

---

**Bergische Universität Wuppertal**  
**Fachbereich D - Abteilung Sicherheitstechnik**



**Bestimmung von Einflussparametern auf die Fließfähigkeit  
von Feuerlöschschäumen bei gleicher Verschäumungszahl**

**vom**  
**Fachbereich D - Abteilung Sicherheitstechnik**  
**der Bergischen Universität Wuppertal**  
**zur Erlangung des Grades eines**  
**Doktor-Ingenieurs**  
**genehmigte Dissertation**

**vorgelegt von**  
**Michael Staubach, M.Sc.**  
**geboren in Heilbad Heiligenstadt**

**Bergisch Gladbach 2011**

**D468**

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20120706-102427-5

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20120706-102427-5>]

## **Danksagung**

Ich möchte die Gelegenheit nutzen und mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit mit Fachwissen, konstruktiven Anregungen, Ausrüstungsgegenständen für die Durchführung meiner Versuche sowie mit wertvoller Arbeitszeit unterstützt haben. Mein Dank gilt hierzu im Besonderen:

- Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Bernd - Jürgen Vorath, der mir während der letzten Jahre nicht nur im fachlichen Rahmen zur Seite stand. Mit zahlreichen Diskussionen, Anregungen und Ratschlägen konnte ich mir seiner Unterstützung stets bewusst sein.
- Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heudorfer für sein Engagement. Trotz der räumlichen Entfernung stand er mir stets mit Rat und Tat zur Seite und wurde nie müde mich kritisch zu hinterfragen, neu zu inspirieren und zu ermutigen.
- dem Werkstattmeister Herrn Klaus Köhl, der mit viel Engagement, Rat und Tat zahlreiche Arbeitsstunden aufgewendet hat um die vielfältigen Änderungen an den Versuchsaufbauten umzusetzen. Auch Frau Rutter als gute Seele und Technische Zeichnerin des Fachgebietes gilt mein Dank. Ebenso sei allen anderen Mitarbeitern und Kollegen des Fachbereiches an dieser Stelle für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung gedankt.
- allen Freunden und Bekannten, die ich an dieser Stelle nicht einzeln aufzählen kann. Stellvertretend seien hier Steffen Ungelenk und André Nemitz genannt, die stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten und mich durch kreative Ideen in scheinbar schwierigen Situationen unterstützten.
- meiner Freundin Franziska Grotzke nebst ihrer Familie für Ihre liebevolle Unterstützung, ihr Verständnis und den Zuspruch.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Helmut und Gisela Staubach, die mich jederzeit und in jeder Hinsicht unterstützt haben und ohne die mir diese Ausbildung nicht möglich gewesen wäre.

## **Zusammenfassung**

Zur Ermittlung der Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum besteht aktuell keine Möglichkeit. Auch in der Normung wird sie nicht betrachtet. Dabei wurden bereits in frühen Phasen der Schaumentwicklung erste Versuche unternommen diese Eigenschaft zu bewerten, was die Bedeutung auf die Löschwirkung widerspiegelt.

Auf der Grundlage bisher entwickelter Versuchsaufbauten (nahezu ausschließlich im Schwerschaumbereich) wurde daher ein neuer, abgeänderter Teststand entworfen, der einen Vergleich von verschiedenen Schäumen (nachgewiesen an Mittelschaum) zulässt. Damit konnte sogar nachgewiesen werden, dass die Fließfähigkeit nicht, wie allgemein angenommen, mit der Verschäumungszahl und daher dem Flüssigkeitsgehalt zusammenhängt. Fünf Schäume mit nahezu gleicher Verschäumungszahl, jedoch unterschiedlicher Blasenzusammensetzung wurden dazu miteinander verglichen.

Eigens dafür wurde ein Schaumerzeuger (auf der Basis eines bei der RWE-Power AG eingesetzten druckluftunterstützten Gerätes) entwickelt, mit dem es möglich war, durch Austausch der Verschäumungssiebe verschiedenen Schaumstrukturen bei nahezu gleicher Verschäumungszahl zu erreichen.

Die Schäume haben je nach Blasenzusammensetzung ein unterschiedliches Ausbreitungsverhalten. Bei Einsatz der drei kleinen Siebe konnte optisch im Schaum eine charakteristische Blasengröße bei gleichmäßiger Struktur festgestellt werden. Dadurch wurde eine eindeutige Tendenz deutlich. Kleine Blasen (hoher Teilungsgrad und damit stärkerer Blasen zusammenhalt) bewirkten einen steifen Schaum mit schlechtem Ausbreitungsverhalten. Je größer die Blasen wurden, desto besser war auch das Fließverhalten. Bei den zwei grobmaschigen Sieben entstanden jeweils sehr durchmischte Blasenzusammensetzungen, bei denen sich aufgrund der unterschiedlichen Blasengrößen auch die daraus resultierenden Eigenschaften überlagerten. Als Ergebnis wurde die Fließfähigkeit wieder geringer.

Die Methode, Schaumproben auf einer Petrischale einzuscannen und danach anhand eines Rasters auszuzählen, erwies sich als nicht aussagekräftig. Durch die räumliche Struktur des Schaumes kann dieser nicht durch ein zweidimensionales Bild bestimmt werden. Hier besteht weiterer Handlungsbedarf für eine eindeutige Zuordnung.

## **Abstract**

Currently there is no possibility existent to determine the flowability of fire fighting foam. Also it is not being considered in standardization processes. None the less first attempts and test setups to assess this property existed already in the early stages of foam development, this reflects the importance for the extinction effect.

Based on previously developed experimental setups (almost entirely in the field of low expansion foam) a new, modified test setup has now been designed. This one permits a comparison of various foams (proved with medium expansion foam). Hereby it could even be demonstrated that the fluidity, in contrast to general convictions, is connected to the expansion ratio and therefore the liquid content. Five foams with almost the same expansion ratio but different bubble size and composition were compared.

Especially for this purpose a foam generator (based on one used at the RWE-Power AG which works with compressed air) was developed. Due to this it was possible to achieve different foam structures with nearly the same expansion ratio by replacing the foam lattice.

The foams had, depending on the bubble composition, a different propagation behaviour. By using the three small lattice elements, it was possible to visibly observe a characteristic bubble size with nearly uniform structure. Yet, the bubbles showed a clear trend. Small bubbles (high degree of division and thus greater bubble cohesiveness) led to a stiff foam with poor propagation behaviour.

The larger the bubbles were, the better was the flowability. The two coarsely meshed lattice structures produced highly mixed bubble compositions in which, due to the different bubble sizes also the resulting properties were superimposed. As a result, the flowability was lower again.

The method of scanning the foam sample on a petri dish and then enumerating the bubbles by a grid, proved not to be very instructive. Due to the spatial structure of foam, it cannot be determined by a two-dimensional image. It therefore remains a task to be tackled to develop an unambiguous correlation.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Allgemeines zum Schaum .....</b>	<b>4</b>
2.1. Physikalische Schaumeigenschaften/-parameter .....	4
2.2. Phänomenologie des flüssigen Schaumes .....	5
2.3. Möglichkeiten der Schaumentstehung und -erzeugung .....	7
2.4. Schaum im Bereich der Gefahrenabwehr .....	7
<b>3. Feuerlöschschaum .....</b>	<b>9</b>
3.1. Spezifische Parameter und Eigenschaften von Feuerlöschschaum .....	9
3.1.1. Eigenschaften und Parameter des Schaummittels .....	9
3.1.2. Eigenschaften und Parameter von Löschschaum .....	12
3.1.3. Löschwirkungen von Schaum .....	15
3.2. Die historische Entwicklung der Schaumerzeugung .....	16
3.2.1. Die Anfänge des Schaumlöschverfahrens .....	16
3.2.2. Chemischer Schaum .....	16
3.2.3. Das Luftschaumverfahren .....	18
3.2.4. Druckluftschaum .....	19
3.2.5. Hochverschäumter Schaum .....	19
3.3. Die historische Entwicklung der Tests von Schaumparametern .....	21
3.3.1. Tests allgemeiner Schaumeigenschaften und -parameter .....	22
3.3.2. Tests physikalischer Eigenschaften und Parameter von Feuerlöschschaum .....	22
3.3.3. Einordnung von Verschäumungszahl und Fließfähigkeit .....	24
3.4. Einsatzspektrum von Feuerlöschschaum .....	25
3.5. Anforderungen an Feuerlöschschaum .....	27
3.5.1. Anforderungen aus historischer Sicht .....	28
3.5.2. Anforderungen aus derzeitigem Kenntnisstand .....	28
3.5.3. Normative Anforderungen .....	29
3.5.4. Anforderungen und Möglichkeiten der Anwender .....	30
<b>4. Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum .....</b>	<b>34</b>
4.1. Allgemeines zum Fließen .....	34
4.2. Fließverhalten von Schaum .....	34
4.2.1. Schaumströmung in Rohren .....	35
4.2.2. Schaumströmung auf Flächen .....	36
4.2.3. Schaumströmung durch Verengungen .....	38
4.2.4. Kompressibilität, Stabilität und Viskosität .....	38
4.2.5. Fließen als Eindringen und Benetzen .....	39
4.3. Einflussfaktoren auf die Fließfähigkeit .....	40
4.3.1. Luftanteil .....	40
4.3.2. Flüssigkeitsanteil .....	40
4.3.3. Alterung und Lebensdauer .....	40
4.3.4. Zusatzstoffe und Verschmutzungen .....	41
4.3.5. Blasengröße und Blasenverteilung .....	41
4.3.6. Art der Schaumerzeugung .....	41
4.4. Ermittlung der Fließfähigkeit .....	41
4.4.1. Bestimmung der Verschäumungszahl .....	42
4.4.2. Bestimmung der Wasserabscheidung .....	45

4.4.3.	Geräte und Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Fließfähigkeit.....	45
4.4.4.	Vorüberlegungen für Veränderungen und Neuerungen .....	48
<b>5.</b>	<b>Der Schaumerzeuger .....</b>	<b>50</b>
5.1.	Das Basisgerät als Grundlage für die Schaumversuche .....	50
5.1.1.	Aufbau und Funktion .....	51
5.1.2.	Ermittlung des ursprünglichen Leistungsspektrums .....	53
5.1.3.	Anpassung und Vergleich leistungsspezifischer Bauteile.....	57
5.1.4.	Optimierung der Schaumkammer .....	68
5.1.5.	Das Leistungsspektrum nach Optimierung .....	70
5.2.	Das Arbeitsgerät zur Erzeugung der Schaumproben .....	75
5.2.1.	Aufbau .....	75
5.2.2.	Funktion des Schaumerzeugers .....	76
5.2.3.	Verwendete Verschäumungssiebe.....	77
5.2.4.	Parameter während der Schaumerzeugung .....	79
<b>6.</b>	<b>Praktische Versuche .....</b>	<b>80</b>
6.1.	Versuchsaufbau zum Ermitteln der zu bewertenden Schaumparameter .....	80
6.1.1.	Aufbau und Funktion des Schaumerzeugers .....	81
6.1.2.	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Verschäumungszahl .....	81
6.1.3.	Vorgehen zur Bestimmung der Schaumstruktur .....	81
6.1.4.	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wasserhalbzeit .....	82
6.1.5.	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Fließfähigkeit .....	82
6.2.	Bestimmung der Versuchsdaten.....	87
6.2.1.	Grundeinstellung der Versuchsparameter und Vorbereitung der Versuche.....	88
6.2.2.	Bestimmung der Verschäumungszahl .....	91
6.2.3.	Auswertung der Blasengröße und Schaumstruktur .....	92
6.2.4.	Wasserauslauf.....	92
6.2.5.	Bestimmung von Ausbreitungsverhalten und Fließfähigkeit.....	93
6.3.	Betrachtung der Messfehler.....	93
<b>7.</b>	<b>Auswertung .....</b>	<b>96</b>
7.1.	Verschäumungszahlen.....	96
7.2.	Blasenstruktur der erzeugten Schäume .....	97
7.2.1.	Gegenüberstellung der Blasengröße und -verteilung .....	97
7.2.2.	Auswertung der Auszählung .....	102
7.3.	Fließfähigkeit .....	102
7.3.1.	Gegenüberstellung der Ergebnisse und Vergleich der Fließfähigkeiten.....	103
7.3.2.	Einfluss von Sieb und Schaumstruktur auf die Fließfähigkeit.....	105
7.4.	Wasserauslauf.....	107
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>109</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>112</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>118</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>120</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>121</b>

# 1. Einführung

Feuerlöschschaum ist ein Speziallöschmittel, welches Ende des 18. Jahrhunderts aufgrund der Verbreitung der Ölindustrie und den damit aufkommenden Öl- und Petroleumbränden erstmals eingesetzt wurde. Durch die geringe Dichte des Schaumes wird auf brennbaren Flüssigkeiten der Auftrieb gewährleistet (Wasser versinkt ohne einen Löscheffekt), sodass die Löschwirkung durch Abdecken (Ersticken und Kühlen) eintritt. Aber auch bei Feststoffbränden kann der Einsatz von Löschschaum enorme Vorteile haben: Während Wasser zum großen Teil ungenutzt abläuft und somit beispielsweise in Gebäuden hohe Wasserschäden verursachen kann, ist es möglich mit Schaum ganze Räume zu fluten. Durch die enorme Volumenvergrößerung (Luftanteil im Schaum) wird so nur ein Bruchteil des Wassers eingesetzt. Der Schaum wird durch den Kontakt zum Brandherd zersetzt, womit die Kühlwirkung gezielt eintritt. Weiterhin ist die bessere Benetzbarkeit durch das der Flüssigkeit zugemischte Schaummittel bei diversen Bränden von Vorteil.

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Schaum sind sehr vielfältig. Die Einteilung erfolgt bisher lediglich durch die Verschäumungszahl (VZ) als eine wesentliche Kenngröße. Dabei werden drei Bereiche unterschieden: Schwerschaum  $VZ < 20$ , Mittelschaum  $VZ 20 - 200$  und Leichtschaum  $VZ > 200$ . Für eine erfolgreiche und effektive Brandbekämpfung müssen jedoch noch weitere Eigenschaften beachtet werden. Die Beständigkeit von Schaum im Kontakt mit organisch chemischen Flüssigkeiten (z.B. Alkohol, Benzin) erfordert spezielle Schaummittel. Weiterhin sind Wassergehalt und -auslaufgeschwindigkeit von Bedeutung für die Kühlwirkung des Brandgutes. Insbesondere bei trockenen Schäumen könnte bei Feststoffbränden somit das Feuer unter der Schaumdecke unbemerkt weiterbrennen.

Auch die Fließfähigkeit ist eine wichtige Kenngröße. Sie beschreibt das Ausbreitungsverhalten des Schaumes auf einer Brandfläche und liefert dadurch Erkenntnis, wie schnell eine Fläche bedeckt werden kann bzw. wie viele Schaumrohre und in welcher Größe für einen umfangreicheren Brandherd benötigt werden. Die Bedeutung wurde bereits frühzeitig erkannt. Es gelang jedoch bisher nicht einen Versuchsaufbau zu erstellen, der realitätsnahe Ergebnisse liefert. Daher wurde die Fließfähigkeit, beispielweise in der Normung, bisher nicht weiter betrachtet. Diese Tatsache wiederum führt dazu, dass die Anwendungsmöglichkeiten und Leistungsfähigkeit des Löschmittels nicht voll ausgeschöpft werden können.

## **Problemstellung**

Zur Beurteilung der Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum besteht derzeit keine Möglichkeit. Mit verschiedenen Versuchsaufbauten, die in der Vergangenheit erstellt wurden, konnten keine verwertbaren Ergebnisse ermittelt werden. Somit findet das Themengebiet auch in der Normung keine Beachtung. Ebenso war die Entwicklung der Feuerlöschschäume noch nicht so weit fortgeschritten wie aktuell. Die Weiterentwicklung, u.a. der Schaummittel und Apparaturen, erbrachte die Möglichkeit auch höher verschäumbare Schäume zu erzeugen. Durch Ermittlung des Raumgewichts wird die enorme Bandbreite daher in drei Klassen (Schwer-, Mittel- und Leichtschaum) unterteilt. Die bisherigen Versuchsaufbauten und Experimente befassten sich nahezu alle mit Schäumen im Schwertschaumbereich.

Unter Berücksichtigung der bereits entwickelten Versuchsaufbauten und deren Erkenntnissen soll eine neue Apparatur erstellt werden, die eine Bewertung der Fließfähigkeit erlaubt. Die besondere Herausforderung besteht darin, dass hierbei insbesondere ein Vergleich von Mittelschaum ermöglicht werden soll. Durch eine mögliche Gegenüberstellung und dadurch realisierbare Bewertung könnte eine weitere Zuordnung von Schaumeigenschaften zu spezifischen Anwendungen erfolgen.

Aktuell bestehen keine Erkenntnisse, welche Parameter außer dem Wassergehalt noch Einfluss auf das Fließverhalten von Feuerlöschschäumen haben. Verschiedene Schaummittel, Wasserqualitäten, Parameter bei der Schaumerzeugung, Blasengröße und -zusammensetzung könnten beispielsweise mit einem solchen Versuchsaufbau verglichen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Schäume verschiedener Schaumerzeuger und Herstellungsmethoden bei gleicher Verschäumungszahl gegenüberzustellen und die Ergebnisse als Entscheidungshilfe für Auswahl und Beschaffung heranzuziehen.

## Vorgehensweise

Die Erstellung eines Versuchsstandes zur Ermittlung der Fließfähigkeit erforderte den aktuellen Stand der Wissenschaft. Dazu wurden die Information zu bisher genutzten Aufbauten, insbesondere deren Ergebnisse und Erfahrungen bei der Durchführung der Untersuchungen gesammelt und ausgewertet. Durch die Weiterentwicklung und insbesondere die Anforderung, auch höher verschäumten Schaum zu beurteilen, mussten die Erkenntnisse übertragen und die Aufbauten dementsprechend an die Erwartungen angepasst werden. Auf dieser Basis orientierte sich der erste Versuchsaufbau an einem Modell aus den 50er Jahren, welches bereits mehrfach eingesetzt und in den 90er Jahren noch einmal weiterentwickelt wurde. Damit konnten jedoch, zumindest bei hohen Verschäumungszahlen, keine verwertbaren Ergebnisse erzielt werden. Ein erneuter konstruktiver Umbau (siehe Abschnitt 6.1.5), insbesondere des Schaumbehälters, erbrachte Erfolg, sodass bereits optisch Unterschiede im Auslaufverhalten zu erkennen waren.

Eine weitere Grundvoraussetzung für die Anwendung und Übertragbarkeit der erwarteten Erkenntnisse war, einen geeigneten Schaumerzeuger zu entwickeln, mit dem im begrenzten Labormaßstab realitätsnaher Schaum in ausreichend kleinen Mengen hergestellt werden konnte. Als Basis dafür wurde ein mobiler Schaumerzeuger genutzt, wie er bei RWE-Power zum Einsatz kommt. Dieser wurde für die Versuche durch konstruktive Maßnahmen optimiert, um damit die gewünschte Schaumkonsistenz zu erreichen. Durch den Austausch der Schaumsiebe können so mit einem Schaumerzeuger verschiedene Schaumstrukturen unter ansonsten gleichen Randbedingungen realisiert werden. Somit konnten fünf Schäume mit annähernd gleicher Verschäumungszahl, jedoch unterschiedlicher Blasenstruktur auf dem Versuchsaufbau verglichen werden.

Dabei tritt der Schaum, wie in Abschnitt 6.2.5 beschrieben, aus einem Behälter aus und breitet sich über eine ebene Fläche aus. Der zeitliche Verlauf wird von einer Digitalkamera aufgenommen, deren Bildsequenzen später am Computer ausgewertet werden. Durch Ermittlung der vom Schaum bedeckten Fläche je Zeiteinheit, konnte eine Aussage über das Ausbreitungs- und Fließverhalten der fünf unterschiedlichen Schäume getroffen werden.

