

***Bestimmung der Einsatzgrenzen  
von Löschmittelzusätzen  
bei Klasse B-Bränden***

***Bachelorarbeit***

*im Studiengang*

***Gefahrenabwehr / Hazard Control***



*Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg*

*Fakultät Life Science*

# ***Bachelorarbeit***

*im*

*Studiengang Hazard Control / Gefahrenabwehr*

***„Bestimmung der Einsatzgrenzen von  
Löschmittelzusätzen bei Klasse B-Bränden“***

*vorgelegt von*

***Timo Rosenthal***

*Matrikelnummer 208 26 22*

*am 02. Dezember 2014*

*Gutachter:*

*Herr Prof. Dr. Mickleit (Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg)*

*Herr Dr. Hetzer (Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC Schutz)*

*Die Bachelorarbeit wurde am Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien –*

*ABC-Schutz in Munster erstellt und betreut.*

## Zusammenfassung

Schaumlöschmittel sind für Feuerwehren bei Flüssigkeitsbränden in heutiger Zeit das Mittel der Wahl. Doch das Verbot PFOS<sup>1</sup> (Perfluoroktansulfonsäure)-haltiger Löschsäume verunsichert die Feuerwehren und die Industrie stellt dem Anwender heute neben den PFOS-freien-Löschsäumen auch sogenannte Löschmittelzusätze für Klasse B-Brände<sup>2</sup> zur Verfügung.

Die auf dem Markt vorhandenen Löschmittelzusätze werden laut Hersteller als Alternativen zum Schaumlöschmittel, dem Standardlöschmittel für Flüssigkeitsbrände bei Feuerwehren, angeboten. Die Hersteller werben mit gleichwertigen oder besseren Löscheigenschaften Ihrer Löschmittelzusätze gegenüber den üblichen Schaumlöschmitteln und in vorgeführten Tests der Hersteller überzeugen die Löschmittelzusätze. Weitere unabhängige Untersuchungen sind sehr selten. Die Löschmittelzusätze, erfüllen aufgrund fehlender Schaumbildung nicht die technischen Anforderungen nach DIN-EN 1568<sup>3</sup> oder ICAO (International Civil Aviation Organization).<sup>4</sup> Durch diese Umstände ist es für den Anwender sehr schwierig zu beurteilen, ob der Löschmittelzusatz gegenüber seinem vorhandenen Schaummittel nachhaltige Vorteile bringt. Dabei sind neben dem Löscheffekt und der notwendigen Zumischtechnik auch die erforderlichen Mengen und die Kosten für einen alternativen Löschmittelzusatz zu beurteilen. In dieser Untersuchung werden die Löschmittelzusätze auf Ihre Eigenschaften in Bezug zu Ihren angegebenen Löscheffekten für Flüssigkeitsbrände untersucht, die angeblich die Leistungsfähigkeit eines Schaumlöschmittels kompensieren.

Die durchgeführten Laborversuche, in welchen die Fähigkeit der Einkapselung von brennbaren Flüssigkeiten, das Verhalten einer Emulsion aus Löschmittelzusatz, Löschwasser und einer brennbaren Flüssigkeit, sowie die Abkühlwirkung untersucht wurden, zeigen ein alarmierendes Ergebnis für den Bereich der Flüssigkeitsbrandbekämpfung. Praktische Brandversuche mit Flüssigkeiten, deren Flammpunkt über oder unter der Umgebungstemperatur liegen, zeigen deutliche Differenzen zwischen den Löschmitteln Wasser, Schaum und den Löschmittelzusätzen auf. Das Löschen eines Brandes von Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter der Umgebungstemperatur erscheint ab einer bestimmten Größe mit einem Löschmittelzusatz als schwierig bis unmöglich.

Zusammenfassend zeigen die Resultate der Labor- und Brandversuche sowie die Betrachtung möglicher Einsatzszenarien im Bereich der Flüssigkeitsbrandbekämpfung, dass Löschmittelzusätze als Ersatz für Schaumlöschmittel bei derzeitigem Entwicklungsstand als sehr kritisch zu betrachten sind. Mit einem Löschmittelzusatz ist das Einsatzspektrum im Bereich der Flüssigkeitsbrandbekämpfung aufgrund der vielen unterschiedlichen brennbaren Flüssigkeiten nicht sicherzustellen. Dieses stellt für die Anwender, welche flexible auf mögliche Brandereignisse mit den unterschiedlichsten Flüssigkeiten reagieren müssen, eine deutliche Gefahr oder Verzögerung des Löscherfolgs dar, was mit dem Schaden von Personen oder der Zerstörung von Sachwerten oder Produktionsanlagen einhergeht.

Damit sind die Einführung und der Einsatz eines Löschmittelzusatzes für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung als sehr kritisch zu betrachten und genau zu überprüfen.

## **Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Ralf Hetzer vom Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz im Geschäftsfeld Brandschutz für die fachliche und kompetente Unterstützung und Beantwortung aller Fragen zur Thematik der Schaumlöschmittel und Löschmittelzusätze, des Weiteren für die Unterstützung und Einarbeitung in die Laborversuche.

Bei Herrn Prof. Dr. Mickleit möchte ich für die Betreuung und Unterstützung seitens der Fachhochschule bedanken.

Für die Unterstützung bei den durchgeführten Labor- und Brandversuchen bedanke ich mich bei allen beteiligten Kollegen des Geschäftsfeldes Brandschutz am WIS in Munster.

## **Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

---

**Inhalt**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | <b>8</b>  |
| 1.1      | Zielsetzung.....  | 8         |
| 1.2      | Flüssigkeitsbrände .....  | 9         |
| <b>2</b> | <b>Grundlagen</b> .....   | <b>10</b> |
| 2.1      | Grundlagen brennbare Flüssigkeiten .....  | 10        |
| 2.1.1    | Flammpunkt .....  | 11        |
| 2.1.2    | Physikalische Daten der brennbaren Flüssigkeiten in den Versuchen .....           | 12        |
| 2.1.3    | Heptan .....  | 12        |
| 2.1.4    | F-34 .....  | 13        |
| 2.1.5    | Benzin.....   | 13        |
| 2.2      | Grundlagen Löschmittelzusätze .....   | 14        |
| 2.2.1    | Tenside .....   | 14        |
| 2.2.2    | Mizellen.....   | 16        |
| 2.2.3    | Mögliche Löscheffekte von Löschmittelzusätzen .....                               | 17        |
| 2.2.4    | Abkühlung und Reduzierung der Oberflächenspannung .....                           | 17        |
| 2.2.5    | Einkapseln .....  | 18        |
| 2.2.6    | Antikatalytischer Löscheffekt .....   | 18        |
| 2.2.7    | Zumischrate .....   | 19        |
| 2.2.8    | Physikalische Daten der Löschmittelzusätze .....                                  | 19        |
| <b>3</b> | <b>Experimenteller Teil der Untersuchung der Löschmittelzusätze</b> .....         | <b>20</b> |
| 3.1      | Untersuchung der kritischen Mizellenkonzentration.....                            | 21        |
| 3.1.1    | Versuchsablauf .....  | 21        |
| 3.1.2    | Ergebnis und Bewertung der Untersuchung zur kritischen Mizellenkonzentration..... | 22        |
| 3.2      | Optische Untersuchung der Emulsion .....  | 24        |
| 3.2.1    | Versuchsbeschreibung.....   | 24        |
| 3.2.2    | Vorversuch .....  | 24        |
| 3.2.3    | Versuchsablauf .....  | 25        |
| 3.2.4    | Ergebnisse der optischen Versuche.....  | 26        |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.5 | Ergebnisse der optischen Versuche aus Benzin und Löschmittelzusatz ..... | 26 |
| 3.2.6 | Bewertung der optischen Versuche .....                                   | 27 |
| 3.3   | Untersuchungen der Dampfkonzentration über der Emulsion .....            | 28 |
| 3.3.1 | Messgröße für die Versuche mit dem FT-IR.....                            | 28 |
| 3.3.2 | Funktion des FT-IR Gas Analysator .....                                  | 29 |
| 3.3.3 | Kalibrierung des FT-IR für Heptan und Benzin.....                        | 30 |
| 3.3.4 | Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dampfkonzentration .....               | 33 |
| 3.3.5 | Versuchsdurchführung .....   | 34 |
| 3.3.6 | Ergebnisse der Versuche am FT-IR mit Emulsionen aus LMZ und Heptan.....  | 34 |
| 3.3.7 | Ergebnisse der Versuche am FT-IR mit Emulsionen aus LMZ und Benzin.....  | 36 |
| 3.3.8 | Bewertung der Dampfkonzentration über der Emulsion.....                  | 37 |
| 3.4   | Versuche zur Dichte der Emulsion .....                                   | 38 |
| 3.4.1 | Versuchsaufbau .....   | 38 |
| 3.4.2 | Ergebnis Scheidetrichterversuche .....                                   | 38 |
| 3.4.3 | Bewertung der Scheidetrichterversuche .....                              | 39 |
| 3.5   | Löschversuche .....  | 40 |
| 3.5.1 | Ermittlung der Abbrandraten für Heptan und Kerosin.....                  | 41 |
| 3.5.2 | Versuchsaufbau .....   | 42 |
| 3.5.3 | Versuchsbeschreibung.....  | 44 |
| 3.5.4 | Auswertung und Bewertung der Löschversuche auf Heptan .....              | 45 |
| 3.5.5 | Auswertung und Bewertung der Löschversuche auf F-34 .....                | 48 |
| 3.6   | Versuche zur Abkühlwirkung des Löschmittelzusatzes 1 .....               | 51 |
| 3.6.1 | Versuchsbeschreibung Verdampfungsversuche im Klimaschrank .....          | 52 |
| 3.6.2 | Ergebnisse der Verdampfungsversuche im Klimaschrank.....                 | 52 |
| 3.6.3 | Bewertung der Verdampfungsversuche im Klimaschrank.....                  | 53 |
| 3.6.4 | Versuchsbeschreibung der Sprühversuche .....                             | 54 |
| 3.6.5 | Ergebnisse Sprühversuche.....  | 55 |
| 3.6.6 | Bewertung Sprühversuche.....   | 55 |

---

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>4</b>  | <b>Diskussion der Einsatzgrenzen für Löschmittelzusätze .....</b>                     | <b>57</b> |
| 4.1       | Beispiel zur Logistik und Wirtschaftlichkeit eines Löschmittelzusatzes .....          | 57        |
| 4.2       | Löschvermögen des Löschmittelzusatzes im Vergleich zur DIN-EN 1568-3 und ICAO B ..... | 59        |
| 4.3       | Einsatzbeispiele .....  | 61        |
| 4.3.1     | Pool-Fire an einem Transformator .....  | 61        |
| 4.3.2     | Brand an einem leckgeschlagenem Tanklastzug.....                                      | 63        |
| 4.3.3     | Brand eines Lagertanks bei der Firma INEOS in Köln.....                               | 66        |
| <br>      |   |           |
| <b>5</b>  | <b>Fazit zu den Einsatzgrenzen von Löschmittelzusätzen bei Klasse B-Bränden.....</b>  | <b>69</b> |
| <br>      |   |           |
| <b>6</b>  | <b>Anhang .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>7</b>  | <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>   | <b>95</b> |
| <b>8</b>  | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>  | <b>96</b> |
| <b>9</b>  | <b>Diagrammverzeichnis .....</b>  | <b>97</b> |
| <b>10</b> | <b>Tabellenverzeichnis .....</b>  | <b>98</b> |
| <b>11</b> | <b>Formelverzeichnis .....</b>  | <b>98</b> |
| <b>12</b> | <b>Literaturverzeichnis.....</b>  | <b>99</b> |

# 1 Einleitung

Die Herausforderungen an die Brandbekämpfung vor allem in der Flüssigkeitsbrandbekämpfung steigen kontinuierlich durch die Forderung nach einer schnellen und effizienten Brandbekämpfung, die zugleich umweltgerecht erfolgen soll. Besonders die inzwischen nach EU-Richtlinie 2006/122/EG<sup>5</sup> verbotenen PFOS-haltigen Löschschäume lenkten dabei die Aufmerksamkeit auf eine der Umwelt angepassten Brandbekämpfung. Auf der anderen Seite steht die Forderung nach einer schnellen und effizienten Brandbekämpfung, welche sich aber bei vielen brennbaren Flüssigkeiten oder flüssig werdenden Materialien nur durch ein geeignetes Löschesystem, ein entsprechendes Löschmittel oder die Kombinationen aus beidem effizient und sicher durchführen lässt. Diese Brände sind nicht mit reinem Wasser unter den oben genannten Aspekten zu löschen.

Die Industrie stellt dem Anwender zur Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden unterschiedliche Löscherätetechnologien wie z.B. Höchst-Druck-Löschanlagen, Druckluftschaumsysteme oder aber auch Löschmittel wie Löschschäume oder Pulver zur Verfügung. In den letzten Jahren werden auch vermehrt sogenannte „Löschmittelzusätze“ (LMZ) angewendet, welche vor allem aus der Feststoffbrandbekämpfung bekannt sind. Durch die Reduktion der Oberflächenspannung wird hier eine bessere Penetration des brennbaren Materials erreicht und damit die Effizienz des Löschwassers erhöht.<sup>6</sup> Signifikantes Merkmal der Löschmittelzusätze ist, dass sie keinen Schaumteppich ausbilden wie ein herkömmliches Schaumlöschmittel. Inzwischen bietet die Industrie den Feuerwehren aber auch Löschmittelzusätze an, die geeignet sein sollen, effektiv Flüssigkeitsbrände zu bekämpfen. Dabei soll der Löscheffekt auf der enormen Abkühlwirkung, der Einkapselung brennbarer Stoffe und Gase und/oder durch den Eingriff in die Verbrennungschemie (antikatalytische Wirkung) erfolgen. Für die Feuerwehren bleibt die Frage offen, ob mit diesen Löschmittelzusätzen wirklich eine schnellere, effizientere und vielleicht auch umweltfreundlichere Brandbekämpfung möglich ist als mit Löschschaum und wo die Grenzen dieser Löschmittelzusätze liegen. Die Frage, die beantwortet werden muss, lautet: Sind die Löschmittelzusätze grundsätzlich für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung unter den Aspekten der Effizienz, dem Umweltaspekt, der Technik und Taktik geeignet und ist der ausgelaufene Kraftstoff nach einem PKW-Unfall genauso effektiv zu löschen wie der havarierte Tanklastzug oder der brennende Tank in der benachbarten Raffinerie.

## 1.1 Zielsetzung

In dieser Bachelorarbeit sollen die laut Hersteller für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung (Klasse B-Brände)<sup>7</sup> geeigneten Löschmittelzusätze in Bezug auf mögliche Einsatzgrenzen untersucht werden. Technische Einflussfaktoren wie z.B. Zumischanlagen bleiben unbeachtet.

Diese Ergebnisse sollen den Feuerwehren helfen, eine sinnvolle Abwägung zwischen Löschschaum und Löschmittelzusatz einsatzspezifisch treffen zu können.

## 1.2 Flüssigkeitsbrände

Flüssigkeitsbrände wie der Brand eines Tanklagers im englischen Buncefield<sup>8</sup> am 11. Dezember 2005 oder der Brand eines über 4000 m<sup>3</sup> fassenden Acrylnitril-Tanks am 17. März 2008 in Köln<sup>9</sup> zeigen das potentielle Schadensausmaß sowie den enormen Aufwand der zuständigen Feuerwehren auf.

Die flüssige Form des Brennstoffes führt z.B. beim Bersten, Leckschlagen oder Überschwappen eines Tanks zu einer schlagartigen Ausbreitung der Gefahrenstelle. Ebenso eine falsche Einsatztaktik z.B. mit dem Löschmittel Wasser, kann durch das Aufschwimmen der brennenden Flüssigkeit auf abfließendem Löschwasser eine Ausweitung der Gefahr zur Folge haben. Daher sollten und müssen sich die Feuerwehren die Frage stellen, haben wir ein geeignetes Löschmittel in entsprechender Menge, um mögliche Einsatzszenarien aus diesem Einsatzspektrum abzarbeiten.

Bei den brennbaren Flüssigkeiten ist zu beachten, dass es Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt über und unter der Umgebungstemperatur (im Normalfall auf 20 °C bezogen) gibt. Das bedeutet, dass Flüssigkeiten wie z.B. Benzin mit einem Flammpunkt kleiner -21 °C oder Heptan mit einem Flammpunkt um die -4 °C bereits schon bei normalen Umgebungstemperaturen von unter 0 °C ausreichend Dämpfe für eine Verbrennung bilden. Bei der Brandbekämpfung dieser Flüssigkeiten ist ein Löschmittel, welches eine hohe Gasdichtigkeit aufweist von Vorteil. Ein AFFF (Aqueous Film Forming Foam)-Schaummittel kann z.B. durch die Bildung eines Wasserfilms zwischen Umgebungsluft und brennbarer Flüssigkeit, das Ausgasen minimieren und dadurch einen Löscherfolg erleichtern. Alternativ könnte das Löschmittel Pulver den Brand vorübergehend löschen, unterbindet jedoch kein weiteres Ausgasen der Flüssigkeit. Somit ist eine Rückzündung an erhitzten Oberflächen möglich.

Dem gegenüber stehen brennbare Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt über der Umgebungstemperatur wie z.B. der Flugzeugtreibstoff Jet A1 mit einem Flammpunkt größer + 40 °C. Diese Flüssigkeiten bilden unter normalen Umgebungsbedingungen nicht ausreichend Dämpfe für eine Verbrennung. Hierdurch wird die Bekämpfung eines solchen Brandes erleichtert.

Eine weitere Einflussgröße, die bei der Wahl eines geeigneten Löschmittels für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung von Bedeutung ist, ist die Polarität der Flüssigkeit. Polare Flüssigkeiten wie z.B. Ethanol vermischen sich mit Löschwasser. Diese Flüssigkeiten lassen sich z.B. durch sogenannte AR (Alkohol-Resistent) – Löschsäume oder die Verdünnung der Flüssigkeit mit Wasser unter eine kritische Konzentration löschen. Vertreter der unpolaren Flüssigkeiten wie z.B. Benzin sind nicht mit Wasser mischbar und lassen sich z.B. durch Löschsäume bekämpfen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Grundlagen brennbare Flüssigkeiten

*Brennbare Flüssigkeiten sind flüssige Stoffe, die einen Flammpunkt haben und nach der Entzündung unter normalen Luftbedingungen brennen.*<sup>10</sup>

Die Gefährlichkeit, bzw. die Entzündlichkeit, solcher brennbarer Flüssigkeiten wird nach der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) oder dem „Globally Harmonized System of Classification, Labelling and Packaging of Chemicals“ (GHS) in drei Kategorien eingeteilt.<sup>11</sup> Der Flammpunkt der jeweiligen Flüssigkeit ist dabei der Indikator für die Einteilung.

Die Einteilung nach der Gefahrstoffverordnung erfolgt wie in Abbildung 1 dargestellt.

| Gefährlichkeitsmerkmal | Flammpunkt [°C] | Siedebeginn [°C] | Beispiel  |
|------------------------|-----------------|------------------|---|
| Hochentzündlich        | < 0             | < 35             | Benzin, Diethylether, Schwefelkohlenstoff, Acetaldehyd, Methylamin-Lösungen |
| Leichtentzündlich      | < 21            |                  | Ethanol, Aceton   |
| Entzündlich            | < 21 - ≤ 55     |                  | Terpentin- Ersatz, Petroleum  |

Abbildung 1 Einteilung nach Gefahrstoffverordnung<sup>12</sup>

Das Globally Harmonized System teilt brennbare Flüssigkeiten gemäß Abbildung 2 ein.

| Gefährlichkeitsmerkmal | Flammpunkt [°C] | Siedebeginn [°C] | Beispiel  |
|------------------------|-----------------|------------------|---|
| Extrem entzündbar      | < 23            | ≤ 35             | Benzin, Diethylether, Schwefelkohlenstoff, Acetaldehyd, Methylamin-Lösungen |
| Leichtentzündbar       | < 23            | > 35             | Ethanol, Aceton   |
| Entzündbar             | ≥ 23 - ≤ 60     |                  | Terpentin- Ersatz, Petroleum  |

Abbildung 2 Einteilung nach dem Globally Harmonized System<sup>12</sup>

### 2.1.1 Flammpunkt

Der Flammpunkt ist eine stoffspezifische Kenngröße, welche abhängig vom technischen Verfahren zur Bestimmung variiert. Sie ist abhängig von der Temperatur und dem dazugehörigen Dampfdruck. Dabei beschreibt der Flammpunkt die niedrigste Temperatur, bei der der Dampfdruck hoch genug ist, ausreichend Dämpfe über der Flüssigkeit zu bilden, sodass sich aus dem Dampf und der Umgebungsluft eine zündfähige Atmosphäre bildet.<sup>13</sup>

Durch das Zuführen einer Zündquelle kann ab dieser Temperatur die Verbrennung des vorhandenen Dampf-Gas-Luft Gemischs über der Flüssigkeit erfolgen. Setzt die Verbrennung ausreichend Energie frei, um weitere Teile der Flüssigkeit über den Flammpunkt zu erwärmen, bilden sich weitere brennbare Dämpfe und Gase über der Flüssigkeit und eine Verbrennung kann fortbestehen.

In Tabelle 1 werden die Flammpunkte einiger relevanter brennbarer Flüssigkeiten für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung dargestellt:

Tabelle 1: Flammpunkte unterschiedlicher Flüssigkeiten

| <b><u>Flüssigkeit</u></b> | <b><u>Flammpunkt</u></b><br>[°C] |
|---------------------------|----------------------------------|
| Acrylnitril               | -5 <sup>[42]</sup>               |
| Ottokraftstoff            | <-20 <sup>[13]</sup>             |
| Ethanol                   | 12 <sup>[13]</sup>               |
| Heptan                    | -4 <sup>[14]</sup>               |
| F-34                      | >38 <sup>[17]</sup>              |
| Jet A1                    | >40 <sup>[18]</sup>              |

## 2.1.2 Physikalische Daten der brennbaren Flüssigkeiten in den Versuchen

Im Rahmen dieser Arbeit und für die folgenden Versuche wurden die brennbaren Flüssigkeiten Heptan, F-34 und Benzin verwendet.

### 2.1.3 Heptan

|                  |   |
|------------------|---|
| Bezeichnung      | n-Heptan                                  |
| Hersteller       | Sigma-Aldrich                             |
| Produktnummer    | 34873                                     |
| Formel           | $C_7H_{16}$                               |
| Molekulargewicht | 100,20 g/mol <sup>14</sup>                |
| Flammpunkt       | -4°C (geschlossener Tiegel) <sup>14</sup> |
| UEG              | 1,1 vol. % <sup>14</sup>                  |
| OEG              | 7,0 vol. % <sup>14</sup>                  |
| Dichte           | 0,68 mg/ $\mu$ l <sup>15</sup>            |

Das Diagramm 1 stellt die Dampfdruckkurve des Heptans im Temperaturbereich von -50 °C bis + 50 °C dar. Das Diagramm wurde mit Hilfe von Daten aus der Reaxys-Stoffdatenbank erzeugt.<sup>16</sup>

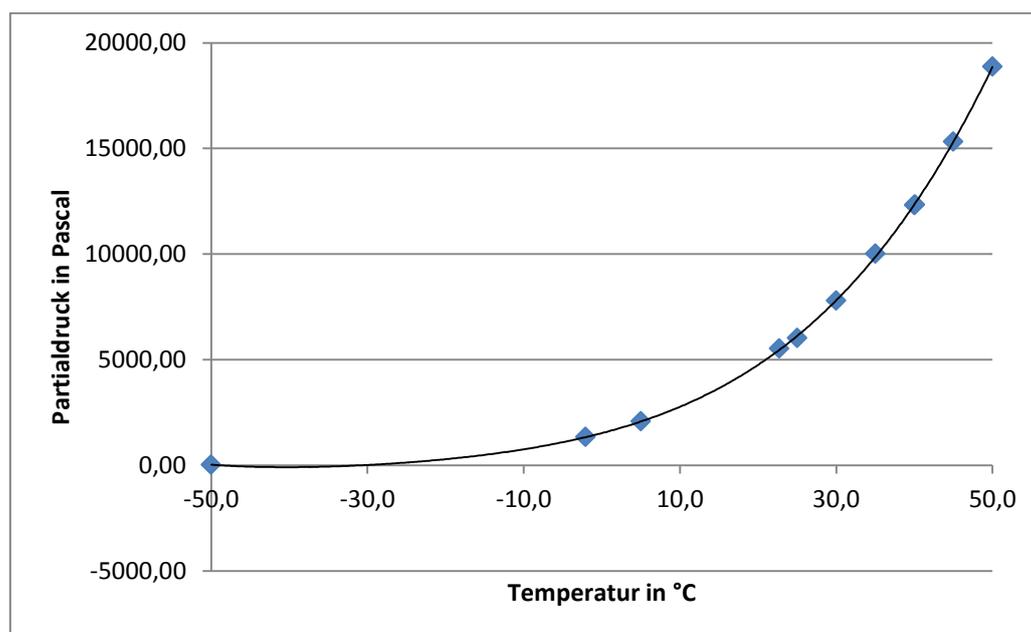


Diagramm 1: Dampfdruckkurve von n-Heptan<sup>16</sup>

### 2.1.4 F-34

|             |   |
|-------------|---|
| Bezeichnung | F-34 (JP-8) nach TL 9130-0012 <sup>17</sup> |
| Flammpunkt  | > + 38 °C <sup>17</sup>                     |
| UEG         | 0,6 vol. % <sup>18</sup>                    |
| OEG         | 6,5 vol. % <sup>18</sup>                    |
| Dichte      | 775 - 840 kg/m <sup>3</sup> <sup>17</sup>   |

### 2.1.5 Benzin

|                  |   |
|------------------|---|
| Bezeichnung      | Benzin  |
| Molekulargewicht | mittleres Molekulargewicht 98 g/mol <sup>19</sup> |
| Flammpunkt       | - 40 °C <sup>20</sup>                             |
| UEG              | 0,7 vol. % <sup>20</sup>                          |
| OEG              | 8,7 vol. % <sup>20</sup>                          |
| Dichte           | 0,78 g/cm <sup>3</sup> <sup>21</sup>              |

## 2.2 Grundlagen Löschmittelzusätze

Löschmittelzusätze sind Stoffgemische, die zur Brandbekämpfung eingesetzt werden. Die LMZ sollen die Effektivität des Wassers, dem Standard-Löschmittel der Feuerwehren, steigern, indem die Eigenschaften des Wassers dem Brandereignis angepasst werden. Gegenüber dem in den Feuerwehren verwendeten Schaumlöschmitteln, bilden Löschmittelzusätze wenig bis gar keinen Schaum aus. Die Löschmittelzusätze bestehen normalerweise wie auch Schaumlöschmittel aus einem Gemisch verschiedener Substanzen. Ein großer Bestandteil davon sind Tenside, welche je nach Art für die Senkung der Oberflächenspannung und/oder die Bildung eines Schaumes oder weitere Effekte verwendet werden können. Des Weiteren sind Substanzen zur Regulierung der Frostbeständigkeit, der Lagerfähigkeit und ggfs. der Korrosivität vorhanden.

### 2.2.1 Tenside

Als Tenside werden grenzflächenaktive Substanzen bezeichnet, welche die Eigenschaften haben, Ober- und Grenzflächenspannungen zu minimieren, Mizellen in der Volumenphase auszubilden oder eine Schaumbildung ermöglichen.

Der allgemeine Aufbau eines Tensides ohne dieses weiter zu spezifizieren, wird als amphiphil bezeichnet. Das bedeutet, dass das Tensid aus einem hydrophoben und hydrophilen Molekülanteil besteht. Diese Eigenschaft ermöglicht die Verbindung zwischen hydrophilen und hydrophoben Stoffen, welche sich unter normalen Bedingungen nicht vermengen würden. Als Beispiel ist die Vermengung von Öl mit Wasser zu einer Lösung zu nennen.

Für die Brandbekämpfung wird die Absenkung der Oberflächenspannung für die Herstellung von Netzwasser verwendet, welches aufgrund der verringerten Oberflächenspannungen besser in Materialien eindringt und eine größere Oberfläche des Wassers bildet, was ein Verdampfen erleichtert. Dabei werden die hydrophilen Teile der Tensidmoleküle in Richtung Wasser und der hydrophobe Teil in Richtung Luft, unpolarem Feststoff oder einer weiteren Flüssigkeitsoberfläche ausgerichtet (Abbildung 3).

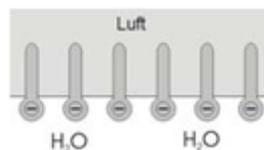


Abbildung 3: Ansammlung der Tenside an der Oberfläche<sup>22</sup>

Die Absenkung der Oberflächenspannung erfolgt bis zu einem gewissen Punkt. Dieser Punkt der Absenkung kann durch die kritische Mizellenkonzentration (CMC) beschrieben werden. Sie beschreibt den Punkt, an dem die Oberfläche des Wassers dicht mit Tensidmolekülen besetzt ist und die Oberflächenspannung nicht oder nur minimal weiter abfällt. Das folgende

Diagramm (Abbildung 4) verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die y-Achse gibt die Oberflächenspannung einer wässrigen Tensid-Lösung in mN/m an. Die x-Achse beschreibt die Konzentration des Tensids in mg/l. Bei sehr geringen Tensid Konzentrationen in der Lösung ist die Oberflächenspannung sehr hoch. Durch die Zugabe weiterer Tensidmoleküle sinkt die Oberflächenspannung ab. An dem durch den orangen Pfeil markierten Punkt (Abbildung 4), fällt die Oberflächenspannung nicht weiter, die kritische Mizellenkonzentration ist erreicht.

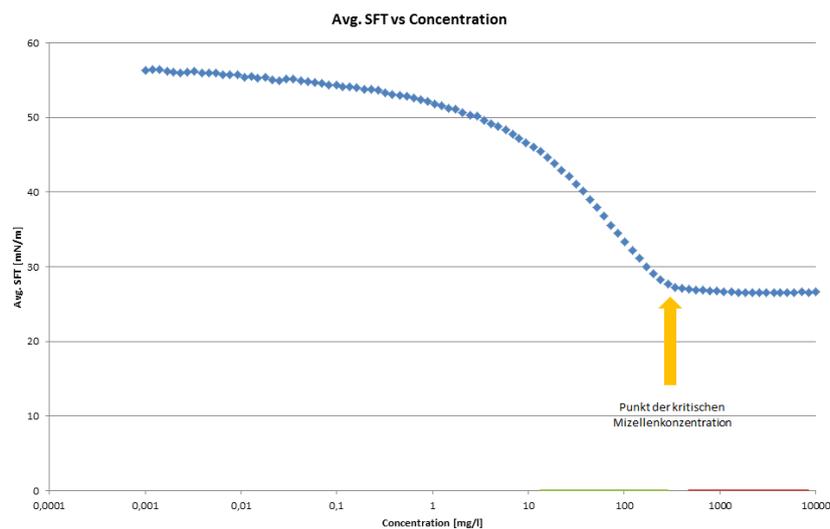


Abbildung 4: kritische Mizellenkonzentration

Wird dieser Punkt erreicht und es stehen weitere Tensidmoleküle zur Verfügung, sammeln sich diese in der Volumenphase und es kommt zur Bildung von Mizellen, siehe Abbildung 5. Die Anwendung und die Eigenschaften von Mizellen werden unter dem Punkt „Mizellen“ genauer erläutert.

Die Eigenschaft der Tenside zur Schaumbildung ist für den Bereich der Brandbekämpfung von entscheidender Bedeutung. Die Herstellung von Löschschäumen erfolgt durch den Eintrag von Luft in den mit Tensiden versetzten Löschwasserstrom. Das bedeutet, Schäume können als Zweiphasensystem klassifiziert werden, in dem im Normalfall das Gas „Luft“ in einem durch Tenside stabilisierten Lamellensystem eingeschlossen ist. Der erste Schritt zur Bildung von Schaum ist das Entstehen von Blasen nach dem Lufteintrag in die Tensidlösung. Diese Blasen lagern sich anschließend zu einem Schaumteppich zusammen. Die Stabilität des Schaumteppichs wird durch die folgenden Faktoren beeinflusst: chemischer Aufbau der Tenside, der Tensidkonzentration, der Temperatur, der Viskosität des Dispersionsmittels (im Normalfall Wasser), der dynamischen Oberflächenspannung der Tensidlösung und der Oberflächenviskosität der Schaumlamelle.<sup>23</sup>

### 2.2.2 Mizellen

Wie in dem Abschnitt „Tenside“ beschrieben, wird die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft durch Tenside besetzt. Ist dieser Prozess jedoch abgeschlossen und die Lösung mit Tensiden gesättigt, beginnen weitere verfügbare Tensidmoleküle sogenannte Mizellen zu bilden. Diese sind in wässriger Umgebung nach außen hydrophil und nach innen hydrophob. Die Konzentration, ab der Mizellen gebildet werden, wird als kritische Mizellenkonzentration beschrieben und ist abhängig vom Dispersionsmittel, wie z.B. Wasser oder Benzin, sowie wie dem Aufbau des Tensides. Mizellen sind also Teilchenverbände, die im Normalfall ihre hydrophoben Enden ins Innere der Zelle richten, um den Wechselwirkungen mit dem Wasser zu entkommen und gleichzeitig die Zelle zu stabilisieren (Abbildung 5).

Aggregation in der Volumenphase

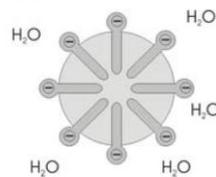


Abbildung 5: Mizelle<sup>22</sup>

Diese Mizellen können im inneren Substanzen aufnehmen, welche in dem Dispersionsmittel wie z.B. Benzin im Wasser unlöslich sind. Dabei ist die Aufnahme von Substanzen in das Innere der Mizellen begrenzt und verändert die Mikrostrukturen und die Dimension der Mizellen. Die Aufnahme von unpolaren Verbindungen in Mizellen in wässriger Umgebung ist ein alltäglicher Prozess, der z.B. beim Waschen von Kleidung genutzt wird.<sup>23 24</sup> Für die Brandbekämpfung resultiert daraus, je mehr Stoffmenge eingekapselt werden soll, desto mehr mit Tensiden versetztes Löschmittel ist erforderlich.

### 2.2.3 Mögliche Löscheffekte von Löschmittelzusätzen

Nach der Sichtung unterschiedlicher Herstellerunterlagen für Löschmittelzusätze können folgende unterschiedliche Löscheffekte angeführt werden:

- Abkühlung und Reduzierung der Oberflächenspannung
- Einkapseln von Brennstoffmolekülen oder Brennstofftropfen
- Antikatalytischer Löscheffekt

### 2.2.4 Abkühlung und Reduzierung der Oberflächenspannung

Der Löscheffekt der Abkühlung basiert auf der Kühlung des brennbaren Materials unter seine Zündtemperatur und im besten Fall unter seinen Flammpunkt. Dieser Prozess erfolgt durch die Übertragung von Energie aus dem brennenden Medium in das Löschwasser und dem entstehenden Wasserdampf. Die dabei entstehende Verdampfungswärme von einem Liter Wasser beträgt 2257 kJ/Kg am Siedepunkt bei 1013 mbar und ist damit die höchste bekannte Verdampfungswärme für Löschmittel.<sup>25</sup> Das bedeutet, je größer und schneller die Energieübertragung gestaltet werden kann, desto schneller wird ein Löscheffekt erzielt.

