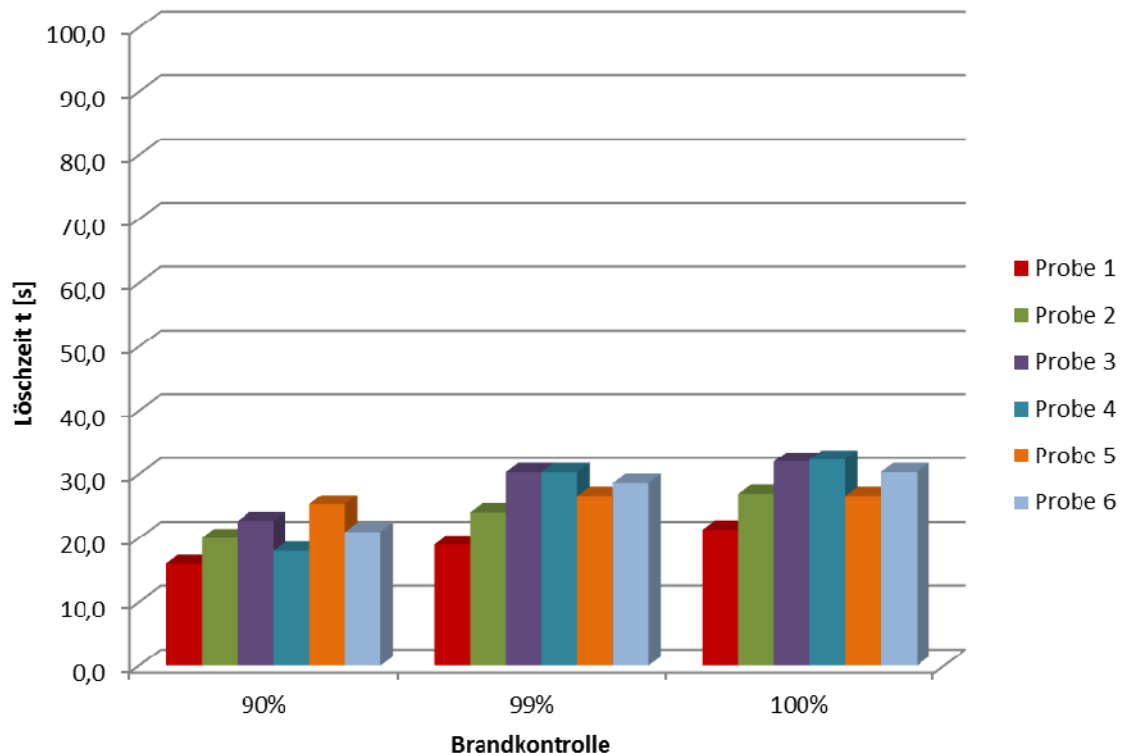


Abbildung 14: Brandkontroll- und Löschezit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff NMP

Bioethanol/Ethanol besitzt ein nahezu gleichgroßes Dipolmoment wie Isopropanol. Aufgrund dessen wurde vermutet, dass ein ähnliches Verhalten bei den Brennstoffen E10 und E85 auftreten könnte. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Abbildungen 15 und 16 im Vergleich mit den Ergebnissen der Abbildung 13 ist festzustellen, dass die Kontroll- und Löscheziten der Kraftstoffe (E10, E85) für alle fluorfreien Schaumlöschmittel nahezu gleiche Zeiten aufweisen.

Der Kraftstoff E10 (vgl. Abbildung 15) wird am schnellsten von dem fluorhaltigen Vergleichsschaumlöschmittel gelöscht. Die fluorfreien Schaumlöschmittel erreichen die Zeitpunkte für die 90 %-Kontrollzeit zwischen 11,7 s und 19,4 s, für die 99 %-Kontrollzeit zwischen 14,6 s und 19,6 s sowie für die Löschezit zwischen 4 s und 14 s später.

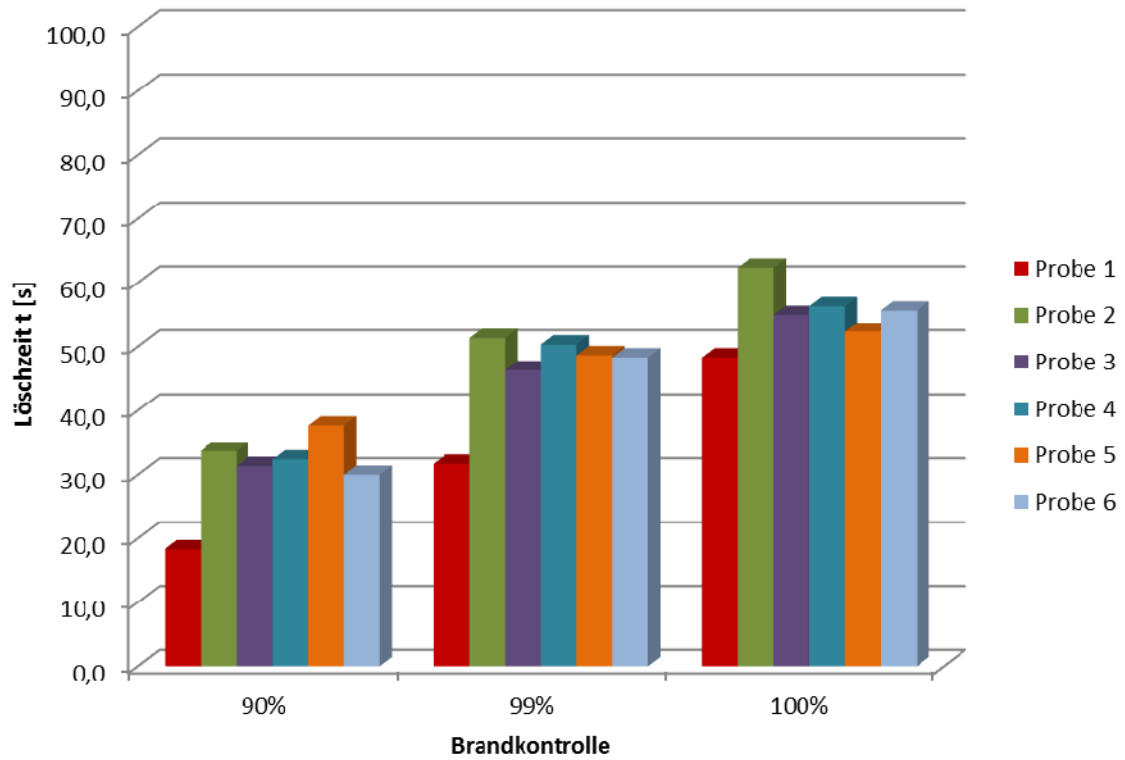


Abbildung 15: Brandkontroll- und Löschezit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff E10

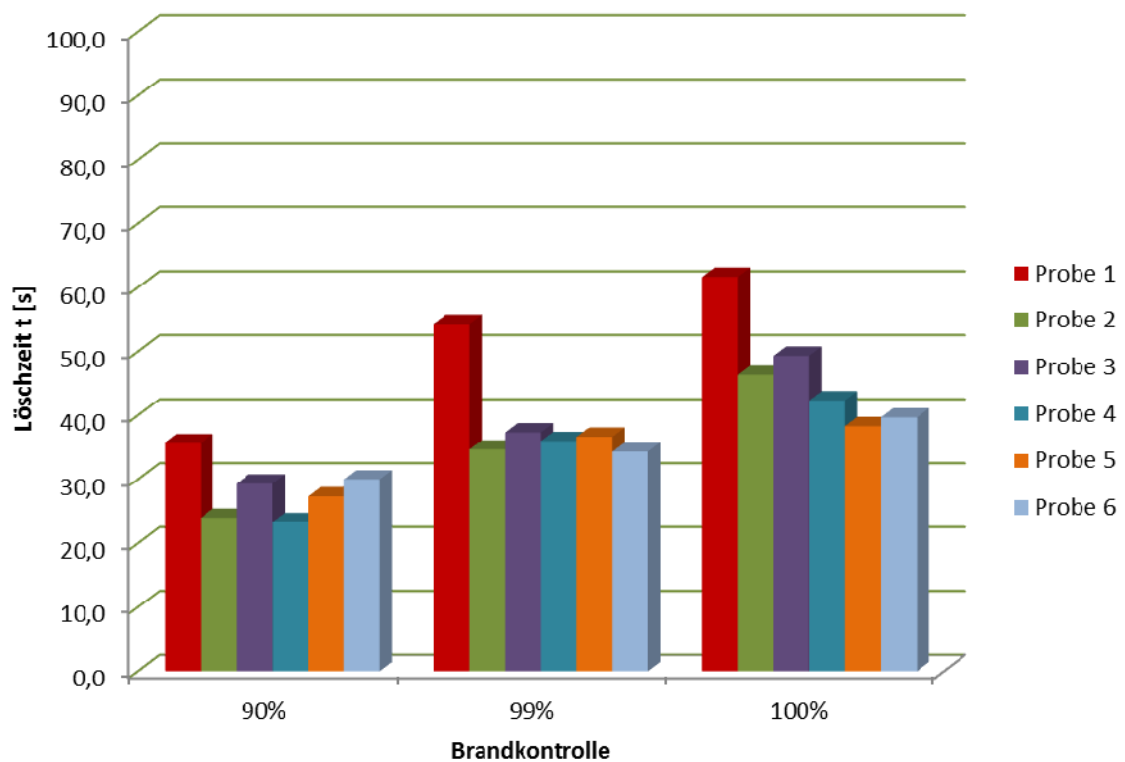


Abbildung 16: Brandkontroll- und Löschezit der untersuchten Schaumlöschmittel für den Brennstoff E85

Im Gegensatz hierzu schneidet das Vergleichsschaumlöschmittel bei dem Kraftstoff E85 wesentlich schlechter ab als die fluorfreien Schaumlöschmittel. So benötigt das Vergleichsschaumlöschmittel durchschnittlich 6,4 s für die 90 %-Kontrollzeit, 20 s für die 99 %-Kontrollzeit und 23,4 s für die Löschzeit länger als das jeweils schlechteste fluorfreie Schaumlöschmittel. Des Weiteren erreichen alle fluorfreien Schaumlöschmittel früher die Kontroll- und Löschzeiten im Vergleich zu den Werten dieser Zeiten beim Kraftstoff E10.

Um das Löschverhalten der einzelnen fluorfreien Schaumlöschmittel im Vergleich zum fluorhaltigen Vergleichsschaumlöschmittel besser beurteilen zu können, wurden die gemittelten Löschzeiten auf die gemittelte Löschzeit des Vergleichsschaumlöschmittels (Probe 1) normiert, d. h.  $t_{\text{Lösch}}(\text{Probe X}) / t_{\text{Lösch}}(\text{Probe 1}) = \text{normierte Löschzeit}$ , und für die fünf Brennstoffe in der Abbildung 17 dargestellt.