Um Einflussfaktoren näher bestimmen zu können und ein Bild der Schaumstruktur zu erhalten, wurden zu jedem Durchgang Proben auf einer Petrischale entnommen und eingescannt (siehe Abschnitt 6.1.3). Dabei zeigte sich jedoch, dass diese (zweidimensionale) Möglichkeit noch kein aussagekräftiges Bild der tatsächlichen Blasenzusammensetzung ergibt und durch andere, räumliche Auswertungsmethoden erfolgen muss.

## **2. Allgemeines zum Schaum**

Schaum entsteht auf verschiedene Weisen bei den unterschiedlichsten Verfahren und ist oft Begleiterscheinung bei Prozessen, in denen Flüssigkeiten teilhaben und bewegt werden. Die *DIN 53902 Bestimmung des Schaumvermögens* beinhaltet folgende Definition: „*Schaum ist die Gesamtheit der durch dünne Flüssigkeitslamellen getrennten gasförmigen Zellen, die durch Zusammenlagerung der Blasen gebildet werden.*“ Es gibt aber auch Schäume mit verfestigten (elastischen oder auch harten) Lamellen, wodurch eine nahezu universelle Einsetzbarkeit und ein weit verbreitetes Vorkommen gegeben ist. Es reicht von kosmetischen Zwecken, wie Rasier-, Bade- und Duschschaum, über den Lebensmittelbereich, beispielsweise als Bierschaum, Schlagsahne oder Eischnee, als flüssige Varianten. In fester Form zeigen sogar Kuchen und Brot eine schaumartige Struktur. Weiterhin findet sich Schaum als Polster-, Filter oder Isoliermaterial, zur Stabilisierung oder als Stoßabsorber, zum Abdichten, Verkleben, Verfüllen und vielen weiteren Anwendungen. Als fester Schaum liefern Gasbeton und sogar Metallschaum gute Isolationswerte bei geringem Gewicht und hoher Festigkeit. Auch im Brandschutz findet Schaum in verschiedenen Variationen Anwendung. Von Schaumstoffen für Kabelabschottungen und Wandverschlüsse im vorbeugenden- und baulichen-, bis hin zum Feuerlöschschaum im abwehrenden Brandschutz.

### ***2.1. Physikalische Schaumeigenschaften/-parameter***

Die Zusammensetzung aus zwei völlig unterschiedlichen Medien bewirkt beim Schaum, je nach Anteil und Zusammensetzung, Eigenschaften von enormer Bandbreite. Die Charakterisierung und Bewertung ist daher besonders schwierig.

Die wichtigste Unterscheidung erfolgt über das Raumgewicht. Dabei wird das Volumenverhältnis zwischen Gitterstruktur (Flüssigkeitsanteil) und eingeschlossenem Volumen (Füllgas) bestimmt.

Bei verfestigten, elastischen Schäumen (z.B. Schaumgummi) können die Lamellen aus offenen oder geschlossenen Zellen aufgebaut sein. Durch die Elastizität werden stoßdämmende, polsternde Eigenschaften ermöglicht. Die offenen Strukturen ermöglichen den Einsatz als Filtermedium oder zum Aufnehmen von Flüssigkeiten. Ist der tragende Bestandteil eines Schaumes verfestigt (erstarren einer Schmelze, chemischen Reaktion, etc. ...) sind Gewichtsersparnis und Dämmwirkung für die Anwendung beabsichtigt. So können je nach Struktur, Materialeigenschaften und Volumenanteil der Gitterstruktur

weitergehende Eigenschaften, wie Elastizität, Dämmwirkung, Lebensdauer etc. des Schaumes beeinflusst werden.

## 2.2. Phänomenologie des flüssigen Schaumes

Flüssiger Schaum unterliegt einer stetigen Veränderung seiner physikalischen Struktur und den damit verbundenen Eigenschaften. Als Dispersion von Luft in einer Flüssigkeit in Form von vielen Blasen wird bei der Erzeugung Energie aufgewendet (Einbringen der Luft bewirkt die Vergrößerung der Flüssigkeitsoberfläche) und das Gemisch somit von einem niedrigeren in einen höheren Energiezustand versetzt. Durch das Bestreben, wieder auf das ursprüngliche Niveau zu kommen, zersetzt sich der Schaum in die anfänglichen Bestandteile Luft und Flüssigkeit, wodurch die Energie wieder frei wird. [1]

Dies geschieht durch Drainage (schwerkraftbedingtes Auslaufen der Flüssigkeit über das Kanalsystem der Lamellen siehe Abbildung 2-2, 2-2 und 2-3), Koaleszens (Lamellenzerfall zwischen benachbarten Blasen) und Disproportionierung (Gasdiffusion aufgrund des Druckunterschiedes von kleineren in benachbarte größere Blasen). [3]



Abbildung 2-1 dreidimensionales Netz der Flüssigkeitskanäle [2]

Die Veränderungen führen soweit, dass in einem Schaumvolumen aufgrund der räumlichen

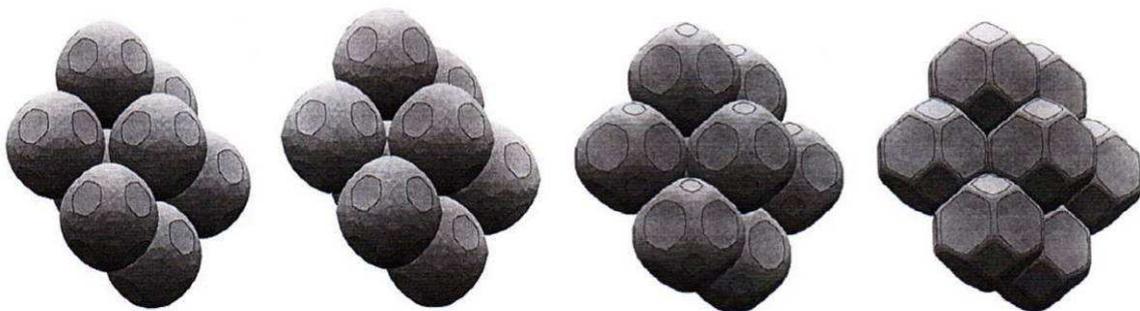


Abbildung 2-2 Verformung von Schaumblasen durch Auslaufen der Flüssigkeit (Drainage) [2]

Die Bilder zeigen die Veränderungen im Schaum, die beim Auslaufen der Flüssigkeit stattfinden. Von links nach rechts nimmt die Dicke der Flüssigkeitskanäle ab. Dadurch werden die Berührungsflächen der Blasen größer, sodass sie sich allmählich von Kugeln zu Polyedern umformen. Dabei wird zwar der Zusammenhalt stärker, die Stabilität nimmt aber ab, da die Struktur schwächer wird.

Inhomogenität der Blasengrößen und Wandstärken unterschiedliche Schaumkonsistenzen und Eigenschaften vorliegen können.

So ändert sich der Wassergehalt schwerkraftbedingt. Abhängig von der Höhe der Schaumschicht und abgelaufener Zeit kann im oberen Bereich ein trockener Polyederschaum und weiter unten ein nasser Kugelschaum, ja sogar die Ursprungsflüssigkeit entstehen.

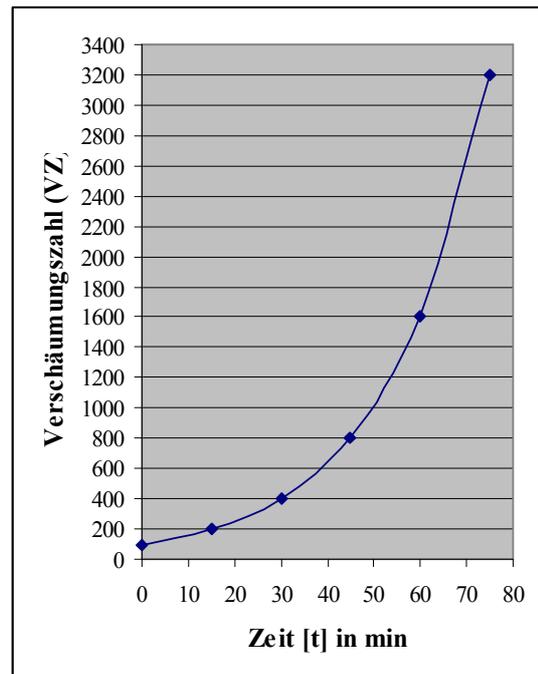
Weiterhin kommt es durch die oben angesprochenen Blasenumbildungen (Koaleszenz und Disproportionierung) zu Veränderungen in der Blasenstruktur. Dies wird

durch ein ungleichmäßiges Blasenbild begünstigt, da in verschiedenen großen Blasen unterschiedliche Innendrucke herrschen. Der Innendruck wird durch die Oberflächenspannung der Schaummittellösung hervorgerufen, hängt jedoch vom Blasendurchmesser ab. Umso kleiner dieser ist, um so größer ist der Druck, es ergibt sich ein umgekehrt proportionales Verhältnis. Somit werden größere Blasen zu Lasten der benachbarten kleineren aufgeblasen. [5, 6]

Dadurch verschiebt sich das Verhältnis der Blasenstruktur immer weiter, wodurch der Schaum empfindlicher wird und leichter zerfällt.

Eine weitere Besonderheit, die den Ausschlag für die vorliegende Arbeit gegeben hat, stellt die Möglichkeit von Schaum dar, gleiche Verschäumungszahlen bei unterschiedlicher Blasenstruktur bilden zu können. So kann ein Schaum aus gleichmäßigen kleinen, großen bzw. mehr oder weniger durchmischten Blasen bestehen (siehe Abschnitt 6.2.3). Die Zusammensetzung hat dann Auswirkungen auf den Teilungsgrad und damit die Kanal- und Wandstärken. Dies beeinflusst wiederum den Zusammenhalt und die damit verbundenen Eigenschaften, u.a. die in Abschnitt 6.2.5 untersuchten Auswirkungen auf Ausbreitungsverhalten und Fließfähigkeit.

Aufgrund seiner Zusammensetzung und der beschriebenen Morphologie besitzt Schaum spezifische Eigenschaften, die je nach Zeit und Betrachtungsweise sowohl dynamisch als auch statisch sein können. Die Beurteilung und Einstufung ist folglich nicht einfach, zumal



**Abbildung 2-3 Zeitliche Abhängigkeit der VZ bei ruhendem Schaum nach [4]**

die Beurteilungsmethoden selbst eher statischer Natur sind und somit nur ein gewisses Spektrum zu dem betrachteten Zeitpunkt wiedergeben können.

### ***2.3. Möglichkeiten der Schaumentstehung und -erzeugung***

Schäume können durch chemische Reaktionen, plötzlichen Druckabfall in Flüssigkeiten mit darin gebundenem Gas oder durch heftige Bewegungen an der Flüssigkeitsoberfläche (z.B. Begasen, Befüll- bzw. Rührvorgänge) entstehen. Dabei reißt die Flüssigkeit als kontinuierliche Phase durch die entstehenden Scher- oder Zugkräfte auf und das Gas kann eindringen. [7] Bei diesen Beispielen wird jedoch nur ein Teil der Flüssigkeit zu Schaum umgewandelt. Dieser lagert sich dann auf der Oberfläche an und ist in den meisten Fällen ungewollt oder sogar störend.

In der Lebensmittelindustrie sorgen u.a. Rühr- und Scher-, aber auch biologische Vorgänge (Hefe, Gehrung,...) für die Einbringung von Gas in ein umgebendes (flüssiges oder teigiges) Medium.

Andere Verfahren, bei denen große Mengen an Schaum erzeugt werden können und bei denen die Schaumproduktion gewollt ist, sind gezieltes Einleiten eines Gases in eine Flüssigkeit oder deren turbulente Vermischung (mechanisches Schlagen, Rühren bzw. Mixen). Eine weitere Möglichkeit besteht durch gleichzeitiges Vermengen von Flüssigkeit und Gas in einem Schaumerzeuger oder Besprühen eines Siebes bei selbstansaugender oder erzwungener Luftzufuhr, wie es u.a. in Feuerwehr-Schaumerzeugern zur Anwendung kommt. Auch hier wird die Flüssigkeit aufgerissen, um die Luft in Blasen einzuschließen.

### ***2.4. Schaum im Bereich der Gefahrenabwehr***

Im Bereich der Gefahrenabwehr ist Schaum im Allgemeinen nicht allein gleichzusetzen mit Feuerlöschschaum. Es ergeben sich noch weitere Einsatzmöglichkeiten. So, wie das Schaummittel dem Wasserstrom zugemischt wird, können der Flüssigkeit noch weitere Wirkstoffe zugesetzt werden, sodass die verschiedenen Eigenschaften des Schaumes auch anderweitig ausgenutzt werden können. Es können beispielsweise Reinigungs-, Desinfektions- und Dekontaminationsmittel im Schaum eingebracht werden. Wenn dann Konzentration und Schaumlebensdauer bekannt sind, kann das Einsatzobjekt über einen definierten Zeitraum mit den Wirkstoffen in Verbindung gebracht werden. [8, 9]

Im Bereich des Baulichen Brandschutzes können Kabeldurchführungen und Wanddurchbrüche mit nichtbrennbaren Schotts aus Spezialschaum verschlossen werden. [10]

Die Gewichtsreduzierung lässt Schaum auf Flüssigkeiten schwimmen, wodurch im Schadensfall eine effektive Brandbekämpfung oder die Abdeckung von niedrigsiedenden Flüssigkeiten als Verdampfungsminderung bzw. Freisetzungverzögerung möglich ist.

Durch das vergrößerte Volumen und die Schaumstruktur wird die Effizienz bspw. beim Bekämpfen von Waldbränden besonders gut und kann so u.a. in Gebieten mit geringem Wasservorkommen ausgenutzt werden. Weitere Eigenschaften mit den zugehörigen Anwendungsbeispielen zeigt Tabelle 2-1.

**Tabelle 2-1 Eigenschaften und Anwendungsbeispiele von Schaum in der Gefahrenabwehr**

<b>Eigenschaften</b>	<b>Anwendungsbeispiele</b>
Trennen von Brandstoff und Sauerstoff	- Generell Schaumdecke (beim Löschen fester und flüssiger Stoffe)
Bedecken als Schaumteppich	- Wie oben (trennen von Brand und Sauerstoff) - Abdecken von Flüssigkeitslachen (Verhinderung des Ausgasens und damit von Bildung explosiver Atmosphären) - Desinfektion - Dekontamination
Verdrängung von Luft (-sauerstoff)	- Fluten von Räumen
Benetzung/Bedeckung in Kombination mit längerer Verweildauer	- Reinigung - Desinfektion - Dekontamination - Schutz vor Strahlung/Isolation
Volumenvergrößerung (und damit Gewichtsreduzierung)	- Flüssigkeitsbrände (Aufschwimmen) - Effektivitätssteigerung (im Vergleich zur eingesetzten Flüssigkeit) z.B. bei Waldbrandbekämpfung - Baumaterialien wie Gasbeton und Metallschäume - Durch Anhaften kein ungenutztes Abfließen, wie bei Löschwasser
Auslaufen der Flüssigkeit	- Gezielte Kühlung/Benetzung des abgedeckten Mediums

### **3. Feuerlöschschaum**

Wie schon in den vorherigen Abschnitten angesprochen, ist Feuerlöschschaum eine Dispersion aus Luft in einer Schaummittellösung, die aufgrund der Zusammensetzung verbesserte Löscheigenschaften für diverse Brandeinsätze, insbesondere für Flüssigkeitsbrände liefert. Schaum selbst ist kein einheitlich definierbares Löschmittel. In Abhängigkeit von Zusatzstoffen, Erzeugung, Löschgerät und Umgebungsbedingungen variieren die physikalischen und chemischen Eigenschaften und damit auch die Löscheffekte. Durch genaue Kenntnis der Zusammenhänge und Beeinflussungsmöglichkeiten kann der Anwender auf unterschiedliche Phänomene reagieren und wenn nötig gegensteuern.

#### ***3.1. Spezifische Parameter und Eigenschaften von Feuerlöschschaum***

Neben den oben erwähnten allgemeinen Schaumeigenschaften werden zur Bestimmung und Beurteilung von Feuerlöschschaum spezifische Parameter verwendet. Allerdings ist deren Anzahl enorm groß und die Auffassungen über die Art und Bedeutung der aussagekräftigen Schaumkenngrößen gehen weit auseinander. Ein Schaum kann folglich nicht exakt anhand einzelner weniger Eigenschaften bestimmt werden. Jedoch wird Feuerlöschschaum, wie in Abschnitt 3.1.2 dargestellt, über die Verschäumungszahl als wesentliche Kenngröße beurteilt. Um einen umfassenden Überblick zu schaffen, erfolgt eine erste Voreinteilung durch die Trennung zwischen Parametern des Schaummittels und denen des Schaumes. Der Schaum wird zwar zum Teil von den Schaummittelkenngrößen mit beeinflusst, kann aber abhängig vom eingesetzten Schaummittel jeweils zugeordnet und unterschieden werden. So wird im Folgenden das chemische und physikalische Verhalten der Konzentrate und verdünnten Lösungen unabhängig von den Verschäumungs- und Qualitätseigenschaften des Schaumes selbst betrachtet.

##### **3.1.1. Eigenschaften und Parameter des Schaummittels**

Da die Einbringung von Schaummittel erst eine stabile Verschäumung ermöglicht und ein Teil der Schaumeigenschaften auf Parameter des verwendeten Schaummittels zurückzuführen ist, werden hier zuerst Kenngrößen aufgezählt, die sich vornehmlich auf das Schaummittel beziehen.

- Viskosität

Die Viskosität beschreibt die Zähflüssigkeit des Schaummittels und ist wichtig für eine gleichbleibende Ansaugung. Die Zumischtechnik muss genau angepasst sein und wird bei Venturizumischern über den Unterdruck realisiert. Abweichungen der Viskosität haben folglich Einfluss auf Ansaugmenge und damit Zumischrate. [11]

- Wasserstoffindex/pH-Wert

Ein abfallender pH-Wert ist Hinweis für Qualitätsminderung, ein sich andeutendes Haltbarkeitsende des Schaummittels bzw. eine Verminderung der Löschleistung. [11]

- Korrosionsverhalten

Anfang der 50er Jahre wurden von *Scheichel* in [12] explizite Anforderungen gestellt. Die heute gängigen Schaummittel sind zwar nicht mehr so aggressiv, allerdings sollten alle Armaturen (und insbesondere Pumpen, wenn die Lösungen durch sie gefördert wurden) nach Gebrauch aufgrund der entfettenden und korrosiven Eigenschaften gründlich gespült werden. Die Verringerung der Oberflächenspannung lässt die Lösung auch in kleinste Zwischenräume und Risse eindringen. Durch die zusätzliche Auflösung des Schmierfilms besteht somit bei Nichtbeachten Korrosionsgefahr.

Beim Lagern von Schaummittel stellt das Verhalten gegenüber verschiedenen, auch nicht metallischen Werkstoffen, kein Problem dar.

- Toxizität und Umweltbeeinflussung

Die physiologische Wirkung von Schaummittel wird von den Herstellern getestet und die entsprechenden Warnhinweise auf der Verpackung abgebildet. Die meisten Schaummittel sind als wassergefährdender Stoff eingestuft. Weiterhin bestehen reizende und entfettende Eigenschaften bei Kontakt mit der Haut. [11]

Auch die Umweltverträglichkeit wird kontrolliert und immer wieder verbessert, um Umweltgifte wie bspw. florierte Kohlenwasserstoffe zu entfernen oder zu ersetzen, sodass einige Schaummittel mittlerweile zu 100% biologisch abbaubar sind.