Die Energieübertragung kann durch eine große Oberfläche des Löschwassers beschleunigt werden, Komplikationen verursacht dabei die hohe Oberflächenspannung des Wassers von ca. 72 mN/m bei 20°C.<sup>26</sup> Diese hohe Oberflächenspannung führt zum Effekt der Tropfenbildung. Die Tropfen bilden die Form einer Kugel aus, welche die kleinste mögliche Oberfläche generiert. Durch die Zugabe von Tensiden kann die Oberflächenspannung des Wassers auf bis unter 17 mN/m<sup>27</sup> gesenkt werden, siehe Abbildung 7.

Die reduzierte Oberflächenspannung durch die Zugabe eines Löschmittelzusatzes in den Löschwasserstrom generiert feinere Wassertropfen. Dessen kleineres Volumen generiert insgesamt eine größere Gesamtoberfläche und erhöht dadurch die Fläche zur Energieübertragung. Die Folge ist eine schnellere Verdampfung der kleinen Tropfen gegenüber der großen Wassertropfen, welche aufgrund ihrer zu kurzen Verweildauer unter Umständen nicht vollständig verdampft werden können.<sup>28</sup>

### 2.2.5 Einkapseln

Durch die unter den Abschnitten „Tenside“ und „Mizellen“ beschriebenen Eigenschaften erhalten Löschmittelzusätze mit entsprechenden Tensiden die Möglichkeit, Moleküle in Mizellen einzukapseln. Werden laut Hersteller z.B. Moleküle von brennbaren Flüssigkeiten eingekapselt, stehen diese einer Verbrennung nicht mehr zur Verfügung, da sie keine brennbaren Gase oder Dämpfe mehr freisetzen können. Eine weitere Anwendung dieser Eigenschaft (neben der Brandbekämpfung) wäre die Sicherung auslaufender brennbarer Flüssigkeiten bei Verkehrsunfällen, wobei auf eine störende Schaumdecke verzichtet werden könnte, sollte die Flüssigkeit vollständig durch den Löschmittelzusatz eingekapselt werden können.

### 2.2.6 Antikatalytischer Löscheffekt

Der Antikatalytische Löscheffekt ist vor allem durch Löschpulver bekannt. Die sehr feinen Pulverpartikel hemmen und unterbrechen die in der Flamme ablaufende chemische Reaktion. Aufgrund der thermischen Zersetzung des Pulvers werden freie Moleküle gebildet, welche sich mit den Radikalen der Verbrennung kombinieren. Hierdurch wird die Reaktionskette der Verbrennung unterbrochen. Des Weiteren kann das Löschmittel Pulver einen Löscheffekt über seine sehr große Oberfläche erreichen. Die Radikale der Verbrennung verlieren Teile Ihrer Energie durch den Kontakt mit der kühlen Oberfläche der Pulverkörnchen. Dieses führt ebenfalls zum Kettenabbruch.<sup>29</sup>

In den Unterlagen der Hersteller für Löschmittelzusätze wird der Löscheffekt durch die antikatalytische Wirkung angeführt. Laut Beschreibung können die Löschmittelzusätze freie Radikale einkapseln und erhalten hierdurch einen antikatalytischen Löscheffekt. Dieser Löscheffekt ist beim Einsatz von Löschpulvern vielfach bekannt und bei einem flüssigen LMZ chemisch evtl. möglich, in der Praxis jedoch sehr fraglich.

### 2.2.7 Zumischrate

LMZ haben vom Hersteller vorgegebene Zumischraten, welche meistens zwischen 0,1% und 6,0% je nach Einsatzzweck liegen. Die Zumischrate definiert das Verhältnis von Löschmittelzusatz zum Löschwasser in Prozent. Das bedeutet, bei einer 1% Zumischung werden 1 Teil LMZ mit 99 Teilen Wasser zu 100 Teilen LMZ-Wassergemisch vermischt. Durch eine höhere Zumischrate wird die Konzentration des Löschmittelzusatzes mit seinen Bestandteilen wie z.B. den Tensiden im Löschwasserstrom erhöht.

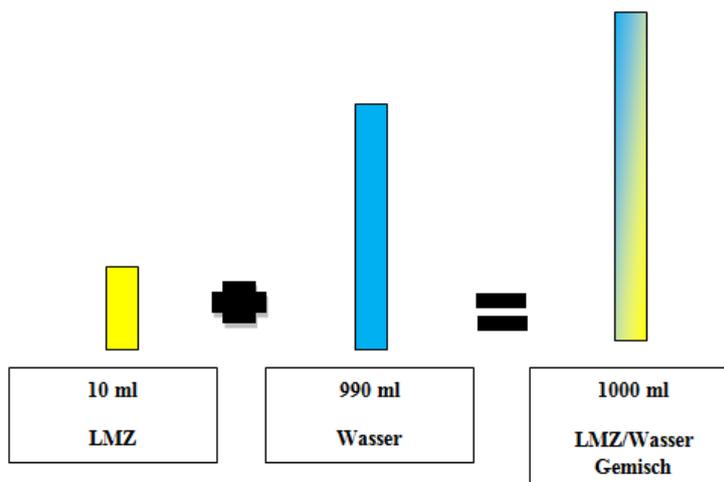


Abbildung 6: Zumischrate (ohne Maßstab)

Die Zumischung kann dabei im Einsatz durch unterschiedliche Apparaturen, wie z.B. Z-Zumischer oder Druckzumischanlagen, erfolgen.

### 2.2.8 Physikalische Daten der Löschmittelzusätze

Die Tabelle 2 stellt die relevanten physikalischen Daten der verwendeten Löschmittelzusätze und des fluorfreien Referenz-Schaumlöschmittels dar.

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der LMZ

|                    | LMZ 1     | LMZ 2 | LMZ 3 | Schaum |
|--------------------|-----------|-------|-------|--------|
| Zumischrate B in % | 3         | 3     | 1     | 3      |
| Dichte in g/ml     | 0,98      | 1,02  | 1,01  | k.A.   |
| ph-Wert            | 6,9 - 7,1 | 8,0   | 7,5   | 7,42   |

### 3 Experimenteller Teil der Untersuchung der Löschmittelzusätze

In dieser Untersuchung werden die Löschmittelzusätze auf Ihre Eigenschaften in Bezug zu Ihren angegebenen Löscheffekten untersucht, die angeblich die Leistungsfähigkeit eines Schaumlöschmittels kompensieren.

In einem ersten Schritt wurde die kritische Mizellenkonzentration bestimmt. Durch dieses Verfahren konnten die Oberflächenspannung sowie die vorhandene Menge an Tensidgemisch im jeweiligen Löschmittelzusatz bestimmt werden. Diese Größen halfen zu beurteilen, ob ausreichend Tenside in den Löschmittelzusätzen vorhanden sind, um einen möglichen Löscheffekt durch die Inertisierung hervorzurufen.

Durch die optische Beobachtung von Mischungen aus brennbarer Flüssigkeit und Löschmittelzusatz sollte eine von den Herstellern angegebene langanhaltende Inertisierung untersucht werden. Durch eine mögliche Phasentrennung der einzelnen Flüssigkeiten aufgetragen gegenüber der Zeit ließ sich bestimmen, ob eine mögliche Inertisierung langfristig bestehen würde.

Um den Löscheffekt der Inertisierung abschließend bewerten zu können, erfolgte die Messung der Zeit bis zum Erreichen der unteren Explosionsgrenze und damit der Bildung einer zündfähigen/brennbaren Atmosphäre über der Mischung. Dieses erfolgte mit Hilfe eines Gasanalysators durch die Messung der Dampfkonzentration.

Durch den Versuchsaufbau mit Scheidetrichtern auf unterschiedlichen Niveaus, sollte bestimmt werden, ob die sehr kurzfristig inertisierten Teile der brennbaren Flüssigkeit eine Art Schutzschicht, ähnlich einer Schaumdecke, an der Oberfläche ausbilden würden oder aufgrund ihrer Dichte in der brennbaren Flüssigkeit versinken würden.

Nach der Untersuchung einer möglichen Inertisierung sowie der Bildung einer Art Schutzschicht sollte in praktischen Brandversuchen beispielhaft die Löschwirkung eines Löschmittelzusatzes gegenüber den Löschmitteln Wasser und Schaum auf einer brennbaren Flüssigkeit mit einem Flammpunkt unter und über der Umgebungstemperatur erprobt werden. Durch diese Versuche sollte festgestellt werden, ob es neben der bereits stark begrenzten Inertisierung tatsächlich nennenswerte Differenzen im Löschvermögen gibt.

Durch das auffällig positive Löschverhalten des Löschmittelzusatzes auf einer brennbaren Flüssigkeit mit einem Flammpunkt über der Umgebungstemperatur, sollte durch zwei weitere Laborversuche die Abkühlwirkung des Löschmittelzusatzes genauer analysiert werden. In einem auf 85 °C erwärmten Klimaschrank wurde hierbei untersucht, ob die Zumischung eines Schaumlöschmittels oder eines Löschmittelzusatzes die Verdampfung von Wasser beschleunigt.

Durch die pulsartige Aufgabe von Sprühimpulsen der unterschiedlichen Löschmittel auf eine erwärmte Oberfläche, sowie die Sammlung des ablaufenden Wassers, konnte die verdampfte Masse bestimmt werden. Dieses Verfahren ermöglichte es, zu bestimmen ob es evtl. eine erhöhte Kühlwirkung durch die Bildung kleinerer Tropfen geben könnte.

### 3.1 Untersuchung der kritischen Mizellenkonzentration

Zum Nachweis einer möglichen Inertisierung (teilweise auch Einkapselung genannt) brennbarer Flüssigkeiten durch Löschmittelzusätze wurde in einem ersten Schritt die kritische Mizellenkonzentration (CMC) und die Oberflächenspannung der Löschmittellösung bestimmt. Die Löschmittellösung beinhaltete destilliertes Wasser sowie den Löschmittelzusatz in der vorgegebenen Anwendungskonzentration der Hersteller für Flüssigkeitsbrände. Durch die CMC lässt sich eine Aussage darüber treffen, ob in der Löschmittellösung ausreichend Tensid vorhanden ist, um nicht nur die Oberflächenspannung zu senken, sondern auch Mizellen in der Phase auszubilden.<sup>30</sup> Ist diese Bedingung erfüllt, könnten in einer Emulsion aus Löschmittel und einer brennbaren Flüssigkeit, Teile dieser eingekapselt werden, wodurch ein Ausgasen unterbunden werden könnte.

#### 3.1.1 Versuchsablauf

Die Bestimmung der CMC erfolgt mit der Wilhelmi-Platten-Methode. Hierzu wurde ein K-100-Tensiometer mit CMC-Bestimmungseinheit (beides Krüss GmbH, Hamburg) genutzt. In dieser Versuchsreihe arbeitete das Gerät mit der KRÜSS-Standard-Platinplatte mit den Ausmaßen 19,9 mm, 0,2 mm und 10,0 mm (Länge \* Breite \* Höhe). Der Behälter für die flüssige Probe ist auf einem Hebetisch positioniert und wird bis kurz unter die Messplatte gefahren. Wird nun die Messplatte in die Probe getaucht, wird diese benetzt. Anschließend fährt das K-100 die Probe hinab und an der Messplatte wird die entstehende Kraft aufgezeichnet, welche anschließend geräteintern in die Oberflächenspannung der Lösung umgerechnet wird. Nach Abschluss der Oberflächenspannungsmessung bei einer Konzentration wird durch das Abpumpen einer definierten Menge an Lösung und dem Zuführen von destilliertem Wasser die Lösung verdünnt (Konzentration gesenkt). Dann wird die Messung bei dieser Konzentration wiederholt. Durch wiederholtes Absenken der Konzentration und Messung der Oberflächenspannung erhält man den Verlauf der Oberflächenspannung in Abhängigkeit von der Konzentration. Aus dieser Kurve errechnet dann die Software des Geräts die CMC.

Für die Versuche wurde entsprechend der Vorgabe des Herstellers zur Anwendungskonzentration für Flüssigkeitsbrände 1 ml oder 3 ml Löschmittelzusatz in einen Messzylinder pipettiert und anschließend mit destilliertem Wasser bis auf 100 ml gefüllt, um die entsprechende Zumischrate von 1% oder 3% zu erhalten. Mit einer Vollpipette wurden 50 ml in den Vorlagebehälter des K-100 überführt. Nach Abschluss des Vorbereitungsprozesses, der gewährleistete, dass ausreichend destilliertes Wasser zum Verdünnen der Lösung zur Verfügung stand, dass abgepumpte Lösung aufgefangen werden konnte und sich im Schlauchsystem keine Luft befand, welche einen Messfehler hätte verursachen können, arbeitete das K-100 nun vollautomatisch. Nach Abschluss der Messreihe erfolgte die Auswertung der aufgenommenen Daten und die Bestimmung der CMC und der Oberflächenspannung.

### 3.1.2 Ergebnis und Bewertung der Untersuchung zur kritischen Mizellenkonzentration

Die Ergebnisse zur Untersuchung der CMC und der Oberflächenspannung sind in Tabelle 3 dargestellt. Als weiteres wurden die CMC und die Oberflächenspannung des Schaumkonzentrats untersucht, welches in weiteren Versuchen als Referenz diente.

Tabelle 3: Ergebnisse zur Untersuchung der CMC

|                                       | LMZ 1 | LMZ 2 | LMZ 3 | Schaum |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| Zumischrate in %                      | 3     | 3     | 1     | 3      |
| Oberflächenspannung in mN/m bei 21 °C | 28,1  | 17,9  | 26,6  | 27,1   |
| CMC in mg/l                           | 4218  | 1776  | 300   | 289    |
| CMC in %                              | 0,42  | 0,18  | 0,03  | 0,03   |

Die Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Oberflächenspannungen unterschiedlicher Schaumlöschmittel mit und ohne polyfluorierte Tenside. Die gelb markierten Schaummittel sind fluorhaltig, die grün markierten Schaummittel sind fluorfreie Produkte.<sup>31</sup>

|                      | Surface Tension of Cyclohexane | Foam Solution Surface Tension | Foam Interfacial Tension with Cyclohexane | Spreading Coefficient |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------|
| 3M™ 1% AFFF          | 24.0                           | 16.4                          | 4.3                                       | 3.3                   |
| 3M™ 6% AFFF          | 24.0                           | 16.2                          | 4.7                                       | 3.1                   |
| 3M™ ATC™ @ 3%        | 24.0                           | 16.2                          | 3.2                                       | 4.6                   |
| 6% AFFF              | 24.0                           | 17.9                          | 1.4                                       | 4.7                   |
| AFFF/AR @ 3%         | 24.0                           | 18.6                          | 2.0                                       | 3.4                   |
| Fluoro Free Foam @1% | 24.0                           | 24.0                          | 0.6                                       | - 0.6                 |
| 3M™ RF6 @ 6%         | 24.0                           | 26.4                          | 2.4                                       | - 4.8                 |

Abbildung 7: Oberflächenspannungen unterschiedlicher Schaumlöschmittel<sup>31</sup>

Die Löschmittelzusätze 1 und 3 sowie das Schaumkonzentrat wiesen ähnliche Oberflächenspannungen zwischen 26 und 28 mN/m auf, das entspricht ca. einem Drittel der Oberflächenspannung von Wasser mit 72 mN/m. Diese Werte werden durch die in Abbildung 7 dargestellte Tabelle bestätigt. Der Löschmittelzusatz 2 mit einer Oberflächenspannung von 17,9 mN/m, lässt die Annahme zu, dass Fluoranteile vorhanden sind, da alle AFFF-Schaummittel Oberflächenspannung zwischen 16 mN/m und 18 mN/m aufweisen, siehe Abbildung 7.

Der Löschmittelzusatz 1 erreicht ab einer Konzentration von 0,42% die Absenkung der Oberflächenspannung auf ca. 28 mN/m. Dieses entspricht einer Konzentration von 4218 mg/l des Tensidgemisches im Löschmittel. Der Hersteller gibt für die Bekämpfung eines Feststoffbrandes eine Zumischrate von 0,5% bis 1,0% an. Aus diesem Zusammenhang ist ein Rückschluss auf die chemische Einstellung des Löschmittelzusatzes möglich. Der Löschmittelzusatz ist gegenüber den anderen Löschmittelzusätzen sehr knapp ohne große Sicherheitsreserven eingestellt. Denn würde es bei einer eingestellten Zumischrate von 0,5%

zu einer ungenauen Zumischung durch z.B. Ansaugprobleme mit einem Z-Zumischer kommen und die Zumischrate hierdurch unter 0,42 % fallen, wird der Effekt der Absenkung der Oberflächenspannung verringert. Bei der vorgesehenen Zumischrate von 3% für Flüssigkeitsbrände steht theoretisch ca. die 7-fache Menge des Tensidgemisches zur Verfügung, welche erforderlich ist die Oberflächenspannung auf die 28 mN/m abzusenken und Mizellen zu bilden. Die 7-fache Menge des Tensidgemisches bei der 3 % Anwendungskonzentration für Flüssigkeitsbrände ist gegenüber den anderen Löschmittelzusätzen mit der 16 bis 100-fachen Menge deutlich geringer. Aus diesem Grund, kann davon ausgegangen werden, dass der Löschmittelzusatz im Ursprung für die Feststoffbrandbekämpfung entwickelt wurde und dabei ohne größere Sicherheitsreserven eingestellt wurde, da für eine mögliche Einkapselung weniger Tenside zur Verfügung stehen als wie in anderen erprobten Löschmittelzusätzen.

Mit einer erforderlichen Zumischrate von 0,18 % zur Absenkung der Oberflächenspannung auf ca. 17,9 mN/m ähnelt der Löschmittelzusatz 2 augenscheinlich eher dem Löschmittelzusatz 1. Für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung mit einer Zumischrate von 3 % steht auch hier die ca. 17-fache Menge des Tensidgemisches zur Verfügung, welches für die Absenkung der Oberflächenspannung erforderlich wäre. Nach Herstellerangaben werden die Löscheffekte der Einkapselung und der Schaumbildung genannt.

Der Löschmittelzusatz 3 erreicht bereits bei einer Konzentration von 300 mg/l, was einer Zumischrate von 0,03% entspricht die Absenkung der Oberflächenspannung auf 26,6 mN/m. Dieser Hersteller gibt für die Feststoffbrandbekämpfung auch eine Zumischrate von 1,0% vor. Dadurch, dass die Oberflächenspannung bereits bei 0,03% Zumischung abgesenkt ist, wäre auch bereits eine Zumischung von kleiner 0,3% für die Herstellung von Netzwasser möglich, ohne dass bei Schwankungen in der Zumischung der Effekt der Absenkung der Oberflächenspannung verloren gehen könnte. Bei der Zumischrate von 1 % oder 3 % für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung (unterschiedliche Angaben in den Herstellerunterlagen gefunden) stehen somit die ca. 33-fache oder sogar die 300-fache Menge des Tensidgemisches, welches nur zur Absenkung der Oberflächenspannung notwendig wäre, für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung zur Verfügung. Dieser Löschmittelzusatz hat also ausreichend Reserve, bei der Flüssigkeitsbrandbekämpfung, neben einer möglichen Einkapselung eine Verschäumung zu gewährleisten. Es handelt sich hierbei also offensichtlich, eher um einen Löschmittelzusatz, der für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung konzipiert wurde, dieses verdeutlichen die höheren Tensidgemisch Reserven als wie z.B. im Löschmittelzusatz 1.

An der Oberflächenspannung von 27,1 mN/m des Schaumkonzentrates, welches in einigen Versuchen als Referenz diente, zeigt sich deutlich, dass es sich dabei um ein fluorfreies Schaumkonzentrat und kein AFFF handelt. Dieses Produkt ähnelt in der chemischen Einstellung dem Löschmittelzusatz 3. Bereits bei einer Zumischung von 0,03 % wird die Oberflächenspannung auf den oben genannten Wert abgesenkt und es steht für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung ca. die 103-fache Menge des Tensidgemisches zur Absenkung der Oberflächenspannung zur Verfügung. In diesem Schaumkonzentrat wird der Überschuss des Tensidgemisches für die Herstellung von möglichst vielen Schaumblasen verwendet.

## 3.2 Optische Untersuchung der Emulsion

Zur Überprüfung der Stabilität bzw. einer längerfristigen Inertisierung einer Emulsion aus brennbarer Flüssigkeit, Wasser und Löschmittelzusatz wurden entsprechende Mischungen hergestellt. Das optische Verhalten der Proben wurde nach dem Ansatz für einen gewissen Zeitraum bildtechnisch dokumentiert. Hierdurch sollte eine mögliche Trennung der einzelnen Phasen der Emulsion entsprechend der Zeit aufgezeichnet werden. Daraus wären Rückschlüsse möglich, ob und wie lange sich brennbare Flüssigkeiten mit den Löschmittelzusätzen inertisieren lassen.

### 3.2.1 Versuchsbeschreibung

Für diese Versuchsreihe wurden pro Löschmittelzusatz und brennbarer Flüssigkeiten (Benzin oder Heptan) jeweils 5 Messzylinder mit einem Anteil Brennstoff und definierten Anteilen LMZ angesetzt:

$$\frac{1}{2} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{5} \quad \frac{1}{7} \quad \frac{1}{10}$$

Die Definition des z.B.  $\frac{1}{3}$  Brennstoff-LMZ-Gemisches entsprach dabei, einem Teil brennbarer Flüssigkeit und zwei Teilen Löschmittel bestehend aus Löschmittelzusatz und Wasser. Die Anteile wurden entsprechend für die verwendeten 250 ml-Messzylinder errechnet, hergestellt und bildtechnisch dokumentiert.

### 3.2.2 Vorversuch

Für die Herstellung der Mischung war es erforderlich, die brennbare Flüssigkeit mit der LMZ-Lösung vollständig zu emulgieren. Als Richtwert wurde das Brennstoff-LMZ-Gemisch  $\frac{1}{5}$  gewählt, welches laut den Herstellerunterlagen eines Löschmittelzusatzes für die Inertisierung erforderlich wäre. Für den Versuch wurde eine 250 ml mit dem Verhältnis  $\frac{1}{5}$  aus brennbarer Flüssigkeit und destilliertem Wasser mit 3% Löschmittelzusatz hergestellt. Zur Emulgierung wurde die Lösung in ein 250 ml Becherglas überführt und mit einer Petri-Schale verschlossen, um einen Luftzutritt und einen Probenaustritt zu verhindern. In dem Becherglas befand sich ein Rührfisch mit einer Länge von 80 mm und einem Durchmesser von 5 mm. Die Lösung wurde 5 Minuten lang bei 1500 Umdrehungen vermenget und bildete eine Emulsion. Dieser wurde im Anschluss mit einer Vollpipette 20 ml Emulsion entnommen und in eine metallische Petri-Schale überführt. Durch die Zuführung einer Zündquelle wurde die Brennbarkeit überprüft. Die Emulsionen mit dem Heptan ließen sich nicht entzünden, damit war sichergestellt, dass das Rührverfahren für diese und weitere Versuche geeignet war.

### 3.2.3 Versuchsablauf

Für die Versuche wurden entsprechend der Anwendungskonzentration 1%ige oder 3%ige Mischungen mit einem Volumen von 250 ml pro Brennstoff-LMZ-Gemisch hergestellt. Siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Verhältnisse brennbare Flüssigkeit - LMZ.

| <u>Verhältnis</u> | <u>Brennbare Flüssigkeit<br/>in ml</u> | <u>LMZ-Lösung<br/>in ml</u> |
|-------------------|--|-----------------------------|
| 1/2               | 125                                    | 125                         |
| 1/3               | 83                                     | 167                         |
| 1/5               | 50                                     | 200                         |
| 1/7               | 35                                     | 215                         |
| 1/10              | 25                                     | 225                         |

Nach der Herstellung wurden alle Proben einzeln gemäß dem Verfahren aus dem Vorversuch (siehe Abschnitt Vorversuch) verrührt. Das gewährleistete für alle Proben dieselben Ausgangsbedingungen. Nach Abschluss des Rührvorganges wurde die Probe im verschlossenen Messzylinder vor der Kamera zur Dokumentation platziert.

Zum Erhalt einer Referenz wurden im ersten Schritt Blindversuche mit einer Wasser-Heptan und einer Wasser-Benzin Mischung durchgeführt. Die folgende Beschreibung galt gleichermaßen für den Wasser-Benzin-Blindversuch. Für den Blindversuch wurde eine Lösung aus 50 ml technischem Heptan und 200 ml Wasser gemäß dem Rührverfahren aus dem Vorversuch hergestellt. Dieses entsprach bei einem Gesamtvolumen von 250 ml einem Brennstoff-LMZ-Gemisch von  $\frac{1}{5}$ . Zur besseren Kenntlichkeit wurde in dem Wasser-Heptan-Blindversuch das Wasser mit blauer Tinte eingefärbt, um die klaren Flüssigkeiten Wasser und Heptan besser voneinander unterscheiden zu können. Er zeigte sich, dass die Wasser-Heptan-Lösung bereits nach 3 Minuten vollständig entmischt war, (siehe Abbildung 8). Die Wasser-Benzin-Lösung war nach 35 sec. vollständig entmischt (siehe Abbildung 9).



Abbildung 8: Wasser-Heptan Blindversuch (gefärbt)



Abbildung 9: Wasser-Benzin-Blindversuch

### 3.2.4 Ergebnisse der optischen Versuche

Die Proben wiesen nach dem Rührvorgang und dem Umfüllen in die Messzylinder jeweils ein einheitliches weißes Bild auf. Bei allen Löschmittelzusätzen war zu beobachten, dass sich die Proben bereits wenige Augenblicke nach dem Umfüllen in den Messzylinder langsam begannen zu entmischen. Es war an der Oberfläche die Bildung einer wenigen Millimeter starken, klaren Phase zu beobachten. Ebenfalls setzte sich am Boden der Messzylinder eine je nach LMZ leicht grünliche oder milchige Phase ab. Das Brennstoff-LMZ-Gemisch 1:2 (erster Messzylinder von links) trennte sich zuerst am deutlichsten auf, siehe exemplarisch LMZ 1, Abbildung 10 .



Abbildung 10: LMZ 1 - Heptan nach 28 min.

Es waren deutlich eine grünliche Phase, sowie eine weißliche und klare Phase zu erkennen. Das Volumen der grünlichen Phase betrug 125 ml, das Volumen der anderen beiden Phasen zusammen ergab auch 125 ml. Dieses entsprach dem Brennstoff-LMZ-Gemisch  $\frac{1}{2}$ . Die weiteren Messzylinder waren ebenfalls bereits in Teilen aufgetrennt. Dies ist jedoch nicht so deutlich auf der Aufnahme zu erkennen. Die Abbildung 11 zeigt den Löschmittelzusatz 2 nach 4 Stunden. Zu diesem Zeitpunkt war die vollständige Entmischung aller Brennstoff-LMZ-Gemische klar zu erkennen. Die Heptanphase war durch eine weißliche Färbung kenntlich, die Wasserphase durch eine Milchige.



Abbildung 11: LMZ 2 - Heptan nach 4 h

### 3.2.5 Ergebnisse der optischen Versuche aus Benzin und Löschmittelzusatz

Die optische Versuchsreihe mit Benzin erfolgte nur mit dem Löschmittelzusatz 1, aufgrund der Ergebnisse aus den vorherigen Versuchen, in denen der LMZ 1 den stabilsten Eindruck erweckte. Es waren dieselben Beobachtungen wie in den vorherigen Versuchen mit Heptan zu machen, eine sehr dünne Schicht Benzin sammelte sich an der Oberfläche. Der Unterschied zu den Versuchen mit Heptan bestand darin, dass die Entmischung optisch länger dauerte. Die Abbildung 12 stellt den Löschmittelzusatz 1 vermischt mit Benzin nach 60 Minuten dar.



Abbildung 12: LMZ 1 - Benzin nach 60 min.

Bei dem Vergleich der Abbildung 10 und Abbildung 12 ist zu erkennen, dass die Entmischung offensichtlich langsamer abläuft.

### 3.2.6 Bewertung der optischen Versuche

Die optischen Versuche können nur einen Anhaltspunkt in Bezug auf die Stabilität einer Emulsion aus Löschmittelzusatz und brennbarer Flüssigkeit liefern.

In den Versuchen war deutlich zu erkennen, dass sich die Emulsionen sofort oder wenige Augenblicke nach der Herstellung begannen zu trennen. Optisch war die Trennung der Emulsion am Fuß der Messzylinder und an der Oberfläche der Emulsion zu beobachten. Am Fuß kennzeichnete sich die Trennung durch den Absatz einer klaren, grünlichen oder leicht milchigen Flüssigkeit. An der Oberfläche setzte sich eine wenige Millimeter starke und klare Phase ab. Nach einer Stunde konnte bei allen Messzylindern eine starke Entmischung beobachtet werden. Die Versuche mit Benzin beschränkten sich auf den Löschmittelzusatz 1, da dieser in den vorherigen Versuchen mit Heptan den stabilsten Eindruck erweckte. Hierbei war zu beobachten, dass alle Brennstoff-LMZ-Gemische am Fuß und der Oberfläche eine Phasentrennung aufwiesen, jedoch keine weitere Entmischung stattfand.

Aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Flüssigkeiten und den Ergebnissen der nachfolgenden Versuche zur Dichte der Emulsionen (Versuche zur Dichte der Emulsion) kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der wenige Millimeter starken Phase an der Oberfläche um die brennbare Flüssigkeit handelt. Bei der Bildung der klaren, grünlichen oder leicht milchigen Phase am Fuß des Messzylinders sollte es sich wie bereits oben angesprochen um Wasser oder allgemein Löschmittel handeln.

Durch die optischen Versuche ist die Annahme zu treffen, dass die Stabilität einer Emulsion aus Löschwasser, Löschmittelzusatz und einer brennbaren Flüssigkeit möglicherweise von der brennbaren Flüssigkeit und dem Vermischungsvorgang abhängig ist. Das Heptan bildet durch die enthaltenen Verbindungen eine andere Polarität als Benzin, welches aus mehr als 100 Bestandteilen raffiniert wird. Darin könnte der Zusammenhang einer besseren und oder langfristigen Emulgierung liegen. Von einer vollständig stabilen Emulsion für einen längeren Zeitraum kann zurzeit aufgrund der Ergebnisse nicht ausgegangen werden. In einem nächsten Schritt muss daher die Konzentration der Dämpfe über der Emulsion ermittelt werden, damit eine Aussage getroffen werden kann, ob diese Emulsionen die brennbare Flüssigkeit wirklich vollständig einkapseln, sodass auch keine brennbaren Dämpfe mehr freigesetzt werden, oder nur Emulsionen gebildet werden, welche die Flüssigkeit emulgieren, aber kein Ausgasen verhindern.

### 3.3 Untersuchungen der Dampfkonzentration über der Emulsion

Die nach dem Ergebnis der Untersuchung zur CMC theoretisch mögliche Inertisierung von brennbaren Flüssigkeiten durch Löschmittelzusätze wurde bereits durch die optischen Versuche in Frage gestellt. In den folgenden Versuchen sollte durch die Messung der Dampfkonzentration an Emulsionen aus brennbarer Flüssigkeit, Löschmittelzusatz und Wasser die Vollständigkeit der Inertisierung untersucht werden.

Die Dampfkonzentration abhängig von Temperatur und Partialdruck über einer Flüssigkeit ist ein entscheidendes Kriterium für die Brennbarkeit einer Flüssigkeit. Erreicht die Dampfkonzentration den Wert der unteren Explosionsgrenze besteht Brandgefahr. Die Entwicklung dieser Konzentration wurde in der folgenden Versuchsreihe mit dem Löschmittelzusatz 1 analysiert.

#### 3.3.1 Messgröße für die Versuche mit dem FT-IR

In der allgemeinen Brand- und Explosionsschutzlehre werden die sicherheitstechnischen Kenndaten Flammpunkt, Zündtemperatur und untere- sowie obere Explosionsgrenzen definiert. Für diese Versuchsreihe wird die untere Explosionsgrenze (UEG) als Messgröße definiert, da die UEG in Sicherheitsdatenblättern bereits in Volumenprozent angegeben wird. Alternativ ist die Bestimmung der Volumenprozentzahl am Flammpunkt möglich, jedoch variieren die Temperaturen des Flammpunktes nach angewendetem Messverfahren. Die UEG, definiert in Volumen %, ist die unterste Grenze, bei der ein Dampf-Luft-Gemisch der brennbaren Flüssigkeit gerade noch gezündet werden kann. Die Zusammenhänge aus Temperatur und Dampfkonzentration, sowie den sicherheitstechnischen Kenndaten ist der Abbildung 13 zu entnehmen.<sup>32</sup>

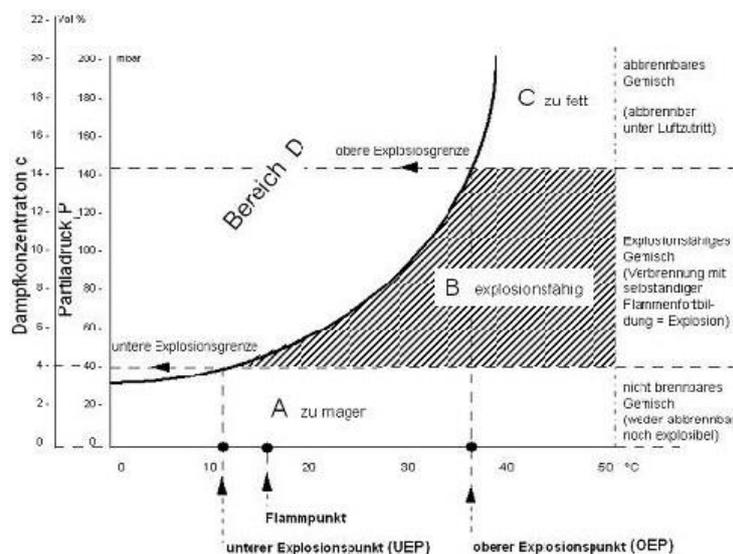


Abbildung 13: Zusammenhang der sicherheitstechnischen Kenndaten<sup>33</sup>

### 3.3.2 Funktion des FT-IR Gas Analysator

Für die Analyse der Dampfkonzentration wurde ein FT-IR Gas Analysator verwendet, welcher nach dem „Fourier Transform Infrarot (FT-IR)“<sup>34</sup> Messprinzip arbeitet. Dieses stammt aus dem Bereich der Infrarot Spektroskopie. Bei dem verwendeten FT-IR handelt es sich um ein Gerät mit der Typenbezeichnung „GASMET<sup>TM</sup> DX4000N FT-IR Gas Analysator Tragbar“ (Abbildung 14, Firma Ansyco, Kalsruhe, Deutschland).

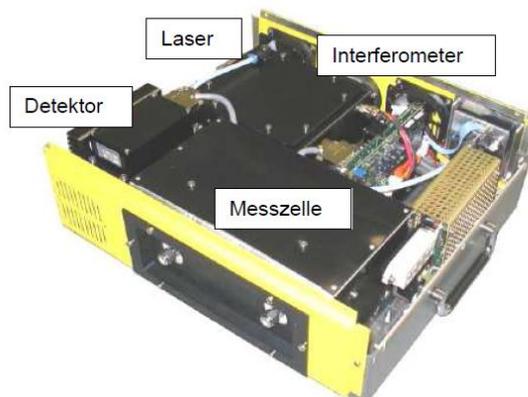


Abbildung 14: GASMET<sup>TM</sup> DX4000N FT-IR Gas Analysator Tragbar

Das Interferometer sendet einen Infrarotlichtstrahl in die Messzelle des FT-IR. Durch die eingebaute Pumpe oder den Eigendruck gelangen die gasförmigen Bestandteile einer Flüssigkeit in die Messzelle. Diese gasförmigen Bestandteile werden vom Infrarotlichtstrahl durchquert, dabei versetzt die Infrarotstrahlung die Moleküle in Schwingungen oder Rotation, wodurch diese Energie absorbieren. Der Detektor wertet die ankommende Infrarotlichtintensität aus. Aus der Absorption resultiert die Änderung der Intensität des IR-Spektrums. Diese lässt sich einem Stoff oder einer Stoffart zu ordnen. So kann durch die Auswertung des IR-Spektrums eine Aussage getroffen werden, welcher Stoff oder Stoffart in welcher Konzentration in der Messzelle vorliegt.