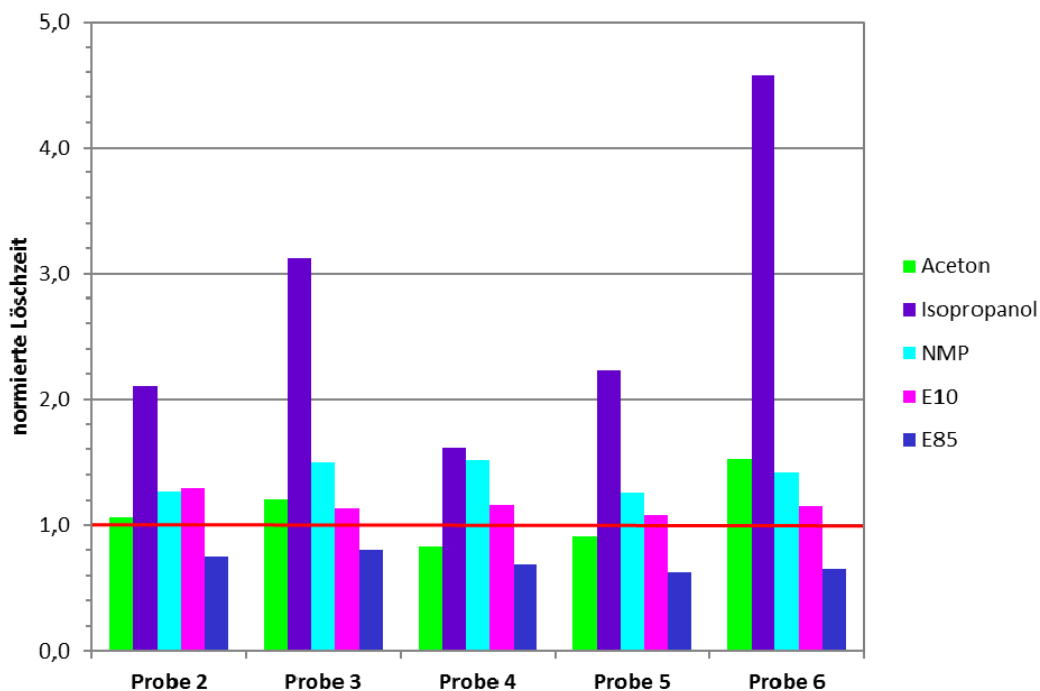


Abbildung 17: Vergleich der normierten Löschzeiten der fluorfreien Schaumlöschmittel für die fünf Brennstoffe

Die in der Abbildung 17 enthaltene rote Linie stellt die Bezugslinie zum Vergleichsschaumlöschmittel ( $t_{\text{Lösch}}(\text{Probe 1}) / t_{\text{Lösch}}(\text{Probe 1}) = 1$ ) dar. Anhand der Darstellung ist zu erkennen, dass alle fluorfreien Schaumlöschmittel ihre schlechtesten Löschzeiten bei ihrer Anwendung auf Isopropanol besitzen und ihre besten Löschergebnisse auf dem Kraftstoff E85. Hervorzuheben ist die Schaumlöschmittelprobe 4, da diese bei den Brennstoffen Aceton und E85 besser als das Vergleichsschaumlöschmittel löschte. Weiterhin liegen die Löschzeiten für die drei anderen Brennstoffe in einem moderaten Bereich über der Vergleichsprobe, welches insbesondere auf die Löschzeit beim Isopropanol zurückzuführen ist.

## 25 %-Rückbrandzeit

In den Abbildungen 18 wurden die gemittelten Rückbrandzeiten (Rückbrandfläche = 25 % der Brennstoffoberfläche) für den jeweiligen Brennstoff dargestellt. Die Schaumlöschmittel werden in dem Diagramm mit Probe 1-6 benannt und besitzen die gleiche Farbgebung zum besseren Vergleich wie in den Abbildungen 12-16. Die Probe 1 ist dabei das Vergleichsschaumlöschmittel (alkoholbeständiger AFFF-Schaum). Die Probe 7 wird nachfolgend aus dem oben angeführten Grund (s. S. 37) nicht weiter betrachtet.

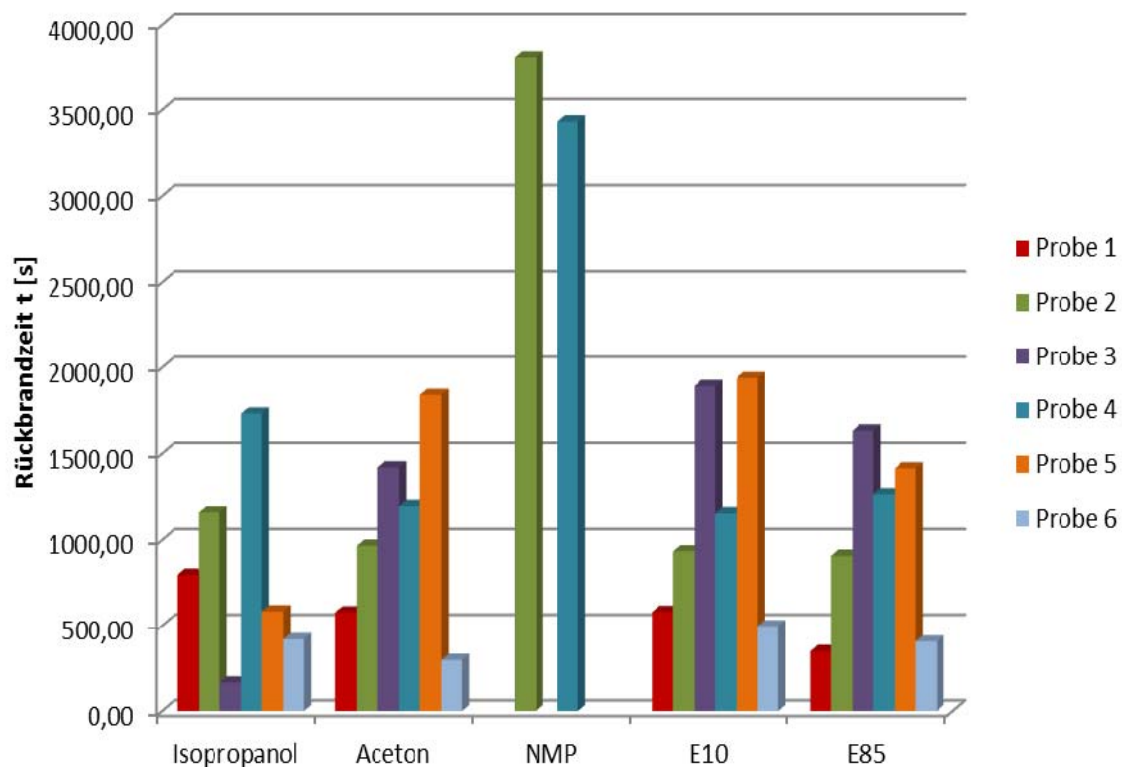


Abbildung 18: Gemittelte 25 %-Rückbrandzeit der untersuchten Schaumlöschmittel für die fünf Brennstoffe

Die höchste Rückbrandbeständigkeit wiesen alle Schaumlöschmittel bei dem Brennstoff NMP auf. Die abgebildeten Rückbrandzeiten lagen dabei oberhalb von 1 h. Am schlechtesten schneiden die Schaumlöschmittel auf dem Brennstoff Isopropanol ab. Nur zwei Schaumlöschmittel erzielen eine Rückbrandbeständigkeit, die oberhalb von 15 min (= 900 s) liegt. Selbst das Vergleichsschaumlöschmittel erreicht diesen Wert (798 s) nicht. Die kleinste Rückbrandbeständigkeit wies Probe 3 mit 166 s auf. Dieser Wert liegt unterhalb den Forderung nach [17], welche als kleinste Zeitangabe bei der Rückbrandbeständigkeit einen Wert von 5 min (= 300 s) angibt.

Für die Brennstoffe Aceton, E10 und E85 erreicht das Vergleichsschaumlöschmittel diese Rückbrandbeständigkeit. Das fluorfreie Löschschaummittel 6 bleibt beim Brennstoff Aceton unterhalb dieses Wertes, jedoch bei den Brennstoffen E10 und E85 liegt die Rückbrandbeständigkeit oberhalb der 300 s. Alle anderen fluorfreien

Schaumlöschmittel besitzen eine Rückbrandbeständigkeit bei den Brennstoffen Aceton, E10 und E85, die oberhalb von 900 s liegen und als ausgezeichnet gelten.

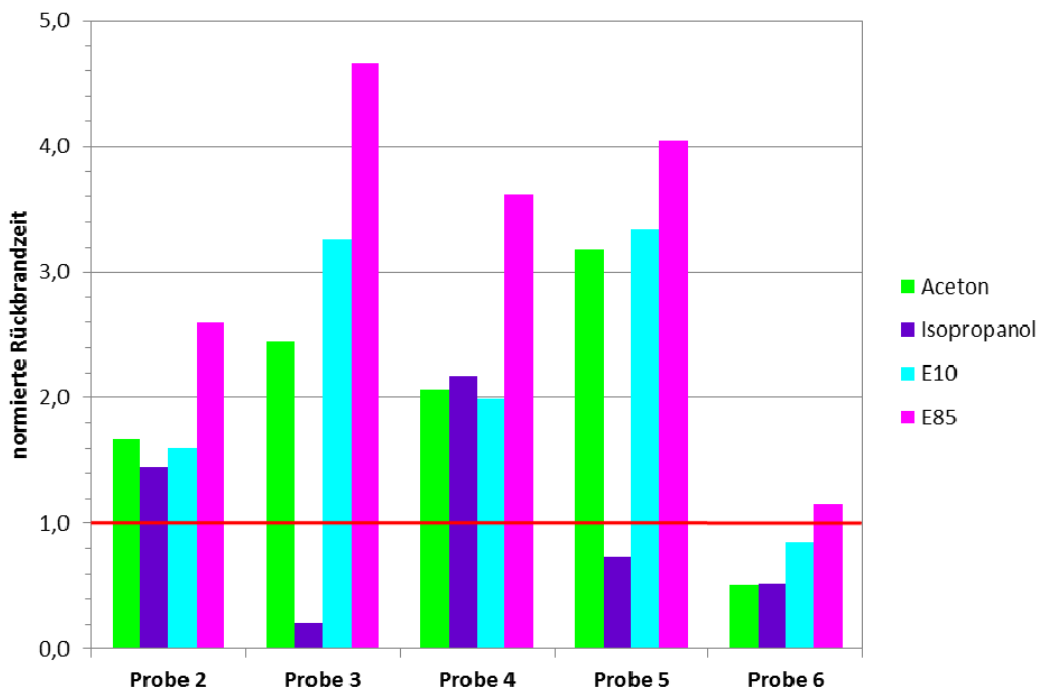


Abbildung 19: Vergleich der normierten 25 %-Rückbrandzeiten der fluorfreien Schaumlöschmittel für die fünf Brennstoffe

Um das Rückbrandverhalten der einzelnen fluorfreien Schaumlöschmittel im Vergleich zum fluorhaltigen Vergleichsschaumlöschmittel besser beurteilen zu können, wurden die gemittelten 25 %-Rückbrandzeiten auf die 25 %-Rückbrandzeit des Vergleichsschaumlöschmittels (Probe 1 ) normiert und für vier der fünf Brennstoffe in der Abbildung 19 dargestellt. Der Brennstoff NMP wurde aus dieser Betrachtung herausgenommen aufgrund der hohen Rückbrandbeständigkeit für alle auf diesen Brennstoff angewendeten Schaumlöschmittel.