- Verdünnbarkeit

Alle gängigen Schaummittel lassen sich von ihrer Eigenschaft her sehr gut mit Wasser verdünnen. Allerdings wird durch Abbauprozesse, insbesondere bei biologisch verträglichen Schaummitteln die Haltbarkeit stark eingeschränkt, sodass verdünnte Lösungen möglichst schnell verbraucht werden sollten. Ansonsten müssten regelmäßig bzw. vor einem Einsatz die

Qualität und insbesondere die Schaumfähigkeit überprüft werden, was mit Mitteln der Feuerwehr nicht zu realisieren ist. [4]

- **Verträglichkeit**

Mischbarkeit mit **anderen Schaummitteln** sollte streng vermieden werden (lediglich bei Mehrbereichschaummittel auf Tensidbasis ist keine Reaktion zu erwarten). Ein Gemisch aus Proteinschaummittel untereinander oder mit Mehrbereichschaummittel darf keinesfalls erfolgen, da es zu Verklumpungen und damit zum Ausfall der Schaumgeräte führen kann. [11] Für Kontakt mit **Säuren, Basen** und insbesondere mit **Alkohol** existieren spezielle Konzentrate, die eine Zerstörung des Schaumes unterbinden.

**Löschpulver** zeigt bei gleichzeitigem Einsatz mit Schaum meist eine (mechanische) zerstörende Wirkung. Es muss folglich vor einem Einsatz die Verträglichkeit (Herstellerangaben) überprüft werden. [11]

- **Stockpunkt und Gefrierpunkt**

Stock- und Gefrierpunkt zeigen wichtige Punkte der Frostbeständigkeit auf. Dies wirkt sich vorher durch eine erhöhte Viskosität und schlechtere Ansaugbarkeit aus. Ist ein Schaummittel laut Hersteller beispielsweise bis  $-15^{\circ}$  Celsius frostbeständig, so muss es sich bis dahin auch noch ohne Probleme ansaugen lassen. Frostbeständigkeit wird in der Praxis ganz einfach durch Zugabe von Frostschutzmitteln erreicht. Ein eingefrorenes und wieder aufgetautes Schaummittel sollte keine Qualitätsverluste zeigen. [11]

- **Zusatzmenge**

Die zuzumischende Schaummittelmenge hängt einerseits vom verwendeten Schaummittel, dessen Konzentration und weiterhin vom Anwendungszweck (Netzmittel, Schaum) ab. Sie kann einen wesentlichen Einfluss auf die Schaumstabilität haben. Der Schaummittelanteil kann von 0,1 bis 6 % variieren und wird vom Hersteller vorgegeben. [13]

- **Verschäumungszahl / Schaumdichte und Wasserhalbzeit**

Diese drei Eigenschaften betreffen eigentlich eher den Schaum und sind daher auch im Abschnitt 3.1.2 genau erläutert. Allerdings ist auch der Einfluss des verwendeten Schaummittels ausschlaggebend, sodass bei Verwendung eines anderen Typs oder Herstellers auch hier andere Ergebnisse zu erwarten sind und daher eine Abhängigkeit beachtet werden sollte.

- Weitere Schaummittelkenngrößen

Es existieren noch wesentlich mehr Kenngrößen, die allerdings aus aktuellem Standpunkt keine übergeordnete Bedeutung bzw. wesentlichen Einfluss auf die Verschäumung und den Schaum selbst haben:

- Haltbarkeit: siehe Herstellerangaben auf der Verpackung
- Verträglichkeit anderer Wasserinhaltsstoffe beispielsweise: Salz- bzw. Kalkgehalt

### 3.1.2. Eigenschaften und Parameter von Löschschaum

Die im Folgenden betrachteten Kenngrößen beziehen sich auf Verschäumungs- und Qualitätseigenschaften des Schaumes selbst. Allerdings sind nur für einen Teil - im Allgemeinen als wichtigste Parameter angesehen - vorgegebene einheitliche Methoden zur Bestimmung und Beurteilung vorgesehen.

- Löschintensität

Die Löschintensität bezeichnet den Volumenstrom an Schaummittellösung (Wasser-Schaummittelgemisch), der zum Löschen von 1 m<sup>2</sup> Brandfläche benötigt wird. Sie wird in

$I_{(lösch)} = \frac{l}{\text{min} * m^2}$  angegeben. Durch Versuche zur Bestimmung dieser Kennzahl konnte ein

Zusammenhang zwischen Löschintensität und der benötigten Löschzeit nachgewiesen werden. Eine Steigerung verkürzt die Löschzeit, bei Verringerung kann es dazu kommen, dass die beim Brand freiwerdende Wärme nicht mehr gebunden werden kann und der Löscherfolg ausbleibt. [4, 14]

Aus dieser Kennzahl entstanden die Mindestapplikationsraten, die u.a. in Normen als Berechnungsgrundlage für ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen herangezogen wurden.

- Spezifisches Schaumgewicht/Verschäumungszahl

Diese beiden Kennzahlen geben das Volumenverhältnis zwischen Flüssigkeits- (Wasser/Schaummittel-Lösung) und Schaummenge an. Die Verschäumungszahl gibt an, um welchen Anteil sich das Volumen der Lösung beim Verschäumen durch Lufteinbringung vergrößert hat. [15] Die Ermittlung und Berechnung werden in den Abschnitten 4.4.1 und 6.1.2 genauer erläutert.

Nach der Verschäumungszahl wird der Schaum in drei Klassen: Schwer-, Mittel- und Leichtschaum eingeteilt (siehe Abschnitt 3.4 Einsatzspektrum von Feuerlöschschaum). Der Kehrwert ist die Schaumdichte. [16]

- Schaumstabilität/Wasserhalbzeit

Die Wasserhalbzeit (WHZ) bezeichnet die Zeit, in der die Hälfte der im Schaum gebundenen Flüssigkeit wieder ausgeschieden wird. Die Ausscheidung erfolgt über schwerkraftbedingte Drainage in den Schaumlamellen und –zwischenräumen, wobei sich das Volumen zunächst kaum verringert. Sie ist ein Maß für die Beständigkeit des Schaumes. [13, 15] Das Vorgehen zur experimentellen Ermittlung wird in Abschnitt 4.4.2 näher beschrieben. Die Form der Behälter sowie ihre Durchmesser, die Art der Einführung des Schaumes aber vor allem die Höhe der Schaumschicht beeinflussen die Wasserhalbzeit. Exakte vergleichbare Werte können also nur ermittelt werden, wenn bei der Bestimmung gleiche Methoden vereinbart werden. [17]

- Feuerfestigkeit/Abbrandwiderstand und Durchbruchfestigkeit

Der Abbrandwiderstand gibt die Beständigkeit des Schaumes gegenüber Flammeneinwirkung und direkter oder indirekter Wärmestrahlung an. Demzufolge müssen die Zerstörungsraten berücksichtigt werden, die durch direkte Flammenberührung, erhitzte Behälterwandungen, Strahlungswärme, brennende Flüssigkeiten usw. einwirken. Da diese Vorgänge eine Verdunstung der Schaumflüssigkeit bewirken, die wiederum entscheidend zum Löschen beiträgt, erfordert dies Berücksichtigung und genaue Betrachtung.

Durch die Durchbruchfestigkeit wird die Fähigkeit des Schaumes beschrieben, das Durchdringen brennbaren Gase zu verhindern. Der Test erfolgt nach Auftragen der Schaumdecke (auf einer brennbaren Flüssigkeit) mit einer Fackel bzw. elektrisch erzeugten Funken. [16]

In der DIN – Reihe 1568 (Teile 1-4) wird dazu die 1 % Rückbrandzeit ermittelt. Hierfür wird eine brennende Wanne (nach vorgeschriebener Vorgehensweise) gelöscht. An der Seite der Brandwanne ist ein brennendes Rückbrandgefäß eingehängt. Der Zeitraum, bis ständig Flammen auf der Schaumdecke erscheinen gilt als 1 % Rückbrandzeit. [18, 19, 20, 21]

- Fließfähigkeit

Die Fließfähigkeit ist die Eigenschaft, die das Abdeckverhalten des Schaumes für eine brennende Fläche (insbesondere von brennenden Flüssigkeiten) beschreibt. Sie ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, bisher jedoch nicht experimentell bestimmbar. Da sehr große Überschneidungen mit der Haftfähigkeit bestehen (ein Schaum kann sowohl fließ-, als auch haftfähig sein), kommt es insbesondere bei kleineren Laborversuchen zu überschneidenden Wechselwirkungen, sodass bisher kein realistischer Zusammenhang zu Großversuchen feststellbar war und der Begriff auch nicht in der Normung aufgenommen

wurde. [13, 15, 16] In Abschnitt 4 wird noch genauer auf die Vorgänge beim Fließen Bezug genommen.

- Haftfähigkeit

Durch die Haftfähigkeit wird die Eigenschaft eines Schaumes beschrieben, an senkrechten oder schrägen Flächen einen stabilen Schaumfilm (vorbeugend zum Schutz und aktiv bei brennenden Objekten) zu bilden. Wie bei der Fließfähigkeit wirken viele Parameter gleichzeitig ein, sodass eine experimentelle Bewertung und normative Bestimmung bisher nicht erfolgt. [16]

- Wärmeleitfähigkeit

Auch die Wärmeleitfähigkeit hat viele Abhängigkeiten von bzw. Beziehungen zu anderen Kenngrößen und kann daher nur schwer vergleich- und reproduzierbar bestimmt werden. Sie trifft eine Aussage über die Dämmwirkung der bedeckten Flächen vor direkter oder indirekter Wärmestrahlung. Schon von *Scheichl* wurde sie in [12] als wichtig beschrieben, konnte aber bis heute keinen Einzug in die Bewertung durch Normen finden. [12]

- Elektrische Leitfähigkeit

Wie bei den vorangestellten Eigenschaften hat auch die elektrische Leitfähigkeit viele Einflüsse und Abhängigkeiten. Diese sind vor allem: die chemische Zusammensetzung (Ionengehalt) der Schaummittel/Wasser-Lösung, der Wassergehalt, der wiederum von Ausgangsverschäumung (Schaumgerät, Druck, Wasser- bzw. Luftverunreinigung), Alter und damit Zersetzungsgrad des Schaumes, Durchmischung, etc. abhängt und viele weitere Faktoren.

Andererseits dürften laut *Scheichl* die Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Luftschäumen verschiedener Herkunft nicht allzu groß sein. Die größte Gefahr geht jedoch von der austretenden Flüssigkeit durch den Zerfall des Schaumes aus, da diese die größte Leitfähigkeit besitzt und unter dem Schaum und damit also für den Betroffenen nicht sichtbar ist. [12]

- Beständigkeit gegen schaumzerstörende Agenzien

Der Beständigkeit des Schaumes gegen verschiedene aggressive Stoffe wird durch spezielle Schaummittel entgegengewirkt und ist daher auch in Abschnitt 3.1.1 Eigenschaften und Parameter des Schaummittels erklärt. Allerdings wird die Beständigkeit auch durch den Zustand des Schaumes, vor allem durch die Verschäumungszahl und Blasengröße beeinflusst. [11]

Einige dieser Eigenschaften sind keine unabhängigen Größen. Sie beeinflussen sich gegenseitig und hängen beim Löschen auch stark von Brandgeschehen ab.

### **3.1.3. Löschwirkungen von Schaum**

Die Löschwirkung von Schaum beruht auf mehreren ineinander übergehenden Effekten und kann aufgrund der sich ändernden Schaumstruktur nicht genau voneinander abgegrenzt werden. [4] Die Hauptwirkungen beruhen, je nach Wassergehalt, auf Ersticken und Abkühlen, wobei ein Schwerschaum aufgrund des hohen Wassergehalts eine größere Kühlwirkung erreicht als ein Mittel- oder sogar Leichtschaum. [13, 15]

Beim Löschen von Flüssigkeiten oder festen Stoffen wird eine Trennschicht gebildet, die eine weitere Zufuhr von brennbaren Gasen und Dämpfen unterdrückt und den Luftsauerstoff abhält. Gleichzeitig wird durch die kühlende Wirkung der Dampfdruck der Flüssigkeit herabgesetzt. Zusätzlich isoliert der Schaumteppich gegen die Wärmestrahlung der Flammen und reflektiert bzw. absorbiert die Energie, die dann nicht mehr zur Brandbeschleunigung beitragen kann.

Für feste, vor allem glutbildende Brandstoffe ist die Kühlwirkung entscheidend. Diese beruht auf den Gesetzmäßigkeiten des Temperatenausgleiches beim Berühren und Verdampfen des Schaumes mit der Brandoberfläche. Umso höher die Wärmekapazität (Wassergehalt) des Schaumes ist, desto effektiver ist die Kühlwirkung. Diese wird durch die Entwässerung des Schaumes stetig fortgesetzt. (Dadurch kann die Löschwirkung des Schaumes im Vergleich zum Wasser wiederum vergrößert werden, da Wasser zu einem großen Teil ungenutzt abläuft und nur ein kleiner Teil zum Löschen und Abkühlen beitragen kann.)

Durch die Wärmestrahlung verdampft das im Schaum enthaltene Wasser, sodass bei Konzentrationen ab ca. 35 Vol. - % die Unterbrechung der Verbrennungsreaktion durch Inertisierung erreicht wird.

In geschlossenen Räumen (Produktionshallen, Schiffen, Kellern,...) kann durch Fluten die Verdrängung vom Luftsauerstoff eine Brandausbreitung verhindern. Hier treten die bisher erläuterten Löschwirkungen in den Hintergrund, sodass statt Wassergehalt das Schaumvolumen und damit ein hoher Luftanteil und damit hohe Verschäumungszahlen erforderlich sind. [4]

## ***3.2. Die historische Entwicklung der Schaumerzeugung***

### **3.2.1. Die Anfänge des Schaumlöschverfahrens**

Die Ursprünge des Schaumlöschverfahrens reichen bis ins Jahr 1877 zurück. Am 9. Februar erhielt *John Henry Johnson* das britische Patent Nr. 560 mit dem Titel „Apparatus for Extinguishing Fire“. Darin wird erläutert, dass durch die Erfindung mit kleinen Löschmengen ein großer Löscherfolg erzielt werden kann. Durch die chemische Reaktion beim Mischen und Verwirbeln von Lösungen (Glycerinschwefelsäure, Natriumcarbonat, Aluminiumsulfat und Silikaten) wird das Löschgas Kohlendioxyd gebildet. Ein gleichzeitiges Beifügen seifenartiger Produkte – erwähnt werden bereits Saponine und Eiweiße – erhält man eine Komposition von schaumiger Beschaffenheit und geringem Volumengewicht, welche auf der Oberfläche von Petroleum schwimmen konnte. Die Mischung wurde durch Schläuche an den Brandherd herangebracht und mit einer Sprühdüse großflächig verteilt.

Da offenbar zu der damaligen Zeit noch geeignete Brandobjekte fehlten (die Entwicklung des Kraftwagens war noch nicht soweit fortgeschritten und die Verwendung und Lagerung von entsprechenden Treibstoffen hatte noch nicht die spätere Bedeutung erlangt), geriet diese Erfindung vorerst in Vergessenheit. [22]

Um die Jahrhundertwende zeigte sich dann, welche ungeheure und mit den bisherigen Löschmitteln nicht beherrschbare Energiefreisetzung in dem noch so neuen und geheimnisvollen „Petroleum“ versteckt lag. [23]

Eine weitere Patentschrift aus dem Jahre 1903 beschreibt einen Apparat zur Herstellung blasenartigen Löschmittels, nach der Entwicklung von *Elmer Gates*. Das Ziel dabei war, unbrennbare Gase sicher auf die Brandfläche zu bringen. Auch wenn nicht explizit das Wort Schaum fällt, wird stattdessen von „bubbles“ (= Blasen) gesprochen. Das System zeigt ohnehin alle Merkmale eines Schaumerzeugers ähnlich dem Prinzip noch heute verwendeter Luftschaum – Handfeuerlöscher. Dabei werden unter Druck gesetzte Löschgase in eine schleimige Flüssigkeit geleitet. Dadurch kann Gates als Erfinder der mechanischen Schaumbildung – nicht jedoch des Luftschaumes benannt werden. Leider liegen keine Daten über die Nutzenanwendung dieses Löschergerätes vor. [23]

### **3.2.2. Chemischer Schaum**

*Alexandre Laurent*, dem sicherlich die Erfindungen der beiden Vorgenannten nicht unbekannt waren, setzte dieses Wissen in die Praxis um. Er hielt am 01.12.1904 einen Vortrag über die Ergebnisse von Löscherversuchen, bei denen erfolgreich größere Brände auf den Ölfeldern von Baku mit Schaum gelöscht wurden.

Er verstand es, die bisher nur im Kleinen demonstrierten Beispiele umzusetzen und entwickelte daraus brauchbare apparative Lösungen. Laurent erhielt dafür das Deutsche Reichspatent Nr. 210332 vom 17.06.1906, was ab 1907 durch die Perfect GmbH, Berlin in den Perkeo-Schaumfeuerlöschern umgesetzt wurde. [23]

In Fachkreisen wurde der neue Löscher vorerst nicht akzeptiert. Nachdem allerdings größere Tanks in Flammen standen und man mit bisherigen Methoden machtlos zusehen musste, beschäftigte man sich eingehender mit dem Perkeo-Gießapparat. So fanden bereits 1910 erste größere Löschversuche in Hamburg mit ortsfesten Löschanlagen nach dem Schaumlöschsystem „Perkeo-Salzkotten“ statt. Der Erfolg sprach für sich und so begann die verstärkte Entwicklung von Schaumlöschgeräten. [23]

Die Apparate erfuhren in den folgenden Jahren mancherlei Wandel. Bereits 1911 gab es die erste fahrbare „Schaum-Feuerlöschanlage für Dauerbetrieb“ in Hamburg. Dem folgte 1914 der „Stankö-Apparat“ der Wiener Ingenieure Johann Stanzig, Rudolf König und Josef Rosenthal mit dem Deutschen Reichspatent Nr. 300074 vom 11.07.1914. Hier wurden die Chemikalien trocken mitgeführt und erst durch das Löschwasser aufgelöst.

Nach dem ersten Weltkrieg gab es noch weitere Entwicklungen wie den „Schaummörser“ für Feuerwehren oder ortsfeste Zweiflüssigkeits- bzw. Zweipulver-Anlagen, die in Mineralölbetrieben eingesetzt wurden. Der Minimax-Einkammergenerator und das Einheitspulver waren 1927 die letzten Entwicklungen der chemischen Schaumerzeugung. [24] Damit war nun, nach den teilweise recht komplizierten Zwischenstufen, ein einfaches System entwickelt, mit dem Schaum in großen Mengen erzeugt werden konnte und womit ein Löscherfolg nahezu garantiert war.

Problematisch waren allerdings die anfallenden Kosten, sowohl für das benötigte Schaummittel, aber insbesondere die Anschaffung der technischen Ausstattung, stellte die Feuerwehren vor immense Probleme.

Es waren also nunmehr keine technischen Probleme, sondern finanzielle Entscheidungen, die nach neuen Wegen und Lösungen suchen ließen.

### 3.2.3. Das Luftschaumverfahren<sup>1</sup>

Bereits 1923 hatte *Clemens Wagner* in der Patentschrift Nr. 521973 vorgeschlagen, eine Schaummittellösung durch eine offene Strahlluftpumpe zu leiten, um dabei die für die Schaumbildung nötige Luft selbst anzusaugen. Dieser revolutionäre Vorschlag – bisher meinte man ein Lösch- oder Stickgas (i.d.R. CO<sub>2</sub>) als Füllgas zum Löschen zu benötigen – stieß allerdings auf erhebliche Probleme. Das damals als gängiges Schaummittel verwendete Saponin ließ sich nur schlecht mit dieser Methode verschäumen. [23]



Abbildung 3-1 Feuerwehrmann mit Luftschaumrohr [25]

Als 1927 der „Aero-Schaum“ von Dresden aus propagiert wurde, stieß dieser bei den Feuerwehren auf wenig Akzeptanz. Bei dem Verfahren wird mittels Auspuffgasen ein Schaum aus einer Schaumbildner enthaltenden Flüssigkeit erzeugt. Laut Hersteller sollten damit die Schaumkosten auf 5-10% des bisherigen Preises sinken. [23]

Es war *Wilhelm Friedrich*, der die Idee von *Clemens Wagner* - den Strahlapparat weiter zu verwenden - wieder aufgriff und von 1926 bis 1932 das Kometrohr entwickelte. [26] Seine Patentschrift Nr. 631477 „Luftschamerzeuger für Feuerlöschzwecke“ vom 14. 12. 1932 gehört damit zusammen mit dem nahezu ein Jahrzehnt älteren Patent von Wagner zu den Pionierpatenten im Feuer- schutzwesen der Welt.