### 3.3.3 Kalibrierung des FT-IR für Heptan und Benzin

Damit eine zuverlässige und aussagekräftige Messung der unteren Explosionsgrenze über der Emulsion erfolgen konnte, war die Kalibrierung des FT-IR im entsprechenden Konzentrationsbereich für die jeweilige brennbare Flüssigkeit erforderlich. Die UEG von Heptan liegt bei 1,0 vol.%, die Kalibration erfolgte in dem Bereich 0,12 bis 3,18 vol.%. Die UEG von Benzin liegt bei 0,6 vol.% und die Kalibration erfolgte in dem Messbereich von 0,2 bis 0,7 vol.%. Die Kalibration höherer vol.-%-Konzentration war aufgrund der maximalen Sättigung des „GASMET DX4000N FT-IR Gas Analysator“ (Firma Ansyco, Karlsruhe) nicht möglich.

Für die Kalibrierung wurde mit der Kalibriereinheit mit der Bezeichnung „SYCOS K-DPG Nexus“ (Firma Ansyco, Karlsruhe) über einen Stellmotor aus einer 5 ml Spritze kontinuierlich ein definiertes Volumen der brennbaren Flüssigkeit in den Verdampfer eingespritzt, siehe Abbildung 15. Der Nullgas-Volumenstrom von 2 l Stickstoff pro Minute bei einem Druck von 2 bar leitete die verdampfte Flüssigkeit über eine beheizte 180 °C Schlauchleitung zur Messzelle des FT-IR weiter. Stickstoff ist nicht IR-aktiv, somit wird für die Messung eine Hintergrundbelastung wie z.B. durch CO<sub>2</sub> ausgeschlossen, welches beim Spülen mit normaler Umgebungsluft auftreten würde. Durch dieses Verfahren wurde dem FT-IR eine definierte Menge der brennbaren Flüssigkeit im verdampften Zustand zugeführt. Die Messung erfolgte bis sich der angezeigte Wert stabilisierte. Danach wurde die Zugabe erhöht und der Prozess wiederholte sich, bis die Sättigung des Gerätes erreicht war.

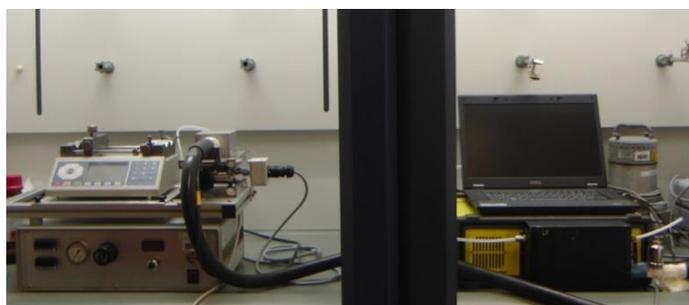


Abbildung 15: Kalibrationsaufbau des FT-IR

Durch die Formel<sup>35</sup> (s. Formel 1) konnte das definierte Volumen der Messkomponenten Heptan und Benzin in die entsprechende Konzentration umgerechnet werden. Durch die Umrechnung und Darstellung der Zugabe gegenüber der errechneten Konzentration in einem x,y Diagramm konnte durch Linearität die Eignung der Kalibrierung nachgewiesen werden.

Formel 1: Berechnung der Konzentration

$$c \left[ \frac{mg}{m^3} \right] = \frac{d \left[ \frac{mg}{\mu l} \right] * v \left[ \frac{\mu l}{h} \right] * 1000}{60 * V \left[ \frac{l}{min} \right]}$$

- c Konzentration
- d Dichte
- v Volumen der Messkomponente
- V Volumen Nullgas

Die Tabelle 5 stellt die kontinuierliche Zugabe von Heptan in den Nullgas-Volumenstrom und die rechnerische Konzentration in  $\text{mg}/\text{m}^3$  und ppm dar. Die Berechnung erfolgte mit der Dichte von  $0,68 \text{ mg}/\mu\text{l}$ .<sup>15</sup>

Tabelle 5: Kalibrierung Heptan

| Zugabe in $\mu\text{l}/\text{h}$ | Konzentration in $\text{mg}/\text{m}^3$ | Konzentration in ppm |
|----------------------------------|---|----------------------|
| 1000                             | 5691,67                                 | 1273,18              |
| 3000                             | 17075,00                                | 3819,55              |
| 5000                             | 28458,33                                | 6365,92              |
| 10000                            | 56916,67                                | 12731,84             |
| 15000                            | 85375,00                                | 19097,76             |
| 20000                            | 113833,33                               | 25463,68             |
| 25000                            | 142291,67                               | 31829,59             |

Im Diagramm 2 wurde die Intensität des Heptans gegenüber dem definierten Zugabevolumen des Heptans während der Kalibrierung aufgetragen. Durch das Hinzufügen einer Trendlinie wird deutlich, dass es sich um eine lineare Funktion handelt, wodurch eine Eignung der Kalibrierung für Heptan gegeben war.

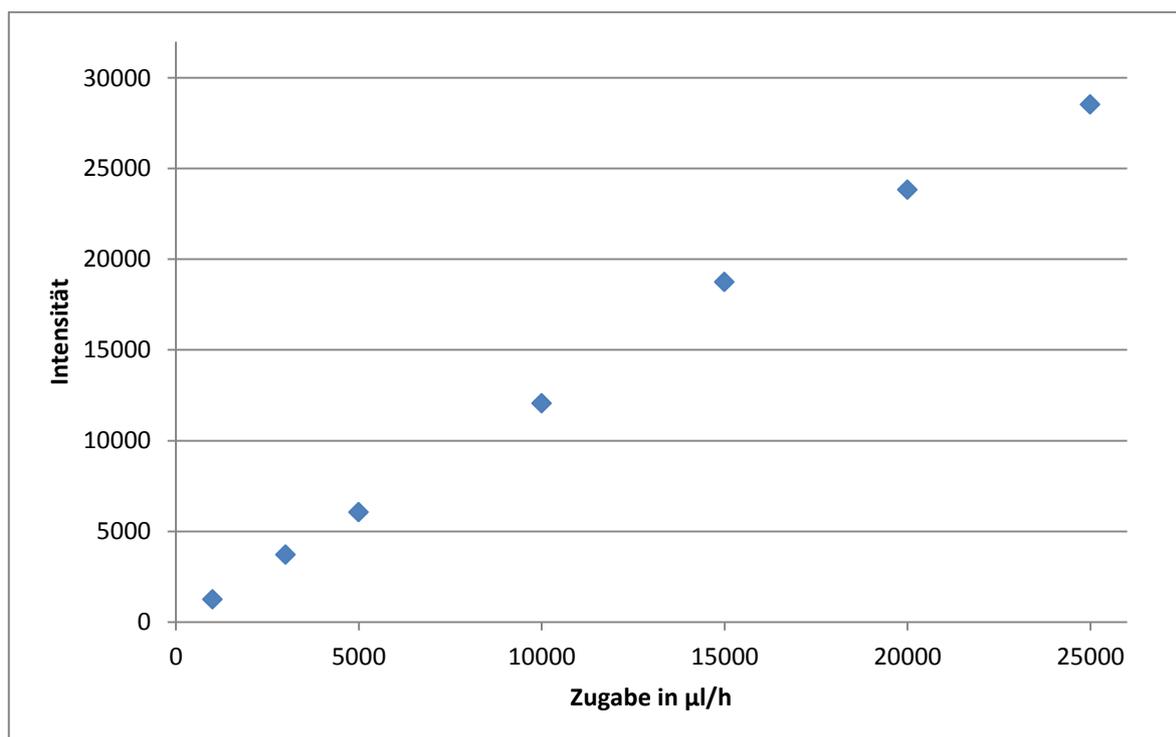


Diagramm 2: Kalibrierung Heptan

Die Tabelle 6 stellt die kontinuierliche Zugabe von Benzin in den Nullgas-Volumenstrom und die rechnerische Konzentration in  $\text{mg}/\text{m}^3$  und ppm dar. Die Berechnung erfolgte mit der Dichte von  $0,75 \text{ mg}/\mu\text{l}$ .

Tabelle 6: Kalibrierung Benzin

| Zugabe in $\mu\text{l}/\text{h}$ | Konzentration in $\text{mg}/\text{m}^3$ | Konzentration in ppm |
|----------------------------------|---|----------------------|
| 500                              | 3250                                    | 743,32               |
| 1000                             | 6500                                    | 1486,64              |
| 1500                             | 9750                                    | 2229,96              |
| 2000                             | 13000                                   | 2973,29              |
| 2500                             | 16250                                   | 3716,61              |
| 3000                             | 19500                                   | 4459,93              |
| 4000                             | 26000                                   | 5946,57              |

Im Diagramm 3 wurde die Intensität des Benzins gegenüber dem definierten Zugabevolumen des Benzins während der Kalibrierung aufgetragen. Durch das Hinzufügen einer Trendlinie in das Diagramm 3 wird deutlich, dass es sich in gewissem Maße um eine lineare Funktion handelt, damit war eine Eignung der Kalibrierung für Benzin gegeben.

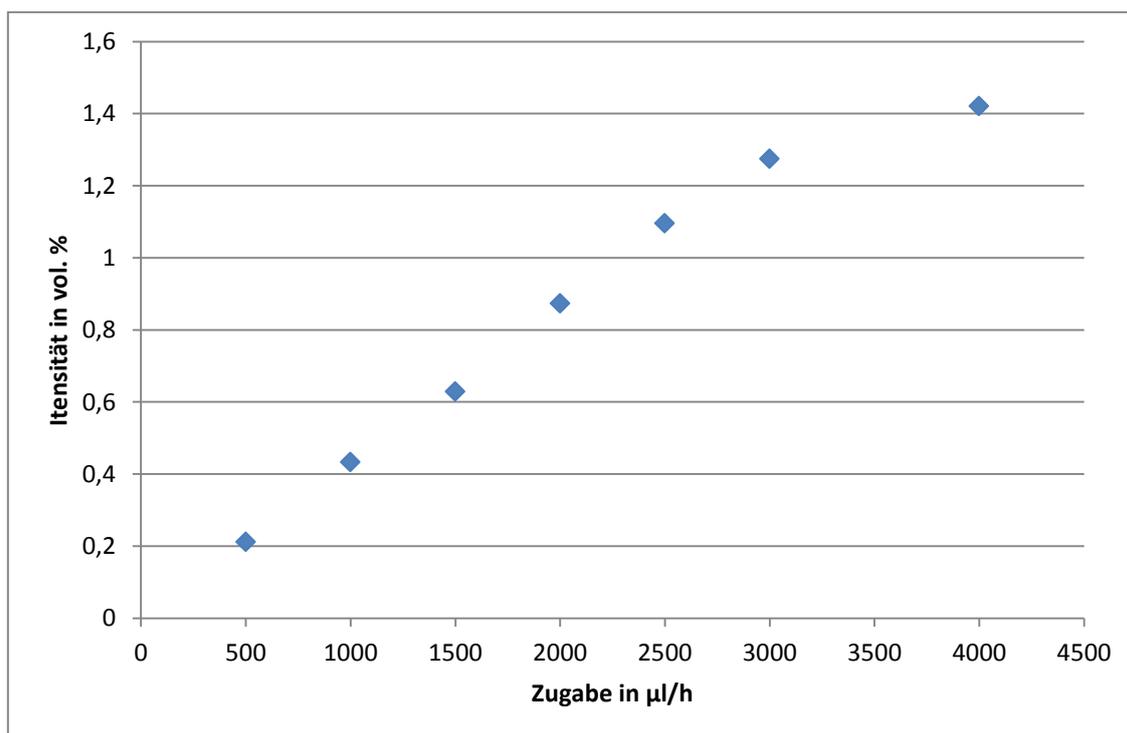


Diagramm 3: Kalibrierung Benzin

Nach der Überprüfung der Eignung der Kalibrierung wurden die Messspektren der Kalibration in der „Calcmeter“-Software als Referenzspektren mit der errechneten Konzentration (aus der Berechnung) hinterlegt. Sie dienen der Software als Grundlage für die Berechnung der Konzentration in den folgenden Messungen.

### 3.3.4 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dampfkonzentration

Damit für alle Versuche und Proben dieselben Umgebungsbedingungen galten, wurde der 500 ml-Messkolben mit der Probe in einem auf 20 °C temperierten Klimaschrank platziert. Der Rundkolben wurde mit einem Waschflaschenaufsatz verschlossen, von welchem die Saug- und Druckleitung zur Messzelle des FT-IR führten. Die vom FT-IR aufgezeichneten Messwerte wurden in dem angeschlossenen PC mit Hilfe der Calcmet-Software ausgewertet und aufgezeichnet. Bei dem Versuchsaufbau (Abbildung 16) handelte es sich um ein geschlossenes System, welches kontinuierlich die Dampfkonzentration über der Emulsion im 20 sec. Takt aufzeichnete.

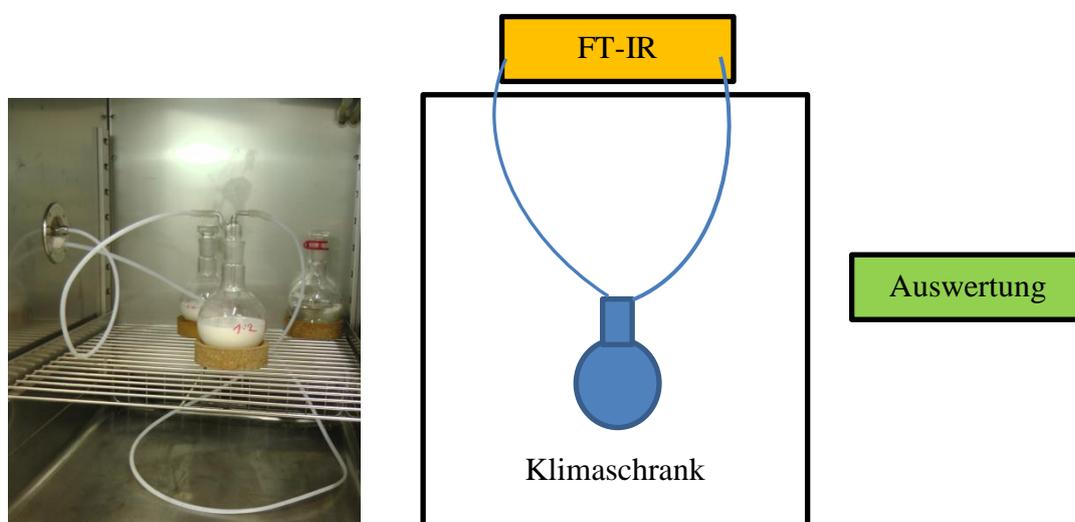


Abbildung 16: Versuchsaufbau FT-IR zur Bestimmung der Dampfkonzentration

Für beide Versuchsreihen (Heptan / Benzin) wurden jeweils zwei Proben in den folgenden Brennstoff-LMZ-Gemischen hergestellt:

$$\frac{1}{2} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{5} \quad \frac{1}{7} \quad \frac{1}{10}$$

Das Verhältnis  $\frac{1}{5}$  wird in den Herstellerunterlagen eines Löschmittelzusatzes für die Inertisierung einer brennbaren Flüssigkeit angegeben und wurde für die Versuche um zwei Brennstoff-LMZ-Gemische nach oben und unten erweitert. Das Volumen pro Probe wurde mit 250 ml definiert und die Angabe des Brennstoff-LMZ-Gemisches bedeutete bei z.B.  $\frac{1}{5}$ , ein Teil Heptan und 4 Teile der 3% Löschmittelzusatz-Lösung.

### 3.3.5 Versuchsdurchführung

Nach der Entnahme der Probe aus dem Klimaschrank und dem Umfüllen in ein 250 ml Becherglas wurde die Probe wie bereits in vorherigen Versuchen gemäß Vorversuch, siehe Abschnitt Optische Versuche, behandelt. Nach Abschluss des 5-minütigen Rührvorganges durch einen Rührfisch (Länge 80 mm, Durchmesser 5 mm) bei 1500 Umdrehungen wurde die Probe in einen 500 ml Rundkolben überführt. Der Rundkolben wurde im Klimaschrank platziert und durch den Waschflaschenaufsatz mit angeschlossener Saug- und Druckleitung zum FT-IR verschlossen. Die 20 sec. zyklische Messung wurde manuell gestartet. Die Messung der Dampfkonzentration erfolgte bis zum Erreichen der UEG. Im Anschluss wurde der Rundkolben entfernt, das System gespült und für die nächste Probe vorbereitet.

### 3.3.6 Ergebnisse der Versuche am FT-IR mit Emulsionen aus LMZ und Heptan

In den ersten Versuchen sollte die technisch bedingte Verzögerung des Messsystems ermittelt werden. Hierzu wurde ein 500 ml Rundkolben mit 250 ml Heptan im Klimaschrank an das FT-IR angeschlossen und die Messung der Konzentration durchgeführt. Die Zeit bis zur Erreichung der 1 vol% entsprechend der UEG wurde als Systemverzögerung festgelegt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Systemverzögerung

| Messung | Versuch 1  |        |         | Versuch 2 |        |         | Versuch 3 |        |         |
|---------|------------|--------|---------|-----------|--------|---------|-----------|--------|---------|
|         | Zeit       | Heptan | Einheit | Zeit      | Heptan | Einheit | Zeit      | Heptan | Einheit |
| 1       | 13:45:28   | 0,325  | Vol.%   | 13:17:22  | 0,283  | Vol.%   | 13:30:49  | 0,27   | Vol.%   |
| 2       | 13:45:49   | 0,601  | Vol.%   | 13:17:42  | 0,529  | Vol.%   | 13:31:10  | 0,498  | Vol.%   |
| 3       | 13:46:10   | 0,783  | Vol.%   | 13:18:03  | 0,699  | Vol.%   | 13:31:31  | 0,652  | Vol.%   |
| 4       | 13:46:31   | 0,943  | Vol.%   | 13:18:24  | 0,848  | Vol.%   | 13:31:52  | 0,787  | Vol.%   |
| 5       | 13:46:52   | 1,086  | Vol.%   | 13:18:45  | 0,988  | Vol.%   | 13:32:13  | 0,911  | Vol.%   |
| 6       |            |        |         | 13:19:06  | 1,115  | Vol.%   | 13:32:34  | 1,026  | Vol.%   |
| Zeit    | 01:24 min  |        |         | 01:44 min |        |         | 01:45 min |        |         |
|         | Mittelwert |        |         | 01:38 min |        |         |           |        |         |

Der Mittelwert der drei Versuche ergab eine Systemverzögerung von 01:38 min. Diese Systemverzögerung wurde bei allen folgenden Versuchen subtrahiert, um die tatsächliche Zeit zu erhalten, in welcher die UEG erreicht wurde.

Das Diagramm 4 stellt die Messzeiten der einzelnen Proben bis zum Erreichen der UEG dar.

| <u>Verhältnis</u> | <u>Versuchsnr.</u>     |
|-------------------|------------------------|
| 1/2               | 1, 2, 3, 4             |
| 1/3               | 5, 6, 7, 8             |
| 1/5               | 9, 10, 11, 12, 13, 14  |
| 1/7               | 15, 16, 17, 18, 19, 20 |
| 1/10              | 21, 22, 23, 24         |

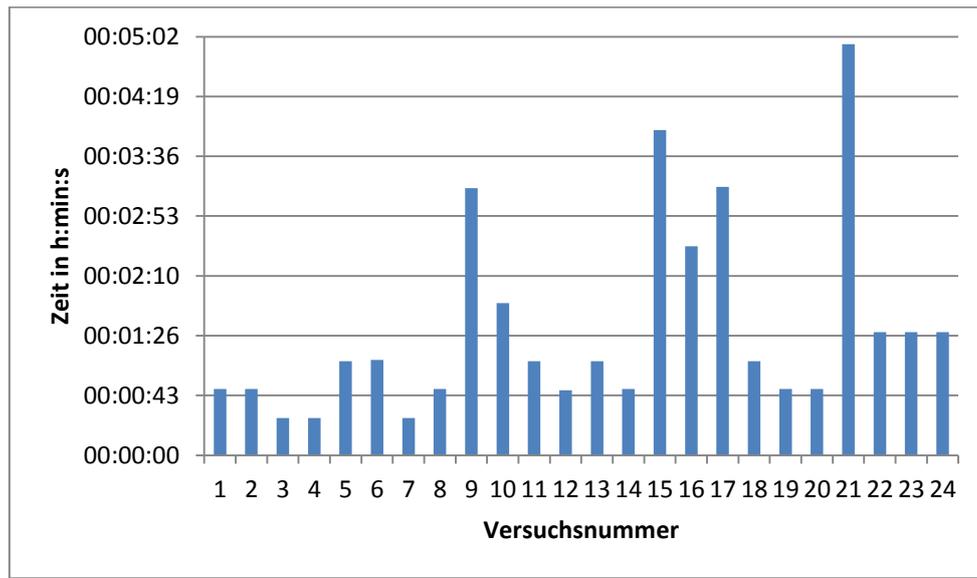


Diagramm 4: Messzeiten bis zum Erreichen der UEG

Die Versuche 9, 15, 16, 17 und 21 wurden als Messabweichung gewertet, da sich eine Schaumschicht auf der Oberfläche gebildet hatte. Das Diagramm 5 stellt den Mittelwert der einzelnen Brennstoff-LMZ-Gemische dar.

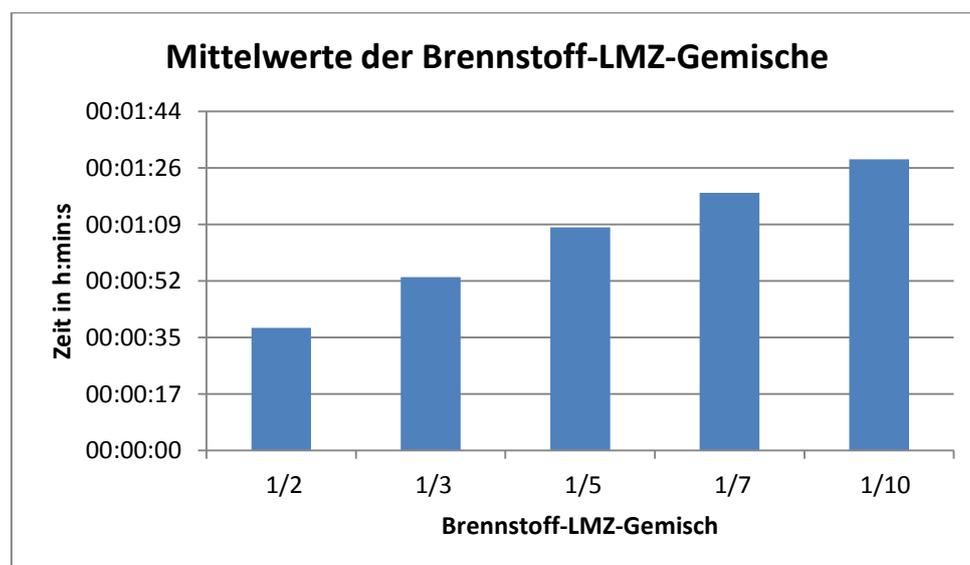


Diagramm 5: Mittelwerte der Brennstoff-LMZ-Gemische

### 3.3.7 Ergebnisse der Versuche am FT-IR mit Emulsionen aus LMZ und Benzin

Die ersten Versuche zeigten, dass sich das FT-IR bereits nach dem ersten oder zweiten Messzyklus von 20 sec. in der Sättigung befand, siehe Abbildung 17 und Abbildung 18. Diese Beobachtung war unabhängig davon, ob eine reine Benzinprobe oder eine Emulsion unter dem Waschflaschenaufsatz platziert wurde. Ursache hierfür war vermutlich der sehr hohe Dampfdruck des Benzins, aufgrund dessen wurde die Versuchsreihe abgebrochen.

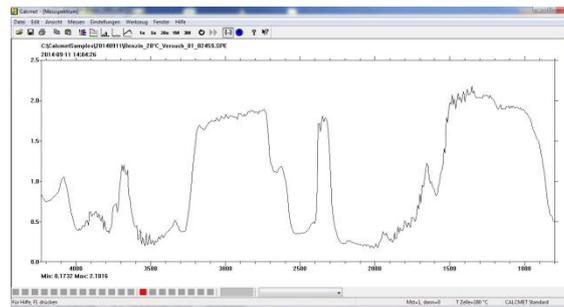


Abbildung 17: Spektrum-Benzin

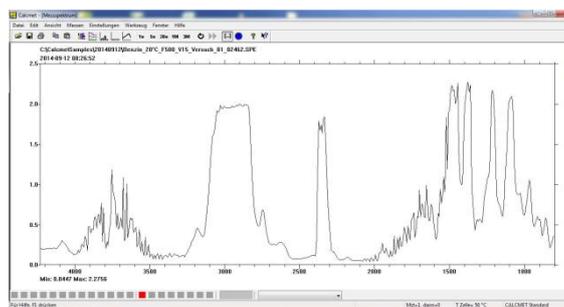


Abbildung 18: Spektrum des Brennstoff-LMZ-Gemisches 1/5

Zur Überprüfung dieser Erkenntnisse wurden die Emulsionen  $\frac{1}{5}$  und  $\frac{1}{7}$  wie vorher beschrieben hergestellt und diesen im Anschluss mit einer 20 ml Vollpipette eine Probe entnommen. Nachdem die Probe in eine metallische Petri-Schale überführt wurde, erfolgte die Zündung eines Feuerzeuges über der Oberfläche der Probe. Das Resultat ist in Abbildung 19 zu erkennen. Über der Probe war ein zündfähiges Dampf-Luft-Gemisch vorhanden, es kam bei der Zündung zu einem Abbrand ohne fortbestehende Verbrennung. Dieser Vorgang ließ sich wiederholt durchführen.



Abbildung 19: Zündung des Dampf-Luft-Gemisches

### 3.3.8 Bewertung der Dampfkonzentration über der Emulsion

Die Versuchsreihe zur Bestimmung der Dampfkonzentration zeigt, dass bei einer Mischung aus n-Heptan und dem Löschmittelzusatz 1 die kritische Konzentration der unteren Explosionsgrenze abhängig vom Brennstoff-LMZ-Gemisch zwischen 30 s und 90 s erreicht wurde. Des Weiteren zeigte sich, dass das Benzin aufgrund seiner sehr niedrigen Flammpunkttemperatur sehr stark ausgaste, sodass der Gasanalysator sich bereits nach einem ersten oder zweiten Messzyklus in der Sättigung befand.

Aufgrund der Sättigung des Gasanalysators bei der brennbaren Flüssigkeit Benzin wurden die Proben zur Überprüfung direkt nach dem Rührvorgang in eine Petri-Schale überführt. Durch das Zuführen und Zünden einer Zündquelle oberhalb der Flüssigphase sollte die Entstehung einer zündfähigen/brennbaren Atmosphäre überprüft werden. Der Versuch bestätigte, dass die Proben unmittelbar eine zündfähige Atmosphäre bildeten, welche ohne eine fortbestehende Verbrennung abbrannte.

In einem Referenzversuch mit einer ca. 2 bis 3 cm starken Schaumschicht wurde eine Verzögerung von 05:39 min. bis zur UEG erreicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die theoretisch mögliche Inertisierung, welche in der Untersuchung zur CMC ermittelt wurde, praktisch nicht in ausreichender Dauer gegeben ist. Des Weiteren bestätigen sie die Vermutungen aus der optischen Versuchsreihe, dass die Löschmittelzusätze brennbare Flüssigkeiten nicht vollständig und vor allem nicht für längere Zeit einkapseln können, sodass auch keine brennbaren Dämpfe mehr entweichen.

Die drei Versuchsreihen widerlegen den sogenannten Löscheffekt durch Inertisierung weitestgehend. Auf Grundlage der Ergebnisse kann nur von einer sehr kurzen und teils unvollständigen Inertisierung brennbarer Flüssigkeiten ausgegangen werden.

### 3.4 Versuche zur Dichte der Emulsion

In dieser Versuchsreihe wurde überprüft, ob die Emulsion oder aber auch die LMZ-Lösung sich über oder unter einer brennbaren Flüssigkeit anordnet oder mit dieser vermischt. Dadurch sollte überprüft werden, ob inertisierte Bestandteile der Flüssigkeit an der Oberfläche eine Art Schutzschicht ähnlich einer Schaumdecke ausbilden würden oder durch die brennbare Flüssigkeit absinken. Aufgrund der widerlegten Fähigkeit der Inertisierung (s. Bewertung der Dampfkonzentration über der Emulsion) war die Bildung einer nachhaltigen Schutzschicht allerdings bereits entkräftet.

#### 3.4.1 Versuchsaufbau

Für diese Versuche wurden zwei 250 ml Scheidetrichter mit einem Schlauch verbunden und in unterschiedlichen Höhen platziert (s. Abbildung 20). In einem Versuch wurde die Emulsion im höheren Scheidetrichter platziert, damit sie von unten in die brennbare Flüssigkeit strömte. Im zweiten Versuch wurde die brennbare Flüssigkeit im höheren Scheidetrichter platziert, damit diese die Emulsion von unten durchströmte. Dieselben Versuche wurden anstatt mit der Emulsion auch mit einer reinen LMZ-Lösung (LMZ 1 und LMZ 3) durchgeführt. Als brennbare Flüssigkeiten wurden Benzin und Heptan verwendet. Mit dem Volumen aus dem höheren Scheidetrichter wurde im Vorwege das Schlauchsystem gefüllt, damit nach dem Öffnen des Ventils am unteren Scheidetrichter sofort Flüssigkeit und keine Luft eintrat.

Darstellung des Versuchsaufbaus:



Abbildung 20: Versuchsaufbau Scheidetrichter

#### 3.4.2 Ergebnis Scheidetrichterversuche

Die Abbildung 21 zeigt den Scheidetrichter nachdem die Emulsion im Verhältnis  $\frac{1}{5}$  aus Heptan und Löschmittel in den tieferliegenden Scheidetrichter mit einer 50 ml Heptanvorlage gelaufen ist. Das Heptan schichtete sich oberhalb der Emulsion.



Abbildung 21: Scheidetrichter Versuch 1

Im zweiten Versuch befand sich im tieferliegenden Scheidetrichter eine 100 ml Emulsion aus Heptan und 3% Löschmittel. Von unten strömte aus dem höherliegenden Scheidetrichter 50 ml Heptan nach.



Abbildung 22: Scheidetrichter Versuch 2

Das von unten einströmende Heptan durchströmte die Emulsion und lagerte sich oberhalb der Emulsion ab, siehe Abbildung 22.

Auch bei Versuchen mit einer reinen 3% Löschmittellösung und Heptan, in welchen Heptan die Löschmittellösung durchströmte oder die Löschmittellösung von unten einströmte, lagerte sich die Phase des Heptans an der Oberfläche ab (Abbildung 23).

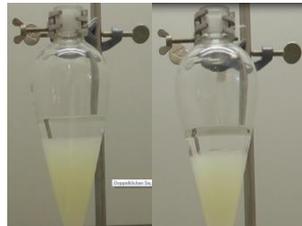


Abbildung 23: Scheidetrichterversuche mit reiner Löschmittellösung und Heptan

Dieselben Beobachtungen erfolgten in gleichen Versuchen mit Benzin.

### 3.4.3 Bewertung der Scheidetrichterversuche

Die Versuche zeigten deutlich, unabhängig von der brennbaren Flüssigkeit, dass das Volumen der Emulsion oder der LMZ-Lösung sich immer unter dem Volumen der brennbaren Flüssigkeit befindet.

Im Zusammenhang mit der widerlegten Inertisierung ist dieser Effekt, die Schichtung unterhalb der brennbaren Phase, als sehr kritisch für die Brandbekämpfung einzustufen. Bei einer geringeren Dichte der brennbaren Flüssigkeit gegenüber dem Löschmittel wird diese kontinuierlich durch den Eintrag von Löschmittel an die Oberfläche getragen. Bei Tankanlagen besteht die Gefahr des Überlaufens und bei Lachen die Gefahr der Ausbreitung.

### 3.5 Löschversuche

Die Laborversuche zeigten, dass die Inertisierung einer brennbaren Flüssigkeit oder die Bildung einer inertisierten Schutzschicht an der Oberfläche, ähnlich einer Schaumschicht, nicht oder nur sehr kurzfristig gegeben war. Diese Ergebnisse ließen die Annahme zu, dass ein nachhaltiger Löscheffekt mit allen Löschmittelzusätzen, welche in den vorherigen Versuchen genutzt wurden, nicht gegeben sei.

Dennoch sollte die Löschwirkung der Löschmittelzusätze am Beispiel des Löschmittelzusatzes 1 noch einmal in Brandversuchen überprüft werden. Als Referenz wurden reines Löschwasser und das fluorfreie Referenzschaummittel (siehe Physikalische Daten Löschmittelzusätze) eingesetzt.

Als Vertreter für brennbare Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter der Umgebungstemperatur wurde Heptan mit einem Flammpunkt von  $-4\text{ °C}$  gewählt. Als brennbare Flüssigkeit mit einem Flammpunkt über der Umgebungstemperatur wurde der Flugzeugtreibstoff F-34 mit  $+38\text{ °C}$  eingesetzt. Die Schichtstärke des Brennstoffes wurde so gewählt, dass ein Abbrand innerhalb der Versuchszeit ausgeschlossen war, siehe Ermittlung der Abbrandraten für Heptan und Kerosin.

### 3.5.1 Ermittlung der Abbrandraten für Heptan und Kerosin

In einer Literaturrecherche konnte der Abbrand der brennbaren Flüssigkeiten Heptan und Kerosin, dargestellt durch einen Massenfluss, der den Massenverlust pro Fläche und Zeiteinheit bei einem Brand beschreibt, ermittelt werden (Tabelle 8). Durch Umrechnung ergibt sich die Abbrandrate in mm/min (Tabelle 8).