Anhand der Abbildung 19 wird bestätigt, dass im Vergleich zum Vergleichsschaumlöschmittel die Probe 6 am schlechtesten im Rückbrandverhalten abschneidet. Die Schaumlöschmittel 4 und nachfolgend 2 weisen für alle Brennstoffe eine höhere Rückbrandbeständigkeit als das Vergleichsschaumlöschmittel auf. Die Schaumlöschmittel 3 und nachfolgend 5 zeigen nur bei der Rückbrandbeständigkeit für Isopropanol schlechtere Werte als das Vergleichsschaumlöschmittel.

### **Weitere Beobachtungen**

Unterschiedliche Reaktionen wurden während der Versuchsdurchführung der verschiedenen Brennstoff-Schaumlöschmittel-Kombinationen wahrgenommen und dokumentiert. An dieser Stelle wird kurz hierauf eingegangen.

Das Auftreten von so genannten Geisterflammen – Entzündung von Brandgasen, die durch die geschlossene Schaumdecke permeieren oder aus durch die geschlossene Schaumdecke nach oben strebender und anschließend zerplatzender Brandgasblasen (s. Abbildung 20) – zählt zu diesen Reaktionen. Die

Permeationsgeschwindigkeit durch die Schaumlamellen ist unterschiedlich und bei ausreichender Größe des Permeationsstroms kann dieser durch die Flamme des Rückbrandgefäßes oder je nach Eigenschaften des Brennstoffes sich entzünden [50]. Diese Geisterflammen (vgl. Abbildung 21) traten vornehmlich nach dem Einstellen des Rückbrandgefäßes auf. In den meisten Fällen ihres Auftretens führten diese eine spiralförmige Bewegung oberhalb des Schaums vom Ort ihrer Entzündung zum Brandwannenrand aus und zerstörten dabei die obere Schaumstruktur. Die Größe und die Anzahl gleichzeitig sowie nacheinander auftretende Geisterflammen waren unterschiedlich. Eine Zunahme dieses Phänomens war mit zunehmender Rückbrandbeständigkeit und Schaumzerfall zu verzeichnen. In Tabelle 8 ist das Auftreten dieser Erscheinung beim Einstellen des Rückbrandgefäßes für die jeweilige Brennstoff-Schaumlöschmittel-Kombination aufgelistet.



Abbildung 20: Empor gestiegene Gasblasen im Schaum

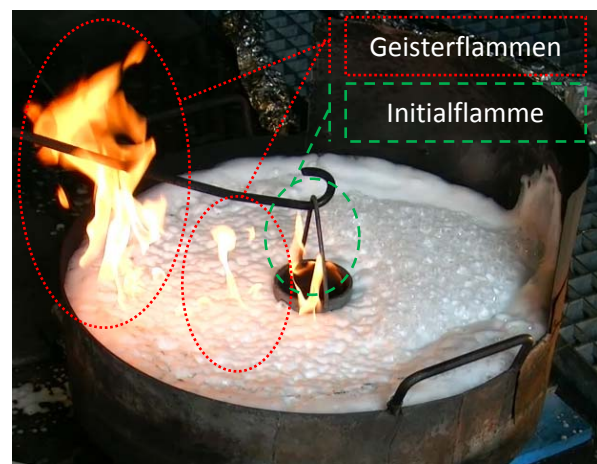


Abbildung 21: Geisterflammen beim Einstellen des Rückbrandgefäßes

Tabelle 8: Auftreten von Geisterflammen beim Einstellen des Rückbrandgefäßes

Brennstoff	Flammen beim Einstellen des Rückbrandgefäßes					
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
Isopropanol						
Aceton						
NMP						
E10	X	X	X		X	
E85	X		X		X	X

Anhand der Tabelle 8 ist zu erkennen, dass die Bio-Ethanol-haltigen Brennstoffe maßgeblich vom Auftreten der Geisterflammen betroffen sind. Bei Betrachtung des Permeationsprozesses sind die physikalisch-chemischen Eigenschaften vermutlich nicht der Grund für das ausschließliche Auftreten der Geisterflammen beim Bio-Ethanol. Besonders die anscheinende Unabhängigkeit von der Bio-Ethanol-Konzentration lässt darauf schließen, dass die Anwesenheit von Bio-Ethanol nicht ausschlaggebend ist. Wie die Untersuchungen an fluorfreiem Schaumlöschmittel am WIS [63] ergaben, sind fluorfreie Schaumlöschmittel häufig weniger beständig auf



unpolaren Brennstoffen. Da die Geisterflammen ausschließlich bei den Brennstoffen E10 und E85 aufgetreten sind, ist vermutlich der unpolare Anteil des Brennstoffs (Kraftstoff Super) an der Schaumzerstörung und Permeation maßgeblich beteiligt. Ein Nachweis darüber, welche Zusammensetzung die gezündeten Brandgase besitzen, die zu den Geisterflammen führen, wurde nicht durchgeführt und bedarf zusätzlicher weiterführender Untersuchungen.



Abbildung 22 : Zylinderbildung des Schaums um Rückbrandgefäß

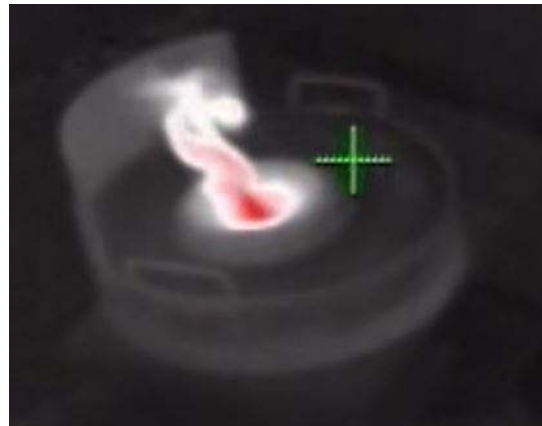


Abbildung 23: Zylinderbildung des Schaums im Infrarotbild

Ein weiteres auftretendes Phänomen war die Ausbildung eines „Schaumzylinders“ konzentrisch um das Rückbrandgefäß (vgl. Abbildung 22) in der Art, dass die Schaumhöhe sich beginnend mit dem Einstellen des Rückbrandzylinders senkte und mit zunehmender Zeit der Durchmesser dieses Gebietes zunahm.

Tabelle 9: Zylinderbildung für die verschiedenen Schaumlöschmittel-Brennstoff-Kombinationen

Brennstoff	Zylinderbildung um das Rückbrandgefäß					
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
Isopropanol	X	X		X	X	
Aceton	X	X	X	X	X	
NMP	X	X	X	X	X	X
E 10		X	X	X	X	X
E85		X	X	X	X	X

Diese Beeinflussung des Schaums durch das Rückbrandgefäß resultiert aufgrund der stetigen Wärmeabgabe (Wärmeleitung und Wärmestrahlung) durch die im Rückbrandgefäß brennende Flüssigkeit, welches den angrenzenden Schaum erwärmt und das Volumen innerhalb der Gasblasen vergrößerte. Dies bewirkt, dass der Schaum scheinbar nach dem Einstellen des Rückbrandgefäßes an dessen Wandung aufstieg. Mit fortschreitender Zeit hielten die Schaumlamellen dem zunehmenden inneren Druck durch die Erwärmung nicht stand und die größeren Schaumblasen zerfielen. Benachbarte Gasblasen wurden durch den Prozess der

Erwärmung und auch des Zerfalls beeinflusst, so dass sie zu einem späteren Zeitpunkt zerfielen. Dass in unmittelbarer Nähe des Rückbrandgefäßes der „Schaumzylinder“ eine höhere Temperatur besitzt, wird durch das Bild der Wärmebildkamera bestätigt (s. Abbildung 23).

Die Zylinderbildung fand nicht bei allen Versuchen statt (vgl. Tabelle 9). Dies ist vermutlich zurückzuführen auf eine thermische Stabilität der Schäume oder auf eine zu schnelle Zerfallsrate des Schaumes. Alle Kombinationen von Schaumlöschmittel – Brennstoff, bei denen keine Zylinderbildung auftrat, ausgenommen die Kombination Vergleichsschaumlöschmittel 1 – E10, wiesen für den jeweiligen Brennstoff die niedrigste Rückbrandzeit auf.



Abbildung 24 : Rückbrand durch Schaumschicht    Abbildung 25 : Beginnender Rückbrand durch zerstörte Schaumschicht

Der Zeitpunkt für den Start des Rückbrandes variiert je Schaumlöschmittel-Brennstoff-Kombination. In einigen Fällen waren die auftretenden Geisterflammen so zahlreich und ausgedehnt, dass infolgedessen die Schaumzerstörung rasant zunahm und damit die Brennstoffoberfläche freigelegt wurde. Des Weiteren bestand ebenso die Möglichkeit, dass der Rückbrand infolge der Geisterflammen durch die geschlossene Schaumdecke erfolgte (vgl. Abbildung 24) und mit zunehmender Zeit und Bewegung der Flammen auf der Schaumoberfläche diesen zerstörte. Bei anderen Kombinationen zerfiel der Schaum in unmittelbarer Nähe des Rückbrandgefäßes und bei Freilegung der Brennstoffoberfläche begann dort die Rückzündung (s. Abbildung 25). Die übrige Brennstoffoberfläche war währenddessen weiterhin mit stabilem Schaum bedeckt.

Die Rückzündung beim NMP, wie in der Abbildung 26 gezeigt, erfolgte in den drei Fällen ausschließlich dadurch, dass die Schäume zerfallen waren und die zurück bleibende Polymerschicht auf der Brennstoffoberfläche nach ausreichend langer Zeit sich entzündete.

Inwieweit die Grenzkonzentration für eine Rückzündung eines Brennstoffs durch eine Schaumschicht hindurch überschritten wird, ist abhängig sowohl von dem Dampfdruck, dem Diffusionskoeffizienten und den Adsorptions-/Desorptionseigenschaften des Brennstoffs als auch von der Fähigkeit des Schaumlöschmittels,

als Diffusionssperre für die Brennstoffgasphase zu dienen. Beim Isopropanol findet die in [18] beschriebene Gelbildung innerhalb der Schaumlamellen infolge des Kontaktes mit polaren Gasen statt und bestimmt dadurch das Rückzündungsverhalten. Erst nach Zersetzung der Schaumschicht beginnt beim Isopropanol die Rückzündung (s. Tabelle 10). Die Rückzündung des E85 dagegen erfolgt bei noch intakter Schaumschicht. Trotz nahezu identischer Polaritätseigenschaften von Isopropanol und Ethanol beruht (vgl. Tabelle 2) vermutlich dieses Verhalten, wie oben erwähnt, aufgrund des Kraftstoffanteils im Brennstoff. Des Weiteren kann beim Brennstoff E10 die Gelbildung im geringeren Umfang erfolgen, weil dieser Brennstoff nur 10 % an Bioethanol (geringe Anteil eines polaren Stoffs) im Volumen enthält.



Abbildung 26 : Rückbrand nach zerstörter Schaumschicht beim NMP

Tabelle 10: Rückbrand durch Schaumschicht

Brennstoff	Rückbrand durch Schaumschicht					
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
Isopropanol						
Aceton	X	X				
E10	X	X	X	X	X	X
E85	X	X	X	X	X	X

Da die Schaummittel an den Lamellenoberflächen adsorbiert werden, kann ein Zusammenhang zwischen Schaummittelviskosität und Lamellenstabilität vermutet werden. Das Auftreten sogenannter Geisterflammen (s. Tabelle 8) konnte nur im Falle der Schaumlöschmittelprobe 4 für alle Brandstoffe unterbunden werden. Diese Probe 4 besitzt die höchste Viskosität bei allen Versuchstemperaturen des Schaumlöschmittels [38]. Bei den Rückbrandversuchen kam es lediglich bei den Proben 1 und 2 zu Rückzündungen des Acetons durch intakte Schaumschichten. Diese wiesen bei der höchsten untersuchten Temperatur (20 °C) die niedrigste Viskosität auf.