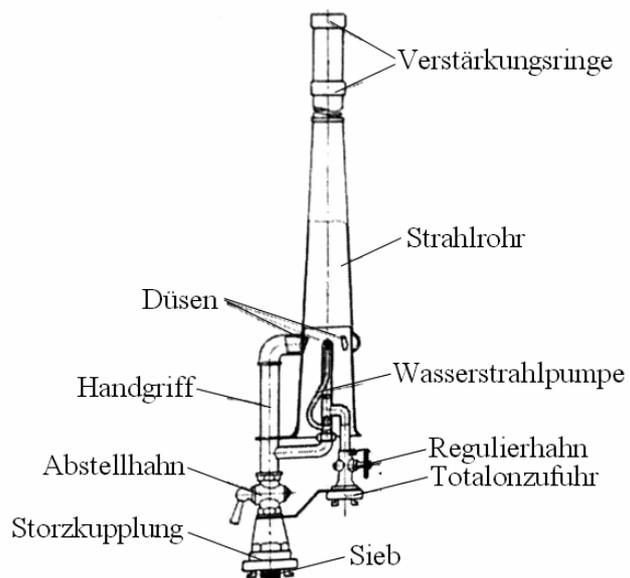


Abbildung 3-2 Darstellung des Kometrohres nach Friedrich, W. [26]

<sup>1</sup> Anmerkung: Der im folgenden Abschnitt beschriebene Luftschaum bezieht sich ausschließlich auf die zum damaligen Zeitpunkt entwicklungstechnisch mögliche Qualität „Schwerschaum“

### **3.2.4. Druckluftschäum**

Parallel zur Entwicklung des Dresdener „Aero-Schaumes“ beschäftigte sich in Dänemark der Brandinspektor *Einer Schroeder* mit neuen Ideen zur Schaumerzeugung. Er entwickelte – inspiriert durch das Schaumschlagen bei der allmorgendlichen Nassrasur – zusammen mit seinem Studienfreund *Jan Schoeheyder van Deurs* eine Maschine, bestehend aus Kreiselpumpe, Kompressor und einem rotierenden Peitschenorgan. Dies war der erste im Feuerwehrdienst brauchbare und vor allem auch benutzte Luftschäumzeuger. Im Aggregat wurde zunächst eine Dispersion von Luft in der Schaummittel-Wasser-Lösung gebildet. Im Schlauch entstand durch Entspannung ein sehr feinblasiger Luftschäum. Durch die geringe Menge, die an Schaummittel nötig war, entstand damit Löschschäum für zur damaligen Zeit konkurrenzlos niedrige Kosten. [27,28]

In den späten 30er Jahren wurde von Flader bereits eine Tragkraftspritze mit angeflanschem Kompressor hergestellt. [29]

Durch den Ausbruch des zweiten Weltkrieges und die in der Zwischenzeit erfolgte Entwicklung des Kometrohres wurde Abstand von den technisch aufwendigeren Druckluftschäumgeräten genommen. Anschaffungs- und Betriebskosten sowie Liefermenge und Betriebssicherheit waren nun nicht mehr mit dem einfachen Kometrohr zu vergleichen.

Nach dem Krieg entdeckt die US-Navy die Vorteile von Druckluftschäum. 1944 wurde die erste Serie von CAFS-Aggregaten (CAFS=compressed-air-foam-system; engl. für Druckluftschäumsystem) der Firma Hale zur effektiven Brandbekämpfung auf Flugzeugträgern und Schiffen eingesetzt. [29]

In den 70er Jahren wurden in ländlichen Gebieten von Texas kleine CAFS-Fahrzeuge zur Verbesserung des desolaten Brandschutzes, insbesondere bei der Buschbrandbekämpfung erfolgreich eingesetzt. Die Verbreitung verlief aber nur sehr zögerlich, da die Technik noch sehr komplex war und viel Erfahrung und gut geschultes Personal erforderte.

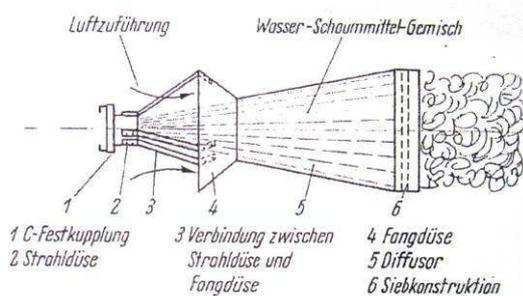
In den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde durch technisch hoch entwickelte Steuerungen ein weiterer Aufschwung der Druckluftschäumaggregate vorangetrieben.

### **3.2.5. Hochverschäumter Schäum**

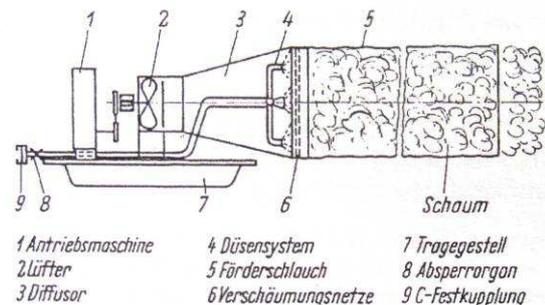
Als Weiterentwicklung des Kometrohr-Luftschäumverfahrens ist der sogenannte hochverschäumte Schäum anzusehen. Die Grundlage dafür bot allerdings erst eine Verbesserung des Schaummittels. Während für den bis dahin niedrigverschäumten Schwerschäum hauptsächlich Eiweißschäummittel eingesetzt wurden, sind die nun entwickelten Schäumbildner auf Netzmittelbasis aufgebaut.

Das Verfahren selbst wurde 1956 in England als sogenanntes „Schaumpfropfenverfahren“ zur Brandbekämpfung im Bergbau über Tage entwickelt und später auch in den USA bei verschiedenen Bränden getestet. Dabei wurden Netze gespannt und diese dann mit einer Schaummittellösung bespritzt und einem Luftstrom ausgesetzt.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu den genauen physikalischen und chemischen Grundlagen, die 1962/63 in der Sowjetunion erfolgten, erbrachten eine Reihe neuer Erkenntnisse und Zusammenhänge. Daraus entstanden neue Schaumrohre und -aggregate. So wurden Mittelschaumrohre für den Bereich von VZ 20 – 200 und Leichtschaumerzeuger für Verschäumungszahlen von  $> 200$  gebaut. [1]



**Abbildung 3-3** Skizze eines Mittelschaumrohres nach [30]



**Abbildung 3-4** Skizze eines Leichtschaumaggregates nach [30]

Während bei den Mittelschaumrohren die Luft, ähnlich wie beim Kometrohr, noch selbstständig durch den Wasserstrom angesaugt wird, muss für eine höhere Verschäumung ein maschineller Luftstrom erzeugt werden, sodass hier geeignete Gebläse erforderlich sind.

- Das Prinzip der Schaumbildung bei hochverschäumtem Luftschaum

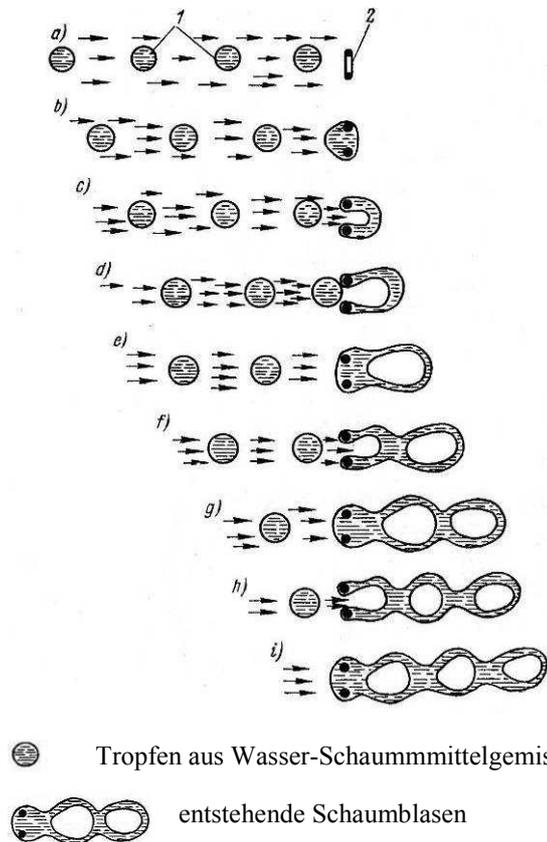
Da der für die Versuche genutzte Schaumerzeuger Mittelschaum und damit hochverschäumten Schaum erzeugt, wird im Folgenden auf das Prinzip der Schaumentstehung im Gerät selbst Bezug genommen. Grundsätzlich läuft die Schaumbildung in allen Geräten und Apparaturen zur Luftschaumerzeugung für hochverschäumten Schaum einheitlich ab. Abbildung 3-5 stellt den Vorgang in den Schritten a) bis i) wie folgt dar:

- a) wird das Wasser-Schaummittelgemisch in der Verschäumungskammer durch eine Düse zerstäubt auf ein Sieb gesprüht. Zeitgleich strömt Luft hinzu (selbstständig angesaugt oder unter Druck zugeführt).
- b) Die Flüssigkeit benetzt die Maschen des Siebes und bildet dort eine Membran.
- c) Diese wird vom Luftstrom verformt und ausgebeult, wodurch eine (noch geöffnete) Blase entsteht.
- d) Luft und Tropfen strömen weiter auf die Maschen zu.

e) Die Blase wird von den weiterhin eintreffenden Tropfen verschlossen.

f) – g) der Tropfen, der die vorige Blase verschlossen hat, wird auf die gleiche Weise verformt und bildet eine weitere Blase.

h) - i) Der Vorgang wiederholt sich nun, bis Luft- oder Flüssigkeitsströmung gestoppt werden oder so stark verändert werden, dass die Bedingungen zur Schaumentstehung nicht mehr gegeben sind.



**Abbildung 3-5 Entstehung von Blasen an einem benetzten Schaumsieb [31]**

Der beschriebene Entstehungsprozess der Blasenbildung läuft parallel auf der gesamten Fläche des benetzten Siebes ab, sodass die Blasen insgesamt einen gleichmäßigen Schaum bilden. Da der Luftstrom durch die von den Tropfen verschlossenen Maschen ausgebremst wird, entsteht vor dem Sieb ein Druckaufbau. Die Druckdifferenz vor und hinter dem Sieb verformt die jeweiligen Tropfen bzw. die daraus entstehenden Membranen, womit wie oben beschrieben, Blasen entstehen. [31]

### 3.3. Die historische Entwicklung der Tests von Schaumparametern

Die Erforschung der Schaumeigenschaften und Festlegung von entsprechenden Kriterien zur Schaumbewertung begann zeitlich versetzt zur Schaumentwicklung. Durch eine qualitative Hinterfragung von Parametern war es einerseits möglich eine Bewertung (Schaummittel, Verfahren bzw. Geräte) vorzunehmen, andererseits konnten hierdurch Fehler aufgedeckt und Verbesserungen vorangetrieben werden. Auf diese Weise entstand in der Folgezeit allmählich das noch heute genutzte und genormte Bewertungssystem. [12]

Die überaus hohe Anzahl und Bandbreite von inhärenten Eigenschaften macht es sehr schwer einen Schaum exakt zu charakterisieren. Hinzu kommt, dass die meisten Schaumeigenschaften einer ständigen dynamischen Veränderung unterliegen, da das disperse Gemisch aus Schaummittellösung und Luft bestrebt ist, wieder in den Ursprungszustand zu gelangen (siehe Abschnitt 2.2 Phänomenologie des flüssigen Schaumes). Durch Drainage, Koaleszens und Disproportionierung [3] wird die Struktur langsam zerstört und die

Flüssigkeit setzt sich wieder – der Schwerkraft folgend – am Boden ab. Die Vorgänge bilden dadurch ein komplexes dynamisches System und sind mit bisherigen, meist statischen Methoden, nicht aussagekräftig zu beschreiben.

### **3.3.1. Tests allgemeiner Schaumeigenschaften und -parameter**

Bereits 1925 veröffentlichten *Oswald* und *Steiner* einen Beitrag in der Kolloid-Zeitschrift über Versuche, bei denen sie ein quantitatives Maß für die Schaumbeständigkeit ermittelten. Dabei wurden allerdings keine seifenartigen Schaumbildner verwendet, sondern Humussäuresolen, die als leicht schäumende Substanzen bekannt waren. Die Flüssigkeit wurde durch Zugabe von Wasser, Natronlauge bzw. Salzsäure auf unterschiedliche pH-Werte gebracht, in einen Messzylinder mit Glasstopfen gefüllt und möglichst gleichmäßig geschüttelt. Nach dem Schütteln wurden die Grenzen „Flüssigkeit - Schaum“ und „Schaum - Luft“ abgelesen und deren zeitliche Veränderung beobachtet, so wie auch heute noch die Schaumstabilität durch ermitteln der Wasserhalbzeit beurteilt wird. Weiterhin maßen sie mit einem Membranometer die quantitative Häutchenbildung (den Grundvorgang der Schaumbildung) und stellten einen direkten Zusammenhang mit den zuvor erstellten Schaumkurven fest. [32]

*Hoffmann* und *Peter* (1941) ermittelten die Verschäumbarkeit bzw. die Abhängigkeit der Schaumhöhe von der Zeit. Sie drückten dazu durch Kapillaren Luft in mit Schaummittellösung gefüllte, möglichst gleich dimensionierte Reagenzgläser. Dabei stieg die Schaumhöhe zuerst linear an, bis sich eine konstante Höhe einstellte. An diesem Punkt zerfallen die Blasen in der gleichen Geschwindigkeit wie neue entstehen. Die Versuche wurden mit unterschiedlicher Temperatur und Blasengröße durchgeführt, wobei die Schaumhöhe als Parameter der Lebensdauer ermittelt wurde. Die erhaltenen Werte wurden in ein Diagramm übertragen. Anhand der daraus entstehenden Kurve kann die Lebensdauer dargestellt werden. Da sich die Ergebnisse als unabhängig zum verwendeten Kapillardurchmesser zeigten, ergab dies also eine von der Apparatur unabhängige Größe. [12]

### **3.3.2. Tests physikalischer Eigenschaften und Parameter von Feuerlöschschaum**

1941 und 1943 wurden von Fachleuten des Feuerschutzdienstes Laboratoriumsmethoden zum Testen von Schaumparametern diskutiert. Unter anderem wurde hier auch über Fließfähigkeit, Durchbruchwiderstand gegen Gase und Feuerfestigkeit gesprochen. Es wurden allerdings nur die Kenngrößen Verschäumungszahl, spezifisches Schaumgewicht und Wasserhalbzeit definiert. Diese fanden von da an Einzug in das deutsche, ja sogar teilweise ausländische Schrifttum.

Die Veröffentlichung „Prüfung von Luftschaum und Luftschaumerzeugern“ von *Brunswig* (1942) war von grundlegender Bedeutung. Er untersuchte und beschrieb Messmethoden und -ergebnisse zu Kälteverhalten, Fließfähigkeit und Zumischung hinsichtlich des Schaummittels. In Bezug auf Schaum betrachtete er dabei die Wechselbeziehung zwischen Verschäumung und spezifischem Schaumgewicht, Schaumfließfähigkeit und Beständigkeit in der Kälte, sowie den Abbrandwiderstand.

Nach *Brunswig* reichen aber für laufende Betriebsprüfungen und zur Beurteilung der Schaumgüte die Parameter spezifisches Schaumgewicht und Wasserhalbwertszeit aus. Diese Einschätzung wird bis heute in Fachkreisen geteilt.

Die experimentell gut fundierte Arbeit von *Amsel* „Die Beurteilung von Schäumen zur Bekämpfung von Mineralölbränden“ in Öl und Kohle (1942) bezieht sich auf weitere Parameter. *Amsel* legt allerdings sein Augenmerk mehr auf die Prüfung des Schaumverhaltens in der Hitze. Er betrachtet die Löschschäume bezüglich ihrer Hitzebeständigkeit, Fließfähigkeit und Schaumzahl. Als Resultat fasst er die ermittelten Ergebnisse zu einem Schaumindex zusammen, mit dem die unterschiedlichen Schäume bewertet werden können. [12, 33] Auch in Amerika erscheint 1945 und in einem Nachtrag aus 1947 die *Joint Army-Navy-Specification JAN-C-266*, in der ebenfalls Anforderungen an Luftschaummittel und Luftschaum gestellt werden. [12]

Eine weitere Arbeit wird 1947 von *Clark* veröffentlicht. Seine Idee ist anhand von Großversuchen den Wert eines Schaumes quantitativ zu bestimmen und parallel dazu im Labormaßstab die physikalischen Schaumeigenschaften herauszufinden. Dabei definiert er eine „Schaumwertziffer“ („*figure of merit*“) als Verhältnis, der auf ein Benzinfeuer aufgegebenen und in der gleichen Zeit zerfallenen Schaummenge. Allerdings kann damit nur eine grobe Abschätzung getroffen werden. Die für die Bewertung wichtigsten Untersuchungen sind Abbrandwiderstand, Verschäumung und Widerstand gegen Benzin. Weiterhin misst *Clark* noch die Grenzflächenspannung und -viskosität des Schaummittels als fundamentale physikalische Größen[12]

Zwischenzeitlich gibt es mehrfach Vorstöße, auch andere Parameter zu bewerten bzw. einen Überblick über die verschiedenen Verfahren zu gewinnen, z.B. die Veröffentlichung von *Schleichl* in der *VFdB Zeitschrift* 1 (1952). [12], worin er einen ausführlichen Überblick über sämtliche Verfahren zur Bestimmung von Schaumparametern erstellt.

Die bis hierher beschriebenen Betrachtungen beziehen sich alle auf die nach heutigem Verständnis gesehene Schaumqualität, Schwerschaum (Schaum mit einer Verschäumungszahl  $< 20$ ). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bis zu diesem Zeitpunkt

Schaumgewicht und Wasserhalbwertszeit als maßgebliche Parameter zur Bestimmung der Schaumqualität genügen.

Die Weiterentwicklung der Luftschaumerzeuger in den sechziger Jahren ermöglicht es hochverschäumten Schaum (als Mittelschaum VZ 20 - 200 und Leichtschaum VZ > 200) zu erzeugen. Hierzu werden noch einige Vorstöße, vor allem von *Pleiß* und *Kretzschmar* (und weiteren Koautoren) gemacht, die u.a. Versuche zur Standzeit vorgemischter Schaumbildnerlösungen [34], Schnellbestimmung der Verschäumungszahl [36], Fließfähigkeit auf festem Untergrund [37], Entwässerung unter Einwirkung von verschiedenen Dämpfen [38], Rauch und Wärmeeinfluss [39] und Großlöschversuche mit Schwer-, Mittel- und Leichtschaum [41] unternahmen und die Ergebnisse publizieren. Auch in diversen weiteren Fachbeiträgen [14, 35, 40, 42, 43, 44] zeigen die beiden Autoren Präsenz. Die Erkenntnisse haben jedoch keine Auswirkungen und die Beurteilung der Schaumparameter erfolgt weiterhin nach den zuvor festgelegten Methoden. Auch aktuell werden Verschäumungszahl, Wasserauslauf (Wasserhalbwertszeit) und Löschvermögen als Bewertungskriterien in der DIN EN 1568 Reihe (Teile 1-4) für den erzeugten Schaum herangezogen und die dazu benötigten Testapparaturen und -methoden beschrieben.