Tabelle 8: Konstanten für Heptan und Kerosin<sup>36</sup>

|         | <u>Dichte</u>         | <u>Massenfluss</u>         | <u>Abbrandrate</u> |
|---------|-----------------------|----------------------------|--------------------|
| Heptan  | 675 kg/m <sup>3</sup> | 0,101 kg/m <sup>2</sup> /s | 8,97 mm/min        |
| Kerosin | 820 kg/m <sup>3</sup> | 0,039 kg/m <sup>2</sup> /s | 2,85 mm/min        |

Formel 2: Berechnung der Abbrandrate

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow \text{Abbrandrate} = \frac{\text{Massenfluss}}{\text{Dichte}}$$

Formel 3: Berechnung der Abbrandrate für Heptan

$$\text{Abbrandrate}_{\text{Heptan}} = \frac{0,101 \text{ kg m}^3}{675 \text{ m}^2 \text{ s kg}} = 8,97 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Formel 4: Berechnung der Abbrandrate für Kerosin

$$\text{Abbrandrate}_{\text{Kerosin}} = \frac{0,039 \text{ kg m}^3}{820 \text{ m}^2 \text{ s kg}} = 2,85 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

### 3.5.2 Versuchsaufbau

Schematische Draufsicht des Versuchsaufbaues

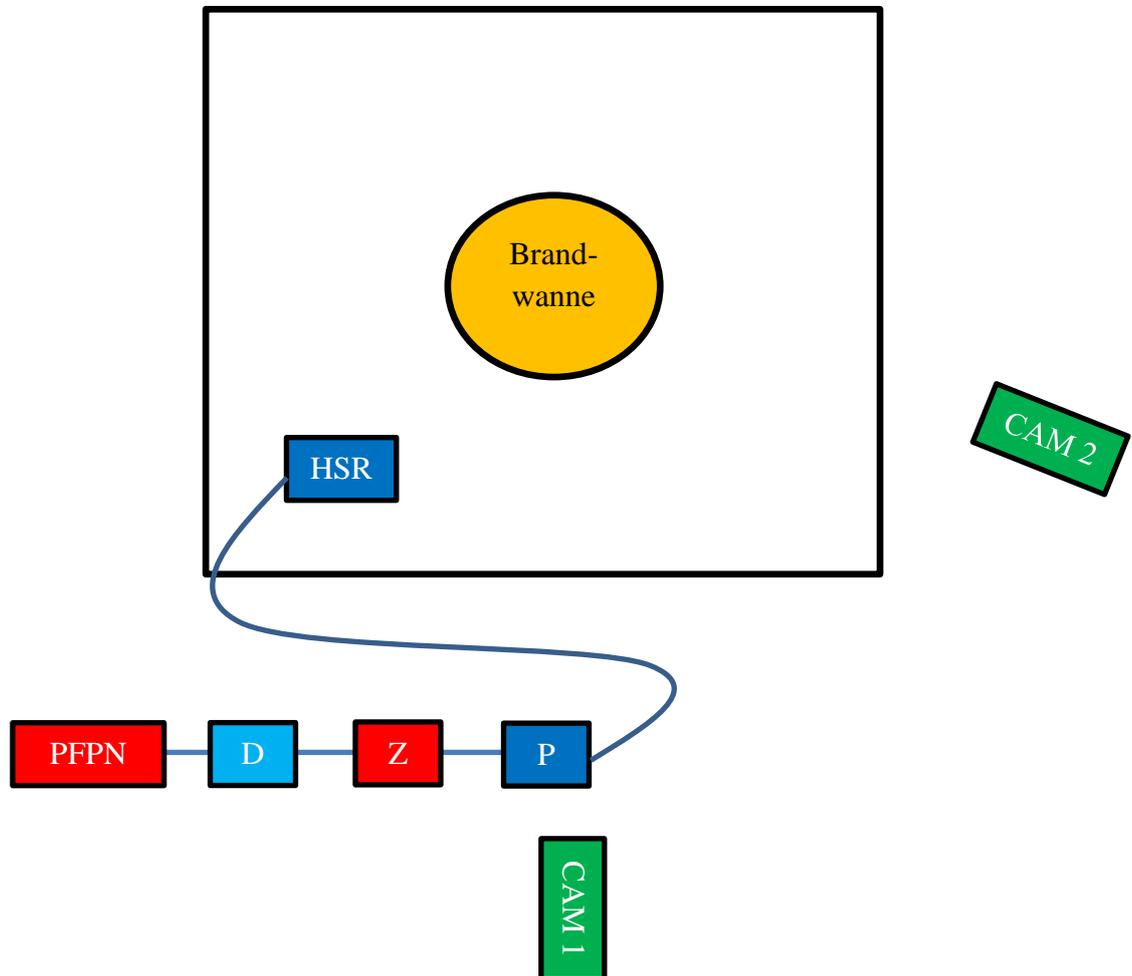


Abbildung 24: Versuchsaufbau Brandversuche

Legende

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| PFPN | Feuerlöschkreiselpumpe              |
| D    | Durchflussmengenmesser              |
| Z    | Z2-Zumischer (200 l/min Durchfluss) |
| P    | Drucksensor anlog / digital         |
| HSR  | Hohlstrahlrohr                      |
| Cam  | Kamera                              |



Abbildung 25: 200 m<sup>2</sup> Brandwanne

Aus Sicherheitsgründen wurde die 4,5 m<sup>2</sup> Brandwanne mit der Bezeichnung 144B entsprechend der DIN-EN 3 in einer 200 m<sup>2</sup> Brandwanne aus Beton platziert.

Die Wasserversorgung für die Löschversuche erfolgte aus einem Unterflurhydranten zur Feuerlöschkreiselpumpe PFFN 10/10. Durch einen 5 m B-Schlauch erfolgte die Weiterleitung zum Verteiler. Nach einer weiteren 5 m B-Leitung folgte der Durchflussmengenmesser und nach einer weiteren 1 m C-Leitung der Z2-Zumischer mit angekoppeltem mechanischem und digitalen Drucksensor am Abgang. Hinter dem Drucksensor folgte eine 15 m C-Leitung. Durch diesen Aufbau war gewährleistet, dass hinter dem Zumischer ein Nenndruck von 6 bar für das folgende Hohlstrahlrohr gehalten und gemessen werden konnte.



Abbildung 26: Messstrecke Brandversuche

In einem Vorversuch wurde die Eignung und Genauigkeit des Versuchsaufbaus und der Messgeräte überprüft. Hierzu wurde an Stelle des HSR am Ende der C-Leitung eine 12 mm Düse der nicht mehr aktuellen Norm DIN 14200 angekuppelt. Laut Tabelle<sup>37</sup> liefert diese Düse bei einem Druck von 6 bar 235 l/min. Die Feuerlöschkreiselpumpe saugte das Löschwasser aus einem Behältnis und der Z2-Zumischer bei 3% aus einem mit Wasser gefüllten Eimer. Durch diesen Versuchsaufbau wurde für 60 s Wasser gefördert und nach Beendigung des Versuches die angezeigte Durchflussmenge am Durchflussmengenmesser mit dem errechneten Volumen aus dem Behältnis verglichen. Während des Versuches wurde der Druck durch ein mechanisches Manometer hinter dem Z2-Zumischer überwacht. Die Abweichung zwischen Wasserfördertabelle und Messtechnik betrug ca. 10 l. Die digitale Aufzeichnung des Drucks stimmte mit der analogen Anzeige überein. Dieses Ergebnis wurde als ausreichend für die vorgesehenen Löschversuche angesehen.

In einem weiteren Vorversuch wurden die l/min-Angaben des Hohlstrahlrohrs vom Hersteller mit dem vorhandenen Versuchsaufbau überprüft. Bei einer eingestellten l/min-Leistung von 235 l/min am HSR zeichneten die Messgeräte im Versuchsaufbau bei einem Druck von 6 bar zwischen 220 und 230 l/min auf. Bei einer eingestellten 400 l/min Leistung wurde bei einem Druck von 6 bar hinter dem Z-Zumischer ein Wert von ca. 400 l/min erreicht.

Für die Löschversuche wurde eine metallische, runde 4,5 m<sup>2</sup>-Brandwanne mit einer Höhe von 0,3 m verwendet, welche aus Sicherheitsgründen mittig in einer 200 m<sup>2</sup> großen betonierten Brandwanne im Freien stand. Durch die vorgesehene dynamische Applikation der Löschmittel bestand die Gefahr, dass durch den Löschmittelstrahl brennende Flüssigkeit aus der Brandwanne getragen wird und diese durch das Bodenablaufventil in die Kanalisation einläuft. Als Gegenmaßnahme erhielt die 200 m<sup>2</sup>-Brandwanne eine Wasservorlage, welche das Bodenablaufventil in der Mitte der Wanne überdeckte, damit beim Überschwappen der brennenden Flüssigkeit aus der kleinen Brandwanne, diese nicht in das Abwassersystem einlaufen könnte.

### 3.5.3 Versuchsbeschreibung

Für die Löschversuche wurde die oben genannte Brandwanne (144B) verwendet. Diese erhielt pro Versuch eine 4 cm starke Wasservorlage. Die Höhe entspricht einem Volumen von 180 l Wasser. Im Anschluss wurden 135 l, welches einer Schichtstärke von 3 cm entspricht, brennbare Flüssigkeit in die Brandwanne eingefüllt. Im Vorwege wurde der Versuchsaufbau für ca. 60 s in Betrieb genommen, damit der Z-Zumischer abhängig vom gewählten Löschmittel 3% Wasser, Löschmittelzusatz oder Schaummittel ansaugte und die C-Leitung mit diesem gefüllt war. Hierdurch wurde sichergestellt, dass mit dem Öffnen des Strahlrohres im Löschversuch sofort das entsprechende Löschmittel in der passenden Konzentration ausströmte. Für die Brandbekämpfung während des Versuches wurde ein Fließdruck von 6 bar hinter dem Zumischer gehalten. Dieser Wert wurde durch einen mechanischen Drucksensor optisch angezeigt und durch einen digitalen Drucksensor überwacht und aufgezeichnet. Nach dem Betanken der Brandwanne und dem Füllen des Versuchsaufbaues wurde die Brandwanne mit ca. 1 l Heptan entzündet. Nachdem die Wanne den Vollbrand erreicht hatte, wurde mittels Handtaster der erste Peak in der Messtechnik gesetzt, welche neben dem Peak, den Druck und die Durchflussmenge aufzeichnete.

Die dynamische Brandbekämpfung mit dem Hohlstrahlrohr erfolgte 60 s nach dem Erreichen des Vollbrandes. Konnte innerhalb von 120 s kein Löscherfolg erzielt werden, wurde der Versuch beendet. In der Versuchsreihe mit Benzin wurde die maximale Versuchszeit auf 140 s angehoben, da aus Vorversuchen ersichtlich wurde, dass ein Löscherfolg mit Wasser nach ca. 125 s möglich war.

### 3.5.4 Auswertung und Bewertung der Löschversuche auf Heptan

In der Tabelle 9 sind die dokumentierten Messwerte und Löschzeiten der einzelnen Löschversuche auf Heptan aufgeführt.

Tabelle 9: Ergebnisse der Löschversuche auf Heptan

| <b>Versuch</b>                    | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>6</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>7</b> | <b>8</b> |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Löschmittel                       | Wasser   | Wasser   | Wasser   | Wasser   | Schaum   | Schaum   | LMZ      | LMZ      |
| Wasservorlage in l                | 180      | 180      | 180      | 180      | 180      | 180      | 180      | 180      |
| Schichtstärke Wasservorlage in cm | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        |
| Brennstoffmenge in l              | 135      | 135      | 135      | 135      | 135      | 135      | 135      | 135      |
| Schichtstärke Brennstoff in cm    | 3        | 3        | 3        | 3        | 3        | 3        | 3        | 3        |
| Umgebungstemperatur in °C         | 19       | 19       | 24       | 19       | 24       | 24       | 19       | 24       |
| Vorbrandzeit in Sekunden          | 35       | 60       | 60       | 56       | 60       | 60       | 60       | 60       |
| Literleistung HSR in l            | 235      | 400      | 360      | 235      | 235      | 235      | 235      | 235      |
| Druck in bar nach dem Zumischer   | ca. 6,0  |
| Löschzeit in s                    | -        | -        | -        | -        | 66       | 78       | -        | -        |

Das Diagramm 6 stellt die Löschzeiten der einzelnen Versuche grafisch dar. Die Versuche mit Löschzeiten von 120 s wurden dort abgebrochen.

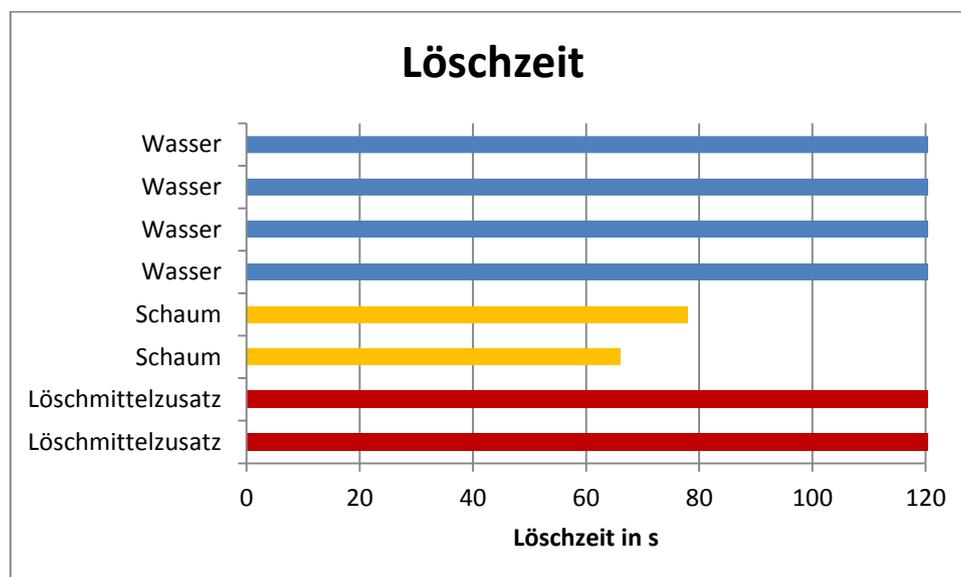


Diagramm 6: Löschzeiten auf Heptan

In allen Löschversuchen erfolgte eine dynamische Applikation des Löschmittels durch ein C-Hohlstrahlrohr mit einer eingestellten Durchflussmenge von 235 l/min. Eine Ausnahme bilden die Löschversuche 2 und 3. Die dynamische Applikation basiert auf den Angaben eines Löschmittelzusatzherstellers, dass der Löschmittelzusatz für eine erfolgreiche Brandbekämpfung möglichst dynamisch appliziert werden soll. Die 3%ige Zumischung erfolgte bei allen Versuchen durch einen Z2-Zumischer sowie in den Versuchen 2 und 3 durch einen Z4-Zumischer. Auch in den Versuchen mit reinem Löschwasser erfolgte die

3%ige Zumischung von Wasser aus einem Behältnis, damit für alle Versuche dieselben Druck und Strömungsverhältnisse gegeben waren.

Die Löschversuche 1, 2, 3 und 6 erfolgten mit reinem Löschwasser. Die Löschversuche 1 und 6 wurden mit der eingestellten Literleistung von 235 l/min nach 120 s ohne Löscherfolg beendet. Die Wirkweise einer erhöhten Literleistung von 400 l/min wurde im Versuch 2 erprobt. Die Steigerung der Literleistung führte auch zu keinem endgültigen Löscherfolg (Versuchsabbruch nach 120 s), sondern nur zu evtl. größeren Teillöscherfolgen. Im Löschversuch 3 wurde das B-Hohlstrahlrohr mit einem feststehenden Zahnkranz im Gegensatz zum rotierenden Zahnkranz des C-Hohlstrahlrohrs verwendet. Hierdurch sollte der Einfluss dieser mechanischen Komponente betrachtet werden. Die Literleistung von 360 l/min führte auch zu keinem Löscherfolg nach 110 s. Es zeigte sich, dass durch einen breit gefächerten Sprühstrahl mit reinem Löschwasser der Brand großflächig unterdrückt werden konnte und ein Teillöscherfolg erzielt war. Doch die Größe (Fläche) des Sprühstrahls, gegeben durch die Geometrie des verwendeten Strahlrohres, wird als zu gering eingeschätzt um den Brand vollständig durch die Kühlwirkung des Wassers zu löschen.

Die Brandbekämpfung in den Löschversuchen 4 und 5 erfolgte mit dem nicht filmbildenden und fluorfreien Referenzschaumlöschmittel. Die dynamische Applikation widersprach der allgemeinen Taktik zur Applikation von Löschschaum, erfolgte jedoch auf diesem Wege zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Versuche. Die 3%ige Zumischung erfolgte durch den Z2-Zumischer, welcher direkt aus dem Schaummittelkanister ansaugte. Das Schaumlöschmittel konnte mit der dynamischen Applikation den Versuch 4 in 66 s und den Versuch 5 in 78 s löschen. Die in diesen Versuchen aufgezeichnete Durchflussmengenmessung zeigte starke Schwankungen auf. Das Schaumlöschmittel beeinflusste die Leitfähigkeit des Wassers, was wiederum die korrekte Arbeitsweise des magnetisch-induktiven Durchflussmengenmessers beeinflusste. Gleichzeitig aufgezeichnete Druckkurven ließen aber auf eine kontinuierliche Durchflussmenge schließen. Die Problematik wurde für alle weiteren Versuche behoben, indem der Durchflussmengenmesser vor dem Zumischer in den Versuchsaufbau integriert wurde. Die Versuche mit Schaumlöschmittel zeigten, dass trotz dynamischer Applikation und Hohlstrahlrohrdüse eine Verschäumung eintrat, welche eine weitestgehend geschlossene Schaumdecke ausbildete. Durch die geringe Distanz zwischen Brandoberfläche und Hohlstrahlrohrdüse sowie die Bewegung der Düse wurde die Schaumschicht stetig aufgerissen, jedoch führt das Verfahren zu einem Löscherfolg.

In den Versuchen 7 und 8 erfolgte die Brandbekämpfung mit dem Löschmittelzusatz, welcher mit 3% in den Löschmittelstrom zugemischt wurde. Die Brandbekämpfung erfolgte dynamisch mit dem Hohlstrahlrohr bei einer eingestellten Literleistung von 235 l/min. Die Löschversuche 7 und 8 wurden nach 120 s ohne Löscherfolg beendet. Durch die dynamische Brandbekämpfung war die Ausbildung einer Schaumschicht zu beobachten, durch welche Teile der Brandoberfläche offensichtlich gelöscht wurden. Mit dem Löschmittelzusatz gelang es ähnlich den reinen Löschwasserversuchen den Brand zu unterdrücken und großflächig, jedoch nicht abschließend zu löschen.

Durch die hohe Viskosität des Schaumlöschmittels und des Löschmittelzusatzes lässt sich abschließend nicht ausschließen, dass die Zumischung gewissen Schwankungen unterlag. Aber der Durchfluss und die Ansaugbarkeit wurden wie oben erwähnt in den Vorversuchen überprüft.

Die Löschversuche zeigen, dass ein Löschen des Brandes von 135 l Heptan in einer 4,5 m<sup>2</sup> Brandwanne nach einer Minute Vorbrandzeit mit reinem Löschwasser oder einem Löschmittelzusatz und dem verwendeten HSR sehr schwierig bis gar nicht möglich ist.

Die wahrscheinlich stärkste Einflussgröße in diesen Brandversuchen war die Dampfkonzentration des Heptans. Die Flammpunkttemperatur von -4 °C war durch die Umgebungstemperaturen von 19 °C bis 24 °C deutlich überschritten, hierdurch stand jederzeit über der flüssigen Phase ausreichend Dampf zur Verfügung die Verbrennung zu unterhalten.

Eine erfolgreiche Brandbekämpfung erfordert daher das gleichzeitige Ablöschen der gesamten Oberfläche des Heptans und das Kühlen der stählernen Außenwand der Brandwanne, an welcher sonst die Rückzündung der Dämpfe erfolgt. Alternativ wäre die Minimierung der Dampfkonzentration in Kombination mit einer gewissen Kühlung eine erfolgreiche Variante für die Brandbekämpfung.

Das Löschmittel Wasser und der Löschmittelzusatz können aufgrund fehlender Inertisierung der brennbaren Flüssigkeit oder einer anderweitigen Minimierung der Dampfkonzentration nur über den Löscheffekt der Abkühlung einen Löscherfolg erzielen. Doch die Versuche zeigen, dass Wasser und Wasser mit reduzierter Oberflächenspannung durch den Löschmittelzusatz in zwei Minuten nicht ausreichend Energie aus dem Verbrennungsraum abführen konnten, sodass die Verbrennung zum Erliegen gekommen wäre.

Das Schaumlöschmittel erreichte trotz nicht optimaler Bedingungen für die Aufbringung- und Schaumerzeugung einen Löscherfolg. Die ausgebildete Schaumdecke minimierte ein Ausgasen des Heptans und kühlte die stählerne Wand ausreichend, sodass die Verbrennung zum Erliegen kam.

### 3.5.5 Auswertung und Bewertung der Lösversuche auf F-34

In der Tabelle 10 sind die dokumentierten Vorbrandzeiten und Löszeiten der einzelnen Lösversuche für F-34 aufgeführt.

Tabelle 10: Ergebnisse der Lösversuche auf F-34

| <b>Versuch</b>                    | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Löschmittel                       | Wasser   | Wasser   | Schaum   | Schaum   | LMZ      | LMZ      |
| Wasservorlage in l                | 180      | 180      | 180      | 180      | 180      | 180      |
| Schichtstärke Wasservorlage in cm | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        |
| Brennstoffmenge in l              | 135      | 135      | 135      | 135      | 135      | 135      |
| Schichtstärke Brennstoff in cm    | 3        | 3        | 3        | 3        | 3        | 3        |
| Umgebungstemperatur in °C         | 16       | 21       | 21       | 11       | 15       | 15       |
| Vorbrandzeit in Sekunden          | 60       | 60       | 60       | 65       | 60       | 60       |
| Literleistung HSR in l            | 235      | 235      | 235      | 235      | 235      | 235      |
| Druck in bar nach dem Zumischer   | ca. 6,0  |
| Löszeit in s                      | 122      | 129      | 15       | 16       | 16       | 18       |

Das Diagramm 7 stellt die Löszeiten der einzelnen Versuche grafisch dar.

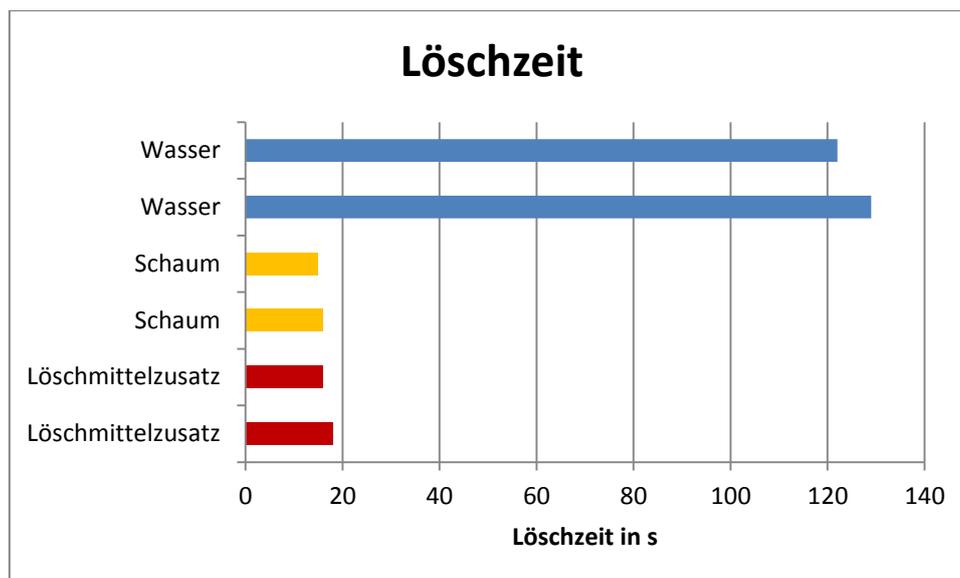


Diagramm 7: Löszeiten auf F-34

In dieser Versuchsreihe erfolgte in allen Versuchen eine dynamische Applikation mit dem C-Hohlstrahlrohr bei einer eingestellten Literleistung von 235 l/min. Die Zumischung erfolgte durch einen Z2-Zumischer bei einer Zumischrate von 3%. Während der Lösversuche mit Wasser wurde anstelle eines Schaumlöschmittels reines Wasser aus einem Behältnis zugemischt, damit für alle Versuche dieselben Druck und Strömungsverhältnisse gegeben waren. Durch die hohe Viskosität konnte nicht ausgeschlossen werden, dass es zu Schwankungen in der Zumischung kam. Die einwandfreie Funktion des Zumischers war zuvor mit reinem Wasser überprüft worden.

Die ersten beiden Lösversuche erfolgten mit reinem Löschwasser. Die Löszeit im Versuch 1 lag bei 122 s und im Versuch 2 bei 129 s. Die ursprünglich vorgesehene Löszeit von 120 sec. wurde auf Grundlage des ersten Versuchs erhöht, da bei 120 sec. deutlich zu erkennen war, dass ein vollständiger Löscherfolg innerhalb weniger Sekunden folgen würde. Hierdurch wurde die maximale Löszeit auf 140 sec. angehoben. Es zeigte sich, dass durch die dynamische Applikation mit reinem Wasser zügig große Teile der Brandoberfläche abgelöscht werden konnten. Aufgrund des höheren Flammpunktes des F-34 gegenüber dem Heptan blieben sofortige und schlagartige Rückzündungen aus. Dieser Prozess erleichterte das vollständige Ablöschen. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass für die Brandbekämpfung im Bereich des Ringspalts eine gewisse Zeit erforderlich war.

Das Schaumlöschmittel löschte die Versuchsbrände 3 und 4 in 15 s und 16 s erfolgreich ab. Dabei kam die Verbrennung zum Erliegen, bevor eine geschlossene Schaumdecke ausgebildet war. Die Ursache hierfür wird in der dynamischen Applikation vermutet. Die entstandene Schaumdecke kühlte die abgedeckten Bereiche und minimierte die Dampfkonzentration. Durch diesen Prozess verkleinerte sich die Brandoberfläche und die nicht abgedeckten verbliebenen Bereiche konnten durch die Kühlwirkung des Sprühstrahls bekämpft werden.

In den Versuchen 5 und 6 löschte der Löschmittelzusatz den Brand in 16 s und in 18 s. Dabei war die Ausbildung einer ebenfalls sehr dünnen, aber unvollständigen Schaumdecke auf der Flüssigkeitsoberfläche zu beobachten. Aufgrund der in den Laborversuchen widerlegten Inertisierung muss der Löschmittelzusatz aufgrund der deutlichen zeitlichen Differenz zu reinem Löschwasser (über 100 s) eine höhere Abkühlwirkung generieren oder einen bisher unberücksichtigter Prozess oder Löscheffekt führte zu diesem schnellen Löscherfolg. Die geringfügig ausgegebildete Schaumdecke könnte auch einen Einfluss auf den Löscherfolg gehabt haben.

Die Lösversuche zeigen, dass ein Flüssigkeitsbrand mit 135 l F-34 in einer 4,5 m<sup>2</sup>-Brandwanne nach 60 s Vorbrandzeit mit allen drei Löschmitteln in unterschiedlicher Zeit zu löschen ist. Der verwendete Flugtreibstoff F-34 mit einem Flammpunkt von + 38 °C, erleichtert im Vergleich zum Heptan die Brandbekämpfung enorm, da bei Umgebungstemperatur nicht ausreichend brennbare Dämpfe für eine zündfähige Atmosphäre zur Verfügung stehen. Hierdurch lässt sich der Brand auch mit reinem Wasser oder Löschmittelzusatz effektiver löschen, welche nicht wie das Schaumlöschmittel durch eine Schaumdecke ein Ausgasen des Brennstoffes vermindern. Dennoch kühlt auch das Schaumlöschmittel, wie die anderen beiden Löschmittel, durch die Verdampfung der enthaltenen Wasserbestandteile die Brandoberfläche.

Die Löswirkung des Löschmittelzusatzes in dieser Versuchsreihe ist mit einer Differenz von 100 s in der Löszeit zum Wasser deutlich positiver als in der vorherigen Versuchsreihe. Diese Differenz zeigt deutlich, dass die Kühlwirkung des Löschmittelzusatzes höher sein muss oder ein anderer Löscheffekt zum Tragen kommt. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch die herabgesetzte Oberflächenspannung die Gesamtoberfläche des Löschmittelzusatzes verglichen zum Löschwasser deutlich größer wird und hierdurch eine größere Kühlwirkung

auftritt. Doch mit dieser Versuchsreihe kann nicht abschließend geklärt werden, welcher Löscheffekt entscheidend zum Löscherfolg beigetragen hat.

Das Schaumlöschmittel minimierte durch die erzeugte Schaumschicht oberhalb der Brennstoffmasse ein Ausgasen. Des Weiteren wurde durch das im Löschschaum enthaltene Wasser eine Kühlwirkung auf die Brandoberfläche sowie die stählerne Außenwand erzeugt, was zum Löscherfolg führte.

### 3.6 Versuche zur Abkühlwirkung des Löschmittelzusatzes 1

Nachdem der Löschmittelzusatz 1 in den praktischen Brandversuchen den Brand des Flugzeugtreibstoffes F-34 im selben Zeitfenster wie das Schaumlöschmittel löschte, jedoch nicht den Heptanbrand, war es erforderlich, den bisher noch nicht betrachteten Löscheffekt der Abkühlwirkung genauer zu untersuchen.

Die Erklärung der Kühlwirkung ist auf unterschiedlichen Wegen möglich oder beruht auf der Kombination unterschiedlicher Wege. Der Löschmittelzusatz könnte chemische Substanzen enthalten, die ein früheres Verdampfen ermöglichen. Diese Eigenschaft wurde durch Verdampfungsversuche im Klimaschrank untersucht. Hierzu wurden flüssige Proben des Löschmittelzusatzes und als Referenz Wasser und das eingesetzte Schaumlöschmittel in Petri-Schalen gefüllt und anschließend für 2 h im Klimaschrank platziert. Vor und nach dem Versuch wurde die Masse ermittelt, die Differenz ermöglichte eine Aussage, ob der Löschmittelzusatz schneller oder mehr verdampfte als die Referenzproben.

Alternativ könnte die Kühlwirkung über die Tröpfchengröße generiert werden. Durch die im Löschmittelzusatz enthaltenen Tenside wird die Oberflächenspannung herabgesetzt, die Folge sind bei der Brandbekämpfung kleinere Wassertröpfchen die das Strahlrohr verlassen. Viele kleinere Wassertröpfchen erzeugen eine größere Gesamtoberfläche als wenige große Tropfen. Dadurch verdampfen die kleinen Tropfen mit der großen Oberfläche um ein vielfaches schneller als die großen Tropfen und entziehen dem Brand damit Energie.

Eine weitere Erklärung basiert auf einer längeren Standzeit auf der Oberfläche. Durch eine erhöhte Standzeit auf einer erwärmten Oberfläche kann mehr Energie von der Oberfläche in das Löschmittel übertragen. Der Effekt der Abkühlung würde ansteigen.

### 3.6.1 Versuchsbeschreibung Verdampfungsversuche im Klimaschrank

Von dem Löschmittelzusatz und dem Schaumlöschmittel wurden mit destilliertem Wasser jeweils 250 ml 3% Lösungen hergestellt. Aufgrund der schlechten Löslichkeit des Schaumlöschmittels wurden beide Proben jeweils 10 Minuten bei Umdrehungen zwischen 700 bis 1000 mit einem Rührfisch gelöst. Für die statistische Sicherheit wurden pro Löschmittel Wasser, Löschmittelzusatz und Schaumlöschmittel jeweils 3 Petrischalen (Innendurchmesser 90 mm, Höhe 20 mm) vorbereitet. Die Masse der jeweiligen leeren Petrischale wurde aufgenommen. Danach wurden in diese jeweils 50 ml der entsprechenden Probe pipettiert. Im Anschluss wurde die Masse der Petrischalen mit Flüssigkeit gemessen. Alle Proben wurden gemeinsam für 2 h bei 85 °C im Klimaschrank platziert (Abbildung 27). Die Verteilung im Klimaschrank erfolgte pro Versuchsreihe unterschiedlich. Nach 2 h wurden die Proben entnommen und abgedeckt, damit keine weitere Masse verdampfen konnte. Alle Proben wurden nacheinander erneut gewogen. Anschließend wurde die Differenz der Massen errechnet.

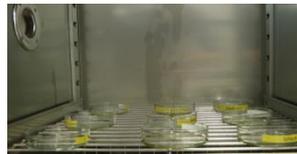


Abbildung 27: Proben im Klimaschrank

### 3.6.2 Ergebnisse der Verdampfungsversuche im Klimaschrank

Der Versuch wurde dreimal durchgeführt, sodass für jedes Löschmittel 9 Proben vorhanden waren. Das Diagramm 8 stellt im Mittelwert die verdampfte Masse der 3 Proben pro Versuchsreihe und Löschmittel dar.

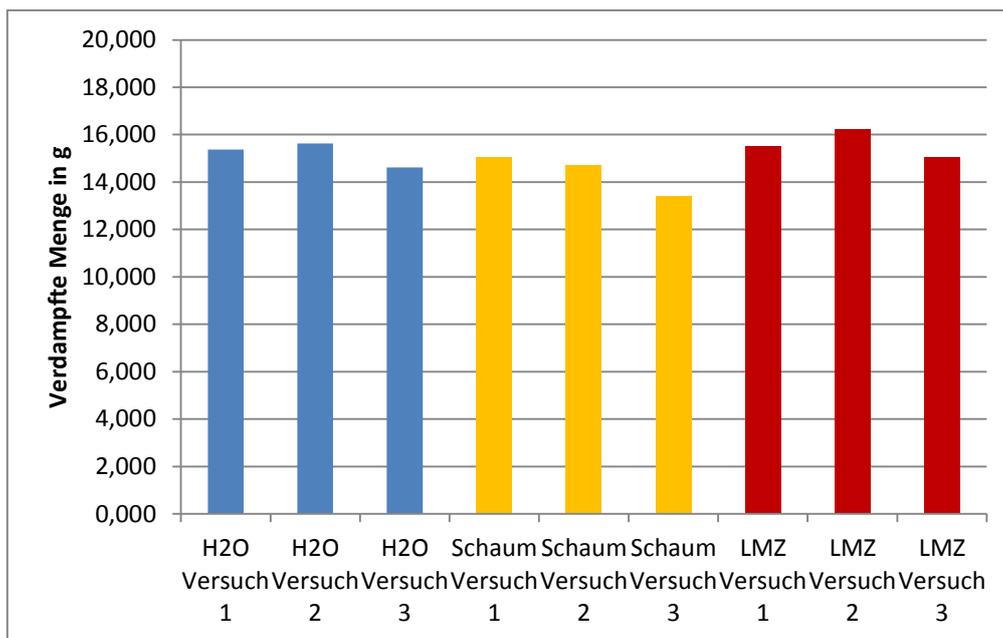


Diagramm 8: Mittelwerte der verdampften Proben

Das Diagramm 9 stellt den errechneten Mittelwert der verdampften Masse in g pro Löschmittelprobe aus den 9 Proben dar.