## 5.4 Bewertung der Umweltverträglichkeit

Anhand der Sicherheitsdatenblätter [52-57] der Schaumlöschmittel wurden spezifische Daten ausgewählt und zur Bewertung der Umweltverträglichkeit herangezogen. Diese spezifischen Daten sind die Wassergefährdungsklasse (WGK), die Umwelttoxizität und die Abbaubarkeit bzw. die Persistenz.

Nach der Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS) [58] wird die Wassergefährdungsklasse von Stoffgemischen entweder basierend auf den Einstufungen der Bestandteile oder auf Grundlage von Tierversuchen durchgeführt. Die möglichen Einstufungen erfolgen in

- WGK 1 - schwach wassergefährdend,
- WGK 2 - wassergefährdend und
- WGK 3 - stark wassergefährdend.

Alle Stoffe, die Dispergiermittel (z.B. Tenside) enthalten, müssen nach der VwVwS mindestens der WGK 1 zugeordnet werden. Allen fluortensidfreien untersuchten Schaumlöschmitteln wird laut den zugehörigen Sicherheitsdatenblättern die WGK 1 zugeordnet. Auf der Grundlage von Versuchen mit Algen (*Desmodesmus subspicatus*), Krustentieren (Daphnien) und Ratten (spezifizierte pathogenfreie Wistar Ratten) sowie der biologischen Abbaubarkeit bestätigt ein externer Prüfbericht [59] diese Einteilung für eines der fluorfreien Schaumlöschmittel.

Infolge der gleichen Zuordnung in die Wassergefährdungsklassen kann diese nicht für die Bewertung der Schaumlöschmittel herangezogen werden. Jedoch kann durch die Einstufung aller untersuchten Schaumlöschmittel in die niedrigste WGK geschlussfolgert werden, dass diese Schaumlöschmittel in niedrigen Konzentrationen kurzfristig nur eine geringe Belastung für die Umwelt darstellen.

In allen vorliegenden Sicherheitsdatenblättern wurde nach oder in Anlehnung an die OECD Richtlinien 201, 202 und 203 [60-62] die Umwelttoxizität klassifiziert. Zur Beschreibung der Umwelttoxizität werden die Substanzen an Algen und Cyanobakterien, Wasserflöhen (Daphnien) und Fischen getestet. Dabei wird die niedrigste Konzentration, bei dem 50 % der Testlebewesen nach definierten Zeiträumen noch leben, ermittelt. Für die bestmögliche Einstufung nach VwVwS muss diese niedrigste Konzentration einen Wert größer als 100 mg/l betragen. Alle untersuchten Schaumlöschmittel halten diese Grenze ein. Die niedrigste Konzentration wurden für zwei der Schaumlöschmittel in einem Bereich von (100 – 1000) mg/l und für drei weitere Schaumlöschmittel oberhalb von 1000 mg/l angegeben. Lediglich eines der untersuchten Schaumlöschmittel wurde mit einer niedrigen Konzentration von < 100 mg/l angegeben.

Die biologische Abbaubarkeit der Schaumlöschmittel wurde gemäß DIN EN ISO 9888 [63] untersucht. Demnach wird der biologische Abbau über einen definierten Zeitraum an Belebtschlamm untersucht, indem der gemessene chemische Sauerstoffbedarf oder der gelöste organische Kohlenstoff überwacht wird. Da einige

persistente Stoffe jedoch unter diesen Verfahrensbedingungen nicht zerfallen, sind die Messungen des chemischen Sauerstoffbedarfs oder der gelösten organischen Kohlenstoffe z.B. für PFTs nicht geeignet. Die Resultate dieser Messungen (Abbauraten) lassen somit keine Rückschlüsse zu, welche Stoffe abgebaut wurden und welche Zerfallsprodukte evtl. dabei entstanden sind.

Die Abbauraten von zwei Schaumlöschmitteln sind sehr hoch (100 % und 99 % in 28 Tagen). Die Zerfallsprodukte können dabei vernachlässigt werden, weil in diesen Fällen unter den gegebenen Testbedingungen keine bzw. fast keine weiter oxidierbaren Bestandteile enthalten sind. Die übrigen vier Schaumlöschmittel können ohne weitere Analyse der Zerfallsprodukte nicht hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit bewertet werden. Um ein Verbreitung dieser Stoffe in der Umwelt auszuschließen, sind zusätzliche Analysen auf persistente Stoffe notwendig.

## 6 Vergleichendes Fazit zu den untersuchten Löschschaummitteln

Die Praxistauglichkeit der untersuchten Schaummittel wird in diesem Punkt mittels ausgewählter Eigenschaften verglichen und bewertet. Diese Eigenschaften sind die Zumischrate, der Fluorgehalt, der Aggregatzustand bei -10°C, die Viskosität, sowie die Lösch- und Rückbrandzeiten auf den verschiedenen getesteten Brennstoffen. Die Quantifizierung der Daten erfolgt über den Vergleich der gemessenen/ angegebenen Werte der Schaumlöschmittel zwei bis sieben mit der Probe eins. Die Schaumlöschmittelprobe 7 wurde mit Leitungswasser angewendet (alle den anderen Schaumlöschmittelproben mit Brunnenwasser) und deshalb rot hinterlegt.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der ermittelten Schaumlöschmitteleigenschaften

Eigenschaft	Probe 1 Vergleichs- probe	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7
Zumischrate	3%	6%	6%	3%	6%	3%	6%
Fluor	Ja	Spuren	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Aggregatzustand bei -10°C	flüssig	fest	fest	flüssig	fest	flüssig	flüssig
Grenzviskosität unterschritten	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	ab 10°C	Nein
Vgl. Löschzeit, Isopropanol	41 s	110,7 %	212,3 %	61,5 %	123 %	357,4 %	533,2 %
Vgl. Löschzeit, Aceton	63 s	5,8 %	21,1 %	-17,4 %	-8,9 %	53,2 %	-5,3 %
Vgl. Löschzeit, NMP	21 s	26,6 %	50 %	51,6 %	25 %	42,2 %	14,1 %
Vgl. Löschzeit, E10	48 s	29 %	13,8 %	16,6 %	8,3 %	15,2 %	12,4 %
Vgl. Löschzeit, E85	61 s	-24,9 %	-20 %	-31,4 %	-37,8 %	-35,7 %	-37,8 %
Vgl. Rückbrandzeit, Isopropanol	798 s	45,4 %	-79,2 %	117,2 %	-26,8 %	-47,5 %	-29,7 %
Vgl. Rückbrandzeit, Aceton	579 s	67 %	145,3 %	106,7 %	218 %	-48,5 %	23,3 %
Vgl. Rückbrandzeit, E10	581 s	60,8 %	225,6 %	98,8 %	233,6 %	-14,3 %	3,6 %
Vgl. Rückbrandzeit, E85	350 s	159,4 %	366,6 %	261,4 %	304,3 %	16 %	104,3 %

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieses Vorhabens war es, Erkenntnisse über die Eignung von fluortensidfreien Schaumlöschmitteln und -löschverfahren bei häufig verwendeten brennbaren polaren Flüssigkeiten zu gewinnen. Die Aktualität für die Bearbeitung dieser Problematik resultiert daraus, dass auf Grundlage der EU-Richtlinien 1907/2006 und 2006/122/EG sowie der Stockholm-Konvention die Verwendung ausgewählter per- oder polyfluorierter Chemikalien reglementiert wurde. Ein Großteil der Schaumlöschmittel für brennbare polare Flüssigkeiten enthielt solche fluorhaltigen Chemikalien. Bei den Brennstoffen lag ein wesentliches Augenmerk auf den Kraftstoffen mit einem Bio-Ethanol-Anteil, da deren Verwendung infolge der EU-Richtlinie 2003/30/EC im letzten Jahrzehnt stetig zugenommen hat.

Das Angebot an fluorfreien alkoholbeständigen Schaummitteln in Europa unterliegt stetigen Marktentwicklungen. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen zu diesem Vorhaben waren 7 fluorfreie Schaummittel verfügbar, von denen 6 ausgewählt wurden. Des Weiteren wurde ein fluorhaltiges, unter deutschen Feuerwehren weitverbreitetes, alkoholbeständiges Löschschaummittel als Referenzlöschmittel hinzugezogen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden die Untersuchungen auf ein Löschverfahren begrenzt. Dieses ist das Schwerschaumlöschverfahren mit Schwerschaumrohr unter Verwendung eines Premixes.

Aus der Vielzahl der national als auch international existierenden Normen und Vorschriften zur Sicherstellung von Qualität und Mindestleistung von Löschsäumen wurde für dieses Vorhaben die Norm DIN EN 1568-4 [17] ausgewählt. Ihre Bedeutung für die deutschen Feuerwehren hinsichtlich der Anforderungen von Schwerschaum zur Aufgabe auf polare Flüssigkeiten war das Entscheidungskriterium. Das in dieser Norm beschriebene Kleinlöschverfahren wurde zum Testszenario für die Vergleichsuntersuchungen bestimmt.

Die Durchführungsbestimmungen der Norm DIN EN 1568-4 gaben zwei polare brennbare Flüssigkeiten als Brennstoffe vor. Diese waren Isopropanol (Propan-2-ol) und Aceton (Propan-2-on). Des Weiteren wurden zwei handelsübliche Kraftstoffe mit Bio-Ethanol-Anteil als Brennstoffe gewählt. Namentlich waren dies, Super E10 (maximaler Bio-Ethanol-Anteil 10 %) und Bioethanol E85 (maximaler Bio-Ethanol-Anteil 85 %). Als fünfter Brennstoff wurde N-Methyl-2-Pyrrolidon als eine sehr stark polare brennbare Flüssigkeit bestimmt.

Die ausgewählten Löschschaummittelkonzentrate wurden hinsichtlich der Eigenschaften Leitfähigkeit in Wasser und Viskosität sowie Fluorfreiheit untersucht. Ebenso wurden die Verschäumungszahl und Wasserhalbwertzeit/-viertelzeit des erzeugten Schaums dieser Löschschaummittelkonzentrate ermittelt. Die Beurteilung des Löschverhaltens erfolgte anhand von Lösch- und Rückbranduntersuchungen. Das Löschschaummittelkonzentrat 7 wurde für diese Untersuchungen aufgrund der eingeschränkten Verwendbarkeit als Premix zurückgestellt.

Die Untersuchungen der Leitfähigkeit der Schaumkonzentrate in Wasser zeigten, dass die Leitfähigkeitswerte des Schaummittelkonzentrats 6 bei der prozentualen Zumischung um das 0,75-Fache höher lagen als die der anderen vermessenen Schaummittelkonzentrate. Bei der Viskositätsmessung an den Schaummittelkonzentraten mit festem Schergefälle von  $375 \text{ s}^{-1}$  besaßen alle fluorfreien Schaummittelkonzentrate wesentlich höhere Werte der dynamischen Viskosität als das Referenzschaummittelkonzentrat. Diese Ergebnisse sind für die einzusetzende Feuerwehrtechnik bei der Schaumerzeugung relevant. Weiterhin ist die Viskosität ein Indiz für die Wirksamkeit von Schaumlamellen als Diffusionssperre.