Für den ab 1990 verstärkt aufkommenden Druckluftschaum wurden bisher keine Bewertungskriterien erstellt. Hier kann lediglich auf die Aussagen der Hersteller bzw. auf das subjektive Empfinden der Nutzer Bezug genommen werden, was allerdings kritisch zu hinterfragen ist.

### **3.3.3. Einordnung von Verschäumungszahl und Fließfähigkeit**

Wie die Entwicklung der Tests von Schaumparametern zeigt, bestand zumindest am Anfang der Entwicklung die Meinung, dass die Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum eine wesentliche Eigenschaft zu dessen Beurteilung ist. Allerdings sind die verschiedenen Versuche zur Charakterisierung nie zu einem anwendbaren Ergebnis gekommen, sodass bisher keine geeignete, anerkannte Laborprüfmethode existiert.

Als Konsequenz daraus hat sich mittlerweile bei vielen Anwendern die Meinung gebildet, dass die Fließfähigkeit mit dem Wassergehalt des Schaumes in Verbindung gebracht wird. Die allgemein verbreitete Ansicht darüber ist, dass die Fähigkeit des Schaumes sich fortzubewegen mit steigender Verschäumungszahl stetig abnimmt. Dass darauf noch weitere Parameter Einfluss ausüben, ist zwar bekannt, wird aber als nicht relevant genug angenommen um dies zu betrachten. Ohnehin ist der Wert messtechnisch nur sehr schwer zu erfassen.

Es gibt zwar in der Fachliteratur die genannten Versuchsaufbauten (siehe Abschnitt 4.4.3 Geräte und Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Fließfähigkeit), die allerdings weder für den Anwender selbst geeignet sind, noch in Laboren bzw. Normungs- und Prüfinstitutionen Fuß gefasst haben. Hinzu kommt, dass die beschriebenen Verfahren für Schwertschaum angedacht waren und damit eine geeignete Beurteilung insbesondere von Mittel- und Leichtschaum schlecht zu realisieren ist. *Pleß, Kretschmar und Steinbach* machen zwar auch Versuche mit hochverschäumten Schaum [37], allerdings nur in Realmaßstab (siehe 4.4.3). Bei Versuchen zur Schaumfließfähigkeit in Kabelkanälen werden von *Kretschmar* Entfernungen für Einspeiseöffnungen vorgegeben[43]. Dies zeigt zumindest das Bewusstsein der Problematik auf.

### 3.4. Einsatzspektrum von Feuerlöschschaum

Neben den im Allgemeinen Abschnitt erklärten Einsatzmöglichkeiten von Feuerlöschschaum kann man noch genauere Felder spezifizieren. Dazu wird der Schaum in drei Klassen eingeteilt: Schwer-, Mittel- u. Leichtschaum. Die dazu vorgenommene Klassifizierung hängt einerseits von der Verschäumungszahl und andererseits vom erzeugten Gerät ab.

**Tabelle 3-1 Einteilung der Verschäumungszahlen und Zuordnung von Schaumgeräten**

Schaumart	VZ	Schaumgeräte		
Schwertschaum	< 20	Schwertschaumrohr	(umschaltbares)	Druckluftschaum
Mittelschaum	20-200	Mittelschaumrohr	Kombi-Strahlrohr	Flexi-Foam-System
Leichtschaum	> 200	Leichtschaumgenerator		

Das Einsatzgebiet, in dem **Schwertschaum** zum Tragen kommt, ist der klassische Anwendungsfall - Flüssigkeitsbrände in größerem Ausmaß (Tanklager, Schiffe,...). Hierbei wird der relativ hohe Flüssigkeitsanteil einerseits für die Kühlwirkung und andererseits zum Erreichen einer besseren Wurfweite benötigt. Der eingebrachte Luftanteil verringert die Masse, sodass der Schaum auf der zu löschenden Flüssigkeit eine schwimmende Deckschicht bilden kann, um diese vom Luftsauerstoff zu trennen. (Bei Schiffsbränden wirkt die Gewichtsersparnis weiterhin der Kentergefahr entgegen.) Aber auch feste glutbildende Brandstoffe können durch die hohe Kühlwirkung des Schwertschaumes effektiv abgelöscht werden. [11, 13, 15]

**Mittelschaum** eignet sich für ähnliche Einsatzgebiete wie Schwertschaum, da auch die Löschwirkung ähnlich ist. (Die primäre Kühlwirkung ist aufgrund des geringeren Wassergehaltes niedriger, doch durch die größere Zerstörungsrate beim Auftreffen und Verdampfen wird dies wieder relativiert.) Allerdings ist der Einsatz nur bei kleineren Brandobjekten möglich und sinnvoll. Aufgrund der geringeren Wurfweite müssen die Einsatzkräfte näher an den Brandherd gelangen. Weiterhin wird durch die weitaus größere

Wärmestrahlung und den damit verbundenen thermischen Auftrieb ein effektiver Einsatz bei ausgedehnten Brandherden fraglich. Dafür können durch die höheren Verschäumungszahlen und die damit verbundene geringere Dichte des Schaumes Schaumschichten aufgebaut werden, sodass es möglich ist aus der Fläche hervorragende Brandobjekte (Fässer, Tankwagen, etc.) wesentlich besser einzuschäumen. Auch können Räume (Kanäle, Keller, Filter, etc.) geflutet werden. [11, 13, 15] Ein weiteres Einsatzfeld bilden Dekontamination und Desinfektion – die längere Verweildauer und der hohe Luftanteil ermöglichen ein gezieltes Auftragen. Auch zum Niederschlagen von Dämpfen und Stäuben ist Mittelschaum gut geeignet.

Das Einsatzspektrum von **Leichtschaum** begrenzt sich nahezu auf das Fluten von abgeschlossenen Räumen. Daher sind die Geräte auch meist als ortsfeste Raumflutungsanlagen ausgeführt. Die Löschwirkung beruht aufgrund des geringen Wassergehalts bei gleichzeitig enormem Volumen auf Erstickung des Brandes. (Als großer Vorteil ist hier zu erwähnen, dass durch den geringen Flüssigkeitsgehalt nach dem Einsatz keine erwähnenswerten Wasserschäden zu verzeichnen sind.) Wenn es die Wetterlage zulässt (keine meteorologische Starkwindsituation), kann Leichtschaum auch im Freien – hier insbesondere zur Schutzschneisenbildung bei Waldbränden eingesetzt werden. Die dazu benötigten Sonderaggregate werden von Feuerwehren in gefährdeten Gebieten (siehe Abbildung 3-6) extra vorgehalten.

Es werden auch **Schaumlöschgeräte mit variablen Verschäumungszahlen** auf dem Markt angeboten. Diese gewährleisten eine Variationsmöglichkeit im Vergleich zu den fest eingestellten Normgeräten. Beim



Abbildung 3-6 IFA W 50 mit Leichtschaumaggregat [16]



Abbildung 3-7 umschaltbares Kombinationsstrahlrohr [45]



Abbildung 3-8 Flexi Foam System [46]

Kombinations-schaumrohr (siehe Abbildung 3-7) kann zwischen Schwer- und Mittelschaum umgeschaltet werden. Wie der Name schon sagt, sind hier zwei Strahlrohre in einem vereinheitlicht. [11]

Eine weitere Möglichkeit bietet das „Flexi Foam“ System - vom Prinzip aufgebaut wie ein Leichtschaumgenerator. Hier sind allerdings Schaum- und Luftstromerzeuger räumlich getrennt. Der sogenannte Schaumkopf wird direkt an der Einsatzstelle aufgebaut bzw. an einer Drehleiter verbaut und so an den Brandherd herangeführt.

Die Luft wird vom Generator abseits des Brandes angesaugt und über Lutten zum Schaumkopf geleitet, wodurch keine Brandgase angesaugt werden. Durch Variation von Durchfluss und Lüfterdrehzahl kann nun Einfluss auf den Schaum genommen werden, sodass laut Hersteller, je nach Gerätevariation, Verschäumungszahlen von 50 bis 500 erreichbar sind. [11]

Als Sondergebiet des Luftschäumens ist **Druckluftschäum** (oder auch als CAFS engl.: **Compressed Air Foam System** bezeichnet) als weitere Schaumvariante anzusehen. Die mittlerweile durch die weiterentwickelte Elektronik nahezu ausgereiften Systeme erzeugen sehr feinblasige Schäume, die allerdings in der Fachwelt nicht unumstritten sind. Sie bieten sicher einige Vor- aber auch Nachteile, die jedoch hier nicht weiter erläutert werden sollen. Genaueres ist in der Fachliteratur nachzulesen. [11, 47, 48, 49, 50]

Der Schaum ist in der Regel in zwei Stufen – als nasser bzw. trockener Schaum – wählbar, wobei beide Klassen im Bereich des herkömmlichen Schwertschäumens ( $VZ < 20$ ) liegen. Zur Erzeugung ist eine spezielle Anlage auf dem Fahrzeug zu verbauen. Die Abgabe kann allerdings über herkömmliche Strahlrohre (sowohl Voll-, als auch Hohlstrahlrohre) erfolgen, womit der technische Aufwand an der Einsatzstelle minimiert wird. [11, 47, 48, 48, 50]

Stationäre Druckluftschäumenanlagen werden u.a. in Lagern mit brennbaren bzw. schmelzenden Kunststoffen (mit hohen Brandlasten) und weiterhin in Straßentunneln zur Brandbekämpfung eingesetzt. [51]

### ***3.5. Anforderungen an Feuerlöschschäum***

Mit der Entwicklung, Anwendung und Verbesserung des Schaumlöschverfahrens veränderten sich die Anforderungen an das Löschmittel Schaum und dessen Gebrauch. Somit unterscheiden sich die Forderungen je nach Zeitpunkt und Anwendung und werden nach Unfällen bzw. spektakulären Einsätzen i.d.R. hinterfragt und überprüft.

### **3.5.1. Anforderungen aus historischer Sicht**

Als 1877 *John Henry Johnson* das Britische Patent Nr. 560 für seinen Feuerlöschapparat bekam, erklärte er den Zweck dieser Anlage wörtlich als: „... *The object of the ... Invention to form ... a viscous incombustible composition of small density in consequence of its frothy condition, which enables it to float on the surface of fatty bodies, such, for example, as petroleum and other essences when on fire ...*“. [23]

Bis dahin war es nicht oder nur schwer möglich Ölbrände zu löschen, die mit der zunehmenden Industrialisierung und den Erdölbohrungen zusammenhingen. [13, 15]

Wasser versank aufgrund der größeren Dichte wirkungslos im Öl. Durch die chemische Reaktion von Natriumcarbonat und Aluminiumsulfat entstand das Löschgas Kohlendioxyd, welches zum damaligen Zeitpunkt als eigentliches Löschmittel betrachtet wurde. Die Seifenlösung war in erster Linie nur Mittel zum Zweck um das Löschgas kontrolliert an den Brandherd heranzubringen.

Der auf chemischem Weg erzeugte Schaum war sehr zähflüssig, sodass er sich nur schlecht auf großen Flächen ausbreitete und mit dem Strahlrohr verteilt werden musste. Da ein besser fließender Schaum eher zum Löscherfolg beiträgt, wurde hier schon der Anspruch, einen gut fließenden Schaum zu erhalten, gestellt.

Revolutionär war im Jahr 1923 die Idee des Berliner Patentanwalts *Clemens Wagner*, Luft als Füllgas zu verwenden. Damit konnten die Nachteile der chemischen Schaumherstellung weitgehend vermieden werden. Nun erkannte man auch immer mehr, dass das Füllgas im Schaum lediglich zur Gewichtsverringering und Volumenvergrößerung des flüssigen Löschmittelgemisches diente und kein „Löschgas“ gebraucht wurde.

Durch die enorme Vielfalt der neuen Geräte zur Schaumerzeugung, die eine ebenso große Bandbreite an unterschiedlichen Schaumeigenschaften erzeugten, wurden zu dieser Zeit auch verschiedene Versuche unternommen, die Fließfähigkeit zu beurteilen, wie die Berichte und Tests von *Brunswig* [52], *Amsel* [53], *Friedrich* und *Emmerich* (nicht veröffentlicht, nur in [12] beschrieben) und weiteren Feuerlöschexperten zeigen [12, 54].

### **3.5.2. Anforderungen aus derzeitigem Kenntnisstand**

Durch die kosten- und materialbedingte Vereinheitlichung der Löschgeräte im zweiten Weltkrieg, die zugunsten des Kometrohres ausfiel [15], sank auch die Anzahl der Anforderungen an den Löschschaum, dafür wurden diese aber weitaus präziser. Auf Tagungen wurde von Vertretern und Fachleuten des Feuerschutzdienstes über diverse Schaumparameter diskutiert um schließlich die Kenngrößen Verschäumungszahl, spezifisches

Schaumgewicht und Wasserhalbwertszeit zu definieren und vereinheitlichen. Diese Werte erlangten in der Folge Eingang in das deutsche und auch teilweise in das ausländische Schrifttum [12]. Sie waren weiterhin prägend für die in den Folgejahren entwickelten Normen im Brandschutz.

### **3.5.3. Normative Anforderungen**

In den Normen werden Anforderungen an Schaummittel und Feuerlöschschaum beschrieben und nur teilweise Grenzbereiche gefordert. Die wesentlichen Normen dazu sind die DIN EN 1568 Teil 1,2,3 und 4, als Nachfolgedokumente der DIN 14272, die sich explizit mit Schaummittel zur Herstellung von Schaum verschiedener Güteklassen befassen. Weiterhin sind einzelne Anforderungen auch in anderen Normen spezifiziert. Hier seien beispielsweise die Normen für Schaumstrahlrohre DIN 14366, Schaumstrahlrohre für Werferunterteile DIN 14366 - Teil 2, Schaumdüsen DIN EN 15767-3 und Zumischer DIN 14384 genannt.

- **DIN EN 1568-1** *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil: 1 Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum zum Aufgeben auf nichtpolare (mit Wasser nichtmischbare) Flüssigkeiten*

In der DIN wird, wenn auch nicht so untergliedert, eine Aufteilung nach Anforderungen an die verwendeten Schaummittel, die Schaummittellösung und an den erzeugten Schaum selbst vorgenommen.

Die Spezifikationen, die für Schaummittel genannt werden, sind:

- Größe und Anteil an Sediment
- Viskosität
- pH-Wert

Die Spezifikationen, die die Schaummittellösung betreffen, sind:

- Oberflächenspannung
- Spreitungskoeffizient

An den produzierten Schaum werden folgende Ansprüche gestellt:

- Verschäumung und Wasserabscheidung
- Löschvermögen [18]

- **DIN EN 1568-2-4** *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil: 2-4 (Anforderungen an Leichtschaum, Schwerschaum zum Aufgeben auf nichtpolare bzw. Schwerschaum auf polare Flüssigkeiten)*

Die Ansprüche an das Schaummittel, die Schaummittellösung und den erzeugten Schaum in den Teilen 2,3 und 4 der DIN EN 1568 entsprechen den oben erläuterten aus dem ersten Teil.

Die Verschäumungszahlen und Wasserabscheidungswerte liegen (aufgrund der Zusammensetzung) zwar in verschiedenen Bereichen - auch die Schaumrohre und Versuchsaufbauten unterscheiden sich - hier werden aber nur bei der Begriffsbestimmung die Unterscheidung nach Schwer-, Mittel- und Leichtschäum vorgenommen. Spezielle Zahlen bzw. genaue Anforderungen werden in den anderen Teilen nicht unterschieden. [19, 20, 21]

- **DIN 13565\_1** *Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Schaumlöschanlagen – Teil 1: Anforderungen und Prüfverfahren für Bauteile*

Die schaumspezifischen Forderungen begrenzen sich auf Verschäumungszahl und Wasserabscheidung – die Prüfung lehnt sich an der DIN EN 1568 an. Hier wird nur die jeweilige Schaumabgabereinrichtung gegen die in der DIN verwendete Düse ausgetauscht. [55]

- **DIN 14366 Tragbare Schaumstrahlrohre**

Auch hier beschränken sich die Anforderungen an den erzeugten Schaum auf Verschäumungszahl und Wasserhalbezeit. Zusätzlich werden noch Zumischung, Arbeitsdruck und Wurfweite (von Schaum und von Wasser) vom jeweiligen Arbeitsgerät überprüft.

Die Messeinrichtungen für Verschäumungszahl und Wasserhalbezeit unterscheiden sich allerdings von denen in DIN EN 1568. Es wird daher auch explizit darauf hingewiesen, dass die so erhaltenen Werte nicht mit denen der anderen Verfahren vergleichbar sind. [56]

Die Normen hinterfragen lediglich die Eigenschaften Verschäumungszahl und Wasserabscheidung. Allerdings werden hierfür verschiedene Messaufbauten beschrieben und daher darauf hingewiesen, dass die erhaltenen Ergebnisse nicht vergleichbar sind. Die Überprüfung der Fließfähigkeit wird in keiner Norm betrachtet. Gerade der Unterschied bei verschiedenen Strahlrohren ließe eine Einstufung bzw. Wertigkeit zu, was insbesondere für den Anwender eine Entscheidungsmöglichkeit darstellen könnte.

#### **3.5.4. Anforderungen und Möglichkeiten der Anwender**

Die Anforderungen, die aus der Praxis an Feuerlöschschaum gestellt werden, hängen einerseits von der vorhandenen technischen Ausstattung der Feuerwehren und dem zugehörigen Ausbildungsstand, andererseits vom Anwendungsfall (der vorgefundenen Lage und der erwarteten Wirkung) ab.

Die Anforderung „Schaum muss löschen“ wird nur qualitativ gestellt, mit wenigen Ausnahmen – z.B. Löschfall Flugzeug – hier wird sie quantitativ ausgestaltet. Nur im Rahmen von Großbränden stellt sich die Frage von Schaummittelreserven, detaillierte Effizienzanalysen liegen allerdings meist nicht vor.

Bei spezifischen Brandgefahren geben Genehmigungsbehörden oder Versicherer vor Schaum zum Löschen vorzuhalten, die Beurteilung der Wirksamkeit, d.h. der Art und Menge, liegt in der Regel beim Betreiber.

- **Technische Ausstattung der Feuerwehren**

In der Bundesrepublik Deutschland befinden sich die Feuerwehren in der kommunalen Zuständigkeit, d.h. die finanzielle und damit die technische Ausstattung ist sehr unterschiedlich und in den Feuerwehrbedarfsplänen der Kommunen festgelegt. So ist auch die Ausstattung mit Schaumtechnik, zumindest was über die DIN - Beladung der Fahrzeuge hinausgeht - sehr unterschiedlich, da innerhalb der gesetzlichen Regelungen und Budgetgrenzen Entscheidungsspielraum besteht. So reicht die Ausstattung vom Schaum-Handlöscher, der hier nicht betrachtet werden soll, bis hin zu mobilen bzw. fest verbauten Schaummonitoren und -werfern. Dazwischen liegen die Schwer- und Mittelschaumrohre als tragbare, mobile Gerätschaften. Ergänzend können, insbesondere für Kleinbrände ausgelegte, kompakte Schaumgeräte wie die Mittelschaumpistole oder das PRO/pak Schaumschnellangriffsgerät genannt werden.



Abbildung 3-9 Mittelschaumpistole (integrierter Zumischer und Schaumbehälter) [57]



Abbildung 3-10 PRO/pak - tragbares Schaumsystem mit Schwer-, Mittelschaumrohr und Netzmitteldüse [58]

Seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts werden auch immer mehr Druckluftschaumanlagen auf Feuerwehrfahrzeugen verbaut.