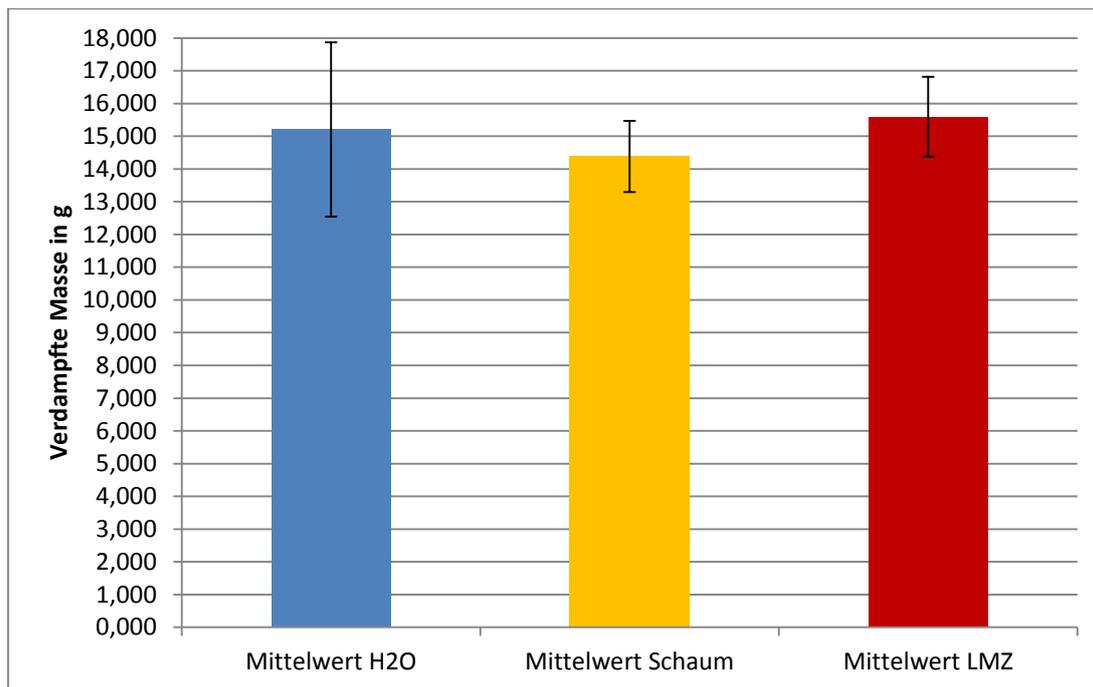


Diagramm 9: Mittelwert der verdampften Masse pro Löschmittel

### 3.6.3 Bewertung der Verdampfungsversuche im Klimaschrank

Die drei Versuchsreihen zeigten deutlich, dass im Durchschnitt ca. 15 g pro Probe verdampft sind. Vom Wasser verdampfte 2,52 % weniger als vom Löschmittelzusatz und das Schaummittel lag 7,78 % unter dem Löschmittelzusatz. Die doch relativ geringen Abweichungen lassen keine Aussage zu, dass ein Löschmittel wesentlich schneller verdampfen würde als andere.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die erfolgreiche Brandbekämpfung auf dem Brennstoff F-34 durch den Löscheffekt der Abkühlwirkung hervorgerufen sein könnte, diese jedoch nicht auf der Basis einer schnelleren Verdampfung geschehen ist.

### 3.6.4 Versuchsbeschreibung der Sprühversuche

Schematische und vereinfachte Darstellung der Versuchsanlage:

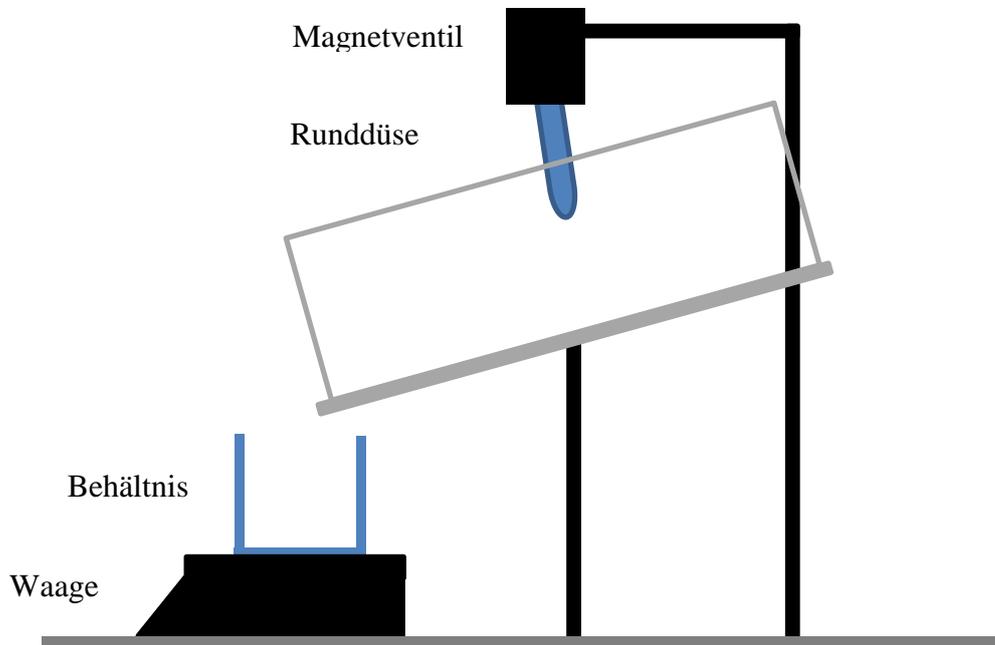


Abbildung 28: Versuchsanlage der Sprühversuche

Die Versuche wurden an der in Abbildung 28 dargestellten Versuchsanlage durchgeführt. Das Löschmittel (1 l) wurde in einen 5 l Druckbehälter bevvorratet. Dieser wurde durch 2 bar Pressluft kontinuierlich unter Druck gehalten. Aus diesem Druckbehälter wurde das Löschmittel über eine Schlauchleitung bis zum Magnetventil geführt, welches die Runddüse abspernte. Durch eine Computersoftware wurde das Magnetventil in definierten Abständen (120 s) für eine Sekunde geöffnet und applizierte pro Sprühstoß 25 ml auf die 30° geneigte metallische Oberfläche. Das ablaufende Löschmittel wurde in einem Behältnis aufgefangen, welches auf einer Waage positioniert war. Der Messwert der Waage wurde elektronisch im Computer 4-mal pro Sekunde dokumentiert. Durch dieses Verfahren kann z.B. auch der Haftfaktor für eine Flüssigkeit bestimmt werden. Nach den kalten Sprühversuchen wurde hinter der geneigten metallischen Oberfläche eine Heizplatte (140 °C) montiert. Wurde nun Löschmittel appliziert, setzte der Verdampfungsprozess ein. Durch die Differenz der ablaufenden Massen aus den kalten und warmen Sprühversuchen konnte auf die verdampfte Masse geschlossen werden.

Es wurden reines Wasser, das Referenzschaumlöschmittel und der Löschmittelzusatz 1 verwendet. Für die Messung erfolgten 10 Sprühstöße mit einem Abstand von 120 s zwischen den Sprühstößen.

### 3.6.5 Ergebnisse Sprühversuche

Pro Löschmittel erfolgten 10 Sprühstöße mit je 25 ml. Hieraus errechnet sich ein gesamtes Applikationsvolumen von 250 g. Das Diagramm 10 stellt die Massendifferenz aus den kalten und warmen Sprühversuchen dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Masse verdampft ist.

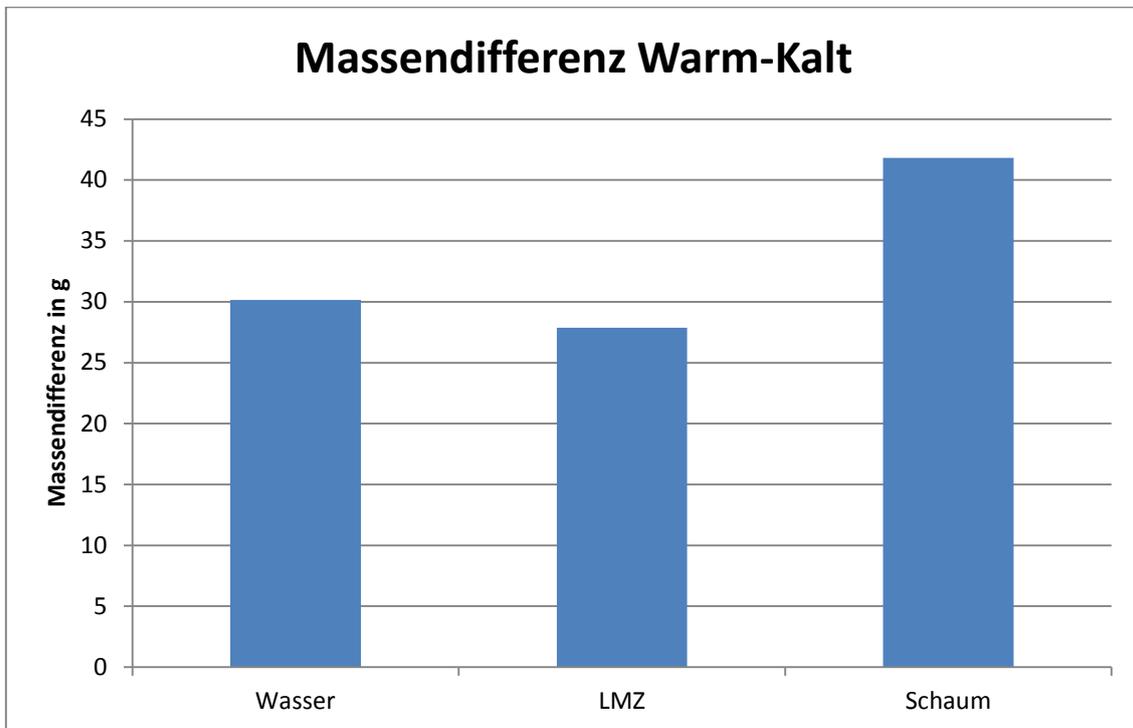


Diagramm 10: Massendifferenz der Sprühversuche

### 3.6.6 Bewertung Sprühversuche

Die Massendifferenzen aus den warmen und kalten Sprühversuchen zeigen deutlichere Unterschiede als die Versuche im Klimaschrank. Dieses lässt darauf schließen, dass der mögliche Abkühlprozess durch den Effekt einer längeren Standzeit auf der Oberfläche oder die Entstehung kleinerer Tropfen entsteht. Durch diesen Versuch kann kein aussagekräftiges Ergebnis erlangt werden, jedoch sind die folgenden Rückschlüsse möglich. Die Bestimmung des Haftfaktors zeigte, dass der Faktor des Löschmittelzusatzes höher war als beim Schaumlöschmittel oder dem reinen Wasser. Dieser Effekt führt zu einer längeren Standzeit auf der metallischen Oberfläche und ermöglicht einen längerfristigen Übergang von Energie aus der Oberfläche in das Löschmittel. Doch die Berechnung der Massendifferenz zeigt, dass vom Schaumlöschmittel am meisten Masse verdampft ist. Dieses beruht womöglich auf der Bildung eines Schaumes, welcher für mehrere Sekunden bis zur vollständigen Verdampfung auf der Oberfläche klebt (Abbildung 29).



Abbildung 29: Erhöhte Standzeit des Schaumes auf der metallischen Oberfläche

Dieser Effekt, vermutlich bedingt durch die Austrocknung des Schaumes, konnte in diesem Versuch nur mit dem Schaumlöschmittel erreicht werden. Dadurch, dass die Differenz der verdampften Masse zwischen Wasser und Löschmittelzusatz keine deutlichen Unterschiede aufzeigt, liegt weiterhin keine Indikation vor, dass der Löschmittelzusatz früher oder besser verdampft. Die Differenz zwischen dem Schaumlöschmittel sowie dem Wasser und Löschmittelzusatz ist mit der Bildung des Schaumes, welcher auf der Oberfläche haftet, zu begründen. Die Bildung kleinerer Tropfen, die schneller verdampfen, kann in diesem Versuch nicht bewertet werden. Aufgrund der sehr geringen Differenz zwischen dem reinem Wasser und dem Löschmittelzusatz ist der Effekt der kleineren Tropfen in diesem Versuch nicht vorhanden oder so gering, dass kein Einfluss auf die Messung erfolgte.

Ob die bessere Benetzbarkeit bzw. längere Standzeit eines Löschmittels auf einer festen Oberfläche ebenfalls auf einer flüssigen Oberfläche zur Wirkung kommt, sollte in weiteren Untersuchungen ermittelt werden. In diesem Zusammenhang wäre auch die Bildung kleinerer Tropfen durch die reduzierte Oberflächenspannung zu untersuchen.

## 4 Diskussion der Einsatzgrenzen für Löschmittelzusätze

### 4.1 Beispiel zur Logistik und Wirtschaftlichkeit eines Löschmittelzusatzes

An diesem Beispiel soll die Logistik und Wirtschaftlichkeit zwischen einem Löschmittelzusatz und einem Schaumlöschmittel dargestellt werden. Es wird eine Oberfläche der brennbaren Flüssigkeit von  $10 \text{ m}^2$  und eine Höhe von  $0,04 \text{ m}$  angenommen. Die Aufgabe, ein weiteres Ausgasen zu minimieren oder zu unterbinden.

An erster Stelle wird das Volumen der brennbaren Flüssigkeit errechnet.

Volumen der brennbaren Flüssigkeit:

$$V = \text{Oberfläche} * \text{Höhe}$$

$$V = 10 \text{ m}^2 * 0,04 \text{ m} = 400 \text{ l brennbare Flüssigkeit}$$

Somit ergeben sich auf einer Oberfläche von  $10 \text{ m}^2$   $400 \text{ l}$  brennbare Flüssigkeit.

Bei dem Einsatz des Löschmittelzusatzes gibt ein Hersteller für die Inertisierung, die in diesem Fall angestrebt wird, ein Anteil von 1:5 von brennbarer Flüssigkeit zum Löschmittel an. Das bedeutet auf einen Teil der brennbaren Flüssigkeit kommen 4 Teile des Löschmittels.

Löschmittelbedarf mit Löschmittelzusatz

$$V_{\text{Löschmittel}} = \text{Volumen brennbare Flüssigkeit} * 4$$

$$V_{\text{Löschmittel}} = 400 \text{ l} * 4 = 1600 \text{ l Löschmittel}$$

Das bedeutet für dieses Beispiel wären  $1600 \text{ l}$  Löschmittel bestehend aus Wasser und einer 3% Zumischung des Löschmittelzusatzes erforderlich.

Volumen Löschmittelzusatz im Wasser-Löschmittelzusatzgemisch bei 3% Zumischung

$$V_{\text{LMZ}} = \text{Löschmittel} * 0,03$$

$$V_{\text{LMZ}} = 1600 \text{ l} * 0,03 = 48 \text{ l}$$

Für das Beispiel mit einem Löschmittelzusatz sind  $48 \text{ l}$  Löschmittelzusatz und  $1552 \text{ l}$  Löschwasser erforderlich.

Für einen Einsatz mit Schaum wird Schwerschaum gewählt, da dieser die höchste Gasdichtigkeit aufweist<sup>38</sup>. Außerdem wird eine Verschäumungszahl von 8 angenommen. Die angenommene Schaumhöhe beträgt  $0,2 \text{ m}$  bei einer 3 % Zumischung.

## Volumen Löschschaum

$$V_{\text{Löschschaum}} = \text{Oberfläche} * \text{Höhe Löschschaum}$$

$$V_{\text{Löschschaum}} = 10 \text{ m}^2 * 0,2 \text{ m} = 2000 \text{ l Löschschaum}$$

Aus dem Volumen des Löschschaumes und der Verschäumungszahl kann das Volumen des Wasser-Schaummittelgemisches errechnet werden.

## Volumen Wasser-Schaummittelgemisch

$$V = \frac{V_{\text{Löschschaum}}}{\text{Verschäumungszahl}}$$

$$V = \frac{2000 \text{ l}}{8} = 250 \text{ l Wasser - Schaummittelgemisch}$$

Nachdem das flüssige Volumen des Wasser-Schaummittelgemisches bekannt ist, kann der Anteil des Schaummittelkonzentrates bestimmt werden.

## Volumen Schaummittelkonzentrat im Wasser-Schaummittelgemisch

$$V_{\text{Schaummittelkonzentrat}} = \text{Wasser Schaummittelgemisch} * 0,03$$

$$V_{\text{Schaummittelkonzentrat}} = 250 \text{ l} * 0,03 = 7,5 \text{ l}$$

Für den Einsatz mit Schaummittel sind 7,5 l Schaummittelkonzentrat und 242,5 l Wasser erforderlich.

Das Rechenbeispiel zeigt deutlich auf, dass beim Sichern einer ausgelaufenen Flüssigkeit zwischen einem Löschmittelzusatz und Schaumlöschmittel eine nennenswerte Differenz auftritt. Bei Betrachtung dieser Differenz von 48 l Löschmittelzusatz zu 7,5 l Schaummittelkonzentrat und 1552 l Wasser zu 242,5 l Wasser aus logistischer und wirtschaftlicher Sicht, liegt der Vorteil eindeutig bei dem Schaumlöschmittel. Wird die Schichtstärke der brennbaren Flüssigkeit auf 0,01 m gesenkt sind immer noch 12 l Löschmittelzusatz und 388 l Löschwasser erforderlich.

## 4.2 Löschvermögen des Löschmittelzusatzes im Vergleich zur DIN-EN 1568-3 und ICAO B

In diesem Abschnitt sollen die in den Löschversuchen erzielten Ergebnisse gegenüber den technischen Anforderungen der DIN-EN 1568-3 sowie der ICAO Level B verglichen werden. Die Basis hierfür bildet eine Brandwanne mit einer Oberfläche von 4,5 m<sup>2</sup>, welche in den Löschversuchen eingesetzt wurde und ebenso in den beiden oben genannten technischen Anforderungen zur Bestimmung des Löschvermögens gefordert wird, siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Löschvermögen nach technischen Anforderungen

|                    | DIN-EN 1568-3 <sup>39</sup>       | ICAO Level B <sup>40</sup>     | Löschversuche Heptan    | Löschversuche F-34      |
|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Brandwannengröße   | 4,5 m <sup>2</sup>                | 4,5 m <sup>2</sup>             | 4,5 m <sup>2</sup>      | 4,5 m <sup>2</sup>      |
| Brandwannenform    | Rund                              | Rund                           | Rund                    | Rund                    |
| Brennstoff         | Heptan                            | Kerosin                        | Heptan                  | F-34 (Kerosin)          |
| Brennstoffmenge    | 144 l                             | 100 l                          | 135 l                   | 135 l                   |
| Vorbrennzeit       | 180 s                             | 60 s                           | 60 s                    | 60 s                    |
| Schaumrohr         | UNI 86                            | UNI 86                         | HSR                     | HSR                     |
| Applikation        | direkt / statisch                 | direkt / statisch              | direkt / dynamisch      | direkt / dynamisch      |
| Applikationsrate   | 2,5 l/min/m <sup>2</sup>          | 2,5 l/min/m <sup>2</sup>       | 52 l/min/m <sup>2</sup> | 52 l/min/m <sup>2</sup> |
| Maximale Löschzeit | < 180 s für Löschleistungsstufe I | < 60 s (99%)<br>< 120 s (100%) | < 120 s                 | < 140 s                 |

Schaumlöschmittel mit einer Löschleistungsstufe I, die der DIN-EN 1568-3<sup>3</sup> entsprechen, müssen bei einer direkten Applikation von 2,5 l/min/m<sup>2</sup> die 4,5 m<sup>2</sup> Brandwanne mit Heptan in weniger als 180 s löschen. Der Brand wird also maximal mit 7,5 l/m<sup>2</sup> gelöscht. In den durchgeführten Löschversuchen wurden rechnerisch ca. 104 l/m<sup>2</sup> Löschmittel in den 120 s appliziert. Es ist anzumerken, dass größere Mengen Löschmittel neben der Brandwanne, aufgrund der dynamischen Applikation, auftrafen doch es ist davon auszugehen, dass die Applikationsrate trotzdem weit über 7,5 l/m<sup>2</sup> liegt. Das Schaumlöschmittel konnte laut Tabelle 9 den Heptanbrand, bei einer dynamischen Applikation, in 66 s und 78 s löschen. Das entspricht 57 bis 67 l/m<sup>2</sup>. Der Löschmittelzusatz wurde ebenfalls wie gefordert dynamisch appliziert, erreichte jedoch keinen Löscherfolg trotz einer rechnerischen Applikationsrate von 104 l/m<sup>2</sup> in 120 s.

Die Löschversuche auf dem Flugzeugtreibstoff F-34 lassen sich besser mit den technischen Anforderungen nach ICAO Level B<sup>4</sup> vergleichen, in welchen auch Kerosin als Brennstoff zum Einsatz kommt. Schaumlöschmittel, die der Anforderung entsprechen, müssen den Brand der 4,5 m<sup>2</sup> Brandwanne mit einer Applikationsrate von 2,5 l/min/m<sup>2</sup> innerhalb von 60 s zu 99% löschen und nach 120 s vollständig gelöscht haben. Auch in diesen Versuchen wurde das Hohlstrahlrohr dynamisch eingesetzt, was einer rechnerischen Applikationsrate von ca. 104

l/m<sup>2</sup> in 120 s entspricht. Das Schaumlöschmittel, welches laut Hersteller die Anforderungen nach ICAO Level B und der DIN-EN 1568-3 mit einer Löschleistungsstufe I erfüllt, löschte den Brand nach Tabelle 10 innerhalb von 15 - 16 s ab. Das entspricht ca. einer Applikation von 26 l/m<sup>2</sup> abzüglich der Verluste. Der Löschmittelzusatz, mit Löschzeiten zwischen 16 und 18 s erreichte damit ebenfalls eine rechnerische Applikationsrate von 26 bis 29 l/m<sup>2</sup>, die zum Löscherfolg führte.

Die Applikationsraten liegen damit jeweils deutlich über den geforderten Applikationsraten der technischen Anforderungen. Dabei gilt zu bedenken, dass den Löschversuchen eine dynamische Applikation mit einem Hohlstrahlrohr zu Grunde liegt. Diese steht einer qualitativ hochwertigen Schaumerzeugung entgegen, da die Verschäumungszahl am Hohlstrahlrohr deutlich geringer sein sollte als an einem Schaumrohr. Doch auch bei den Differenzen des Strahlrohres und der Art Applikation lassen sich Rückschlüsse auf das Löschvermögen des Löschmittelzusatzes schließen. Der Löschmittelzusatz wurde wie vom Hersteller gefordert, dynamisch appliziert und sollte daher in den Löschversuchen dem Löschschaum gegenüber im Vorteil liegen.

Durch die technischen Anforderungen nach DIN-EN 1568-3 und ICAO Level B wird aufgezeigt, welches Löschvermögen mit Schaumlöschmitteln möglich ist. Der Löschmittelzusatz ist definitiv kein Schaumlöschmittel, doch sollte dieser ähnliches Löschvermögen erreichen, da er laut Hersteller als Ersatz für konventionelle Schaumlöschmittel geeignet sein soll.

### 4.3 Einsatzbeispiele

In diesem Abschnitt soll an einigen möglichen Flüssigkeitsbrandszenarien und realen Schadensereignissen die Einsatzfähigkeit eines Löschmittelzusatzes ohne Schaumbildung, wie er in den vorherigen Laborversuchen und Brandversuchen verwendet wurde, diskutiert werden.

#### 4.3.1 Pool-Fire an einem Transformator

Dieses Beispiel basiert auf einem leckgeschlagenen Transformator, siehe Abbildung 30. Dessen Öl, welches zur Kühlung fungiert, austritt und sich an der heißen Oberfläche entzündet und in der vorhandenen Auffangwanne ein Pool-Fire (Lachenbrand) bildet. Es liegt ein vollflächiger Brand in der Auffangwanne (8 m \* 6 m) rundum und unter dem Transformator (6 m \* 4 m) vor. Dadurch beträgt die Brandoberfläche 48 m<sup>2</sup>, wovon sich 24 m<sup>2</sup> unter dem Transformator befinden. Die Außentemperatur beträgt 18 °C, windstill und bedeckter Himmel.

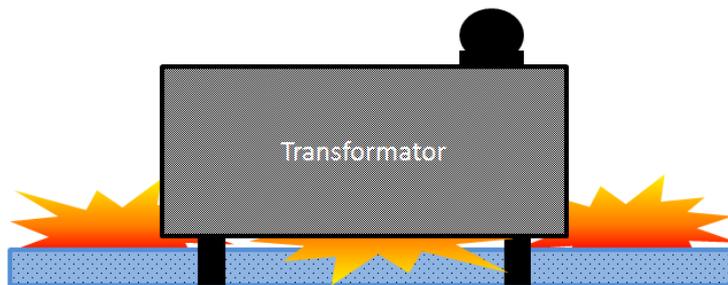


Abbildung 30: Transformatorbrand

Für eine erfolgreiche Brandbekämpfung ist es erforderlich zu verhindern, dass die Auffangwanne nicht mit zu viel Löschmittel beaufschlagt wird und brennendes Öl überläuft. Dieses Szenario würde eine Ausweitung der Einsatzstelle nach sich ziehen. In den Versuchen zum Verhalten der Lösungen mit Löschmittelzusätzen und brennbaren Flüssigkeiten konnte gezeigt werden, dass sich die brennbare Flüssigkeit aufgrund der geringeren Dichte oberhalb des Löschmittels schichtete.

Da es sich bei der brennenden Flüssigkeit um ein Öl handelt, welches zur Kühlung verwendet wird, sollte der Flammpunkt über der Umgebungstemperatur liegen.

Das Löschmittel Wasser erscheint an dieser Stelle nicht das erste Mittel der Wahl zu sein, da Teile des Brandes durch den Transformator verdeckt werden und dadurch nicht durch einen Löschmittelstrahl erreichbar sind. Zudem zeigte sich in den durchgeführten Löschversuchen auf F-34 (Flammpunkt über der Umgebungstemperatur), dass die Löszeit des Wassers ca. 100 s höher lag, als die für das Schaumlöschmittel und den Löschmittelzusatz.

Der Einsatz eines Löschmittelzusatzes erscheint auf Grundlage des schnellen Löscherfolgs in den Löschversuchen auf der brennbaren Flüssigkeit F-34 als möglich. Die Applikation wäre

analog zu reinem Löschwasser mit einem feinen Sprühstrahl erforderlich. Die dynamische Einarbeitung des Löschmittelzusatzes in die Oberfläche wäre aufgrund der fehlenden bzw. unzureichenden Inertisierung zu diskutieren.

Laut Hersteller soll der Löschmittelzusatz dynamisch in die Oberfläche der Flüssigkeit eingearbeitet werden, um eine erfolgreiche Inertisierung zu gewährleisten und damit ein Ausgasen der brennbaren Flüssigkeit zu unterbinden. Dieser Effekt konnte durch die drei Versuchsreihen zum Bereich der Inertisierung widerlegt werden. Hierdurch ist auch keine Rückbrandbeständigkeit gegeben.

Der Löschmittelzusatz könnte durch die Abkühlwirkung oder die antikatalytische Wirkung, also das Stören der Verbrennungsreaktion, einen Löscherfolg erzielen. Die im Löschmittelzusatz enthaltenen Tenside senken die Oberflächenspannung des Löschmittels, die Folge sind kleinere Tröpfchen, die gemeinsam eine größere Gesamtoberfläche bilden. Dieser Effekt sollte eine schnellere Abkühlwirkung der Brandoberfläche und heißer Bauteile gegenüber dem Wasser herbeiführen. Bei diesem Ansatz ist es erforderlich davon auszugehen, dass durch den Löschmittelzusatz gleichzeitig alle Bauteile, die frei liegende Brandoberfläche, sowie der Brand unter dem Transformator, erreicht werden und unter die Zündtemperatur gekühlt werden.

Die Brandbekämpfung mit dem Löschmittel Schaum sollte in jedem Fall zu einem abschließenden Löscherfolg führen. Der Vorteil bei einem Schaumeinsatz sollte die mögliche sanfte Applikation des Schaummittels über die Oberflächen des Transformators darstellen. Hierdurch wäre für die Einsatzkräfte ein größerer Abstand vom Objekt als bei einer Brandbekämpfung mit Wasser oder Löschmittelzusatz möglich, welcher zudem in die Flüssigkeit durch die dynamische Applikation eingearbeitet werden müsste. Ebenso würde der ablaufende Schaum die Oberflächen kühlen und eine Schaumschicht in der Auffangwanne aufbauen. Durch diese Maßnahme würde das Kühlen und Löschen in einem Zug erfolgen können. Dann ist es nur noch eine Frage der Zeit, bis ausreichend Schaum in der Auffangwanne entstanden ist und sich bis unter den Transformator ausbreitet und damit die Freisetzung weiterer brennbarer Dämpfe reduziert und den Brand endgültig löscht.

Dieses Beispiel zeigt, dass ein Löscherfolg mit allen Löschmitteln erzielt werden könnte, jedoch der Füllstand der Auffangwanne kritisch zu beachten ist. Zudem stellt der verschattete Bereich unter dem Transformator eine Herausforderung für alle Löschmittel dar, die sich nicht selbstständig ausbreiten. Für eine schnellere Brandbekämpfung ist auch die Kombination unterschiedlicher Löschmittel möglich.

### 4.3.2 Brand an einem leckgeschlagenem Tanklastzug

Dieses Einsatzbeispiel ist tagtäglich auf den Straßen denkbar. An einem Tanklastzug, beladen mit Superbenzin, läuft am Tankauflieger die Bremse warm und entzündet die Reifen. Durch die enorme Wärmestrahlung schlägt die hinterste Kammer des Tankaufliegers vor dem Eintreffen der Feuerwehr Leck. Das Superbenzin mit einem Flammpunkt von unter  $-21\text{ °C}$  entzündet sich durch den Brand der Reifen oder die Wärmestrahlung, siehe Abbildung 31. Mit der Zeit bildet sich eine brennende Lache hinter dem Auflieger auf der Straße aus. Die Außentemperatur beträgt  $18\text{ °C}$ , windstill und bedeckter Himmel.

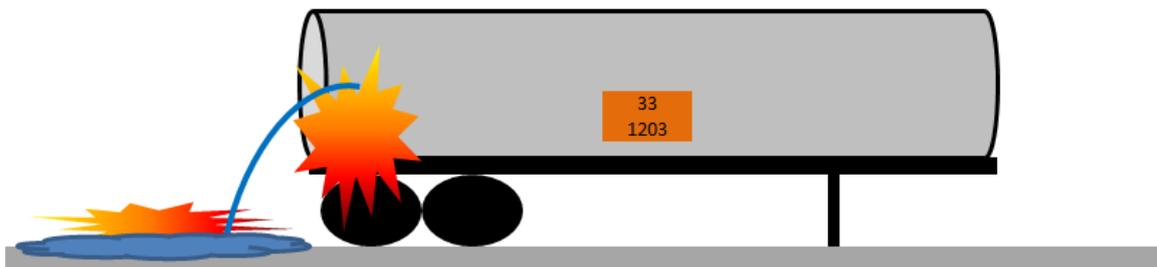


Abbildung 31: Leckgeschlagener Tanklastzug

Vor dem Einleiten von Brandbekämpfungsmaßnahmen, kann durch die Betrachtung der Charakteristik des Superbenzins, welches nach GHS als extrem entzündbar klassifiziert ist, die Einschätzung der vorhandenen und einsetzbaren Löschmittel erfolgen. Durch den Blick in eine Gefahrstoffdatenbank oder ein Sicherheitsdatenblatt ist zu erkennen, dass der Flammpunkt unter  $-21\text{ °C}$  liegt. Dieses bedeutet, dass bei den gegebenen Umgebungsbedingungen dauerhaft eine ausreichende Dampfkonzentration über der flüssigen Phase vorhanden ist, eine Verbrennung aufrecht zu erhalten. Dieses bestätigen die mit dem Gasanalysator durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Dampfkonzentration über der flüssigen Phase. Dabei wurde festgestellt, dass das Superbenzin bei  $20\text{ °C}$  Raumtemperatur so stark ausgast, dass das Messgerät nach einem ersten oder zweiten Messzyklus in der Sättigung war und dadurch ein Bestimmen der Konzentration unmöglich wurde. Dazu zeigte sich, dass trotz der Mischung mit einem Löschmittelzusatz, diese Mischung sofort bei Raumtemperatur eine zündfähige Atmosphäre zur Verfügung stellte.

Daher sollte der entsprechende Rückschluss für die Brandbekämpfung lauten: Für eine erfolgreiche Brandbekämpfung ist ein Löschmittel erforderlich, welches ein Ausgasen minimiert oder zeitgleich die vollständige Oberfläche unter die Zündtemperatur kühlen könnte. Diese Aussage kann durch die durchgeführten Brandversuche bestätigt werden. Bei den durchgeführten Lösversuchen in einer  $4,5\text{ m}^2$  mit Heptan (Flammpunkt  $-5\text{ °C}$ ) zeigte sich, dass Löschaum durch die Bildung einer Schaumschicht und der daraus resultierenden Minimierung der Dämpfe sowie dem gleichzeitigen Kühleffekt einen Löscherfolg erzielte. Dagegen konnte mit einem feinen Sprühstrahl aus Wasser oder Löschmittelzusatz zwar ein Teillöscherfolg erzielt werden, doch alle Oberflächen und verschatteten Bereiche die nicht

durch den Sprühstrahl erreicht wurden zeigten eine bestehende Verbrennung. Nur eine gleichzeitige Kühlwirkung über die vollständige Oberfläche, sowie Bauteile, würde zum Löscherfolg führen. Bei dem Einsatz von Löschpulver könnte bei entsprechender Applikationsrate ein Löscherfolg durch den Abbruch der Verbrennungsreaktion erfolgen, doch durch die dauerhafte Präsenz der Dämpfe aus der brennbaren Flüssigkeit, würden sich diese an Bauteilen mit einer Temperatur über der Zündtemperatur erneut entzünden. In Kombination mit Kühlmaßnahmen könnte auch diese Maßnahme einen gewünschten Löscherfolg erzeugen.

Vor der Brandbekämpfung sollte aus Sicht der Einsatzkräfte, als eine der ersten Maßnahmen die Kühlung der verblieben intakten Tankkammern durchgeführt werden. Denn die Betrachtung der Charakteristik zeigte, dass es sich um eine extrem entzündbare Flüssigkeit handelt, das bedeutet, je weniger Volumen dieser Komponente austritt oder zur Verbrennung beiträgt, desto geringer ist der Aufwand zum Erzielen eines Löscherfolgs. Die Kühlmaßnahmen können durch die Applikation von Löschwasser auf den Tankauflieger realisiert werden. Der Einsatz eines Löschmittelzusatzes könnte in Erwägung gezogen werden, wenn dieser eine höhere Kühlwirkung erzeugt, wie die Hersteller mancher Löschmittelzusätze versprechen. In den Versuchen zur Abkühlwirkung konnte jedoch beispielhaft für den Löschmittelzusatz 1 gezeigt werden, dass im Klimaschrank keine erhöhte Verdampfungsrate für Lösungen aus Wasser und Schaumlöschmittel oder Löschmittelzusatz festgestellt wurde.

Nach Einleitung der Kühlmaßnahmen ist die Bekämpfung des Brandes durchzuführen. Je nach Größe und Lage der Leckage läuft weiterhin Superbenzin aus der Tankkammer nach, oder aber es brennt auch innerhalb der Tankkammer. Die praktischen Brandversuche mit Heptan, sowie die Laborversuche mit dem Gasanalysator sprechen nun gegen den Einsatz eines Löschmittelzusatzes zur Bekämpfung des Brandes. Denn durch die sehr kurzfristige Inertisierung, welche nur durch eine dynamische Einarbeitung entsteht, bei der das Produkt vermutlich noch weiter verteilt wird oder Einsatzkräfte sehr dicht an den Brand müssen, stehen aufgrund des niedrigen Flammpunktes grundsätzlich brennbare Dämpfe über der Flüssigkeit zur Verfügung. Die Folge ist, dass ein Löscherfolg nur erzielt werden kann, wenn die vollständige Oberfläche inkl. möglicher Bauteile und verschatteter Bereiche gleichzeitig unter die Zündtemperatur gekühlt wird oder ein bisher nicht betrachteter Löscheffekt des Löschmittelzusatzes wirken würde.