Die verschiedenen chemischen Analysen an den 6 fluorfreien Schaummittelkonzentraten bestätigten die Herstellerangaben. Bei einem fluorfreien Schaummittelkonzentrat (Probe 2) wurden geringe, nicht quantitativ bestimmbare Mengen an Fluor ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Menge an Fluor unterhalb der gesetzlich vorgegebenen Menge für die Löschschaummittel liegt.

Die ermittelten Verschäumungszahlen der untersuchten Schaummittelkonzentrate erzielten Werte im Bereich der Schwerschäume, dabei war die Verschäumungszahl der Probe 2 mit  $VZ = 3,97$  am kleinsten und der Probe 6 mit  $VZ = 7,19$  am größten. Die Referenzprobe besaß eine Verschäumungszahl von  $VZ = 7,76$ . Die gemittelten Werte der Schäume wurden für die Wasserviertelzeit im Bereich von 8 - 20 min und für die Wasserhalbwertszeit im Bereich von 15 – 37 min gemessen. Bei den Proben 3 und 5 wurden höhere Wasserviertel- und Wasserhalbwertszeiten bestimmt, jedoch waren die Messungen mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Für die Referenzprobe wurden eine gemittelte Wasserviertelzeit von 4,2 min und eine gemittelte Wasserhalbwertszeit von 7,85 min festgestellt.

Mittels der Lösch- und Rückbrandversuche wurden generelle Unterschiede im Leistungsvermögen der Löschschaummittel deutlich. Das Referenzschaummittel löschte die Brände für drei der fünf Brennstoffe (Isopropanol, N-Methyl-2-Pyrrolidon, Super E10) schneller als jedes fluorfreie Löschschaummittel. Im Gegensatz dazu wurden die Brände von Bioethanol E85 von jedem verwendeten fluorfreien Schaum schneller als von dem Referenzschaummittel gelöscht. Die Rückbrandbeständigkeit für das N-Methyl-2-Pyrrolidon war für alle Schaumlöschmittel überdurchschnittlich gut. Die Proben 2 und 4 zeigten eine höhere Rückbrandbeständigkeit gegenüber dem Referenzschaummittel für alle Brennstoffe auf. Für die Proben 3 und 5 wurde außer beim Brennstoff Isopropanol eine niedrigere Rückbrandbeständigkeit als für das Referenzschaummittel gefunden. Die Probe 6 wies außer beim Brennstoff Bioethanol E85 eine geringere Rückbrandbeständigkeit als das Referenzschaummittel auf.

Die Umweltverträglichkeit der fluorfreien Schaummittelkonzentrate wurde recherchiert und ergab, dass sie akzeptable Ergebnisse bei den einheitlichen Tests zur Bewertung der Gefahr für biologische Systeme erzielten. Eine Aussage über die biologische Abbaubarkeit dieser Schaummittelkonzentrate kann daraus nicht



abgeleitet werden, da bestimmte persistente Stoffe nicht erfasst und Abbauprodukte in ihren Auswirkungen nicht berücksichtigt werden.

**Aus den Untersuchungen wird geschlossen, dass z. mehrere fluorfreie Schaummittel erhältlich sind, deren Leistungsfähigkeit gleichwertig zu denen fluorhaltiger Schaummittel ist.**

## Literatur

- [1] Amtsblatt der Europäischen Union (L 372/32): Richtlinie 2006/122/EG des Europäischen Parlaments und des Rates: zur dreißigsten Änderung der Richtlinie 76/769/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Perfluorooctansulfonate).  
Straßburg, 2006
- [2] A. Biegel-Engler, C. Staude, L. Vierke, C. Schulte: Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC): Einsatz mit Konsequenzen. in UMID: Umwelt und Mensch – Informationsdienst, Hrsg.: Umweltbundesamt, Bundesamt für Strahlenschutz, Bundesinstitut für Risikobewertung, Robert Koch-Institut, Verlag Umweltbundesamt 1/2013, 12-17
- [3] D. Brooke, A. Footitt, T. A. Nwaogu: Environmental Risk evaluation report: Perfluorooctanesulphonate (PFOS).  
ISBN: 978-1-84911-124-9, Product Code: SCHO1009BRBL-E-P, Environment Agency, Wallingford, 2004
- [4] 3M Company: Environmental and health assessment of Perfluorooctane Sulfonic Acid and its Salts.  
St. Paul, 3M Company. U.S. EPA docket AR-226-1486. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency 2003
- [5] J. Kowalczyk: Übergang von Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) aus kontaminierten Futtermitteln in ausgewählte Gewebe des Mastschweins und der Legehennen.  
Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 2013
- [6] G. W. Olsen, H.-Y. Huang, K. J. Helzlsouer, K. J. Hansen, J. L. Butenhoff, J. H. Mandel: Historical Comparison of Perfluorooctanesulfonate, Perfluorooctanoate, and Other Fluorochemicals in Human Blood.  
Environ Health Perspect. 2005 May; 113(5): 539–545
- [7] R. R. Melkote, L. Wang, N. Robinet: Next Generation Fluorine-Free Firefighting Foams.  
Suppression, Detection and Signaling Research and Applications (SUPDET) conference 2012, proceedings of SUPNET 2012, Phoenix, National fire protection association, 2012, 4 Seiten
- [8] K. O. Wirz: Umweltfreundliche Siloxantenside als Alternative für den Gebrauch in wasserfilmbildenden Feuerlöschschäumen (AFFF).

Dissertation, Universität zu Köln, 2013

- [9] K. O. Wirz, D. Blunk, F. Kümmerlen, R. Hetzer: Fluorfreie AFFF für militärische Treibstoffe.  
Jahresfachtagung vfdb 2013, Tagungsband, vfdb (Hrsg.), Weimar Band/Jahrgang 61, Altenberge, 2013, 495-512
- [10] R. Hetzer, F. Kümmerlen, D. Blunk: Auf dem Weg vom Siloxantensid zum fluorfreien AFFF.  
4. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Tagungsband, 26.-27. März 2015, Magdeburg, ISBN 978-3-00-048960-0, 8 Seiten
- [11] Fachausschuss Technik des deutschen Feuerwehrverbandes: Sach- und Umweltgerechter Einsatz von Schaummitteln.  
Deutscher Feuerwehrverband, 12.03.2015
- [12] B. Tschöpe: Umweltschutz fordert Einsatzgrenzen.  
WFV-Info, Heft III/08, Bundesverband Betrieblicher Brandschutz – Werkfeuerwehrverband Deutschland e. V., 2008, S. 22-23
- [13] Fachgebiet IV 2.3 des Umweltbundesamtes Ratgeber: Fluorhaltige Schaumlöschmittel umweltschonend einsetzen.  
Umweltbundesamt, 2013
- [14] C. Staude, A. Biegel-Engler: Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC): Auswirkungen von Schaumlöschmitteln auf die Umwelt.  
Schadenprisma, 4, 2013, 4-7
- [15] A. Hagenars, I. J. Meyer, D. Herzke, B. G. Pardo, P. Martinez, M. Pabon, W. De Coen, D. Knapen: The search for alternative aqueous film forming foams (AFFF) with a low environmental impact: physiological and transcriptomic effects of two Forafac<sup>®</sup> fluorosurfactants in turbot.  
Aquat Toxicol., 104 (3-4), 2011, 168-76, doi:  
10.1016/j.aquatox.2011.04.012
- [16] Chisholm, B.: Fluorine Free Foam (F3) Fire Tests.  
Resource Protection International, RPI Ref No.: P-1177, Esbjerg, 2012
- [17] Norm DIN EN 1568-4:2010  
*Feuerlöschmittel – Schaumlöschmittel – Teil 4: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwertschaum zum Aufgeben auf polare (mit Wasser mischbare) Flüssigkeiten.*  
Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [18] A. Kretzschmar: Theoretische Grundlagen und Stabilisierung von

Schäumen.

in Brandschutz Explosionsschutz – Aus Forschung und Praxis, Bd. 7,  
Berlin, Staatsverlag der DDR, 1982, 3-23

- [19] Amtsblatt der Europäischen Union (L 396): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.  
Brüssel, 2006
- [20] Amtsblatt der Europäischen Union (L 209/01): Beschluss des Rates vom 14. Oktober 2004 über den Abschluss — im Namen der Europäischen Gemeinschaft — des Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe (2006/507/EG).  
Luxemburg, 2004
- [21] Norm ISO 7203-3:2011  
*Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for top application to water-miscible liquids.*  
International Organization for Standardization, Genf, 2011
- [22] Dienstvorschrift ICAO Doc 9137 – AN/898 Part 1 (2014)  
*AIRPORT SERVICES MANUAL PART 1 : RESCUE AND FIRE FIGHTING.*  
International Civil Aviation Organization, Montreal, 2014
- [23] Leitfaden IMO MSC. 1/Circ. 1312 (2009)  
*Guidelines for the performance and testing criteria, and surveys of foam concentrates for fixed fire-extinguishing systems.*  
International Maritime Organization, Maritime Safety Committee, London, 2009
- [24] Leitfaden IMO MSC/Circ. 582 (1992)  
*Guidelines for the performance and testing criteria, and surveys of low-expansion foam concentrates for fixed fire-extinguishing systems.*  
International Maritime Organization, Maritime Safety Committee, London, 1992
- [25] Leitfaden IMO MSC/Circ. 799 (1997)  
*Guidelines for the performance and testing criteria, and surveys of*

*expansion foam concentrates for fixed fire-extinguishing systems of chemical tankers.*

International Maritime Organization, Maritime Safety Committee,  
London, 1997

- [26] Militärische Anforderung MIL-F-24385F (1992, letzte Änderung 1994)  
*Military Specification: Fire extinguishing agent, aqueous film forming foam (AFFF) liquid concentrate for fresh and sea water.*  
U.S. Government, Department of Defense, US Naval Research Laboratory, Washington DC, 1994
- [27] Norm NFPA 11 (2016)  
*Standard for Low-Expansion Foam.*  
National Fire Protection Association, Quincy, 2016
- [28] Norm NFPA 1150 (2016)  
*Foam Chemicals for Fires in Class A Fuels.*  
National Fire Protection Association, Quincy, 2016
- [29] Norm UL 162:1994-03-30  
*Standard for Foam Equipment and Liquid Concentrates.*  
UL LLC., Northbrook, 1994
- [30] Norm GOST 6948-81 (1982)  
*Forming Agent PO-1 – Specifications.*  
Russische Föderation, Föderale Agentur für technische Regulierung und Metrologie, Moskau, 1982
- [31] Norm GOST R 51114-97 (2014)  
*Automatic water and foam fire fighting systems. Feeder. General technical requirements. Test methods.*  
Russische Föderation, Föderale Agentur für technische Regulierung und Metrologie, Moskau, 1982
- [32] FM Approval Standard Class Number 5130 (2014)  
*Approval Standard for Foam extinguishing System.*  
FM Approvals LLC, Norwood, 2014
- [33] Richtlinie VdS 3124 (2013)  
Richtlinie für Schaummittel – Anforderungen und Prüfmethode.  
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, 2013
- [34] J. Falbe, M. Regitz (Hrsg.): Römpp Chemie-Lexikon.  
9. Auflage, Thieme Georg Verlag, 1990
- [35] W. M. Haynes, D. R. Lide: CRC Handbook of Chemistry and Physics,  
91. Auflage, CRC Press, Boca Raton, 2010, 9-51 – 9-60
- [36] Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2003/30/EC des Europäischen Parlaments und des Rates: zur Förderung der

Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor.  
Straßburg, 2003

- [37] Biofuels barometer 2015 - EurObserv'ER.  
Systèmes solaires Le journal des énergies renouvelables n° 228,  
5/2015, 63-75
- [38] T. C. Fuhrmann: Eigenschaften von fluorfreien Schäumen für die  
Brandbekämpfung von polaren Flüssigkeiten.  
Masterarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2015
- [39] Auxquimia S.A.U.: Unipol-FF 3/6 Fluorine free foam concentrate  
(3x6).  
Produktdatenblatt, Auxquimia S.A.U., Mieres, 2014
- [40] Bio-Ex S.A.S.: Ecopol Alkoholbeständiges Synthetikschaummittel  
ohne Fluor.  
Produktdatenblatt, Leader GmbH (Hrsg.), Kleinblittersdorf, 2014
- [41] Dafo Fomtec AB: Fomtec® Enviro 3x3 Ultra Schaumkonzentrat.  
Produktdatenblatt, Dafo Fomtec AB, Tyresö, 2013
- [42] Eau et Feu: Foam Master 3F 6%.  
Produktdatenblatt, Eau et Feu, Reims Cedex; 2014
- [43] Dr. Sthamer Hamburg: MOUSSOL®-FF 3/6 F-5 #7942  
Alkoholbeständiges Schaumlöschmittel.  
Produktdatenblatt PD - 7942 - V04 - MOUSSOL-FF 3x6 F-5 #7942 –  
DE, Version 04, Dr. Sthamer Hamburg, Hamburg, 2015
- [44] Solberg Scandinavian AS: Re-Healing™ RF 3x6 ATC™  
Schaummittelkonzentrat.  
Produktdatenblatt, Blatt-Nr.: F-20130004-2\_DE, Sæbøvågen,  
Solberg Scandinavian AS, 2014
- [45] Dr. Sthamer Hamburg: MOUSSOL®-APS LV 3/3 F-15 #6341  
Alkoholbeständiges AFFF-Schaumlöschmittel.  
Produktdatenblatt PD - 6341 - V04 - MOUSSOL-APS LV 3x3 F-15  
#6341 – DE, Version 04, Dr. Sthamer Hamburg, Hamburg, 2015
- [46] C. Penz: Wirkungsmechanismus siloxanbasierender  
Schauminhibitoren in Mineralöl.  
Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005
- [47] A. Kretzschmar, H. Reichel: Theoretische Grundlagen und  
Stabilisierung von Schäumen.  
in: Brandschutz Explosionsschutz - Aus Forschung und Praxis, Bd. 7,

- Staatsverlag der DDR, Berlin, 1. Auflage, 1982, 3-11
- [48] Norm NFPA 412 (2014)  
*Standard for Evaluating Aircraft Rescue and Fire-Fighting Foam Equipment.*  
National Fire Protection Association, Quincy, 2014
- [49] A. Kretzschmar, G. Pleß: Einfluss der Wasserqualität auf die Verschäumbarkeit von Schaumbildnern.  
in: Brandschutz Explosionsschutz - Aus Forschung und Praxis, Bd. 7, Staatsverlag der DDR, Berlin, 1. Auflage, 1982, 31-43
- [50] F. Wolf, A. Kretzschmar, H. Reichel: Permeationsuntersuchungen an stabilisierten Schaumlamellen.  
in Brandschutz Explosionsschutz - Aus Forschung und Praxis, Bd. 7, Berlin, Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, 1982
- [51] R. Hetzer, E. Schönherr, M. Mickleit: AFFF: Sind wasserfilmbildende Löschschäume noch zeitgemäß?  
vfdb-Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, Ebner Verlag GmbH & Co KG, Ulm, Bd. 63, 2014, 4, 171-5
- [52] Auxquimia S.A.U.: Unipol-FF 3/6.  
Sicherheitsdatenblatt, Auxquimia S.A.U., Mieres, 2015
- [53] Bio-Ex S.A.S.: Ecopol.  
Sicherheitsdatenblatt, Leader GmbH (Hrsg.), Kleinblittersdorf, 2014
- [54] Dafo Fomtec AB: Fomtec<sup>®</sup> Enviro 3x3 Ultra.  
Produktdatenblatt, Dafo Fomtec AB, Tyresö, 2014
- [55] Eau et Feu: Foam Master 3F 6%.  
Sicherheitsdatenblatt, Eau et Feu, Reims Cedex; 2014
- [56] Dr. Sthamer Hamburg: MOUSSOL<sup>®</sup>-FF 3/6 F-5 #7942.  
Sicherheitsdatenblatt SD - 7942 - V13 - MOUSSOL-FF 3x6 F-5 #7942 - DE, Version V12, Dr. Sthamer Hamburg, Hamburg, 2014
- [57] Solberg Scandinavian AS: Re-Healing Foam RF3x6 ATC 3%-6 %.  
Sicherheitsdatenblatt, Sæbøvågen, Solberg Scandinavian AS, 2008
- [58] Vorschrift VwVwS  
*Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe.*  
BAnz. Nr. 142a, 57, Bundesanzeiger Verlagsges. mbH, Köln, 2005
- [59] Synlab Umweltinstitut GmbH: Prüfbericht H1306-1343/001 –  
Prüfung eines Löschmittels - Einstufung in

Wassergefährdungsklassen.  
Stollberg, 17.09.2013

- [60] Richtlinie  
OECD Guidelines for the testing of chemicals: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth inhibition test, Test No. 201.  
2006, DOI: 10.1787/9789264069923-en
- [61] Richtlinie  
OECD Guidelines for the testing of chemicals: Daphnia sp. Acute Immobilisation Test, Test No. 202.  
2004, DOI:10.1787/9789264069947-en
- [62] Richtlinie  
OECD Guidelines for the testing of chemicals: Fish, Acute Toxicity Test, Test No. 203.  
1992, DOI:10.1787/9789264069961-en
- [63] Norm DIN EN ISO 9888  
*Bestimmung der aeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Stoffe im wässrigen Medium - Statischer Test (Zahn-Wellens-Test).*  
Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1999



# Anhang

## A1: Spezifikation Isopropanol



### SPEZIFIKATION *specification*

Version 1.1 / 05.09.2013 RP

**Produkt** *product* 003074 Isopropanol

**Chem. Bezeichnung** *chem. name* 2-Propanol

**Chem. Formel** *chem. formula* (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHOH

**Synonyme** *synonym* IPA; Alkohol C<sub>3</sub>; Dimethylcarbinol; Isopropylalkohol; sec.-Propylalkohol

**Molekulargewicht** *molecular weight* 60,10

**CAS-Nr.** *CAS-No.* 67-63-0

**EINECS-Nr.** *EINECS-No* 200-661-7

**Zolltarif-Nr.** *customs tariff number* 2905 12 00

\* \* \* \*

#### Daten

<b>Prüfmerkmal</b>	<b>Einheit</b>	<b>Spezifikation</b>	<b>Prüfmethode</b>
Dichte (20°C) <i>density</i>	g/ml	0,784 - 0,786	DIN 51 757
Brechungsindex n <sub>D</sub> <sup>20</sup> <i>Refractive index</i>		1,375 - 1,378	DIN 51 423
Wassergehalt <i>water</i>	%	≤ 0,1	DIN 51 777-1
Reinheit <i>purity</i>	%	≥ 99,7	
Säuregehalt <i>acidity</i>	%	≤ 0,001	DIN EN ISO 2114
Farbzahl <i>colour</i>		≤ 10	DIN EN 1557
Siedebereich <i>Initial boiling point</i>	°C	81,0 - 83,0	

Hiermit bestätigen wir, dass die o.g. Werte mit denen des Herstellers/Vorlieferanten übereinstimmen. Alle früheren Versionen werden hierdurch ersetzt. Die Angaben entbinden den Kunden nicht von der Wareingangskontrolle gemäß HGB 377/388. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung der Eignung des Produktes für einen bestimmten Einsatzzweck kann daraus nicht abgeleitet werden.

*This is a complete and true copy of the supplier's certificate of analysis / specification. We are not responsible for the correctness of the data contained herein. This certificate / specification does not release the customer from the obligation to carry out an inspection of the goods received. We shall not be liable for any consequential losses or damages whatsoever.*

Carl Dicke GmbH & Co. KG \* Postfach 30 01 51 \* D-41191 Moenchengladbach \* Wetschewell 15 \* D-41199 Moenchengladbach

Telefon: +49 (0)2166 915433 \* Fax: +49 (0)2166 915269 \* eMail: [info@carl-dicke.de](mailto:info@carl-dicke.de) \* Homepage: [www.carl-dicke.de](http://www.carl-dicke.de) \* Ust.-ID-Nr. DE 120 822 198

Registriergericht: AG Moenchengladbach \* Handelsregister-Nr.: A 24 85 \* Geschäftsführer: Dr. Peter Hendricks / Regina Padberg-Hendricks \* St.-Nr. 121/5837/4779

Stadtsparkasse Moenchengladbach

BLZ 31050000

Konto-Nr. 30401

IBAN DE79 31050000000030401

SWIFT/BIC

MGLSDE33

Deutsche Bank AG, Moenchengladbach

BLZ 31070001

Konto-Nr. 7213325

IBAN DE27 310700010721332500

SWIFT/BIC

DEUTDE330

Gladbacher Bank, AG, Moenchengladbach

BLZ 31060181

Konto-Nr. 43536010

IBAN DE34 310601810043536010

SWIFT/BIC

GENODE33



## A2: Spezifikation Aceton



### SPEZIFIKATION

Version 1.1 / 12.07.2013 / AP

Produkt <i>Product</i>	003000	Aceton
Qualität <i>Quality</i>		chem. rein
Chem. Bezeichnung <i>chem. name</i>		Dimethylketon, Propanon-2
Chem. Formel <i>chem. formula</i>		C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
CAS-Nr.		67-64-1
EINECS-Nr.		200-662-2
Molgewicht <i>molecular weight</i>		58,08
Verpackung <i>packaging</i>		in UN-geprüften Gebinden oder lose im Tankwagen <i>In Un-approved containers or bulk tanker</i>

\* \* \* \*

#### Daten

<u>Prüfmerkmal</u>	<u>Einheit</u>	<u>Wert</u>	<u>Prüfmethode</u>
Aussehen der Lösung <i>Appearance</i>		klar und farblos <i>clear, colourless</i>	
Geruch <i>Odour</i>		charakteristisch <i>characteristic</i>	
Reinheit <i>Purity</i>	%	≥ 99,5	
Wassergehalt <i>Water content</i>	%	≤ 0,3	
Löslichkeit (in H <sub>2</sub> O) <i>Solubility</i>		mischbar <i>miscible</i>	
Farbzahl ( Hazen/ APHA)		≤ 10	
Dichte (bei 20 °C) <i>Density</i>	g/ cm <sup>3</sup>	0,789 - 0,792	
Brechungsindex n <sub>D</sub> <sup>20</sup> <i>refractive index</i>		1,356 – 1,360	
Siedebereich <i>Boiling range</i>	°C	55,7 - 56,7	
Gefrierpunkt <i>Freezing point</i>	°C	-94,80	
Flammpunkt <i>Flash point</i>	°C	-19,0	
Säuregehalt (als Essigsäure) <i>Acidity (as Acetic acid)</i>	%	≤ 0,002	
Verdunstungszahl ( ETHER =1) <i>Evaporation number</i>		1,9	

Diese Spezifikation wurde auf Basis der Angaben unseres Vorlieferanten erstellt und ersetzt alle vorherigen Ausgaben. Sie entbindet den Kunden nicht von der Wareneingangskontrolle gemäß HGB 377/378. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung der Eignung des Produktes für einen bestimmten Einsatzzweck kann daraus nicht abgeleitet werden.