Die Luftschaumgeräte, seien es die Kleingeräte, die üblichen handgeführten Schaumrohre oder große Werfer bzw. Monitore, sind auf einen spezifischen Druck (in der Regel 5 bar am Strahlrohreingang) und damit auf eine Verschäumungszahl festgelegt. Diese wird zwar von Druckschwankungen und veränderlichen äußeren Parametern (z.B. Luft- und Wasserqualität, Temperatur, Art und Zustand des Schaummittels...) gering beeinflusst, wird aber nicht

bewusst verändert. Damit sind die Verschäumungszahl und der Wassergehalt festgelegt. D.h. da die Schaumgeräte keine Beeinflussung des Schaumes zulassen, bestehen auch keine diesbezüglichen Wünsche der Wehren. Sie sind mit der Technik zufrieden, die robust konstruiert ist und unter den gegebenen Arbeitsumständen funktioniert.

Im Druckluftschaumbereich besteht die Möglichkeit, Einfluss auf den erzeugten Schaum zu nehmen. Durch Variation der Parameter und Verwendung unterschiedlicher Strahlrohre kann die Verschäumungszahl innerhalb des Schwerschaumbereiches verändert werden. Allerdings stehen der besseren Anpassung des Löschmittels die aufwendigere und damit teurere Technik und der erforderliche höhere Ausbildungsstand gegenüber. Bei einigen Wehren besteht – nicht nur seit dem Tübinger Unfall<sup>2</sup>– die Befürchtung, dass die Technik noch nicht ausgereift und damit fehleranfällig ist.

- **Ausbildungsstand der Anwender**

Die Ausbildungssituation in den Feuerwehren ist sehr unterschiedlich. Während Schaum in einigen Wehren immer häufiger eingesetzt wird, kommt er anderenorts kaum zum Einsatz. Auch Übungen mit Schaum werden selten organisiert. Das Thema wird meist nur theoretisch angesprochen. Ein gut ausgebildetes Personal ist jedoch im Ernstfall eine der Grundvoraussetzungen für einen erfolgreichen Löscheinsatz. Das geübte Zusammenspiel zwischen Maschinist und Angriffstrupp ist beim Schaumangriff wichtiger als sonst. Insbesondere beim Thema Druckluftschaum ist der Ausbildungsstand aufgrund der erhöhten technischen Ausstattung unabdingbar. Welche Leistungen möglich sind, zeigen die Flughafenfeuerwehren, die durch ständiges Üben ein hohes Sicherheitsniveau gewährleisten.

- **Anwendungsfall und darauf abzustimmende Löschwirkung**

Naturgemäß bedingen verschiedene Brandszenarien auch unterschiedliche Anforderungen an Schaumeigenschaften.

Dabei spielen die Brandlast und die Brandausdehnung eine wesentliche Rolle. Brennbare Flüssigkeiten sind leichter als Wasser, die Auftriebswirkung der im Schaum eingeschlossenen Luft ist hier der entscheidende Faktor. Dabei wird das Trennen von Brand- und Luftsauerstoff als Löscheffekt genutzt. Die aus dem Schaum auslaufende Flüssigkeit kühlt zusätzlich die

---

<sup>2</sup> Am 17. Dezember 2005 verunglückten bei einem Einsatz der Feuerwehr Tübingen zwei Feuerwehrleute tödlich. Bei Löscharbeiten im Dachgeschoss eines Fachwerkhouses, flammte eine Etage tiefer der Brand wieder auf. Aufgrund eines Schlauchplatzers hatten die beiden Feuerwehrleute nun kein Löschmittel mehr zur Verfügung, um sich den Rückweg „freizulöschen“. Beide erstickten bevor der Sicherheitstrupp die beiden nach über 20 Minuten finden konnte. Bei der Rekonstruktion des Unglücks im Januar 2006 stellte sich – für die Brandexperten überraschend – heraus, dass ein mit CAFS gefüllter Schlauch aufgrund von Hitzeeinwirkung sehr schnell platzen kann. Der Grund hierfür scheint zu sein, dass das Druckluft-Schaum-Gemisch den Schlauch nicht so gut kühlt wie Wasser. Anscheinend verlieren die Schläuche deshalb rasch ihre Festigkeit - und platzen. [59]

Temperatur der Brandstelle herunter. Allerdings muss die Interaktion des Schaumes mit der Flüssigkeit beachtet werden, Alkohol wirkt auf viele Schaummittel zerstörend und kann somit einen Löscherfolg behindern bzw. gänzlich unterbinden. Das sollte jedoch entsprechend im Voraus bedacht werden.

Das Deckvermögen – hier ist die gute Fließfähigkeit von Bedeutung – verhindert die weitere Abgabe brennbarer Gase oder Dämpfe. Diese Eigenschaft ist auch sehr gut als vorbeugende Maßnahme nutzbar.

Bei Feststoffbränden, insbesondere glutbildenden Stoffen, ist die abkühlende Wirkung des Schaumes wichtiger und bildet sogar den Hauptlöscheffekt, sodass ein höherer Wasseranteil vorteilhaft ist. Die aus dem Schaum auslaufende Flüssigkeit kühlt somit den Brandherd herunter. Reines Löschwasser perlt durch die hohe Oberflächenspannung zum großen Teil nutzlos ab. Schaum verbleibt länger am Brandgut. Durch die stetige Zersetzung wird die Kühlwirkung aufrechterhalten und durch die verringerte Oberflächenspannung des Wasser-Löschmittelgemisches wird das Brandgut besser benetzt und insgesamt so die Löschwirkung zeitlich verlängert.

Mit Schaum können aber auch angrenzende Gebäude oder Gegenstände bei einem Brand bedeckt werden, die gut isolierende Wirkung ist ein vorbeugende Schutz.

Ein anderer Anwendungsfall ist das Fluten von Räumen (in der Regel Schächte, Keller, Schiffe oder sogar große Hallen). Hier ist die Stickwirkung von Bedeutung. Dabei wird in kurzer Zeit viel Volumen benötigt, was einen hohen Luftanteil im Schaum erfordert. Dazu werden spezielle Geräte mit maschineller Belüftung verwendet.

- **Sicht der Versicherer**

Von Seiten der Schadensversicherer werden die Vorschriften nicht genau spezifiziert. Gängige Praxis aller Sachversicherer ist bei Vorhandensein von brennbaren Flüssigkeiten zwar die Bevorratung von Schaummittel und entsprechenden Gerätschaften vorzuschreiben, jedoch wird dabei kein Bezug auf Schaumqualität bzw. genaue Parameter genommen.

## **4. Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum**

Die Fließfähigkeit eines Schaumes sagt aus, wie gut sich dieser auf einem anderen Medium ausbreitet. Sie ist erforderlich, um eine möglichst große Oberfläche bei gegebener Schaummenge zu bedecken. Insbesondere ein Feuerlöschschaum braucht diese Eigenschaft um möglichst alle brennenden Bereiche abzudecken und um durchgebrannte Stellen wieder zu verschließen.

Der Schaumtransport durch Schläuche bzw. Rohrleitungen wird ebenfalls von der Fließfähigkeit beeinflusst. Auch bei der Beschäumung von Hohlräumen, wie Kellern, Schächten und Kanälen ist diese Eigenschaft zur Bewertung notwendig.

### ***4.1. Allgemeines zum Fließen***

Fließen bezeichnet die Formveränderung durch von außen einwirkende Kräfte nach Überschreiten der Fließgrenze. Somit kann man zwischen reversibler, also elastischer Deformation und irreversibler, der Fließdeformation unterscheiden. [60]

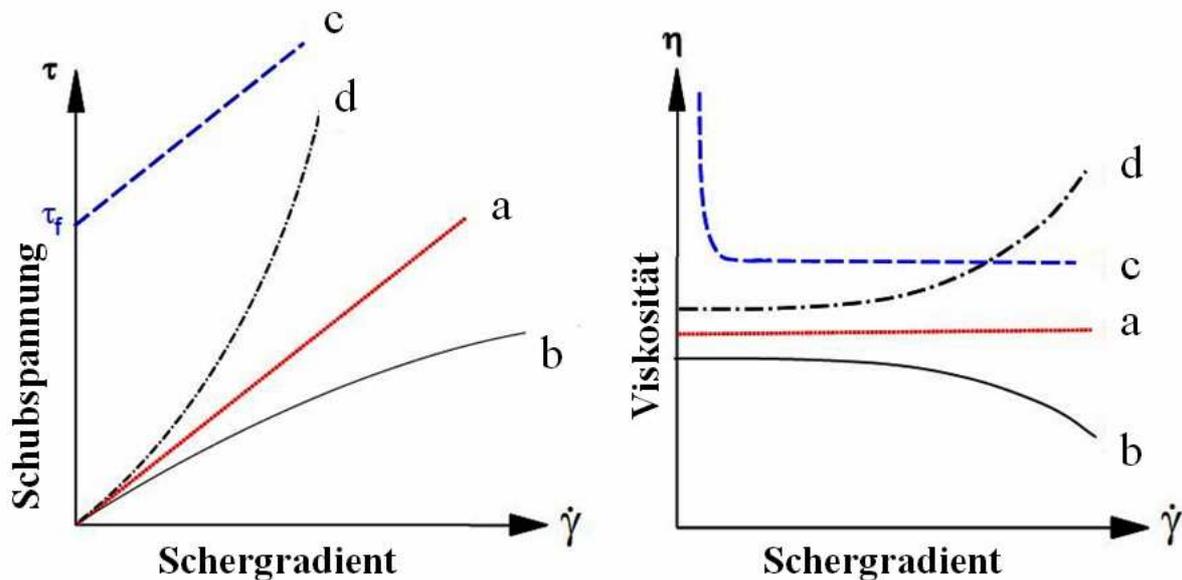
Der Begriff Fließfähigkeit wird normalerweise bei Flüssigkeiten verwendet. Diese sind unter dem Einfluss der Gravitationskraft bestrebt in tieferliegende räumliche Bereiche abzufließen und eine horizontale Oberfläche auszubilden. Durch die Struktur des Schaumes – Blasen, die sich gegenseitig durch Anziehungskräfte, Reibung u.a. beeinflussen – begründet sich die Fähigkeit, zumindest zeitweilig, Anhäufungen auszubilden. Je nachdem, welcher Wassergehalt und welche Struktur vorliegen, von welcher Beschaffenheit der Untergrund ist, welches Schaummittel verwendet wird - um nur einige Parameter zu nennen - können sehr unterschiedliche Fließeigenschaften erreicht werden.

### ***4.2. Fließverhalten von Schaum***

Schaum ist eine Dispersion aus Gas in einer flüssigen Phase und damit streng genommen eine zweiphasige Substanz. Bedingt durch die Schaumstruktur sind die Geschwindigkeiten beider Phasen beim Fließen nahezu gleich. Abgesehen von Diffusion, Zerplatzen und Vereinigen benachbarter Blasen hat die Gasphase allerdings keine Möglichkeit sich relativ zur Flüssigkeit zu bewegen. Daher kann Schaum als eine einphasige Substanz betrachtet werden. [61]

Die Schaumströmung ist jedoch keine newtonsche Strömung. Die Schubspannungen beim Fließen sind nicht direkt proportional zu den Geschwindigkeitsgradienten. Bei der Erhöhung

der Scherspannungen wird die Scheinviskosität verringert. Dies entspricht einem strukturviskosen Verhalten. (siehe Abbildung 4-1) Dafür ist ein Flüssigkeits- bzw. Gleitfilm verantwortlich, der sich unter dem Schaum ausbildet.



**Abbildung 4-1** Typische Fließ- und Viskositätskurven fließfähiger Systeme: (a) newtonsches Verhalten, (b) strukturviskoses Verhalten), (c) binghamsches Verhalten (mit Fließgrenze  $\tau_f$ ) (d) dilatantes Verhalten. [62]

#### 4.2.1. Schaumströmung in Rohren

Auch bei der Schaumströmung in einem Rohr bildet sich eine Gleitschicht an der Wandung aus. Die Dicke dieser Schicht ist abhängig von der Wandrauigkeit und den Schaumparametern, wie Gasanteil und Schaumstabilität. Wenn die Schubspannung in einer Rohrströmung nicht höher als die Fließgrenze des Schaumes ist, erfolgt das Strömen nur aufgrund des Gleitens an der Wand. Dabei werden die Schaumeigenschaften nicht oder nur unwesentlich beeinflusst. Eigens dafür an der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführte Versuche an einer 18 m hohen Steigleitung zeigten keine nennenswerten Unterschiede in der Verschäumungszahl. Der Schaum fließt wie ein fester Pfropfen (siehe Abbildung 4-2). Ein Erhöhen der Geschwindigkeit bzw. Schubspannung bewirkt die Verformung des Schaumes in den Bereichen der maximalen Schubspannung, also in Wandnähe. Wenn die Schubspannung darüber hinaus noch weiter vergrößert wird, führt das wiederum zu einer Verbreiterung des Verformungsbereichs nach innen. Eine Pfropfenströmung im Zentrum der Strömung wird allerdings immer erhalten bleiben, solange die Schubspannungen an dieser Stelle gleich null sind (siehe Abbildung 4-2).

Schütte, Wurm und Kosmolowski betrachten ebenfalls in [63] die Rohrströmung von Schaum. Sie beschreiben den Vorgang ähnlich, reden jedoch von einer „laminaren Kernströmung“ eines viskosen Fluids“ mit Wandleitung.

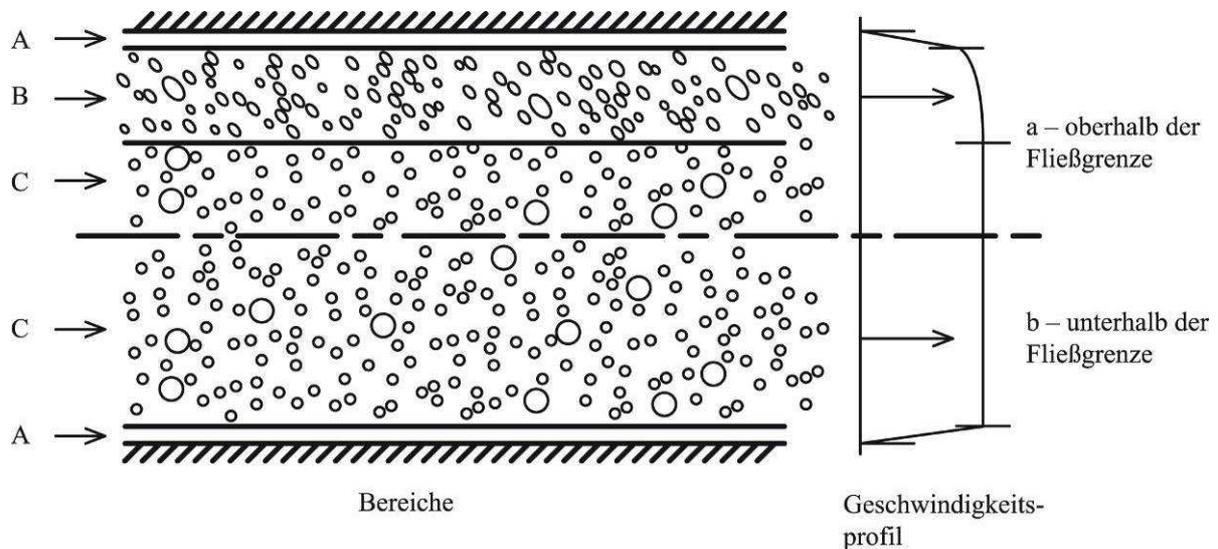


Abbildung 4-2 Darstellung der Rohrströmung bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten nach [61]

A - Gleitschicht, B - gescherter Schaum, C - zentrale Pfropfenströmung.  
a - Wand-Scherspannung unterhalb der Fließgrenze,  
b - Wand-Scherspannung oberhalb der Fließgrenze

#### 4.2.2. Schaumströmung auf Flächen

Die Schaumströmung auf Flächen wird hauptsächlich ebenso von einer einheitlichen Strömung auf einer Gleitschicht hervorgerufen. Durch die fehlende allseitige Umhüllung kann hier allerdings von Schubspannungen ausgegangen werden, die die Fließgrenze des Schaumes zunächst nicht überschreiten; sodass ein Strömungsprofil entsteht, wie es in Abbildung 4-3 dargestellt ist.

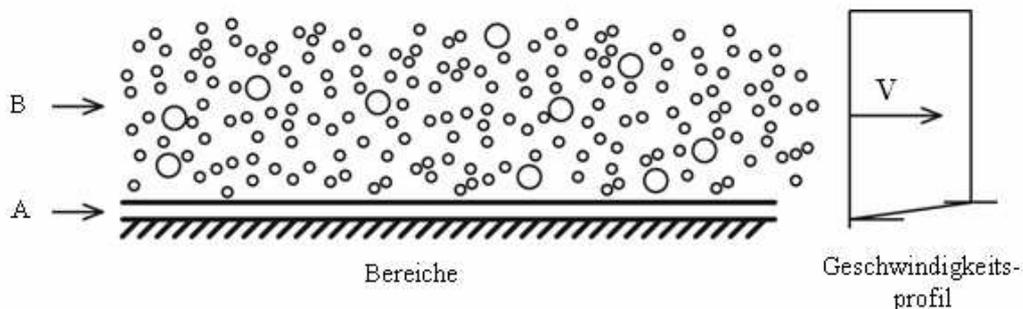


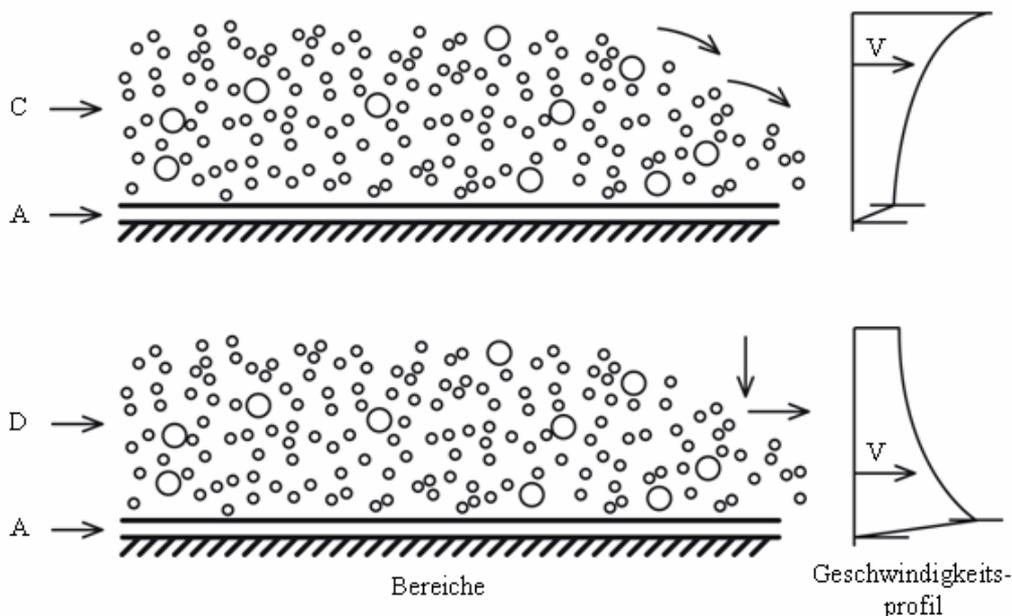
Abbildung 4-3 Schaumströmung auf einer Fläche

A – Gleitschicht  
B – gleichmäßige Schaumströmung

Allgemein können Bewegungen des Schaumes durch:

- den Impuls bei der Erzeugung bzw. beim Auftragen,
- äußere Kräfte (Wind, bewegte Flächen,...) oder
- die eigene potentielle Energie (schräge Fläche, Schaumhöhe) hervorgerufen werden.

Bei zu großem Schaumnachschub entstehen dann zunächst Anhäufungen, die sich anschließend aufgrund der Schwerkraft durch innere Spannungen verformen und sich somit allseitig ausbreiten. Das geschieht beispielsweise durch „Einsickern“ (siehe Abbildung 4-4 unten; die unteren Schichten gleiten auseinander und die oberen Schichten ordnen sich in die darunterliegenden ein) oder durch „Überholen“ (siehe Abbildung 4-4 oben; die Reibung auf der Gleitschicht ist so groß, dass die oberen Schichten über den unteren hinweggleiten). Meist treten beide Erscheinungen parallel auf, sind aber nur nebensächliche Effekte der Schaumausbreitung.