Die praktischen Brandversuche mit Heptan (Schichtstärke 0,03 m) mit einem Flammpunkt von  $-4\text{ °C}$  in einer  $4,5\text{ m}^2$  Brandwanne, aus welcher das Heptan nicht abfließen konnte, zeigen dass bei einer Applikation von  $235\text{ l/min}$  der Brand nicht innerhalb von  $120\text{ s}$  zu löschen war. Dagegen löschte das Schaummittel trotz dynamischer Applikation den Brand in ca.  $70\text{ s}$  ab. Daraus lässt sich schließen, dass beim Einsatz des Löschmittelzusatzes mindestens ein zweites Rohr hätte vorgenommen werden müssen, um verschattete (durch die Wandung und den Einfallwinkel des Löschmittelstrahls) oder unerreichte Oberflächen zu kühlen und abzulöschen. Dabei gilt zu beachten, dass in den Versuchen keinerlei metallische Bauteile innerhalb der Brandwanne vorhanden waren, bei dem hier genannten Einsatzbeispiel sind sicherlich Bereiche durch Bauteile des Tankaufliegers verschattet. Daher kann davon

ausgegangen werden, dass wesentlich mehr Strahlrohre mit Löschmittelzusatz erforderlich sind, die Brandoberfläche, Bauteile und verschattete Bereiche gleichzeitig unter die Zündtemperatur zu kühlen. Ein Beleg dafür ist, dass die Löschversuche zeigten, sobald das Strahlrohr geschwenkt wurde, zündeten die Bereiche schlagartig zurück. Also kann bei einer nicht gleichmäßigen und vollständigen Kühlung aller Komponenten der Löscherfolg stark verzögert werden.

Der Einsatz von geeignetem Schaumlöschmittel, kann den resultierenden Personal- und Materialaufwand eines Einsatzes mit Löschmittelzusatz reduzieren. Das Löschmittel Schaum löschte wie bereits oben genannt in den Löschversuchen den Heptanbrand erfolgreich ab. Dieser Löscherfolg basiert auf der Reduktion der Ausgasung der brennbaren Flüssigkeit und dem gleichzeitigen Kühleffekt durch die Schaumdecke. Somit ist es bei einem Schaumeinsatz nicht erforderlich, alle Brandoberflächen, Bauteile und verschattete Bereiche gleichzeitig unter die Zündtemperatur zu kühlen, sondern die Schaumdecke sichert bereits abgelöschte Teilbereiche gegen ein schlagartiges Rückzünden.

Die Brandbekämpfung mit einem Schaummittel kann in diesem Beispiel die bessere Wahl darstellen. Durch die Schaumdecke wird ein Ausgasen minimiert und damit die Rückbrandbeständig erhöht, gegenüber dem Löschmittelzusatz der durch die fehlende Inertisierung keine Rückbrandbeständigkeit gelöschter Bereiche gewährleisten kann.

### 4.3.3 Brand eines Lagertanks bei der Firma INEOS in Köln

Bei der Firma INEOS in Köln kam es nach der Undichtigkeit an einer Ethylenleitung zu einem Gasaustritt mit folgendem Abbrand. Durch die Strahlungswärme zersetzte sich Ethylen in einer Leitung, es kam zum Leitungsabbriss. Die Folge, eine 40 m hohe Jetflamme die mit einem Druck von 80 bar austritt. Trotz eingeleiteter Kühlmaßnahmen wurde das Aluminiumdach eines nahe stehenden Lagertanks durch die Wärmestrahlung zerstört und entzündete das bevorratete Acrylnitril, siehe Abbildung 32. Es handelt sich dabei um eine farblose, brennbare Flüssigkeit mit einem Flammpunkt von  $-5\text{ °C}$ .



Abbildung 32: Lagertankbrand in Köln<sup>41</sup>

Der Tank hatte eine Oberfläche von ca.  $250\text{ m}^2$  bei einer Höhe von 16 m. Nach der Bereitstellung von ausreichend Schaummittel ( $100\text{ m}^3$  AFFF) und einer Lageänderung (durch die Aufheizung kam es zu einer pulsierenden Verbrennung und es bestand die Gefahr des Überkochens) wurde der Schaumlöschangriff mit einer Applikation von  $31000\text{ l/min}$  Wasser-Schaummittelgemisch gestartet. Dieses entspricht unter optimalen Bedingungen (die vollständige Löschmittelmenge erreicht die Oberfläche des Tanks) einer Applikationsrate von  $124\text{ l/min/m}^2$ . Der Brand konnte nach 20 Minuten gelöscht werden. Dieses entspricht  $620\text{ m}^3$  Wasser-Schaummittelgemisch. Die Zumischrate lässt sich aus dem Unfallbericht nicht ermitteln. Eine Schwierigkeit die dem Unfallbericht entnommen werden kann, ist das die direkte Außenwand des Lagertanks bis auf wenige Zentimeter über dem Flüssigkeitsspiegel weggebrannt ist. Nach dem Brand waren noch  $2500\text{ m}^3$  Acrylnitril mit einer Temperatur von  $75\text{ °C}$  und damit nur  $3\text{ °C}$  unter dem Siedepunkt im Tank vorhanden.<sup>41 42</sup>

Im Folgenden sollen anhand des realen Ereignisses die Möglichkeiten diskutiert werden, mit einem Löschmittelzusatz den Brand des Lagertanks zu löschen. Für die Diskussion wird eine Zumischrate von 3 % angenommen, was einem erforderlichen Schaummittelvolumen von 18600 Litern entspricht bei einer Applikation von  $31000\text{ l/min}$  über 20 Minuten.

Bei der brennenden Flüssigkeit mit einer Oberfläche von  $250\text{ m}^2$  handelt es sich um Acrylnitril mit einem Flammpunkt von  $-5\text{ °C}$ . Die Charakteristik des Flammpunktes entspricht damit, dem in den Labor- und Brandversuchen verwendetem Heptan mit einem Flammpunkt von  $-4\text{ °C}$ . In den Brandversuchen wurde bei einer Oberfläche von  $4,5\text{ m}^2$  mit dem Hohlstrahlrohr mit einer eingestellten Literleistung von  $235\text{ l/min}$  eine Applikationsrate von  $52\text{ l/min/m}^2$  erreicht. Dabei ist anzumerken, dass in diesen Versuchen der Löschmittelzusatz sehr dynamisch mit einem Sprühstrahl in die Brandoberfläche eingearbeitet

werden konnte. Der Heptanbrand konnte hierdurch nicht innerhalb der vorgegebenen Zeit von 120 s gelöscht werden.

Für die Brandbekämpfung des Tankbrandes wurden 2 Großwerfer und ein Schaumwerfer vom Fahrzeug eingesetzt. Aufgrund der Wärmestrahlung und der Wurfparabel wurden diese in ca. 30 m und 50 m Abstand positioniert, siehe Abbildung 33. Ab dieser Entfernung ist der Einsatz eines Sprühstrahles als sehr unwahrscheinlich bis unmöglich einzustufen. Durch die Wurfparabel wird die dynamische Einarbeitung zudem auch sehr stark eingeschränkt.

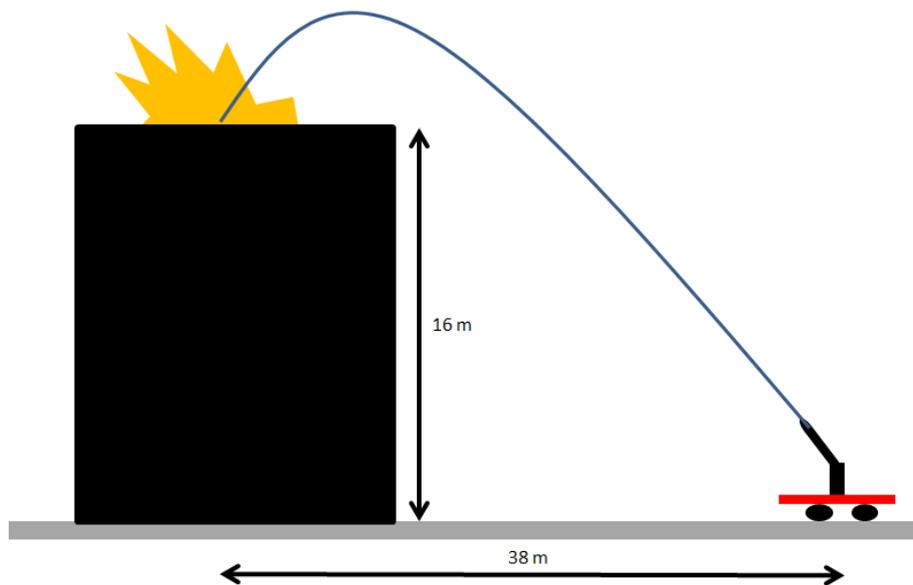


Abbildung 33: Lagertank-Brandbekämpfung

Aufgrund der Fakten, dass keine dynamische Applikation erfolgen kann, sondern immer nur lokal mit einem Vollstrahl die Brandoberfläche erreicht wird oder ein Abregnen des Löschmittelzusatzes in Erwägung gezogen werden könnte, was aufgrund der Thermik ebenfalls als kritisch zu sehen ist, erscheint eine Brandbekämpfung mit einem Löschmittelzusatz in diesem Beispiel als nicht sehr erfolgsversprechend. Weiterhin als sehr kritisch anzusehen ist bei einem Einsatz eines Löschmittelzusatzes, das mögliche Überlaufen des Tanks aufgrund der Dichte des Wasser-Löschmittelgemisches. In den Scheidetrichterversuchen zeigte sich deutlich, dass sich die Wasser-Löschmittelphase unterhalb der brennbaren Flüssigkeit sammelte. Bei der Annahme, dass die Tankwand kontinuierlich bis auf 15 cm über dem Flüssigkeitsspiegel abbrennt, verbleiben  $37,5 \text{ m}^3$  also 37500 Liter bis zum Überlaufen des Tanks. Dieses entspricht fast dem Volumen, welches pro Minute appliziert wird.

Dem Unfallbericht ist zu entnehmen, dass nach dem Löschen des Brandes noch ca.  $2500 \text{ m}^3$  Acrylnitril mit einer Temperatur von  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  verblieben sind. Damit befindet sich die Flüssigkeit  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  unter Ihrem Siedepunkt. Diese Tatsache lässt die Annahme zu, dass die Flüssigkeit eine enorme Konzentration von brennbaren Dämpfen freisetzt. Der Tankrand befindet sich ebenfalls nur noch 15 cm über dem Flüssigkeitsspiegel, was einer Gesamthöhe

von 10 m entsprechen würde. Zur Reduktion der Dämpfe wurde durch die Einsatzkräfte kontinuierlich eine dünne Schaumdecke aufgetragen.

Eine Reduktion bzw. Sicherung des Acrylnitrils mit einem Löschmittelzusatz erscheint aufgrund der Laborergebnisse als sehr unwahrscheinlich. Doch durch die Polarität könnte sich diese Eigenschaft auch von den untersuchten Flüssigkeiten unterscheiden. In der Untersuchung zur Dampfkonzentration zeigte sich, dass die untere Explosionsgrenze von Heptan mit 1 vol.% in weniger als 90 s erreicht wurde und die Lösungen aus Benzin und Löschmittelzusatz grundsätzlich zündfähig sind. Die UEG von Acrylnitril liegt bei 3 vol.%.

Unter der Annahme, die Einkapselung würde wie von Herstellern beworben funktionieren, ergibt sich eine weitere Problemstellung. Wie bereits weiter oben erwähnt, ergaben die Laborversuche, dass Emulsionen aus brennbarer Flüssigkeit und Löschmittelzusatz absinken. Somit würde kontinuierlich neues Acrylnitril an die Oberfläche gefördert werden, was auch nicht zu einer Entschärfung der Lage führen würde, bis die 2500 m<sup>3</sup> Acrylnitril eingekapselt wären. Für die Einkapselung wird vom Hersteller das Verhältnis 1:5 angegeben, also auf einen Teil Acrylnitril müssen 4 Teile Wasser-Löschmittelzusatzgemisch kommen. Die Berechnung ergibt, dass dann ein Volumen von 10000 m<sup>3</sup> Wasser-Löschmittelzusatzgemisch in den Tank appliziert werden muss. Es stehen über der Flüssigkeit aber nur 37,5 m<sup>3</sup> zur Verfügung. Hierdurch wäre die Sicherung des Acrylnitrils, selbst unter der Annahme, dass die Einkapselung funktioniert, nicht möglich. Auf der anderen Seite sind bei einer Zumischrate von 3% 300 m<sup>3</sup> also 300.000 l Löschmittelzusatz erforderlich.

Im Folgenden soll die Sicherung des Acrylnitrils mit Schaumlöschmittel kurz dargestellt werden. Aufgrund der Windanfälligkeit, kann die maximale Schaumhöhe über dem Flüssigkeitsspiegel nur 0,15 m betragen. Bei einer Oberfläche von 250 m<sup>2</sup> entspricht dieses 37,5 m<sup>3</sup>. Die Verschäumungszahl für Schwertschaum wird mit 8 angenommen. Durch die Berechnung ergibt sich für die einmalige Abdeckung der Acrylnitril-Oberfläche ein Bedarf von 4687,5 Liter Wasser-Schaummittelgemisch. Bei einer üblichen Zumischrate von 3 % sind dieses 140 Liter Schaummittelkonzentrat. Müsste die Schaumschicht aufgrund von Wind alle 10 Minuten wieder vollständig hergestellt werden, würden in einer Stunde 840 Schaummittel verbraucht werden.

Die Diskussion an dem realen Brand eines Lagertanks mit Acrylnitril zeigt deutlich die Grenzen für den Einsatz eines Löschmittelzusatzes auf. Die Vorteile liegen bei der Brandbekämpfung und der anschließenden Sicherung des Acrylnitrils eindeutig auf der Seite des Löschschaumes. In dem realen Einsatzgeschehen wurde die Schaumdecke im weiteren Verlauf durch sogenannte Teichbälle ersetzt, welche ein Ausgasen des Acrylnitrils weiter reduzierten als die zu dünne Schaumdecke. Würde in dem Lagertank eine Flüssigkeit brennen, deren Flammpunkt über der Umgebungstemperatur liegt und eine dynamische Applikation erfolgen können, wäre ein Löscherfolg tendenziell denkbarer aber ebenso sehr unwahrscheinlich, aufgrund der Problematik, dass der Tank zügig überlaufen würde.

## **5 Fazit zu den Einsatzgrenzen von Löschmittelzusätzen bei Klasse B-Bränden**

Die durchgeführten Labor- und Brandversuche sowie die anschließende Diskussion potenzieller Flüssigkeitsbrandszenarien lassen deutlich erkennen, dass die oft von Herstellern propagierte vollständige Austauschbarkeit von Schaumlöschmitteln gegen Löschmittelzusätze nicht gegeben ist.

In den optischen Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Emulsion aus Wasser, einem Löschmittelzusatz und einer brennbaren Flüssigkeit sich bereits nach wenigen Augenblicken beginnt in Teilen zu entmischen. Dabei setzte sich grundsätzlich die brennbare Flüssigkeit aufgrund der geringeren Dichte an der Oberfläche ab. Dieses Verhalten konnte in den Versuchen mit den Scheidetrichern ebenfalls belegt werden. Hierfür strömte die brennbare Flüssigkeit in den tieferliegenden Scheidetrichter mit der Löschmittellösung oder einer Emulsion aus den drei oben genannten Bestandteilen. Ebenfalls wurde der Vorgang in entgegengesetzter Richtung durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass sich die brennbare Flüssigkeit grundsätzlich über dem Löschmittel oder der Emulsion schichtet. Hierdurch kann angenommen werden, dass emulgierte Bestandteile absinken und Teile der brennbaren Flüssigkeit an die Oberfläche fördern. Eine für die Brandbekämpfung sehr nachteilige Eigenschaft. Die Untersuchungen mit einem Gasanalysator zeigen, dass sich die brennbaren Flüssigkeiten Heptan und Benzin überhaupt nicht oder nur für sehr kurze Augenblicke einkapseln lassen. Dadurch erscheint die Inertisierung einer brennbaren Flüssigkeit gegen das weitere Ausgasen als nicht praktikabel. Die durchgeführten Brandversuche verdeutlichen die vorhandenen Löschleistungsverluste vor allem bei Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter der Umgebungstemperatur. Der Löschmittelzusatz erreichte trotz einer dynamischen und deutlichen höheren Applikationsrate, als sie z.B. für Schaumlöschmittel in der DIN-EN 1568-3 oder ICAO Level B gefordert wird, keinen Löscherfolg bei einem Heptanbrand. Ausschließlich der 4,5 m<sup>2</sup>-Brand des Flugzeugtreibstoffes F-34 mit einem Flammpunkt größer 38 °C konnte erfolgreich im selben Zeitfenster wie mit einem fluorfreien Schaumlöschmittel gelöscht werden. Dabei ist anzumerken, dass bei einer dem Schaummittel angepassten nicht so aggressiven, dynamischen Applikation der Löscherfolg des Schaumlöschmittels evtl. auch früher eingetreten wäre. Die Brandversuche zeigen, dass ein Löscherfolg bei Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter Umgebungstemperatur sehr unwahrscheinlich ist. Hierdurch wird ein potentieller Einsatzbereich stark eingeschränkt. Durchgeführte Verdampfungsversuche im Klimaschrank wiesen keine nennenswerten Differenzen in der verdampften Masse von Wasser, Schaumlöschmittel oder Löschmittelzusatz auf. Die Untersuchung der Oberflächenspannung ergab nahezu ähnliche Werte, wie sie auch mit einer unverschäumten fluorfreien Schaummittellösung erreicht werden können. Das bedeutet für den Anwender, dass theoretisch auch mit einem herkömmlichen fluorfreien Schaumlöschmittel eine Netzwasseranwendung wie mit einem Löschmittelzusatz durchführbar ist. Durch die gleichartigen Oberflächenspannungen, ist vermutlich der Abkühleffekt, welcher durch die kleineren Wassertropfen erzeugt werden könnte, bei einem Löschmittelzusatz derselbe wie bei einem unverschäumten Schaumlöschmittel. Als sehr auffällig zeigte sich die notwendige

Konzentration an Tensiden in der wässrigen Lösung zum Erreichen der kritischen Mizellenkonzentration. Bei dem Löschmittelzusatz 3 ist eine Zumischung von 0,03% ausreichend. Der Löschmittelzusatz 1 erfordert eine 0,42%ige Zumischung. Dieses lässt auf eine unterschiedliche Qualität der verwendeten Tenside oder eine andere chemische Einstellung des Löschmittels schließen.

Die Löschwirkung des Löschmittelzusatzes auf der brennbaren Flüssigkeit F-34 konnte in dieser Arbeit nicht abschließend ermittelt werden. Löscheffekte wie die Inertisierung oder das frühere Verdampfen sind wie oben beschrieben, bereits stark eingeschränkt. In weiteren Untersuchungen ist es empfehlenswert die mögliche Einkapselung der brennbaren Dämpfe über der flüssigen Phase durch auftreffendes Löschmittel oder eine antikatalytische Wirkung zu untersuchen.

Den Medien ist zu entnehmen, dass ein Landkreis bereits vollständig von AFFF-Schaummitteln auf einen vielfach beworbenen Löschmittelzusatz umgestellt hat. Nach der Erstellung dieser Arbeit sind diese Prozesse aus sicherheitstechnischer Perspektive als sehr kritisch einzustufen. Durch die Einführung eines Löschmittelzusatzes für die Flüssigkeitsbrandbekämpfung, welcher aufgrund fehlender technischer Normen auch keinem akkreditierten Prüfverfahren unterworfen werden kann, kommt es zu Verlusten in der Löscheinleistung. Die Ergebnisse sollten als alarmierender Anlass genommen werden, vor einem potentiellen Umstieg in der Flüssigkeitsbrandbekämpfung von Schaumlöschmittel auf einen Löschmittelzusatz ausführliche und tiefgehende wissenschaftliche Versuche durchzuführen. Potentielle begrenzte Einsatzmöglichkeiten als Sonderlöschmittel sind allerdings nicht auszuschließen. Werden nur die vom Hersteller angegebenen Daten, Löscheffekte und Tests beachtet und der Löschmittelzusatz ohne die Vorhaltung weiterer entsprechender Schaummittelreserven eingeführt, könnte dieses im Ereignisfall neben längeren Löscheinzeiten mit erhöhtem Löschmittelbedarf im schlimmsten Fall den Schaden von Personen, der Zerstörung von Sachwerten oder den totalen Verlust von Produktionsanlagen zur Folge haben.

---

## 6 Anhang

|  |    |
|--|----|
| Anhang A: Untersuchung der kritischen Mizellenkonzentration..... | 72 |
| Anhang B: Löschversuche .....                                    | 74 |
| Anhang C: Versuche zur Verdampfung .....                         | 91 |
| Anhang D: Sprühversuche .....                                    | 93 |

## Anhang A: Untersuchung der kritischen Mizellenkonzentration

### K100 – Tensiometer

Das K-100 Tensiometer wurde zur Bestimmung der kritischen Mizellenkonzentration verwendet.



Abbildung 34: K100 Tensiometer<sup>43</sup>



Abbildung 35: K100 Tensiometer, eintauchen der Messplatte<sup>43</sup>

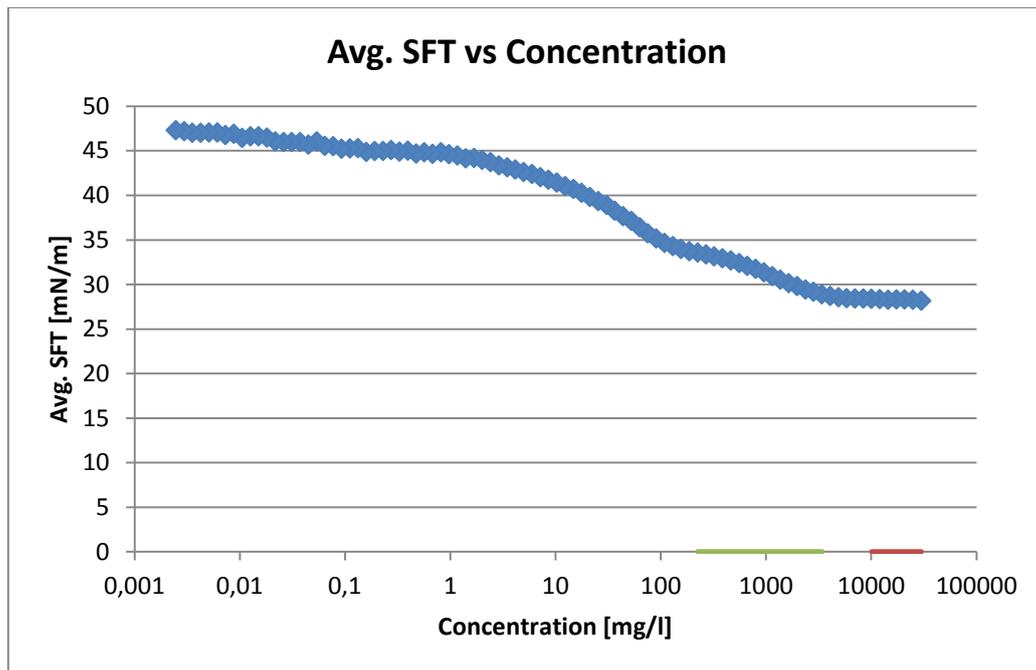
**Löschmittelzusatz 1**

Diagramm 11: Bestimmung der CMC für den Löschmittelzusatz 1 bei 3 % Zumischung

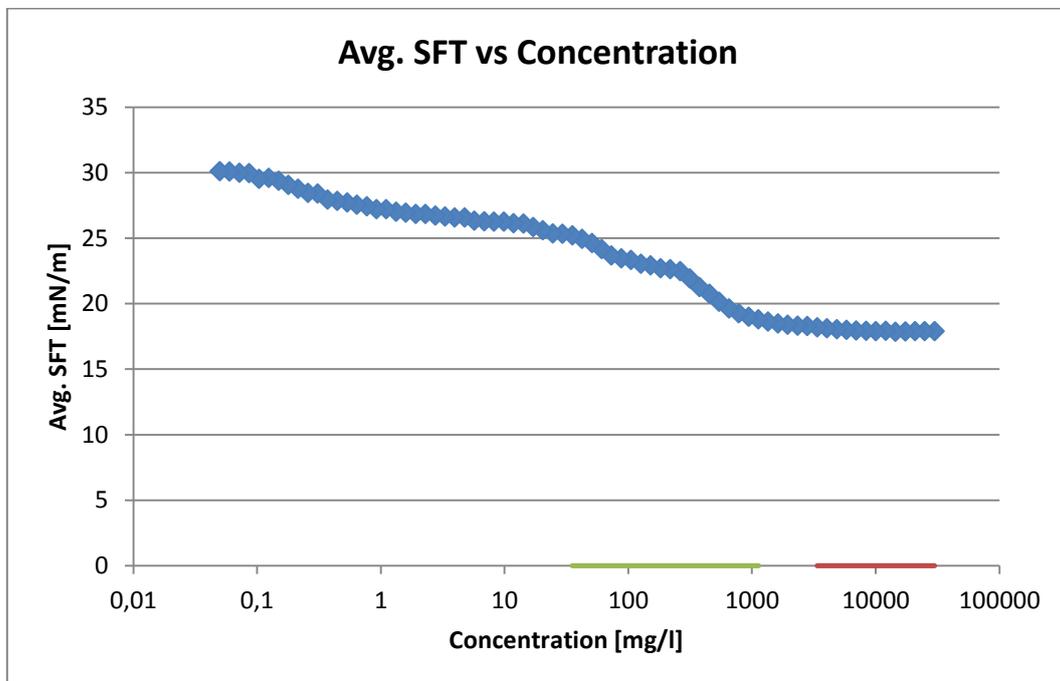
**Löschmittelzusatz 2**

Diagramm 12: Bestimmung der CMC für den Löschmittelzusatz 2 bei 3 % Zumischung

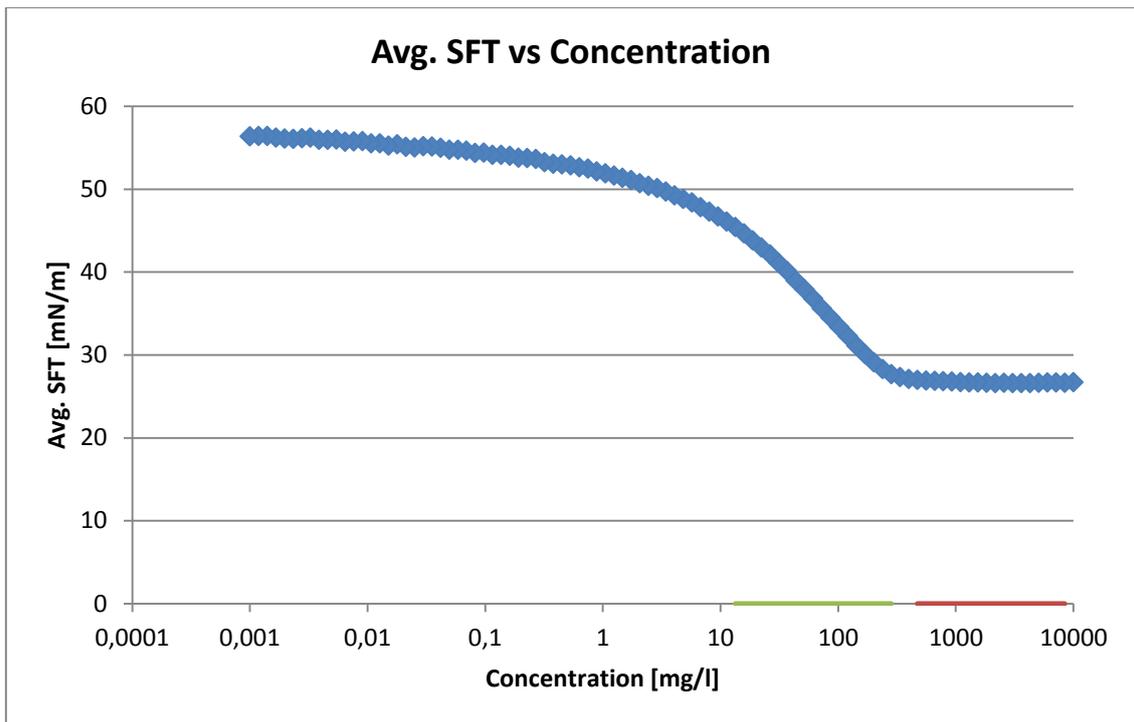
**Löschmittelzusatz 3**

Diagramm 13: Bestimmung der CMC für den Löschmittelzusatz 3 bei 1 % Zumischung

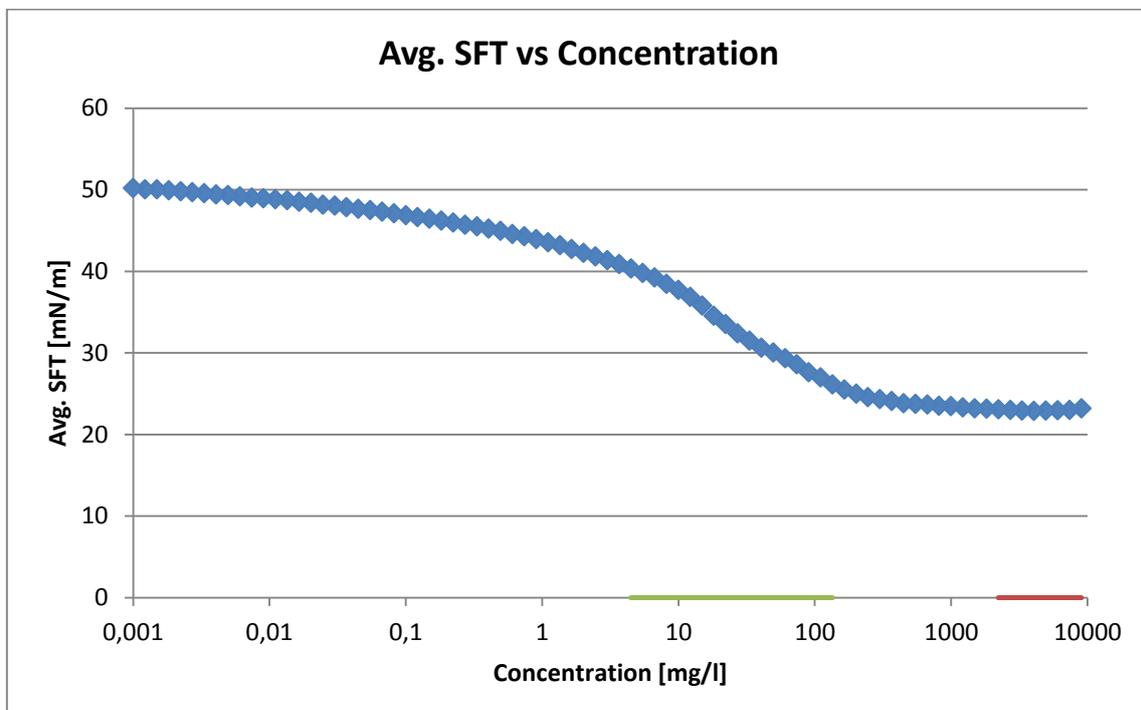
**Schaumkonzentrat**

Diagramm 14: Bestimmung der CMC für das Schaumkonzentrat bei 3 % Zumischung

## Anhang B: Löschversuche

### Bestandteile des Versuchsaufbaues

Im Folgenden werden die Bestandteile des Versuchsaufbaues kurz beschrieben und erläutert.

#### Brandwanne

Als Objekt für die Flüssigkeitsbrände wird eine Brandwanne mit einer Oberfläche von 4,5 m<sup>2</sup> entsprechend der DIN-EN 3 mit der Bezeichnung 144B eingesetzt.



Abbildung 36: 4,5m<sup>2</sup>-Brandwanne

Durchmesser 2,4 m

Oberfläche 4,5 m<sup>2</sup>

Höhe 0,3 m

#### Feuerlöschkreiselpumpe

Zur Förderung und Druckerhöhung im Versuchsaufbau wird eine PFPN 10-1000 der Firma Jöhstadt mit der Typenbezeichnung ZL 1500 eingesetzt.



Abbildung 37: PFPN 10-1000

Hersteller Jöhstadt

Modell ZL 1500

Nenndruck 10 bar

Nenndurchfluss 1000 l/min

## Durchflussmengenmesser

Für die Durchflussmengenmessung wird ein magnetisch-induktiv arbeitender Durchflusssensor vom Lieferanten Schwing verwendet. Die Auswertung erfolgt über das „Peekel Autolog 3000“ System.



Abbildung 38: Durchflussmengenmesser

|              |  |
|--------------|--|
| Lieferant    | Schwing Verfahrenstechnik              |
| Typ          | MS 1000                                |
| Beschreibung | Magnetisch Induktiver Durchflussmesser |
| DN           | 50                                     |
| PN           | 40                                     |

## Drucksensor

Für die Aufnahme des Druckes wird ein digitaler Drucksensor verwendet, welcher über das „Peekel Autolog 3000“ System ausgewertet wird sowie ein analoger Druckmesser zur Kontrolle.



Abbildung 39: Drucksensor und analoge Druckanzeige

## Z-Zumischer

Die Zumischung der Löschmittel in den Löschwasserstrom erfolgt über einen nach dem Injektorprinzip arbeitendem Z2-Zumischer der Firma AWG.



Abbildung 40: Z2-Zumischer

|                |             |
|----------------|-------------|
| Hersteller     | AWG         |
| Modell         | Z2          |
| Zumischrate    | 1 % bis 6 % |
| Nenndurchfluss | 200 l/min   |

## Hohlstrahlrohr

Die Applikation des Löschmittels erfolgt über ein Hohlstrahlrohr mit rotierendem Zahnkranz mit der Bezeichnung Style 2400 der Firma AWG.