Carl Dicke GmbH & Co. KG \* Postfach 30 01 51 \* D-41191 Moenchengladbach \* Wetschewell 15 \* D-41199 Moenchengladbach

Telefon: +49 (0)2166 915430 \* Fax: +49 (0)2166 915289 \* eMail: [info@carldicke.de](mailto:info@carldicke.de) \* Homepage: [www.carldicke.de](http://www.carldicke.de) \* Ust.-ID-Nr.: DE 120 822 188

Registergericht: AG Moenchengladbach \* Handelsregister-Nr. A 24 85 \* Geschäftsführer: Dr. Peter Hendricke / Regina Padberg-Hendricke \* St.-Nr. 121/5807/4779

Stadtparkstrasse Moenchengladbach

BLZ 31050000

Konto-Nr. 30601

IBAN DE793105000000030601

SWIFT/BIC

MGLSDE33

Deutsche Bank AG, Moenchengladbach

BLZ 31070001

Konto-Nr. 7213325

IBAN DE27310700010721332500

SWIFT/BIC

DEUTDE3310

Gladbacher Bank, AG, Moenchengladbach

BLZ 31060181

Konto-Nr. 43536010

IBAN DE34310601810043536010

SWIFT/BIC

GENODED1GBM



## A3: Spezifikation N-Methyl-2-Pyrrolidon

### SPEZIFIKATION

<b>Produkt</b>	N-Methyl-2- Pyrrolidon
<b>CAS-Nr.</b>	872-50-4
<b>EINECS-Nr.</b>	212-828-1

\* \* \* \*

### Produktdaten

<b>Reinheit</b>	min. 99,8 % wt	GC
<b>Dichte (20°C)</b>	1,024-1,044 g/cm <sup>3</sup>	
<b>Farbe</b>	max. 50 mg pt/l	Hazen
<b>Wasser</b>	max. 0,03 % wt	Karl Fischer
<b>Brechungsindex nD20</b>	1,468-1,472	DIN 51423



Diese Spezifikation stellt keine Zusicherung von Eigenschaften dar und entbindet den Kunden nicht von der Wareingangskontrolle gemäß HGB 377 / 388.

Angelegt: 20.01.2005 (RP)

überarbeitet:

# A4: EG-Sicherheitsdatenblattauszug von TAMOIL/HEM (E10)

(keine Verfügbarkeit des Sicherheitsdatenblattes für E10 von Greenline)

 <b>EG-Sicherheitsdatenblatt</b> <small>gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)</small>			
Stoffname: Superbenzin E10 DIN		Stand: 29.05.2015	
Seite 8 / 11		Version: 1.03 / D	
		Druckdatum: 18.06.2015	
<b>9.) <u>Physikalische und chemische Eigenschaften</u></b>			
<b>Allgemeine Angaben</b>			
Form	flüssig		
Farbe	gelblich; klar		
Geruch	benzinartig		
<b>Wichtige Angaben zum Gesundheits- und Umweltschutz sowie zur Sicherheit</b>			
<b>Zustandsänderungen</b>			
Art	Siedebereich		
Wert	22 - 210 °C		
Methode	EN ISO 3405		
<b>Flammpunkt</b>			
Wert	< -35 °C		
Methode	ASTM D 56		
<b>Zündtemperatur</b>			
Wert	ca. 220 °C		
<b>Explosionsgrenzen</b>			
Obere Explosionsgrenze	ca. 8,00 Vol-%		
Untere Explosionsgrenze	ca. 0,60 Vol-%		
<b>Dampfdruck</b>			
Wert	45 - 90 kPa		
Methode	EN 13016-1		
<b>Dichte</b>			
Wert	0,72 - 0,775 g/cm <sup>3</sup>		
Methode	EN ISO 12185		
Bezugstemperatur	15 °C		
<b>Viskosität</b>			
Art	kinematisch		
Wert	1,00 mm <sup>2</sup> /s		
Methode	ASTM D 445		
Bezugstemperatur	20 °C		
<b>Wasserlöslichkeit</b>			
Wert	< 0,15 g/l		
<b>10.) <u>Stabilität und Reaktivität</u></b>			
<b>Zu vermeidende Stoffe</b>			
Oxidationsmittel; flüssiger Schwefel			
<b>Gefährliche Zersetzungsprodukte</b>			
Keine gefährlichen Zersetzungsprodukte bekannt. Verdampft bei Umgebungstemperatur. Freisetzung von Kohlenwasserstoffgasen ist möglich.			
<b>Zu vermeidende Bedingungen</b>			
Zu den Sicherheitshinweisen (P- Sätze) siehe Kapitel 15.			

# A5: EG-Sicherheitsdatenblattauszug von Greenline (E85)

PDFMAILER.DE autorisierter Distributor SienerSoft AG Tel.: 0 67 21 / 30 5-0 Softwareversand www.sienersoft.de

**EG-Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EWG**  
MBE Mitteldeutsche BioEnergie GmbH & Co. KG  
überarbeitet am : 12.10.2006 Revisions-Nr. : 2,00  
**ETHANOL E85**  
00710-0002

Chemikalienschutzhandschuhe aus Viton, Schichtstärke mindestens 0,7 mm, Durchbruchzeit (Tragedauer) ca. 480 Minuten, z.B. Schutzhandschuhe <Vitoject 890> der Firma www.kcl.de.  
Diese Empfehlung beruht ausschließlich auf der chemischen Verträglichkeit und dem Test nach EN 374 unter Laborbedingungen.

Je nach Anwendung können sich unterschiedliche Anforderungen ergeben. Daher sind zusätzlich die Empfehlungen des Schutzhandschuhlieferanten zu berücksichtigen.

## **Augenschutz**

Dicht schliessende Schutzbrille  
Augenspülflasche mit reinem Wasser.

## **Körperschutz**

Lösemittelbeständige Schürze

## **9. Physikalische und chemische Eigenschaften**

### **Allgemeine Angaben**

Aggregatzustand Flüssig  
Farbe Farblos bis gelblich  
Geruch Benzinartig

### **Wichtige Angaben zum Gesundheits- und Umweltschutz sowie zur Sicherheit**

	Prüfnorm
<b>Zustandsänderungen</b>	
Siedepunkt	ca. 70 °C, abh. von d. Ottokraftstoff
Flammpunkt	< - 20 °C
<b>Entzündlichkeit</b>	
untere Explosionsgrenze bei 20 °C	2,1 – 2,2 Vol%.
Zündtemperatur	390 °C.
Dampfdruck :	48 (Sommer) – 54 (Winter) kPa
bei (50 °C)	
Dichte (bei 20 °C) :	0,785 g/cm <sup>3</sup>
Wasserlöslichkeit :	Ethanolanteil mit Wasser extrahierbar
bei (20 °C)	
<b>Lösemittelgehalt</b>	
100 %	

## **10. Stabilität und Reaktivität**

### **Zu vermeidende Bedingungen**

Bildung explosiver Gasgemische mit Luft.

### **Zu vermeidende Stoffe**

Oxidationsmittel

### **Gefährliche Zersetzungsprodukte**

Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

Reizende/ätzende, brennbare sowie giftige Schwelgase.

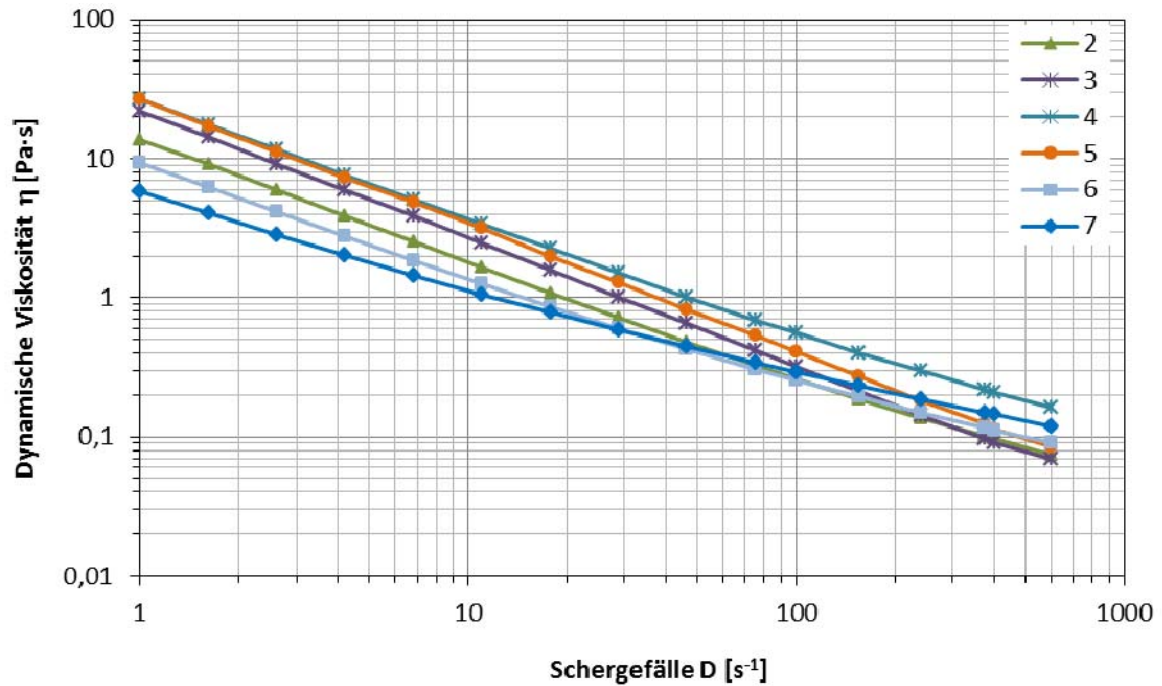
### **Zusätzliche Hinweise**

Keine Zersetzung bei bestimmungsgemäßer Lagerung und Anwendung.