**Abbildung 4-4 Schaumströmung auf einer Fläche mit innerer Umstrukturierung**

**A – Gleitschicht**

**C – Schaumströmung mit Überholen der oberen Schichten**

**D – Schaumströmung mit Einsickern der oberen Schichten**

Schaum hat weiterhin die Eigenschaft, dass die Fließfähigkeit mit zunehmender Zeit abnimmt. Die Folge ist, dass sich der Schaum anfangs auf der Gleitschicht ausbreitet bis die Schubspannung aufgrund der Ausbreitungsfläche und geringerer Fließgeschwindigkeit zu hoch wird. Danach beginnt sich der Schaum aufzubauen bis die Schwerkraft in Summe mit der Strömung wiederum höher wird als der durch die Schubspannung entgegengebrachte Widerstand.

### 4.2.3. Schaumströmung durch Verengungen

Auch beim Durchfließen von Verengungen verhält sich Schaum anders als ein newtonsches Fluid. Durch die Kompressibilität der in den Blasen eingeschlossenen Luft können verschiedene Einschnürungen ohne Weiteres passiert werden. Hierbei konnte in einigen Versuchen sogar teilweise eine Unabhängigkeit von Druckverlust und Volumenstrom beobachtet werden.

Ausschlaggebend dabei ist jedoch die Art einer Einschnürung. Diese hat Einfluss auf die Schaumstruktur. Ein Kugelventil beispielsweise, kann Schaum beinahe komplett zu einer Luft/Wasser-Strömung umwandeln, während durch ein Membranventil bei gleichem Druckverlust ein stabiler, homogener Schaum erzeugt werden kann. Dieses Verhalten lässt sich wie folgt begründen: hohe Spannungen (die in einem Kugelventil erzeugt werden) können zu einer Vereinigung von Blasen führen und damit den Schaum zerstören, eine Expansion des Schaumes kann jedoch sehr weit ohne eine Aufspaltung gelingen.

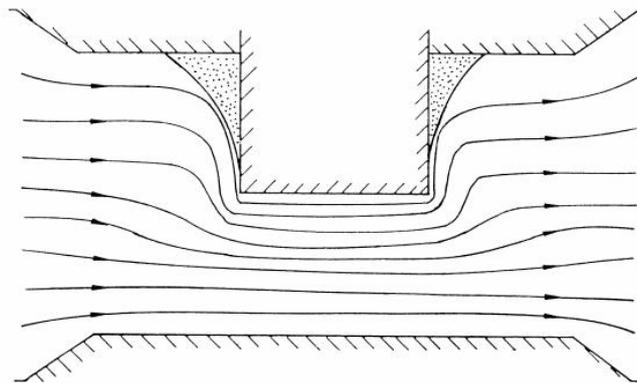


Abbildung 4-5: Stilisierte Schaumströmung durch eine Verengung [61]

Abbildung 4-5 zeigt die aus experimentellen Daten ermittelten Stromlinien von Schaum durch eine Verengung. [61]

### 4.2.4. Kompressibilität, Stabilität und Viskosität

- **Kompressibilität**

Aufgrund des hohen Luftanteils im Schaum zeigt dieser, ebenso wie Luft selbst, kompressible Eigenschaften. Die Kompressibilität des Schaumes tritt allerdings (bei Strömenden Fluiden) aufgrund der (im Vergleich zur Luft) höheren Dichte bereits bei erheblich niedrigeren Geschwindigkeiten auf.

Durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit, welche die einschließende Hülle bildet, wird die innenliegende Luft unter Druck gesetzt. Dabei ist der Druck in kleineren Blasen höher als in großen, wodurch die Disproportionierung (das Gas aus kleinen diffundiert in umliegende

größere Blasen, siehe Abschnitt 2.2 Phänomenologie des flüssigen Schaumes) erklärt werden kann. Bei Komprimierung eines Schaumes steigt der Blaseninnendruck weiter an (die Blasen werden kleiner) und entspannt sich wiederum bei Druckminderung. Bei zu großen Scherspannungen (hohe Geschwindigkeiten und abrupte scharfkantige Verengungen) zerplatzen die Blasen und der Schaum wird zerstört.

Durch Verringerung des umgebenden Druckes dehnen sich die Blasen aus. Das funktioniert allerdings nur in begrenztem Maß, da die Blasenwände je nach Konstitution und Beanspruchung hierdurch ebenfalls zerplatzen können.

Druckverluste in einer Rohrströmung können somit sehr leicht eine Änderung der Dichte und der durchschnittlichen Blasengröße innerhalb verschiedener Bereiche derselben Strömung erzeugen. [61]

- **Stabilität**

Die Schaumstabilität oder auch Lebensdauer wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Die wesentlichen Aspekte (bei ruhendem Schaum) sind Blasenumbildung und Flüssigkeitsausscheidung, die als Diffusion, Koaleszens und Drainage auftreten und bereits in Abschnitt 2.2 eingehend diskutiert wurden. Die Dauer dieser Vorgänge ist allerdings im Vergleich zu Schaumzerstörungsmechanismen durch Scherströmungen deutlich höher. Bewegter Schaum wird vor allem durch Scherbeanspruchungen beeinflusst, die jedoch von vielen Faktoren wie Untergrundbeschaffenheit, Geschwindigkeit, Temperatur etc. abhängen. Solange Scherbeanspruchungen auf Schaumentstehung und Schaumzerstörung einwirken, kann fließender Schaum als dynamisch stabil angenommen werden. [61] Auch dazu wurden an der Bergischen Universität Wuppertal Strömungsversuche an der 18 m hohen Steigleitung durchgeführt.

- **Viskosität**

Fließender Schaum kann, wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, nicht als eine Strömung eines newtonschen Fluids bezeichnet werden. Durch die entstehende Gleitschicht zwischen Schaum und der angrenzenden Oberfläche und die andere Struktur in Wandnähe gibt es bisher keine Möglichkeit die Viskosität eines Schaumes direkt zu messen. [61]

#### **4.2.5. Fließen als Eindringen und Benetzen**

Weitere Eigenschaften, die u.a. in engem Zusammenhang mit der Fließfähigkeit stehen sind das Eindringen und Benetzen. Diese Fähigkeiten hängen jedoch sowohl stark von den eingemischten Zusatzstoffen, i.d.R. Schaummittel, Frostschutz, etc., als auch vom zu

bedeckenden Untergrund ab, sodass im Rahmen dieser Arbeit nicht näher darauf eingegangen wird. Dies betrifft insbesondere:

- Benetzen von Oberflächen (OF-Spannung – Tenside)
- Eindringen bzw. Durchdringen der Brandoberfläche (z.B.: Kohlestaub)
- Eindringen in kleine Zwischenräume und Spalten

### ***4.3. Einflussfaktoren auf die Fließfähigkeit***

Das Fließverhalten von Schaum wird von vielen Parametern beeinflusst. Im Folgenden werden die wichtigsten angerissen.

#### **4.3.1. Luftanteil**

Die Erwartung hohe Verschäumungszahl - schlechtere Fließfähigkeit und umgekehrt kann einerseits über die Dichte und andererseits über den stärkeren Blasenverband (trockener Polyederschaum mit dünnwandigen Lamellen) erklärt werden. In der Fachliteratur findet man im Zusammenhang mit Fließfähigkeit meist nur den Bezug zur Verschäumungszahl, was jedoch nicht der alleinige Einfluss sein kann.

#### **4.3.2. Flüssigkeitsanteil**

Der Flüssigkeitsgehalt eines Schaumes beeinflusst als gewichtsbestimmender Parameter den Gegenpart zum Luftanteil bei der Bestimmung der Verschäumungszahl. Das obengenannte hat hier gleichbleibend Bedeutung. Darüberhinaus wird jedoch von der Flüssigkeit der Gleitfilm gebildet, auf dem sich der Schaum fortbewegt, womit dem Flüssigkeitsfilm eine besondere Bedeutung zukommt.

#### **4.3.3. Alterung und Lebensdauer**

In Abhängigkeit von der Schaumstabilität treten die bereits beschriebenen Alterungsvorgänge – hier ist vor allem der schwerkraftbedingte Flüssigkeitsverlust als Drainage entscheidend – unterschiedlich schnell ein. Eine Schaumströmung verliert so mit ablaufender Zeit stetig an Fließvermögen.

Durch die im Schaum ablaufenden Vorgänge wird er einerseits leichter und andererseits bekommen die Blasen eine stärkere Bindung zueinander, was sich beides negativ auf die Fließfähigkeit auswirkt. Außerdem wird der Schaum empfindlicher gegen äußere Einflüsse, sodass er bei Bewegung oder Beanspruchung wiederum schneller zerstört wird.

#### **4.3.4. Zusatzstoffe und Verschmutzungen**

Die Fließfähigkeit wird von Zusatzstoffen in der Flüssigkeit, wie Schaummittel, Salzen, etc. (und weiterhin sekundär von deren Eigenschaften) beeinflusst. Diese haben Auswirkungen auf die Wechselwirkung zwischen den Blasen untereinander und dem Untergrund und sind mitbestimmend für die Ausbildung des Gleitfilms, auf dem sich der Schaum ausbreitet.

Verschmutzungen beeinflussen die Fließfähigkeit in der Regel negativ, da sie beispielsweise von Tensiden umgeben werden und diese an sich binden. Weiterhin können sie ebenfalls die Wechselwirkung zwischen den Blasen beeinflussen.

#### **4.3.5. Blasengröße und Blasenverteilung**

Die Schaumstruktur hat ebenfalls Einfluss auf das Fließverhalten. Dabei sind Blasengröße und -verteilung nicht nur von den Strömungsbedingungen abhängig. Prinzipiell lässt sich der Blasendurchmesser anhand verschiedener Einflüsse verändern, beispielsweise durch unterschiedliche Siebe. Da hierzu bisher keine Erkenntnisse vorliegen, soll in dieser Arbeit insbesondere der Einfluss der Blasenstruktur auf die Fließfähigkeit näher untersucht werden. Die Ergebnisse dazu sind in Abschnitt 7.2 dargelegt.

#### **4.3.6. Art der Schaumerzeugung**

Je nachdem mit welchen Gerätschaften ein Schaum erzeugt wird, sind Unterschiede in Schaumstruktur zu erwarten. Aus einer anderen Struktur folgen wiederum abweichende Eigenschaften. Der Schaum aus einem Druckluftschaumsystem ist nicht vergleichbar mit Luftschaum aus einem Schaumrohr (auch nicht bei gleicher Verschäumungszahl). Durch den höheren Energieaufwand (beim Druckluftschaum) entsteht ein sehr feinblasiger stabiler Schaum (hier haben jedoch ebenfalls noch weitere Parameter Auswirkungen auf die Schaumqualität, wie Abgabeeinrichtung etc. – siehe Abschnitt 2.2 Phänomenologie des flüssigen Schaumes). Die Druckluftsysteme erreichen ohnehin nur Schaumraten im Schwerschaumbereich ( $VZ < 20$ ), sodass sie in dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Aber auch die Umgebungsbedingungen Luftdruck, Luftansaugung bzw. -durchsatz, Wasserhärte, Verschmutzung etc. haben Auswirkungen auf den erzeugten Schaum und dessen Fließverhalten.

### ***4.4. Ermittlung der Fließfähigkeit***

Um die Fließfähigkeit reproduzierbar ermitteln und beurteilen zu können, müssen Grundvoraussetzungen erfüllt sein. Nur so sind aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Zunächst muss ein geeigneter Versuchsaufbau zur Verfügung stehen. Je nach Größe und Schaumdurchfluss des zu beurteilenden Schaumerzeugers/Schaumrohres ist eine geeignete Einrichtung zur Probennahme erforderlich. Diese muss so gestaltet sein, dass der entnommene Schaum nicht bereits durch den Vorgang der Probennahme in seiner Struktur und Qualität beeinflusst wird. Durch die enorme Bandbreite in Bezug auf Verschäumungszahl, Fließverhalten und Haftvermögen (z.B. anhaftende Schaumreste) ist es schwierig eine bestimmte Schaumqualität zu definieren. Versuche bei denen der Schaum mechanisch herausgepresst wird, ergeben wiederum kein realistisches Bild. Auch ein veränderlicher Versuchsaufbau (verschieden große Behälter, Auslassöffnungen bzw. Auslaufflächen etc.) aufgrund der unterschiedlichen zu untersuchenden Schaumkonsistenzen macht die Ergebnisse nur schlecht vergleichbar.

Weiterhin sollte die gewünschte Schaumqualität feststehen und beim zu testenden Schaum nachgewiesen werden. Wenn die Bedingungen der Schaumerzeugung eingehalten werden (Druck, Wasser- und Luftqualität, Zumischung etc.), sollte dazu die Bestimmung der Verschäumungszahl (Wasserauslauf und Verhalten unter Brandbeanspruchung sind hier nach bisheriger Kenntnis nicht relevant) ausreichen.

Somit können verschiedene Einflussfaktoren (Schaummittel, Zumischrate, Schaumerzeuger,...) beurteilt werden, je nachdem, welche Parameter verändert bzw. gleichgehalten werden.

#### **4.4.1. Bestimmung der Verschäumungszahl**

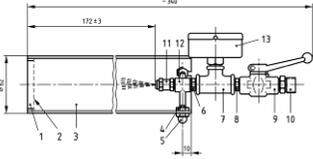
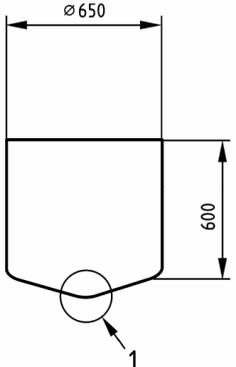
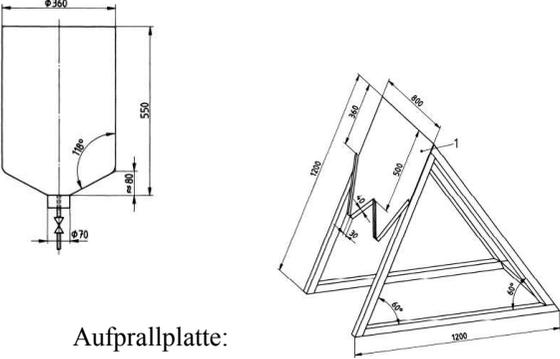
Die Verschäumungszahl als wesentliches Beurteilungskriterium wird durch Auswiegen eines definierten Volumens bestimmt. Die Vorgehensweise für Löschschaum ist für die drei Qualitäten Schwer-, Mittel- und Leichtschaum in den Teilen 1 – 4 der *DIN EN 1568* und für die Beurteilung von Schwer- und Mittelschaumrohren in der *DIN 14366* beschrieben. Das Verfahren wird so lediglich bei Herstellern und Prüfinstitutionen eingesetzt und ist nicht für die Anwendung „vor Ort“ konzipiert. Durch die grobe Unterteilung in die drei Qualitäten ist der Bereich großzügig unterteilt. Die herkömmlichen Schaumarmaturen sind immer für nur einen Schaumbereich konstruiert, sodass eine Überprüfung nicht angedacht ist und auch nicht notwendig erscheint.

Moderne Schaumgeräte (z.B. Druckluftschaumerzeuger, Kombinationsschaumrohre oder das „Flexi-Foam-System“) ermöglichen eine Beeinflussung des Luftanteils. Die Einschätzung der dabei erreichten Verschäumungszahl ist allerdings nur visuell möglich. Auch die damit

verbundene Beeinflussung anderer Eigenschaften kann nur grob abgeschätzt werden und ist vor Ort wissenschaftlich nicht genau überprüfbar.

In den Normen finden sich verschiedene Vorgehensweisen zur Ermittlung der Verschäumungszahl im Bereich Schaummittel und Schaumstrahlrohre. Die Teile 1 – 4 der *DIN EN 1568* (Schaummittel) beschreiben jeweils das Vorgehen für die Bereiche Schwer-, Mittel- und Leitschaum. Die *DIN 14366* erläutert eine etwas abweichende Bestimmung der Kennzahl für Schwer- und Mittelschaumrohre. Das grundsätzliche Verfahren ist prinzipiell ähnlich: es wird jeweils ein leerer, vorher angefeuchteter und abgewogener Behälter gefüllt, abgestrichen, gewogen und ausgewertet. Die zur Bestimmung genutzten Behälter unterscheiden sich jedoch in Form und Größe (und Befüllvorgang), was laut *DIN EN 1568* Einfluss auf die Verschäumungszahl hat, sodass kein Vergleich der erhaltenen Werte möglich ist. Da sich die vorliegende Arbeit mit dem Mittelschaumbereich befasst, werden in der folgenden Tabelle die Unterschiede der Normen für die Bestimmung bei Mittelschaum im Detail herausgestellt. [18, 19, 20, 21, 56]

**Tabelle 4-1 Bestimmung der Verschäumungszahl von Mittelschaum in unterschiedlichen Normen**

	<b>DIN EN 1568-T 1</b>	<b>DIN 14366</b>
<b>Schaumrohr</b>	<p>Mittelschaumrohr (DIN)</p> 	<p>das zu testende Mittelschaumrohr</p>
<b>Auffanggefäß</b>	<p>Auffanggefäß mit einem Volumen <math>V = 200</math> l (650 mm, h = 600 mm) mit verschließbarer Ablassvorrichtung am Boden (Befüllung direkt durch Schaumrohr)</p> 	<p>Volumen <math>V = 50</math> l (360 mm, h = 550 mm) mit Ablassvorrichtung am Boden (Befüllung erfolgt über Aufprallplatte)</p>  <p>Aufprallplatte:</p>
<b>Durchführung</b>	<p>Das Gefäß ist innen anzufeuchten und zu wiegen. Die Masse (<math>M_1</math>) ist zu registrieren. Das Schaumrohr ist aufzusetzen[...] Während der Ablass am Boden geschlossen ist, wird der Schaum aufgefangen, wobei darauf zu achten ist, dass sich in dem Gefäß keine Hohlräume bilden[...] Wenn das Gefäß gefüllt ist, wird die Schaumaufnahme gestoppt und die Schaumoberfläche in Höhe des Randes glatt abgestrichen. Das Gefäß wird gewogen und die Masse (<math>M_2</math>) registriert.</p> <p>Die Verschäumung <math>E</math> ist nach folgender Gleichung zu berechnen:</p> $E = \frac{V}{M_2 - M_1}$ <p>Dabei ist</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V</math> - Volumen des Gefäßes in Litern;</li> <li><math>M_1</math> - Masse des leeren Gefäßes in Kilogramm;</li> <li><math>M_2</math> - Masse des gefüllten Gefäßes in Kilogramm.</li> </ul> <p>(Es wird angenommen, dass die Dichte der Schaummittellösung 1,0 kg/l beträgt.)</p>	<p>Die Verschäumungszahl[...] wird in einer Messanordnung nach Bild 1 bestimmt. Das mit Schaumgemisch[...] beaufschlagte Schaumstrahlrohr wird[...] zur Aufprallplatte geschwenkt und in dieser Stellung so belassen, bis der Auffangbehälter gefüllt ist.</p> <p>Zur Bestimmung der Verschäumungszahl wird das Volumen des Schaumes (im Auffangbehälter) durch die Schaummasse dividiert.</p>

#### **4.4.2. Bestimmung der Wasserabscheidung**

Für die Wasserabscheidung werden in der Literatur und in den Normen verschiedene Begriffe verwendet. Während zunächst der Begriff Wasserhalbzeit genannt wurde, änderte sich die Bezeichnung in der Folge hin zu Wasserhalbzeit (wie auch in *DIN 14366* verwendet). In der 2008 erschienenen *DIN EN 1568* wird von Wasserabscheidung gesprochen, es tauchen aber weiterhin die Begriffe Wasserhalb- und Wasserviertelzeit auf.