Abbildung 41: Hohlstrahlrohr

|                 |                                  |
|-----------------|----------------------------------|
| Hersteller      | AWG                              |
| Modell          | Style 2400                       |
| Nenndruck       | 6 bar                            |
| Durchflussmenge | 130, 235 und 400 l/min bei 6 bar |

## Löschversuche mit Heptan

Löschversuch Nr. 1 mit Wasser

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Wasser                        |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 35 s                          |
| Löschzeit      | nicht gelöscht                |

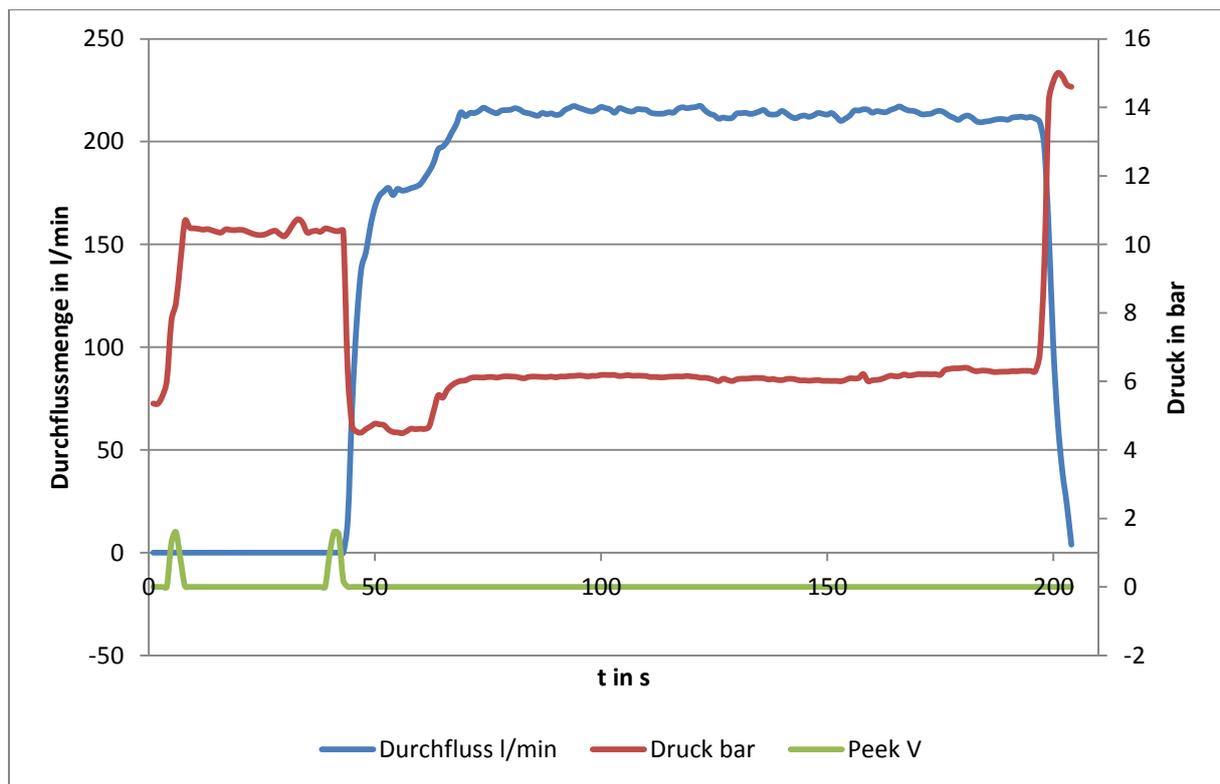
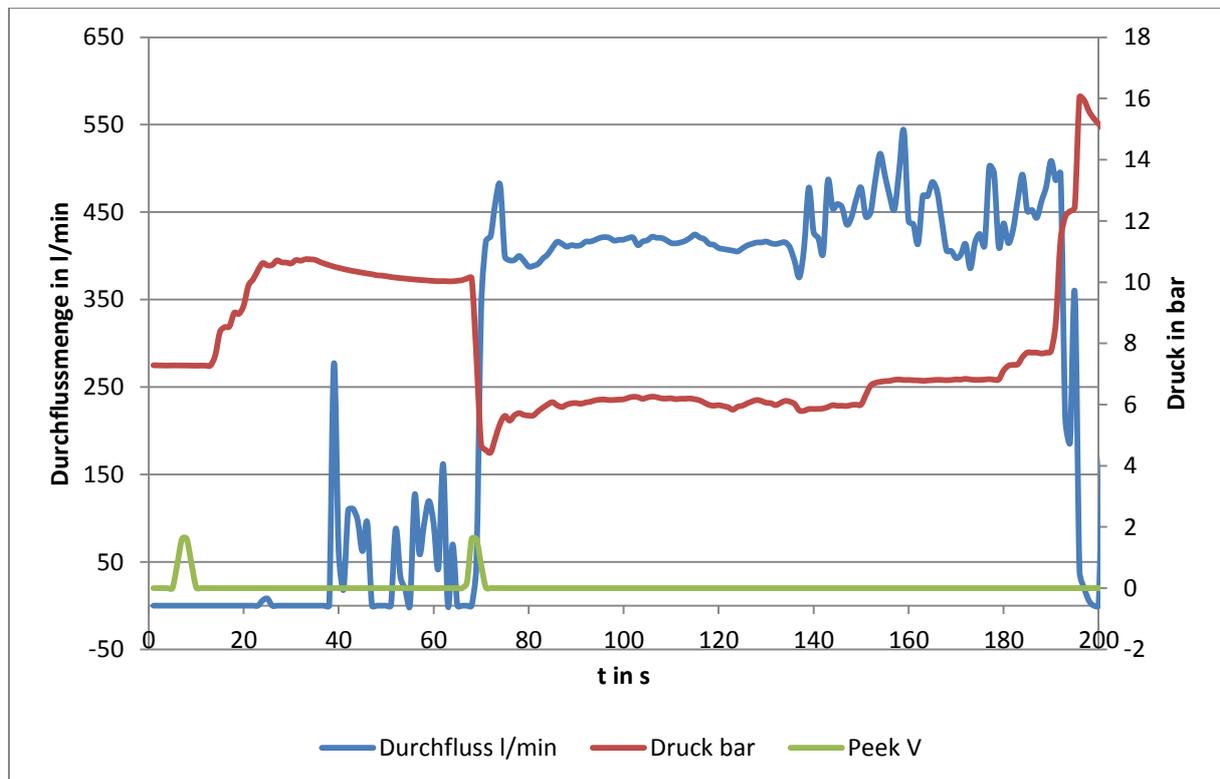


Diagramm 15: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 H2O

## Löschversuch Nr. 2 mit Wasser

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Wasser                        |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 400 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | nicht gelöscht                |



## Löschversuch Nr. 3 mit Wasser

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Wasser                        |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 360 l/min (B-HSR)             |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 59 s                          |
| Löschzeit      | nicht gelöscht                |

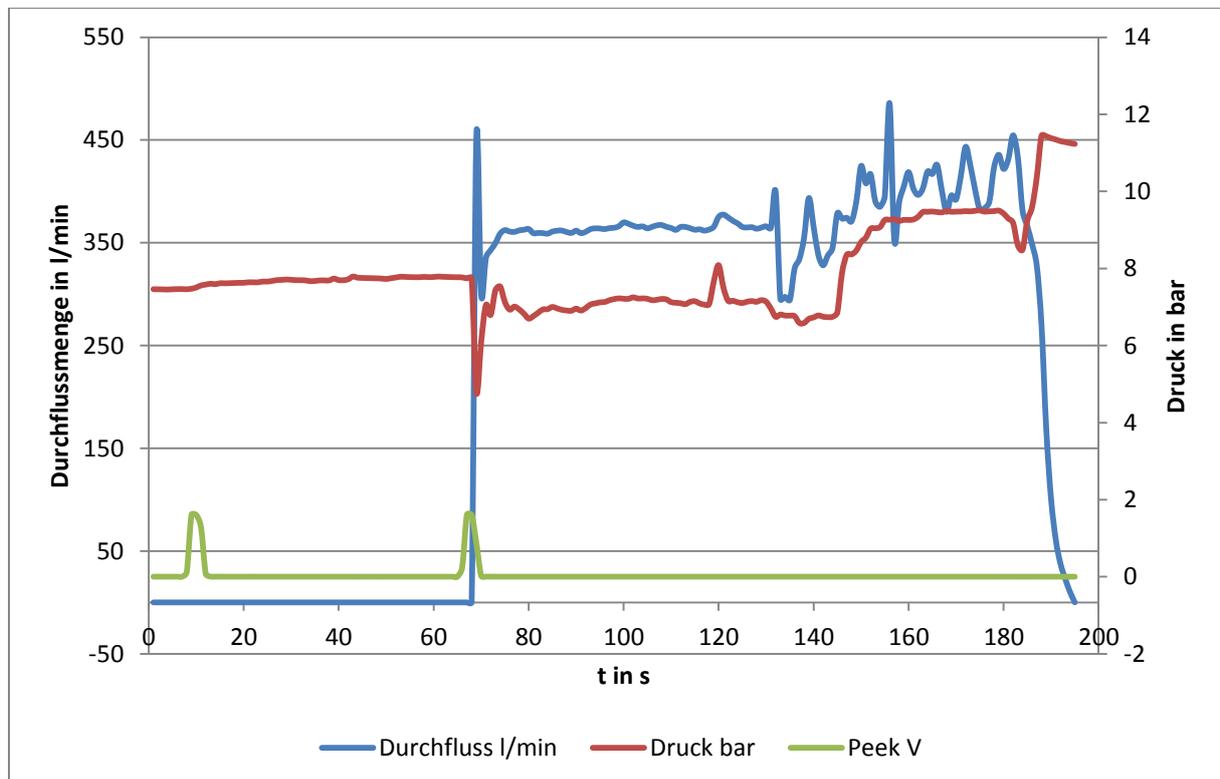


Diagramm 17: Druck- und Durchflussmessung Versuch 3 H2O

## Löschversuch Nr. 4 mit Wasser

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Wasser                        |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 56 s                          |
| Löschzeit      | nicht gelöscht                |

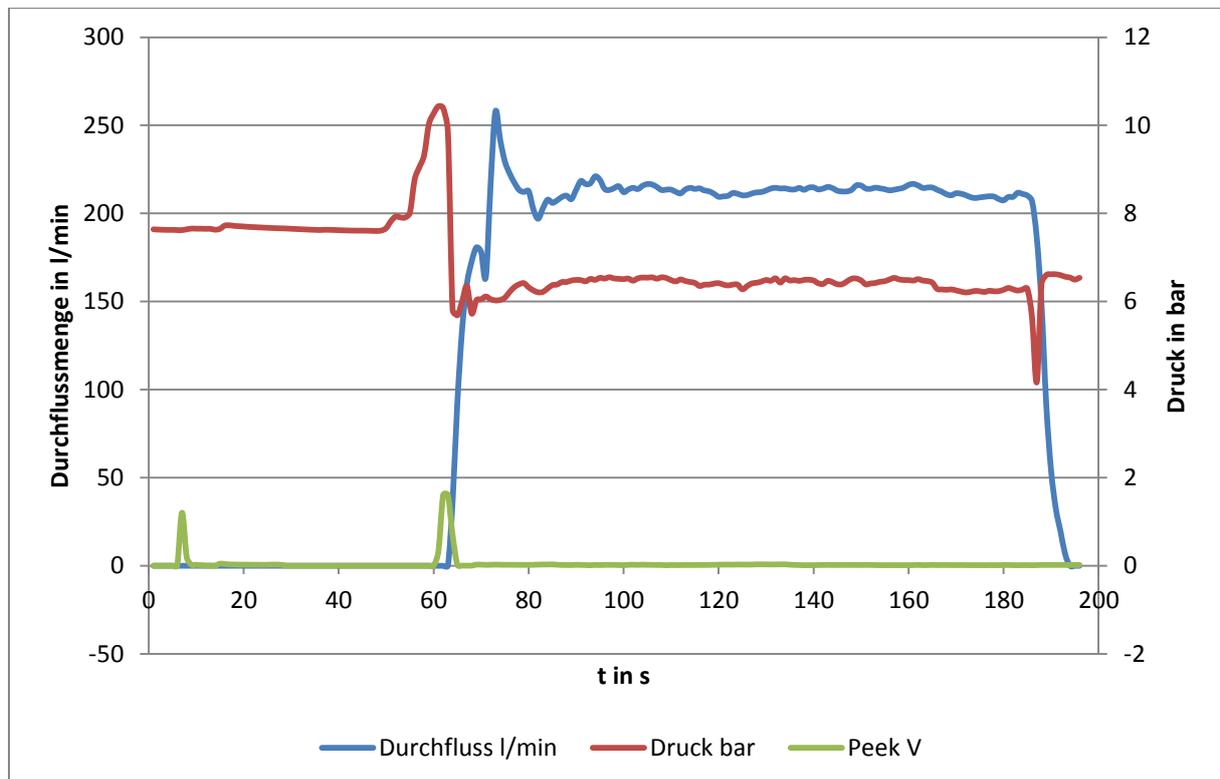


Diagramm 18: Druck- und Durchflussmessung Versuch 4 H2O

## Löschversuch Nr. 1 mit Schaum

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Schaummittel                  |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 66 s                          |

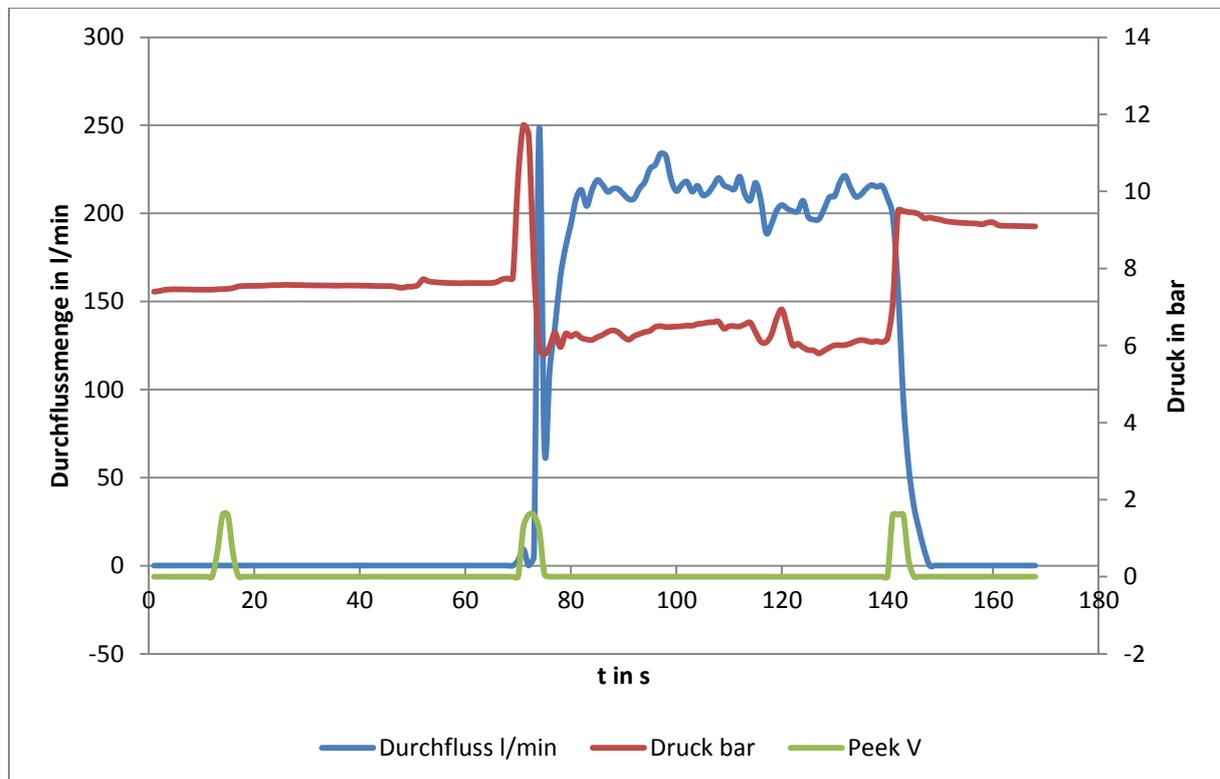


Diagramm 19: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 Schaum

## Löschversuch Nr. 2 mit Schaum

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Schaummittel                  |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 78 s                          |

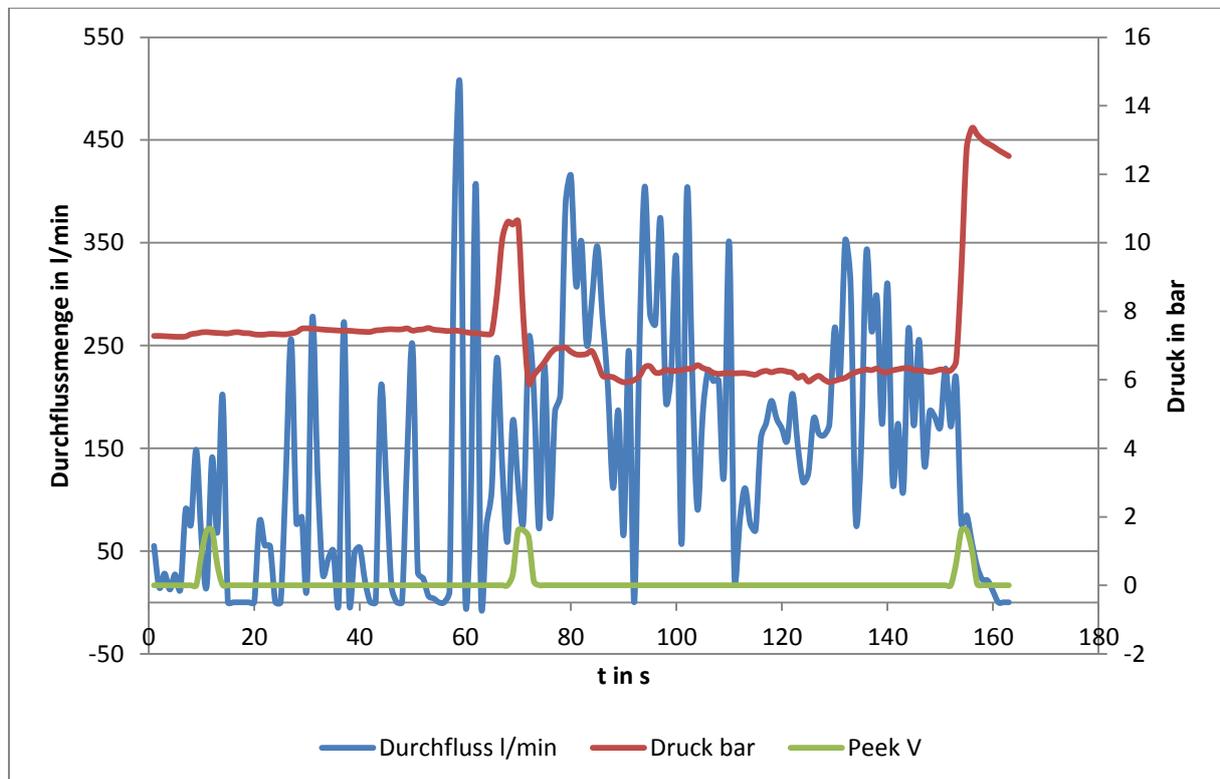


Diagramm 20: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 Schaum

## Löschversuch Nr. 1 mit Löschmittelzusatz

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Löschmittelzusatz             |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | nicht gelöscht                |

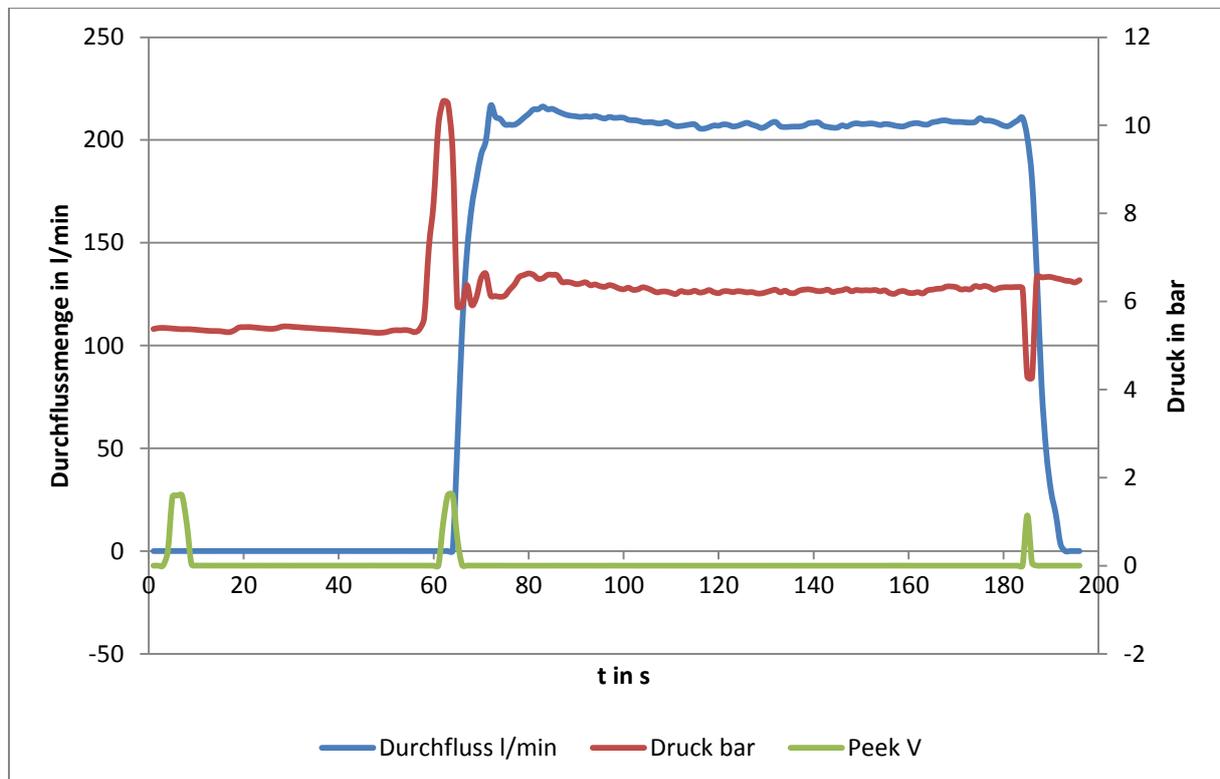


Diagramm 21: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 LMZ

## Löschversuch Nr. 2 mit Löschmittelzusatz

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Löschmittelzusatz             |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l Heptan                  |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | nicht gelöscht                |

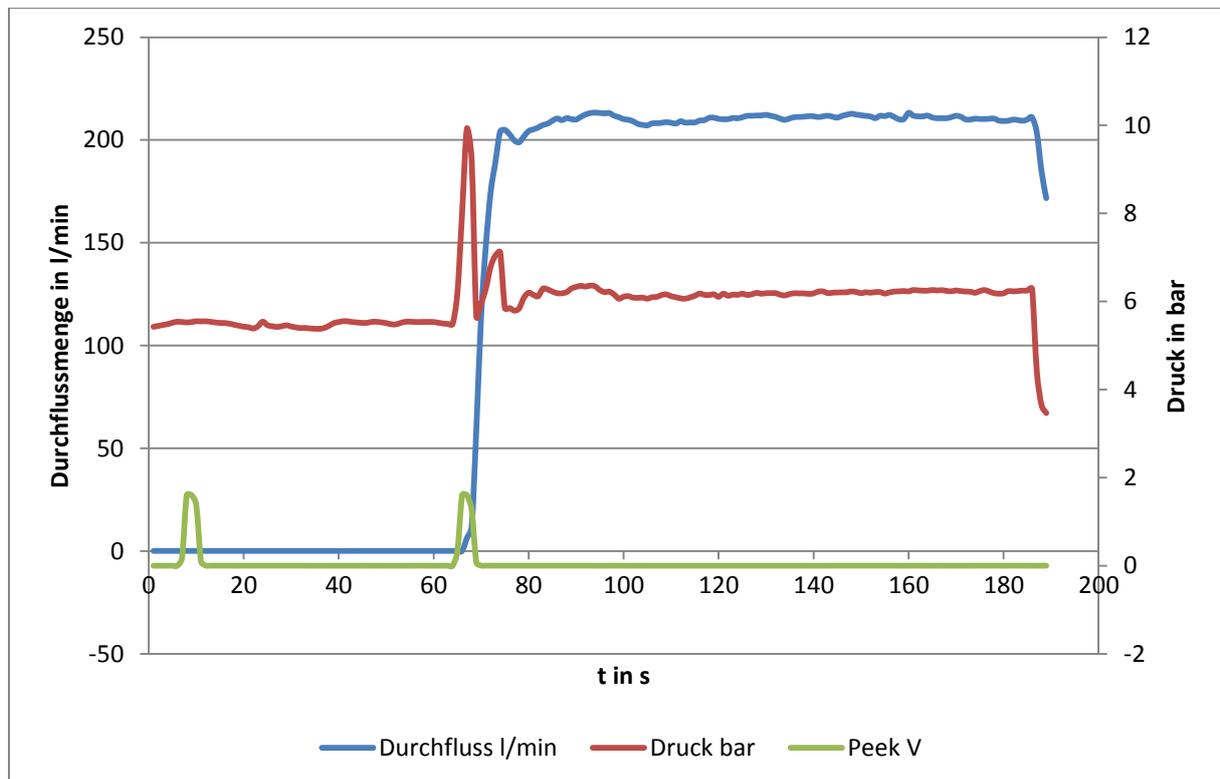


Diagramm 22: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 LMZ

**Löschversuche mit F-34**

Löschversuch Nr. 1 mit Wasser

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Löschmittelzusatz             |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l F-34                    |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 122 s                         |

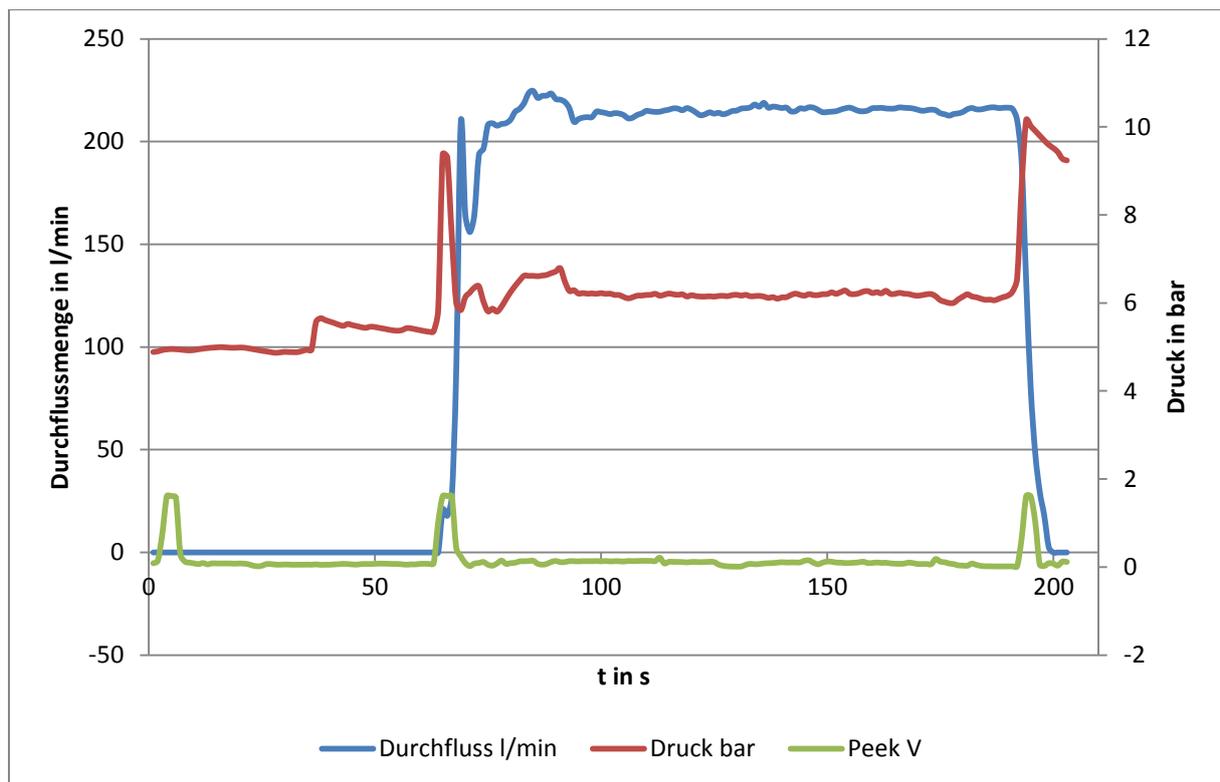


Diagramm 23: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 H2O

## Löschversuch Nr. 2 mit Wasser

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Löschmittelzusatz             |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l F-34                    |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 129 s                         |

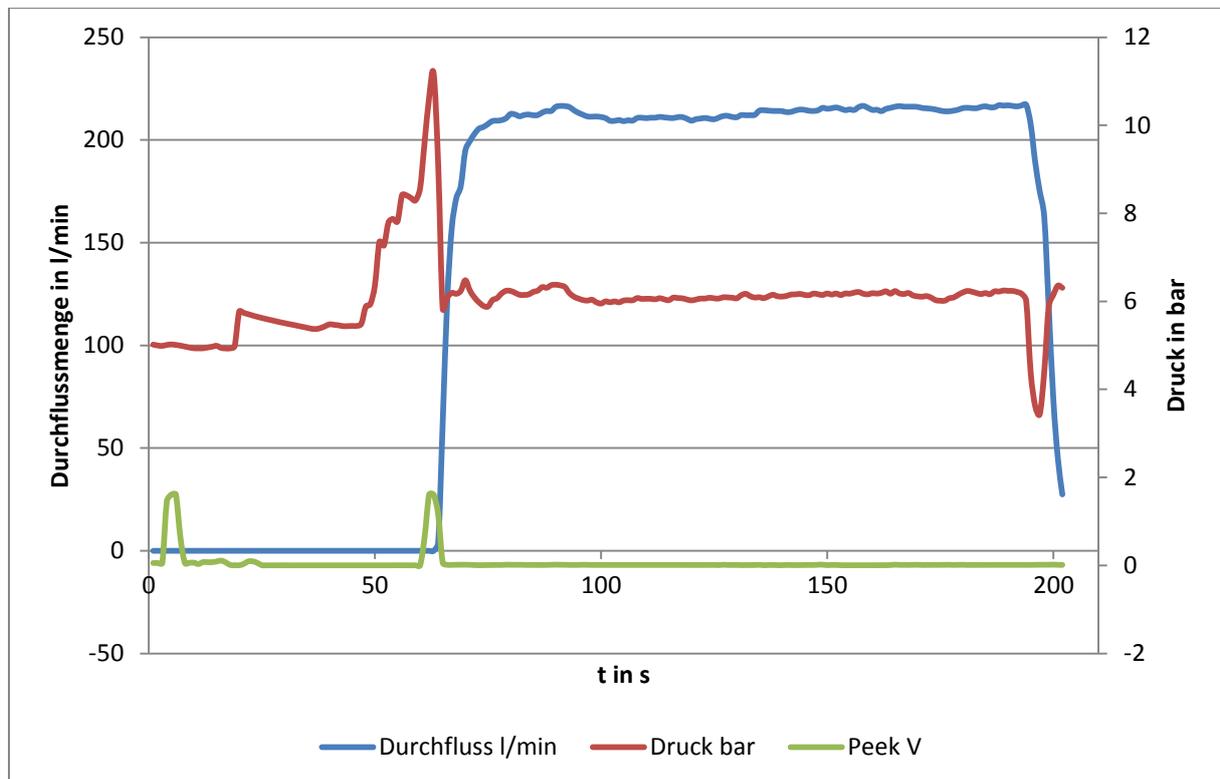


Diagramm 24: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 H2O

## Löschversuch Nr. 1 mit Schaum

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Schaummittel                  |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l F-34                    |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 15 s                          |

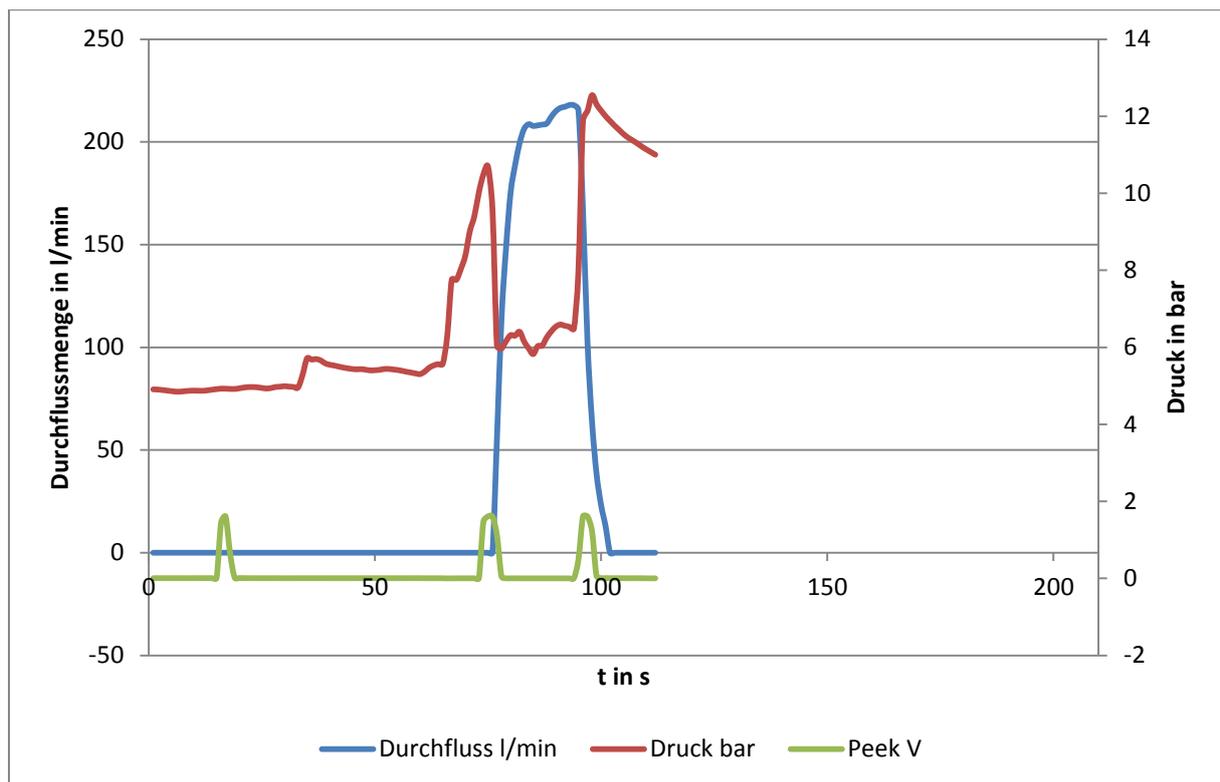


Diagramm 25: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 Schaum

## Löschversuch Nr. 2 mit Schaum

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Schaummittel                  |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l F-34                    |
| Vorbrennzeit   | 65 s                          |
| Löschzeit      | 16 s                          |

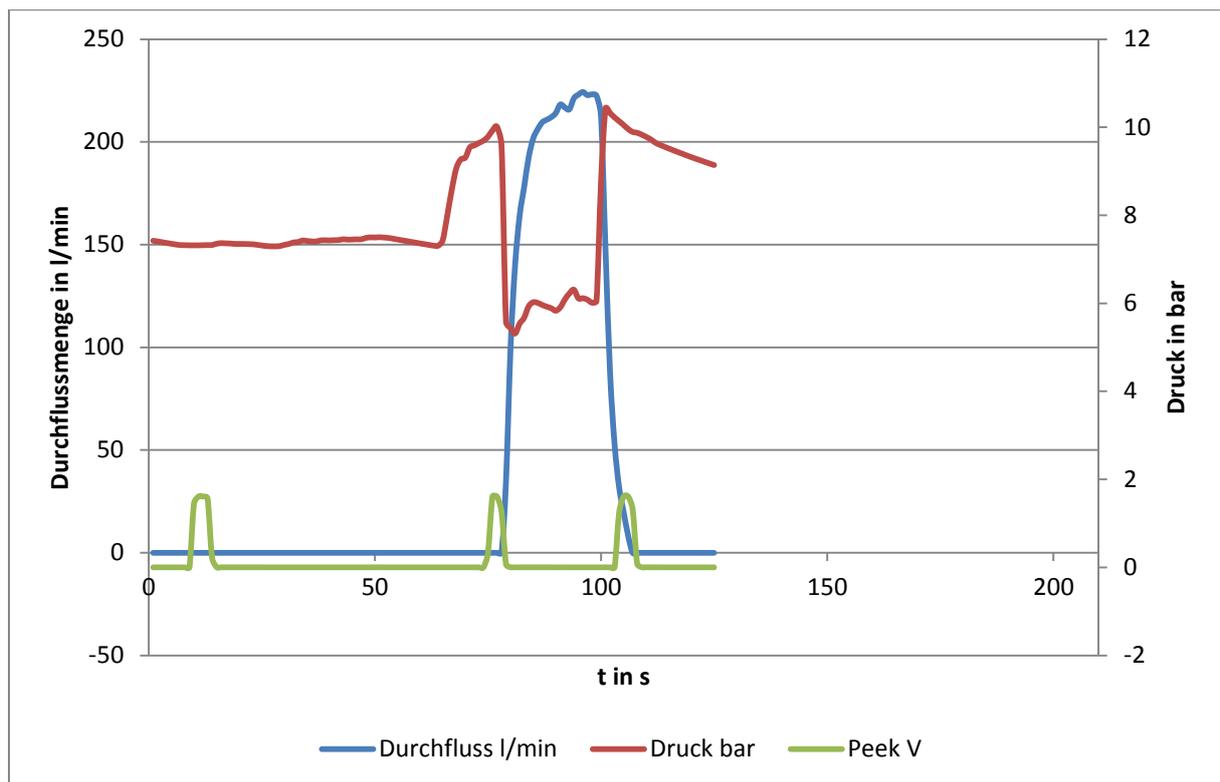


Diagramm 26: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 Schaum

## Löschversuch Nr. 1 mit Löschmittelzusatz

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Löschmittelzusatz             |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l F-34                    |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 16 s                          |