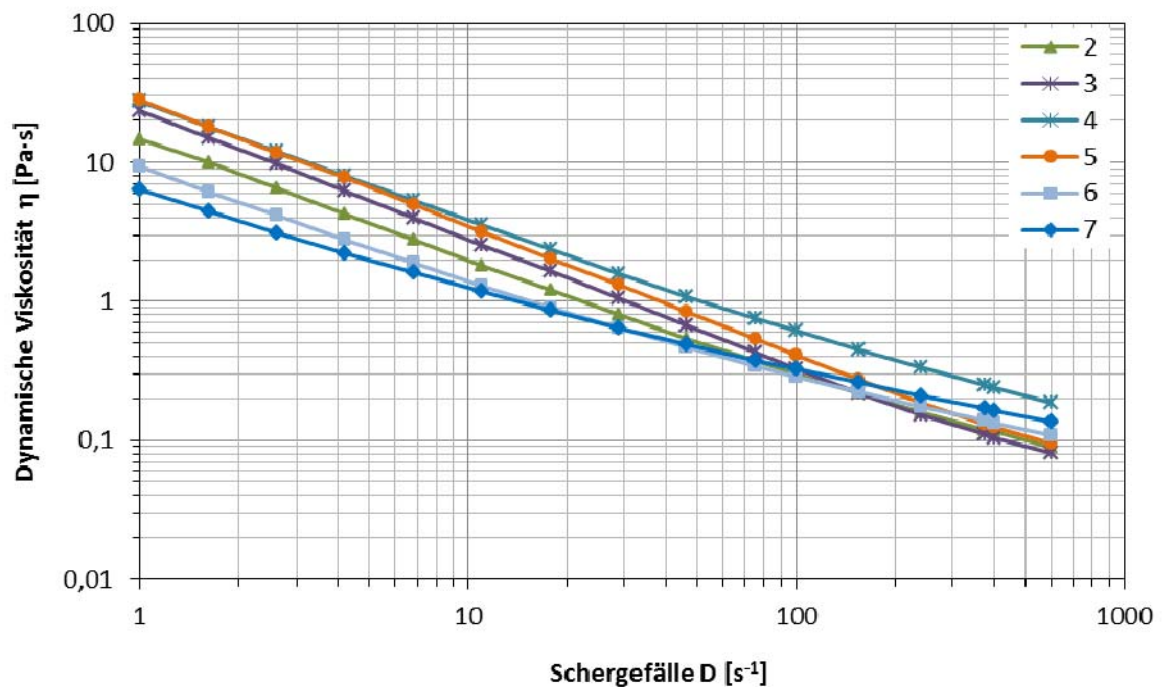
## **11. Angaben zur Toxikologie**

## A6: Ergänzungsgrafiken zur Viskosität

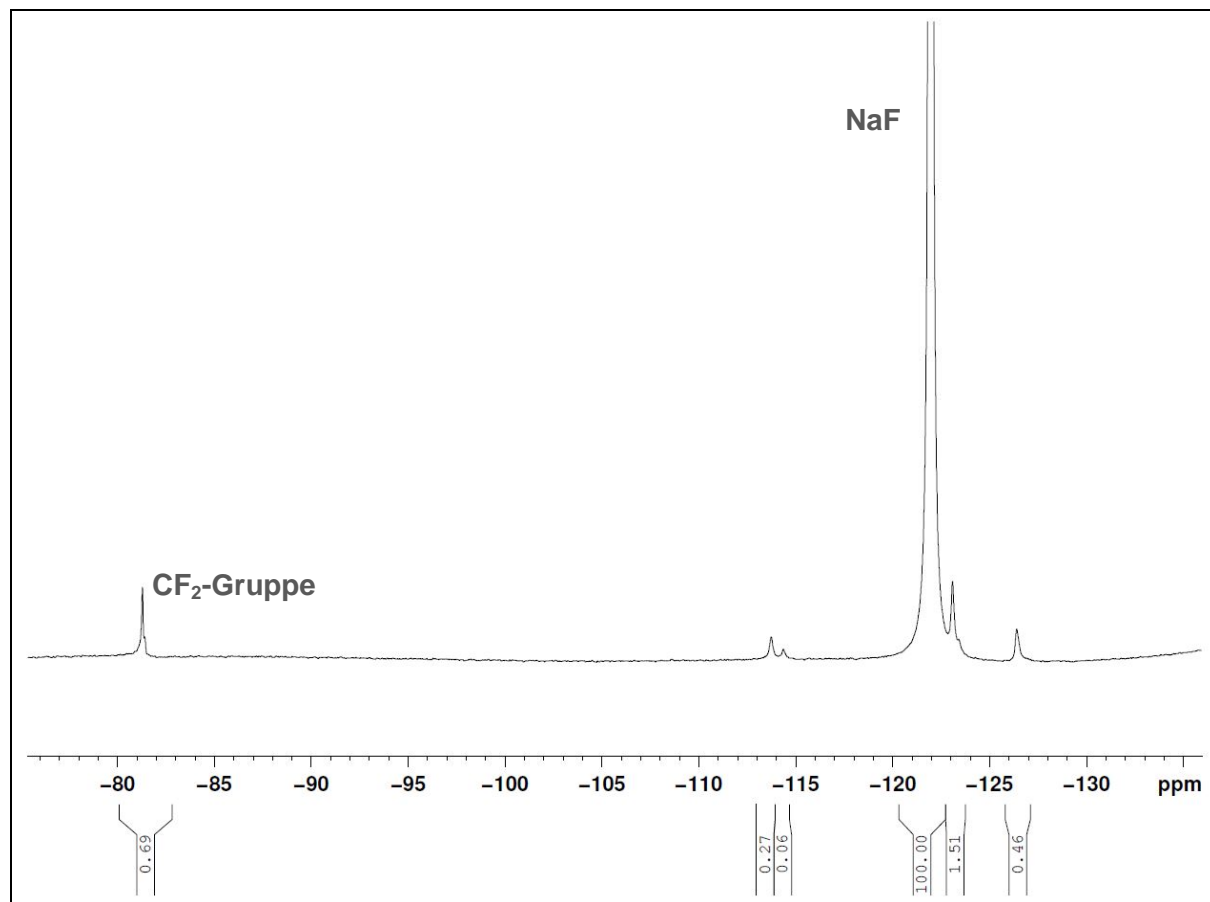
Dynamische Viskosität vs. Schergefälle bei einer Probertemperatur von 10 °C für untersuchte Schaumlöschmittel ohne AFFF



Dynamische Viskosität vs. Schergefälle bei einer Probertemperatur von 0 °C für untersuchte Schaumlöschmittel ohne AFFF



## A7: NMR-Spektrum für Schaumlöschmittelprobe 2



### F2 - Acquisition Parameters

```

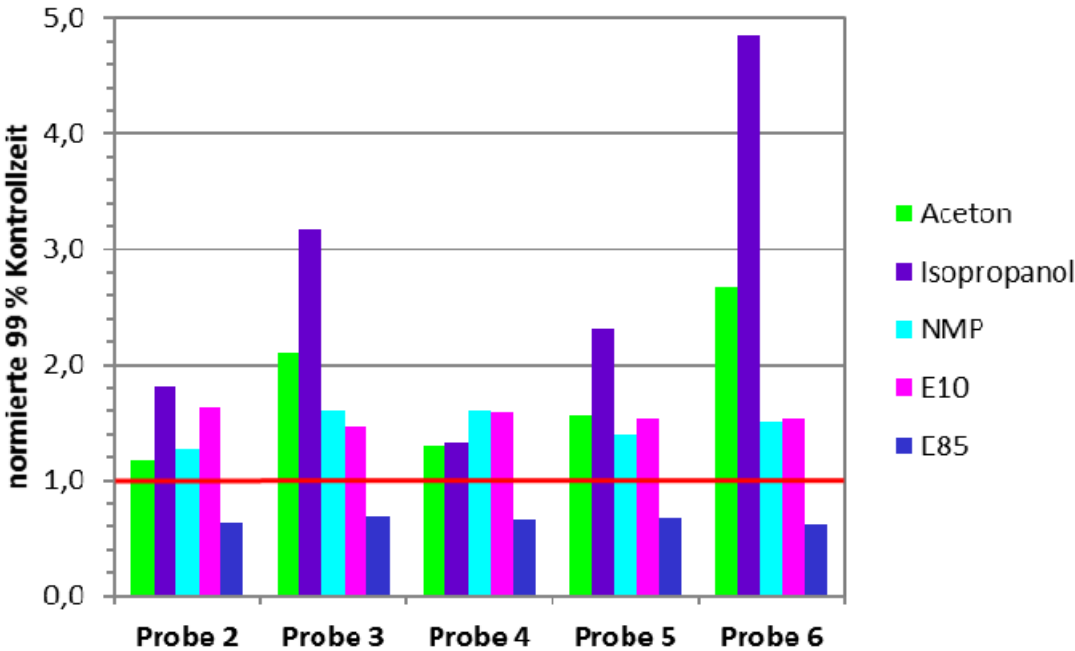
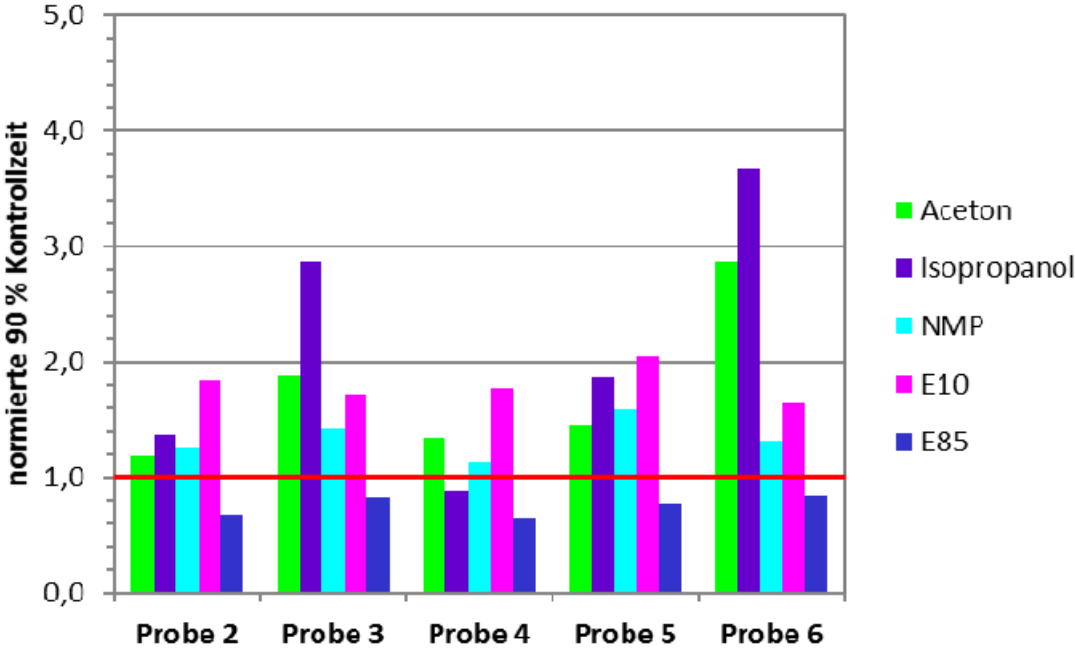
Date_          20150713
Time_          10.31
INSTRUM       spect
PROBHD        5 mm PABBO BB/
PULPROG       zgfhigqn.2
TD            65536
SOLVENT       D2O
NS            2048
DS            4
SWH           93750.000 Hz
FIDRES        1.430511 Hz
AQ            0.3495253 sec
RG            1290
DW            5.333 usec
DE            12.00 usec
TE            297.5 K
D1            1.00000000 sec
D11           0.03000000 sec
D12           0.00002000 sec
TD0           1
    
```

```

===== CHANNEL f1 =====
SFO1          376.4410779 MHz
NUC1          19F
P1            15.00 usec
PLW1          15.00000000 W

===== CHANNEL f2 =====
SFO2          400.1316005 MHz
NUC2          1H
CPDPRG[2]    waltz16
PCPD2         90.00 usec
PLW2          10.00000000 W
PLW12         0.27335000 W
F2 - Processing parameters
SI            65536
SF            376.4983660 MHz
WDW           EM
SSB           0
LB            20.00 Hz
GB            0
PC            1.00
    
```

### A8: Normierte Kontrollzeiten





**A9: 25 % Rückbrandzeit ohne NMP**