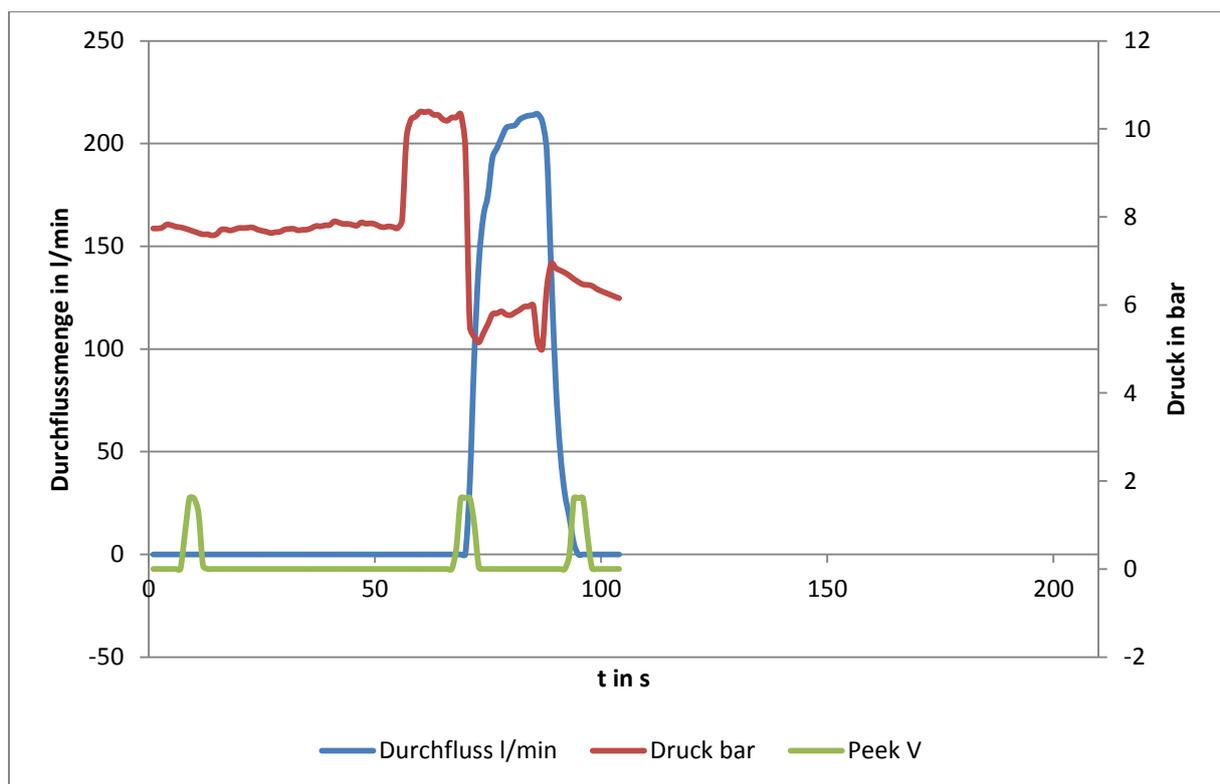


Diagramm 27: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 LMZ

## Löschversuch Nr. 2 mit Löschmittelzusatz

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Löschmittel    | Löschmittelzusatz             |
| Applikation    | dynamisch über Hohlstrahlrohr |
| Zumischrate    | 3 %                           |
| Durchflussrate | 235 l/min                     |
| Brennstoff     | 135 l F-34                    |
| Vorbrennzeit   | 60 s                          |
| Löschzeit      | 18 s                          |

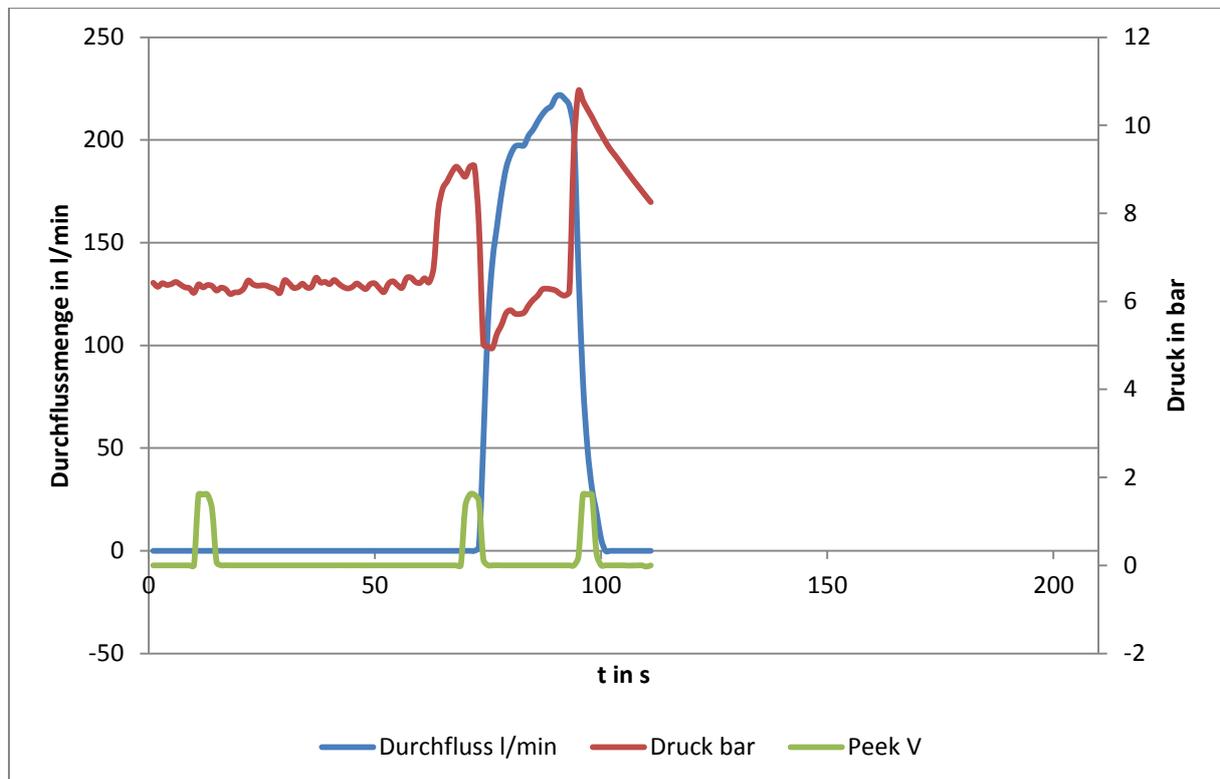


Diagramm 28: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 LMZ

## Anhang C: Versuche zur Verdampfung im Klimaschrank

Das Diagramm 28 stellt grafisch die verdampfte Masse pro Probe im Versuch 1 dar.

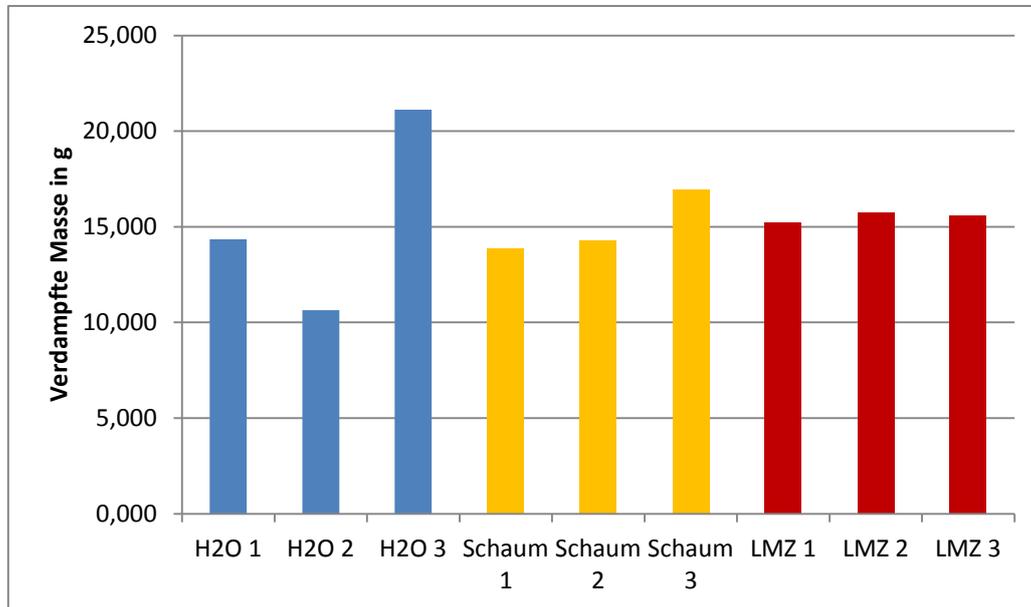


Diagramm 29: verdampfte Masse pro Probe im Versuch 1

Das Diagramm 29 stellt grafisch die verdampfte Masse pro Probe im Versuch 2 dar.

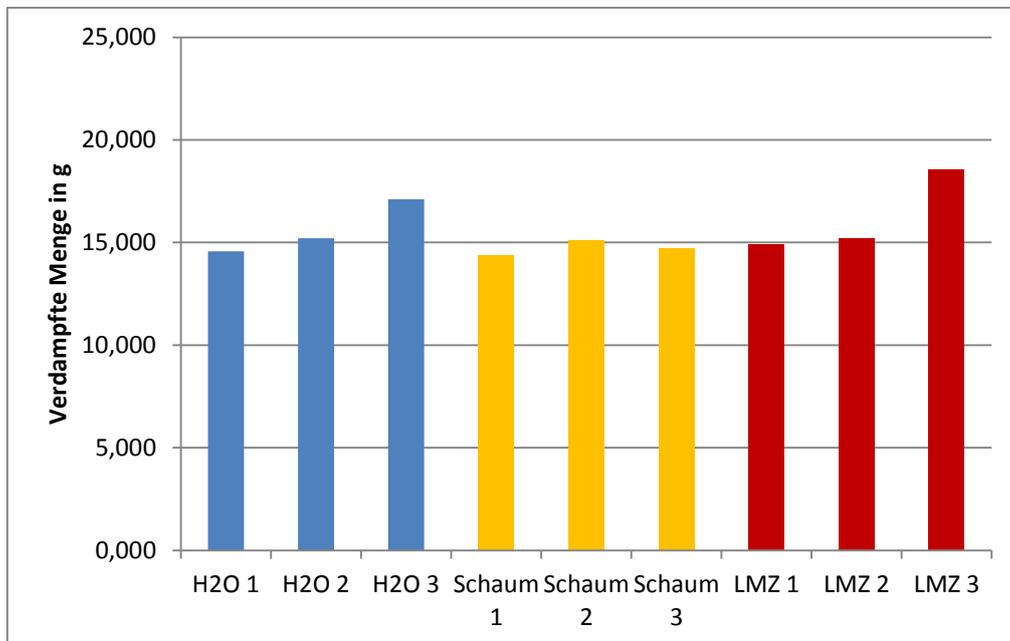


Diagramm 30: verdampfte Masse pro Probe im Versuch 2

Das Diagramm 30 stellt grafisch die verdampfte Masse pro Probe im Versuch 3 dar.

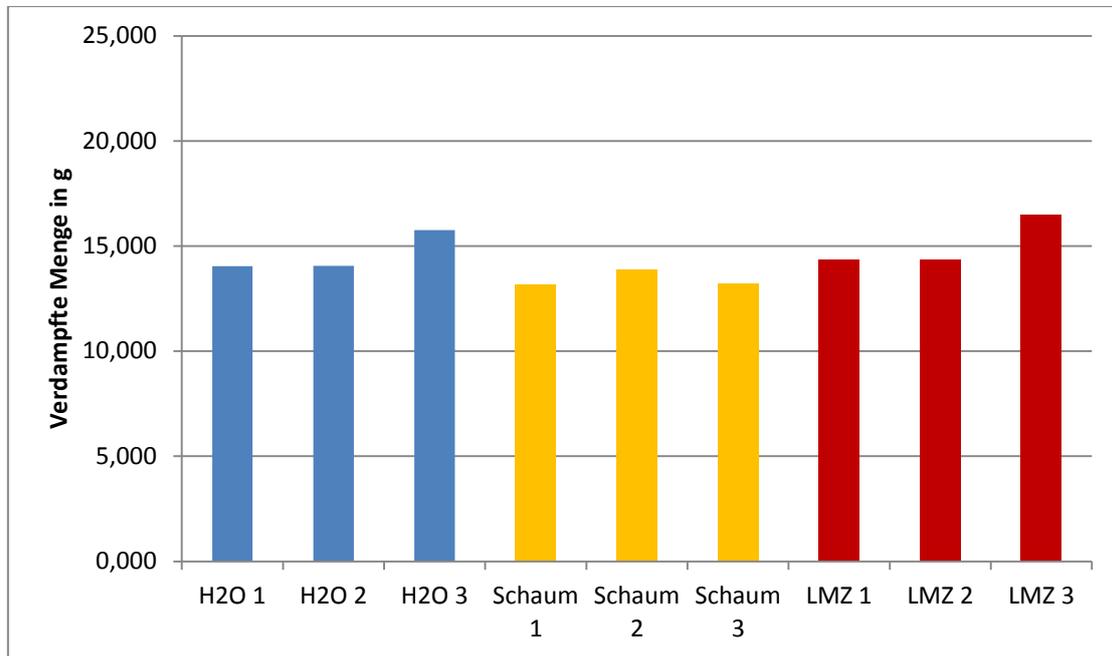


Diagramm 31: verdampfte Masse pro Probe im Versuch 3

## Anhang D: Sprühversuche

Das Diagramm 32 stellt die Massendifferenz (Aufgabevolumen und aufgefangenem Volumen) der warmen Sprühversuche dar.

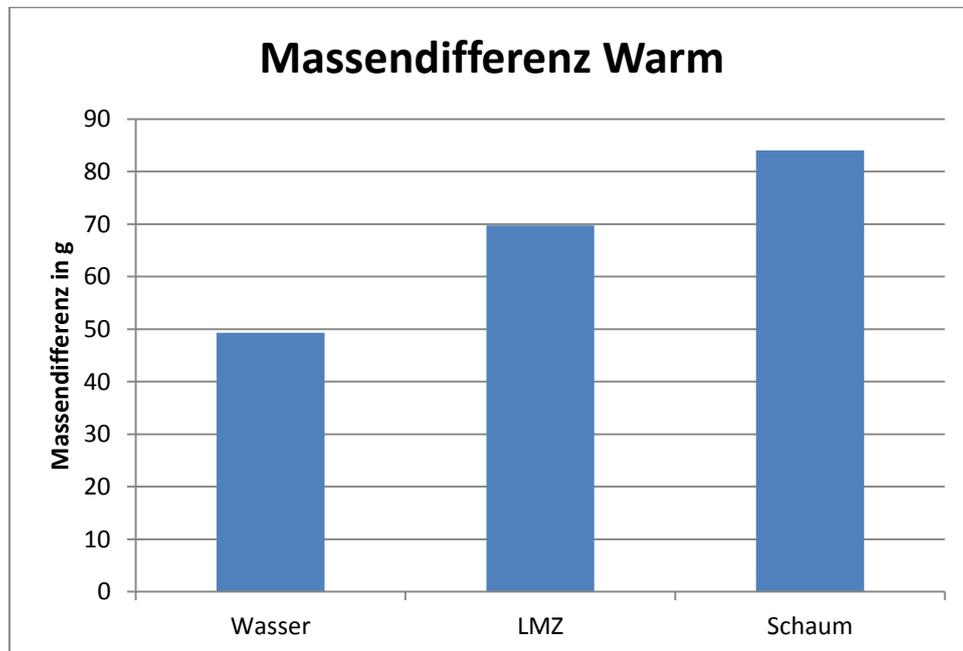


Diagramm 32 Massendifferenz der warmen Sprühversuche

Das Diagramm 33 stellt die Massendifferenz (Aufgabevolumen und aufgefangenem Volumen) der kalten Sprühversuche dar.

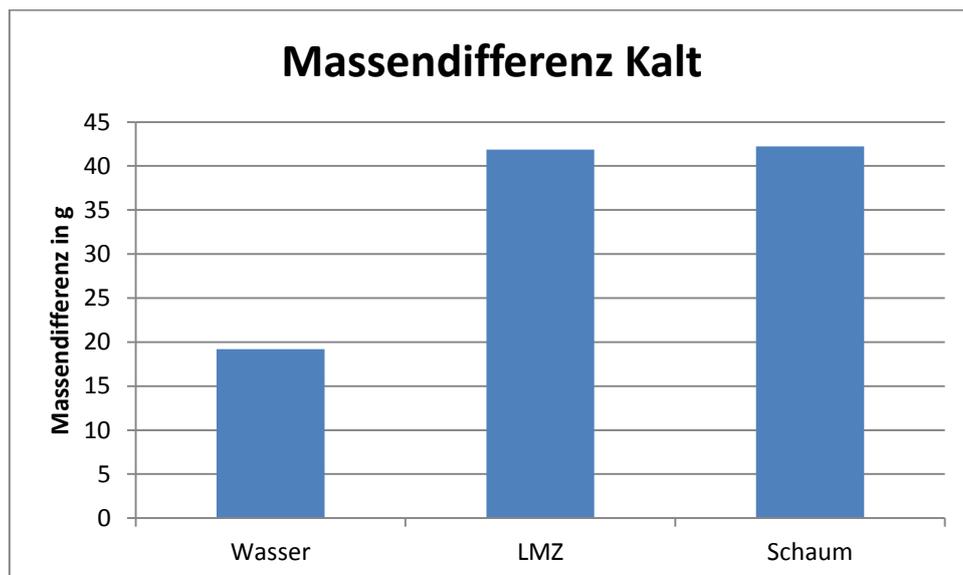


Diagramm 33 Massendifferenz der kalten Sprühversuche

---

## 7 Abkürzungsverzeichnis

|                     |  |
|---------------------|--|
| AFFF                | Aqueous Film Forming Foam (wasserfilmbildendes Schaummittel)     |
| B-Schlauch          | Druckschlauch der Größe B, Innendurchmesser von 75 mm            |
| CMC                 | kritische Mizellenkonzentration                                  |
| C-Schlauch          | Druckschlauch der Größe C, Innendurchmesser von 42 mm oder 52 mm |
| dest. Wasser        | destilliertes Wasser   |
| DIN                 | Deutsches Institut für Normung                                   |
| EN                  | Europäische Norm   |
| h                   | Stunde   |
| HSR                 | Hohlstrahlrohr   |
| ICAO                | International Civil Aviation Organization                        |
| Klasse B-Brände     | Brände von Flüssigkeiten oder flüssig werdenden Stoffen          |
| LMZ                 | Löschmittelzusatz  |
| mbar                | Millibar   |
| min                 | Minute   |
| Nr.                 | Nummer   |
| Oberflächenspannung | entspricht der spezifischen Oberflächenenergie                   |
| OEG                 | obere Explosionsgrenze in vol. %                                 |
| PFOS                | Perfluoroktansulfonsäure   |
| s                   | Sekunde  |
| S.                  | Seite  |
| t                   | Zeit   |
| TL                  | Technische Lieferbedingungen                                     |
| UEG                 | untere Explosionsgrenze in vol. %                                |
| vol.%               | Volumenprozent   |
| z.B.                | zum Beispiel   |

## 8 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1 Einteilung nach Gefahrstoffverordnung.....                              | 10 |
| Abbildung 2 Einteilung nach dem Globally Harmonized System .....                    | 10 |
| Abbildung 3: Ansammlung der Tenside an der Oberfläche.....                          | 14 |
| Abbildung 4: kritische Mizellenkonzentration.....                                   | 15 |
| Abbildung 5: Mizelle .....  | 16 |
| Abbildung 6: Zumischrate (ohne Maßstab) .....                                       | 19 |
| Abbildung 7: Oberflächenspannungen unterschiedlicher Schaumlöschmittel.....         | 22 |
| Abbildung 8: Wasser-Heptan Blindversuch (gefärbt).....                              | 25 |
| Abbildung 9: Wasser-Benzin-Blindversuch.....  | 25 |
| Abbildung 10: LMZ 1 - Heptan nach 28 min.....                                       | 26 |
| Abbildung 11: LMZ 2 - Heptan nach 4 h.....  | 26 |
| Abbildung 12: LMZ 1 - Benzin nach 60 min.....                                       | 27 |
| Abbildung 13: Zusammenhang der sicherheitstechnischen Kenndaten.....                | 28 |
| Abbildung 14: GASMET™ DX4000N FT-IR Gas Analysator Tragbar .....                    | 29 |
| Abbildung 15: Kalibrationsaufbau des FT-IR.....                                     | 30 |
| Abbildung 16: Versuchsaufbau FT-IR zur Bestimmung der Dampfkonzentration .....      | 33 |
| Abbildung 17: Spektrum-Benzin .....   | 36 |
| Abbildung 18: Spektrum des Brennstoff-LMZ-Gemisches 1/5 .....                       | 36 |
| Abbildung 19: Zündung des Dampf-Luft-Gemisches.....                                 | 36 |
| Abbildung 20: Versuchsaufbau Scheidetrichter .....                                  | 38 |
| Abbildung 21: Scheidetrichter Versuch 1 .....                                       | 39 |
| Abbildung 22: Scheidetrichter Versuch 2 .....                                       | 39 |
| Abbildung 23: Scheidetrichterversuche mit reiner Löschmittellösung und Heptan ..... | 39 |
| Abbildung 24: Versuchsaufbau Brandversuche .....                                    | 42 |
| Abbildung 25: 200 m <sup>2</sup> Brandwanne .....                                   | 42 |
| Abbildung 26: Messstrecke Brandversuche .....                                       | 43 |
| Abbildung 27: Proben im Klimaschrank.....   | 52 |
| Abbildung 28 Versuchsanlage der Sprühversuche.....                                  | 54 |
| Abbildung 29 Erhöhte Standzeit des Schaumes auf der metallischen Oberfläche.....    | 56 |
| Abbildung 30: Transformatorbrand .....  | 61 |
| Abbildung 31: Leckgeschlagener Tanklastzug .....                                    | 63 |
| Abbildung 32: Lagertankbrand in Köln .....  | 66 |
| Abbildung 33: Lagertank-Brandbekämpfung .....                                       | 67 |
| Abbildung 34: K100 Tensiometer.....   | 72 |
| Abbildung 35: K100 Tensiometer, eintauchen der Messplatte .....                     | 72 |
| Abbildung 36: 4,5m <sup>2</sup> -Brandwanne.....                                    | 75 |
| Abbildung 37: PFPN 10-1000.....   | 75 |
| Abbildung 38: Durchflussmengenmesser .....  | 76 |
| Abbildung 39: Drucksensor und analoge Druckanzeige.....                             | 76 |
| Abbildung 40: Z2-Zumischer.....   | 77 |
| Abbildung 41: Hohlstrahlrohr .....  | 77 |

## 9 Diagrammverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Diagramm 1: Dampfdruckkurve von n-Heptan .....                                       | 12 |
| Diagramm 2: Kalibrierung Heptan.....   | 31 |
| Diagramm 3: Kalibrierung Benzin .....  | 32 |
| Diagramm 4: Messzeiten bis zum Erreichen der UEG .....                               | 35 |
| Diagramm 5: Mittelwerte der Brennstoff-LMZ-Gemische.....                             | 35 |
| Diagramm 6: Löschzeiten auf Heptan.....  | 45 |
| Diagramm 7: Löschzeiten auf F-34.....  | 48 |
| Diagramm 8: Mittelwerte der verdampften Proben .....                                 | 52 |
| Diagramm 9: Mittelwert der verdampften Masse pro Löschmittel.....                    | 53 |
| Diagramm 10 Massendifferenz der Sprühversuche .....                                  | 55 |
| Diagramm 11: Bestimmung der CMC für den Löschmittelzusatz 1 bei 3 % Zumischung ..... | 73 |
| Diagramm 12: Bestimmung der CMC für den Löschmittelzusatz 2 bei 3 % Zumischung ..... | 73 |
| Diagramm 13: Bestimmung der CMC für den Löschmittelzusatz 3 bei 1 % Zumischung ..... | 74 |
| Diagramm 14: Bestimmung der CMC für das Schaumkonzentrat bei 3 % Zumischung .....    | 74 |
| Diagramm 15: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 H <sub>2</sub> O.....            | 78 |
| Diagramm 16: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 H <sub>2</sub> O.....            | 79 |
| Diagramm 17: Druck- und Durchflussmessung Versuch 3 H <sub>2</sub> O.....            | 80 |
| Diagramm 18: Druck- und Durchflussmessung Versuch 4 H <sub>2</sub> O.....            | 81 |
| Diagramm 19: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 Schaum.....                      | 82 |
| Diagramm 20: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 Schaum.....                      | 83 |
| Diagramm 21: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 LMZ .....                        | 84 |
| Diagramm 22: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 LMZ .....                        | 85 |
| Diagramm 23: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 H <sub>2</sub> O.....            | 86 |
| Diagramm 24: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 H <sub>2</sub> O.....            | 87 |
| Diagramm 25: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 Schaum.....                      | 88 |
| Diagramm 26: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 Schaum.....                      | 89 |
| Diagramm 27: Druck- und Durchflussmessung Versuch 1 LMZ .....                        | 90 |
| Diagramm 28: Druck- und Durchflussmessung Versuch 2 LMZ .....                        | 91 |
| Diagramm 29: verdampfte Masse pro Probe im Versuch 1 .....                           | 92 |
| Diagramm 30: verdampfte Masse pro Probe im Versuch 2 .....                           | 92 |
| Diagramm 31: verdampfte Masse pro Probe im Versuch 3 .....                           | 93 |
| Diagramm 32 Massendifferenz der warmen Sprühversuche .....                           | 94 |
| Diagramm 33 Massendifferenz der kalten Sprühversuche.....                            | 94 |

---

## 10 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Flammpunkte unterschiedlicher Flüssigkeiten..... | 11 |
| Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der LMZ.....         | 19 |
| Tabelle 3: Ergebnisse zur Untersuchung der CMC.....         | 22 |
| Tabelle 4: Verhältnisse brennbare Flüssigkeit - LMZ. ....   | 25 |
| Tabelle 5: Kalibrierung Heptan.....                         | 31 |
| Tabelle 6: Kalibrierung Benzin.....                         | 32 |
| Tabelle 7: Systemverzögerung.....                           | 34 |
| Tabelle 8: Konstanten für Heptan und Kerosin.....           | 41 |
| Tabelle 9: Ergebnisse der Lösversuche auf Heptan.....       | 45 |
| Tabelle 10: Ergebnisse der Lösversuche auf F-34.....        | 48 |
| Tabelle 11: Lösvermögen nach technischen Anforderungen..... | 59 |

## 11 Formelverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Formel 1: Berechnung der Konzentration.....           | 30 |
| Formel 2: Berechnung der Abbrandrate.....             | 41 |
| Formel 3: Berechnung der Abbrandrate für Heptan.....  | 41 |
| Formel 4: Berechnung der Abbrandrate für Kerosin..... | 41 |

## 12 Literaturverzeichnis

---

- [1] **Dr. Seow J.**, „Fire Fighting Foams with Perfluorochemicals - Environmental Review“, 7 June 2013
- [2] DIN-EN 2:2004, Brandklassen
- [3] DIN-EN 1568: 2008, Feuerlösch- Schaummittel
- [4] **ICAO**, Airport Service Manual, Part 1 Rescue and Fire Fighting, 2013
- [5] **Umweltbundesamt**, Ratgeber „Fluorhaltige Schaumlöschmittel Umweltschonend Einsetzen“, Stand Mai 2010
- [6] **U.S. Fire Administration/Technical Report Series**, “Class A Foam for Structural Firefighting”, USFA-TR-083/December 1996
- [7] DIN-EN 2:2004, Brandklassen
- [8] Buncefield Investigation Homepage, Stand 11.10.2014, <http://www.buncefieldinvestigation.gov.uk/index.htm>
- [9] **Berufsfeuerwehr Köln – Amt für Feuerschutz, Rettungsdienst und Bevölkerungsschutz**, „Bericht über den INEOS-Störfall am 17.03 2008“ – V.09-05-15
- [10] **Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie**, Merkblatt Brennbare Flüssigkeiten, BGI/GUV-I 8615, Merkblatt T 053,4/2009
- [11] **Feuerwehr Berlin**, Hinweise zu brennbaren Flüssigkeiten, Stand 10.10.2014, <http://www.berlinerfeuerwehr.de/ihre-sicherheit/praevention/hinweise-zu-brennbaren-fluessigkeiten/?type=98>
- [12] **Feuerwehr Berlin**, Hinweise zu brennbaren Flüssigkeiten, Stand 10.10.2014, <http://www.berlinerfeuerwehr.de/ihre-sicherheit/praevention/hinweise-zu-brennbaren-fluessigkeiten/?type=98>
- [13] **Bender H.**, Das Gefahrstoffhandbuch - Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen nach REACH und GHS, S. 35, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [14] **Sigma-Aldrich Co. LLC.**, Datenblatt Produkt 34873, n-Heptan
- [15] **Suva Gesundheitsschutz**, Sicherheitstechnische Kenngrößen von Flüssigkeiten und Gasen, Ausgabe August 2010, S. 5, 1.4
- [16] **Reed Elsevier Properties SA.**, Datenbank Reaxys, [www.reaxys.com](http://www.reaxys.com)
- [17] **Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung**, TL 9130-0012 Flugturbinenkraftstoff F-34, Ausgabe 9
- [18] **Shell Deutschland Oil GmbH**, Sicherheitsdatenblatt gemäß 91/155/EG JetA-1
- [19] **Pischinger R., Klell M., Sams T.**, Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer Verlag
- [20] **Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung**, Gestis Stoffdatenbank, Benzin, Ottokraftstoff ZVG Nr. 531390, Stand 13.10.2014
- [21] **Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung**, Gestis Stoffdatenbank, Benzin, Ottokraftstoff ZVG Nr. 531390, Stand 13.10.2014
- [22] **Dr. Tuckermann R.**, Vorlesungsskript Grenzflächenchemie Sommersemester 2006
- [23] **Dörfler, Hans-Dieter**: Buch: Grenzflächen und Kolloidchemie, S. 192 ff. S. 209 ff. und S. 223 ff., 1994, Wiley-VCH

- 
- [24] **Dr. Tuckermann R.**, Vorlesungsskript Grenzflächenchemie Sommersemester 2006
- [25] **Rempe, A., Rodewald G.**: Feuerlöschmittel, 7. Auflage aus 2005, S. 33, W. Kohlhammer
- [26] **Kronberg B., Holmberg K. und Lindman B.**, "Surface Chemistry of Surfactants and Polymers", John Wiley & Sons 2014, S. 4
- [27] **BOGDAN Z. DLUGOGORSKI, SATIT PHIYANALINMAT, and ERIC M. KENNEDY**, "Dynamic Surface and Interfacial Tension of AFFF and Fluorine-free Class B Foam Solutions", Process Safety and Environment Protection Research Group, School of Engineering, The University of Newcastle, Callaghan, NSW 2308, AUSTRALIA
- [28] **Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)**, Forschungsbericht Nr. 140, S. 8
- [29] **Rempe, A., Rodewald G.**: Feuerlöschmittel, 7. Auflage aus 2005, S. 35 f., W. Kohlhammer
- [30] **Kronberg B., Holmberg K. und Lindman B.**, "Surface Chemistry of Surfactants and Polymers", John Wiley & Sons 2014
- [31] **Ted H. Schaefer, Bogdan Z. Dlugogorski and Eric M. Kennedy**, "PERFORMANCE CHALLENGES OF FLUORO FREE FOAMS", Process Safety and Environment Protection Group, School of Engineering, The University of Newcastle, AUSTRALIA
- [32] **Bender H.**, Das Gefahrstoffhandbuch, Sicherer Umgang mit Gefahrstoffen nach REACH und GHS, S. 35 ff., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [33] **BASF**, [http://siko.basf-coatings.de/de\\_DE/siko\\_application/D\\_SIKO\\_A\\_Rev1.xml](http://siko.basf-coatings.de/de_DE/siko_application/D_SIKO_A_Rev1.xml) , Stand 17.09.2014
- [34] **Ansyco GmbH**, Bericht Theorie der FT-IR Spektroskopie, [http://www.ft-ir.de/Bericht\\_FTIR\\_Theorie.PDF](http://www.ft-ir.de/Bericht_FTIR_Theorie.PDF) , Stand 17.09.2014
- [35] **Ansyco GmbH**, Bedienungsanleitung ANSYCO SYCOS K-DPG/Nexus 11/09, S. 17
- [36] **NFPA and SFPE**, THE SFPE HANDBOOK OF Fire Protection Engineering Fourth Edition, NFPA No.: HFPE08, Tabelle 3-1.21
- [37] **Rempe, A., Rodewald G.**: Feuerlöschmittel, 7. Auflage aus 2005, S. 59, Tabelle 11, W. Kohlhammer
- [38] **Feuerwehr-Magazin**, Sonderheft "Brandbekämpfung mit Schaum", Auflage 2010, S. 21, Ebner Verlag GmbH & Co. KG
- [39] DIN-EN 1568-3: 2008-06, Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Schwertschaum zum Aufgeben auf nicht-polare (mit Wasser nicht mischbare) Flüssigkeiten, H.2.2, H.3.2
- [40] **ICAO**, Airport Services Manual, Part 1 Rescue and Fire Fighting, Chapter 8. 2013., Fire test method, Performance Level B
- [41] **Berufsfeuerwehr Köln** – Amt für Feuerschutz, Rettungsdienst und Bevölkerungsschutz, „Bericht über den INEOS-Störfall am 17.03 2008“ – V.09-05-15
- [42] Verbandszeitschrift des Bundesverbandes Betrieblicher Brandschutz Werkfeuerwehrverband Deutschland e.V., Ausgabe II/09, S. 22 ff.
- [43] **Krüss GmbH**, <http://www.kruss.de/products/tensiometers/k100/force-tensiometer-k100/> , Stand 18.11.2014