Über die Wasserabscheidung wird das Alterungsverhalten eines Schaumes bestimmt. Die Prüfung ist ebenfalls Bestandteil der Normung. Sowohl in den Teilen 1 – 4 der *DIN EN 1568*, als auch in der *DIN 14366* wird diese nach Bestimmung der Verschäumungszahl (im jeweils verwendeten Behälter) ermittelt. Dadurch unterscheiden sich die Gefäße je nach Norm in Abmessungen und Volumen, weshalb die Ergebnisse wiederum nicht vergleichbar sind. Die dazu verwendeten Gefäße haben im Boden eine verschließbare Ablassöffnung (siehe Abschnitt 4.4.1 Bestimmung der Verschäumungszahl) wodurch die austretende Flüssigkeit abgelassen werden kann. Zur Bestimmung werden in der *DIN 1568* die 25% - und 50% - Wasserabscheidung und in *DIN 14366* die 50% - Wasserabscheidung als Wasserhalbzeit bestimmt. Dazu wird das Gefäß entweder auf eine Waage gestellt und der Gewichtsverlust registriert oder die ausgeschiedene Schaummittellösung in einem Messzylinder aufgefangen. Die Ablassvorrichtung ist so einzurichten, dass die Schaummittellösung abfließen kann, der Schaumdurchfluss aber verhindert wird. [18, 19, 20, 21, 56]

#### **4.4.3. Geräte und Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Fließfähigkeit**

Da es sehr schwer ist ein Maß für die Fließfähigkeit zu finden, wurden zu Beginn nur sehr allgemeine Vergleiche vorgenommen. *Brunswig* berichtet von frühen Vorschlägen einen konischen 100 l – Behälter auslaufen zu lassen, um die dazu benötigten Zeiten zu vergleichen. Dabei kam es jedoch zu Ungenauigkeiten, insbesondere durch im Gefäß verbleibende Anhaftungen [52]. Später wurden Versuche unternommen, die Ablaufzeit über schräge Flächen bestimmter Neigung, Länge und Breite als Beurteilungskriterium zu nutzen. *Brunswig* selbst stellte 1936 in seinem Beitrag „Luftschäum und Luftschäumerzeuger“ ein Prüfgerät (siehe Abbildung 4-6) vor, mit dem der Anwender Füllzeit (also Durchflussmenge) und eine abgeschätzte Verschäumungszahl (anhand der vorher geeichten Fließgeschwindigkeit auf einer Ablaufbahn) bestimmen konnte. Die Fließgeschwindigkeit wurde hier jedoch noch nicht als eigenständiges Merkmal betrachtet, sondern diente als Abschätzungskriterium für die Verschäumungszahl. [64]

1940 wurde von *Daimler* eine U-förmige Spezialbrandwanne (siehe Abbildung 4-7) eingesetzt, bei der die Schaumfließfähigkeit durch Bedecken bzw. Umfließen der abgeteilten Fläche beurteilt wurde [65]. Abbildung 4-7 zeigt die Wanne bei einem Schaumversuch.

Davor wurden auch schon Wannen ohne Unterteilung getestet, brachten jedoch insbesondere in Bezug auf die Fließfähigkeit keine verwertbaren Ergebnisse.

*Brunswig* schlug daraufhin 1942 den in Abbildung 4-8 dargestellten Teststand vor, bei dem die radiale Schaumausbreitung in Zusammenhang mit der Schichthöhe verglichen wurde. Er verwendete dazu eine runde Auffangwanne mit einem Durchmesser von 1,5 m. Darüber stand auf einem Gestell ein zylindrischer Schaumbehälter mit einem Schieber zum Öffnen und einem Kolben (3,75 kg), um Anhaftungen, Stockungen und sonstige Unregelmäßigkeiten beim Auslaufen zu verhindern [52].

Nahezu zeitgleich wurde von *Amsel* ein ganz anderer Ansatz zur Bestimmung der Fließfähigkeit verfolgt. Er bestimmte mit seinem Aufbau die Scherspannungen im Schaum, die zum Fließen überwunden werden müssen. Hierzu wurde von ihm eine Kugel an einer Federwaage senkrecht durch den Schaum eines kubischen 30 l Behälters nach oben gezogen. Hierdurch wurden allerdings nur relative Vergleichsdaten gewonnen, er konnte somit keine Aussage über das wahre Fließverhalten geben.

*Scheichl* fasste 1952 für einen Beitrag in der VFdB – Zeitschrift 1 in [12] noch einmal die

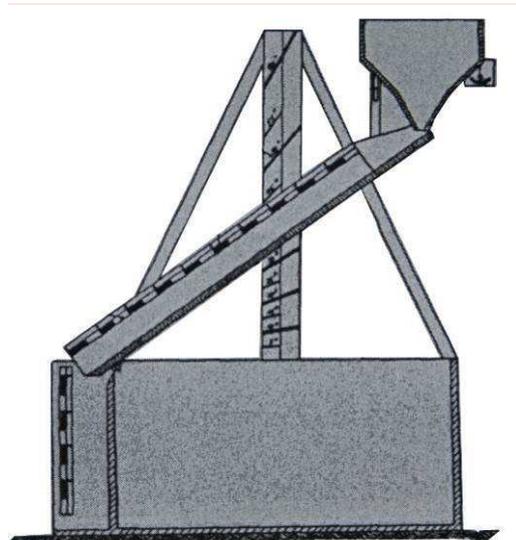


Abbildung 4-6 Prüfgerät nach Brunswig [64]



Abbildung 4-7 U-förmige Brandwanne nach Vorschlag von Daimler[65]

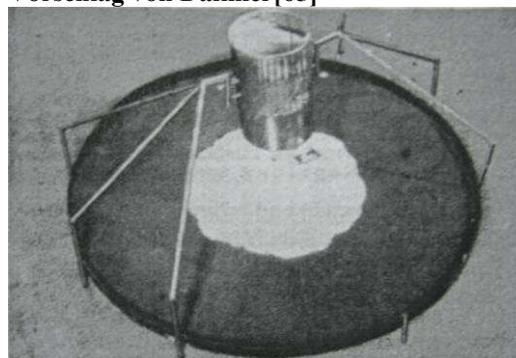


Abbildung 4-8 Teststand mit runder Auffangwanne nach Vorschlag von Brunswig [52]

wichtigsten Versuchsaufbauten zusammen. Dabei wurden auch unveröffentlichte Beiträge zitiert, die jedoch nicht ausführlich beschrieben wurden. *Scheichl* resümierte, dass die Art der Probenentnahme eine grundlegende messtechnische Voraussetzung für genau reproduzierbare Ergebnisse ist. Weiterhin stellte er fest, dass sich die Versuche der Vorgänger nahezu alle auf Laboratoriumsmethoden bezogen, was seiner Meinung nach nicht ausreichend ist. Sein Vorschlag für eine Fließwanne hat daher folgende Dimension: bei 6 m Länge und einem quadratischen Querschnitt von ca. 50 cm Kantenlänge sind die 2 äußeren Stirnwände um 45° ausgestellt. Die Wanne wird mit der Flüssigkeit gefüllt, auf der die Fließfähigkeit des Schaumes bestimmt werden soll. Der Schaum wird über einen Krümmer knapp unterhalb der Oberkante einer Stirnwand in die Wanne gelassen und dann das Vordringen der Schaumzunge in Abhängigkeit von der Zeit beobachtet. [12]

*John* beschrieb 1967 den in Abbildung 4-9 dargestellten Versuchsaufbau, der sich an der Anordnung von *Brunswig* orientiert. Kennzahl für die Fließfähigkeit ist hier wiederum die sich einstellende Fläche des Schaumes. Der Versuchsaufbau mit Fläche, Behälter und Mechanismus wurde in seiner Arbeit aber weitaus detaillierter beschrieben. [54]

*Kretzschmar* veröffentlichte 1983 in Beiträgen von „Brandschutz/Explosionsschutz aus Forschung und Praxis“ Versuche zum Fließverhalten von hochverschäumtem Schaum.

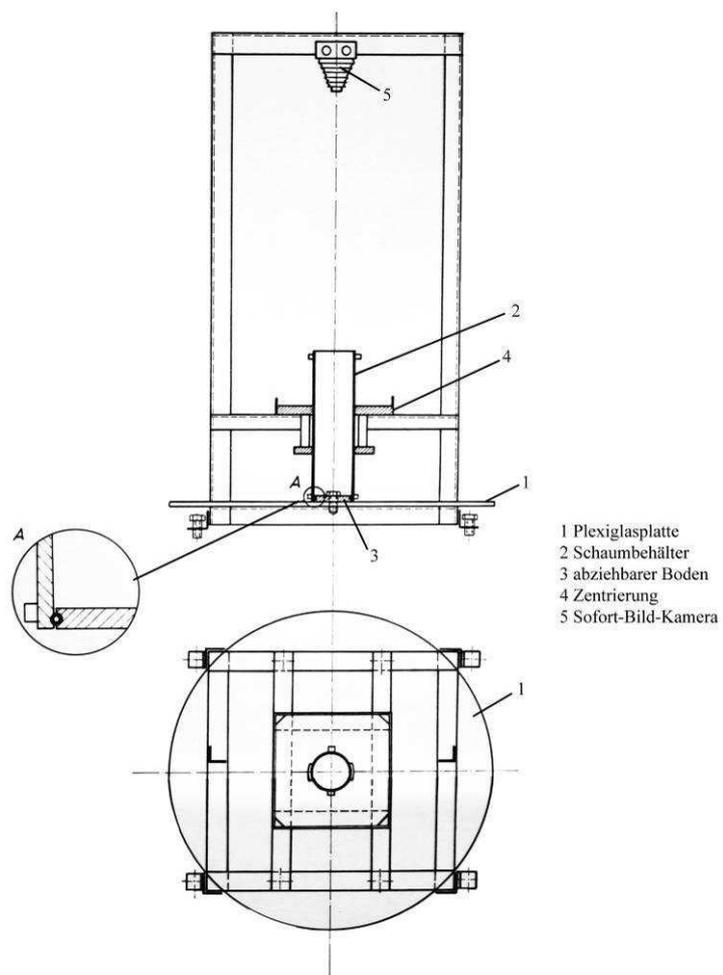


Abbildung 4-9 Versuchsaufbau nach John [54]

An 2 x 2 m großen Kabelkanälen wird die Fließgeschwindigkeit und maximal mögliche verschäumbare Länge von Leicht- und Mittelschaum ermittelt und gegenübergestellt. Er

stellte bereits auch einen Zusammenhang zwischen der Ausbreitung des Schaumes und dem sich einstellenden Schaumwinkel her. [43, 44]

*Pleß, Kretschmar und Steinbach* überprüften 1983 in Realversuchen auf festem, nassem Untergrund (mit Wasser benetzte Betonfläche) die Fließfähigkeit, das Ausbreitungsverhalten und weitere Schaumeigenschaften von Schwer- und Mittelschaum. Sie maßen verschiedene Werte und stellten fest, dass der sich einstellende Winkel zwischen Schaum- und Grundfläche bei vergleichbaren Verhältnissen als Maß für die Fließfähigkeit von Schäumen genutzt werden kann. [37] (die von Kretschmar herangezogenen Schaumwinkel sind in der vorliegenden Literatur nur unzureichend definiert und sicherlich schwer abzuschätzen, sodass ein hoher Ungenauigkeitsgrad besteht.)

Trierweiler [66] verglich 1992 in Wuppertal die mechanischen Eigenschaften ausgewählter Schwertschäume als Grundlage für eine Dissertation von *Böke* [67]. U.a. ermittelte und verglich er die Fließfähigkeit von Schäumen unterschiedlicher Schaummittel. Dazu wurde ein Versuchsaufbau genutzt, der sich wiederum sehr an dem von *John* orientierte. Allerdings erfolgte die Auswertung mit modernerer Technik.

#### **4.4.4. Vorüberlegungen für Veränderungen und Neuerungen**

Bei der Suche nach geeigneten Schaumerzeugern für die geplanten Versuche an der Bergischen Universität Wuppertal konnte bereits das Gefühl für unterschiedliche Schäume und vor allem Schaumkonsistenzen gewonnen werden. Die bisherigen Versuchsaufbauten ließen eine klare Tendenz zu den Auslaufversuchen (*Brunswig, John, Trierweiler*) erkennen. Allerdings waren, zumindest bei *Trierweiler*, Probleme durch anhaftenden Schaum, der nicht aus dem Behältnis ausfloss, zu bemängeln. Bei den geplanten Versuchen im Mittelschaumbereich (bisherige Untersuchungen befassten sich ausschließlich mit Schwertschaum) würden Anhaftungen folglich eher auftreten und daher eine zuverlässige Auswertung beeinflussen. Die Idee von *Brunswig*, Schaum durch einen Kolben herauszupressen, war schwer zu realisieren ohne Einfluss auf die Auslaufgeschwindigkeit zu nehmen (Impuls verfälscht die natürliche Tendenz) und erhöhte die Gefahr der Schaumzerstörung. Im Verlauf der Ideenfindung wurden weiterhin folgende Möglichkeiten näher betrachtet:

- Auslaufen eines Behälters mit definierter Öffnung bzw. Umfließen verschiedener Hindernisse/Auslaufgeometrien
- Auslaufen bzw. „Herauspressen“ aus einem Gefäß unter Messung des entgegengebrachten Widerstandes

- Eindringen in ein Rohr definierten Querschnitts (Eindringtiefe) durch Eintauchen des Rohrs in eine definierte Schaumhöhe

Diese Ansätze führten jedoch zu keinem verwertbaren Ergebnis und wurden daher nicht weiterverfolgt. Schwierigkeiten bereiteten hierbei insbesondere die bereits erwarteten Wandhaftungen des Schaumes, die im kleinen Labormaßstab als Störgröße keine geeignete Auswertung zuließen.

Die bereits mehrfach genutzten Ansätze zur Bestimmung des radialen Auslaufverhaltens (siehe *Brunswig, John und Trierweiler*) zeigten die vielversprechendsten Tendenzen. Daher wurden erste visuell ausgewertete Tests mit verschiedenen Gefäßen (Formen, Größen und Durchmessern) und verschiedenen Untergründen unternommen. Als Ergebnis konnte ein konisches Gefäß von 30 l bestimmt werden, was sowohl die Auswertung im Labormaßstab zuließ, als auch einen ausreichenden Auslauf versprach.

## 5. Der Schaumerzeuger

### 5.1. Das Basisgerät als Grundlage für die Schaumversuche

Als Grundlage für die beabsichtigten Versuche zur Beurteilung der Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum musste zunächst eine Möglichkeit geschaffen werden geeigneten Schaum herzustellen. Die Recherche ergab keine nutzbaren Geräte, die die gewünschten Anforderungen erfüllten. Die Versuche sollten mit realitätsnahem Schaum, jedoch im begrenzten Labormaßstab durchführbar sein. Dabei sollten Möglichkeiten bestehen Einfluss auf die Schaumparameter nehmen zu können. Weiterhin sollte es möglich sein Schäume mit gleicher Verschäumungszahl zu erzeugen, bei denen unterschiedliche Fließeigenschaften nachgewiesen werden können.

Damit konnten Armaturen aus dem Feuerwehrbereich keine Verwendung finden. Der Wasserdurchsatz und das damit entstehende Schaumvolumen war von der Menge im Labormaßstab nicht zu verarbeiten und auch die Entsorgung in dieser Größenordnung war in der Bergischen Universität Wuppertal nicht zu realisieren. Als Gegensatz zu den Schaumarmaturen mit hohen Durchflussraten wurde 1997 bis 2000 eine „Schaumbox“ vom *Funktionsmodellbau Andrea Schmid* gebaut und vertrieben, die eine modellhafte Schaumerzeugung für die strategische Ausbildung von Feuerwehrleuten ermöglichte [68]. Eine Anfrage ergab, dass das Gerät mittlerweile nicht mehr angeboten wird. Der sehr geringe Schaumdurchsatz von 800 ml/min ließ ohnehin Zweifel an der geeigneten Übertragbarkeit der Schaumqualität.

Bei vorangegangenen Arbeiten wurde meist mit Schwerschaum experimentiert, der dafür teilweise mit Rührgeräten mechanisch hergestellt oder über eine Sonde aus dem Strahl eines Schwerschaumrohres entnommen wurde (siehe [66] bzw. [54]). Erste Versuche mit einem Rührgerät zeigten, dass es so nicht möglich war, Schaum mit einem geeignet hohen Luftanteil (im Mittelschaumbereich) herzustellen. Bei Nutzung eines Feuerwehrschaumrohrs brachte die entstehende Schaummenge Platzprobleme mit sich. Weiterhin ließen sich die verhältnismäßig kleinen Behälter der Versuchsaufbauten nicht ohne weiteres befüllen.

Eine geeignete Skalierung zeigte das Schaumrohr, welches in der *DIN EN 1568-Teil 1* genutzt und beschrieben wird. Damit konnten jedoch die Schaumparameter nicht beeinflusst werden. Weiterhin wären geeignete Geräte für die Einspeisung und Zumischung des Schaummittel-Wasser-Gemisches (oder alternativ eine manuelle Vormischung) und zum Fördern der Schaummittellösung nötig gewesen. Da außerdem kein Exemplar zeitnah zu beschaffen war, wurde nach weiteren Alternativen gesucht.

Ein in den RWE-Power – Kraftwerken eingesetztes, kompaktes Schaumlöschgerät bot bei höherem Durchfluss als das DIN-Schaumrohr andere wichtige Details für ein passendes Versuchsgerät. Auf einem fahrbaren Gestell waren auf kleinstem Raum alle Komponenten zur Schaumerzeugung (Zumischer, Düse und Sieb) inklusiv Schaummittelkanister untergebracht (siehe Abbildung 5-1). Die Funktionsweise orientiert sich an der eines Luftschaumrohrs, sodass von einer realistischen Verschäumung auszugehen war. Die Luft wird jedoch nicht selbst angesaugt, sondern über eine Druckluftleitung



Abbildung 5-1 Beschäumungsgerät BG50 (RWE)

eingespeist. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben nicht nur den Wasserfluss, sondern auch den Luftdurchsatz über den eingestellten Druck zu beeinflussen um somit die Schaumgüte zu verändern. Damit war das bei RWE eingesetzte BG50 eine geeignete Grundlage für einen Schaumerzeuger, wie er für die Versuche angedacht war.

### 5.1.1. Aufbau und Funktion

- Aufbau des Schaumerzeugers

Der Schaumerzeuger wird über das Wassernetz mit einem „C“ bzw. „D“ – Feuerwehrschauch angeschlossen und versorgt. Um das Wasser mit Schaummittel anzureichern, wird es durch einen Zumischer geleitet, dessen Ansaugschlauch in den darunter befindlichen Schaummittelkanister eingeführt werden muss. Danach fließt das Gemisch in die

Verschäumungskammer und wird durch eine Düse auf das Verschäumungssieb gespritzt. Im vorderen Bereich der Kammer sitzen vier Lufteinlässe, über die Druckluft zugeführt wird. Diese stellt sowohl den Luftanteil im Schaum, als auch die benötigte Energie für die Weiterleitung durch Rohrleitungen sicher. Für den Anschluss der Druckluft ist ein Kordelventil und zur Abgabe des Schaumes eine Storzkupplung „B“ verbaut.

- Funktion des Schaumerzeugers

Der Wasserfluss erzeugt nach Öffnen des Kugelhahns im Venturizumischer einen Unterdruck, durch den Schaummittel aus dem Kanister angesaugt und dem Löschwasser zugesetzt wird. Das Wasser-Schaummittelgemisch wird anschließend in der Verschäumungskammer durch eine Kegeldüse in der Schaumkammer verteilt und benetzt das Schaumsieb. Zeitgleich wird die

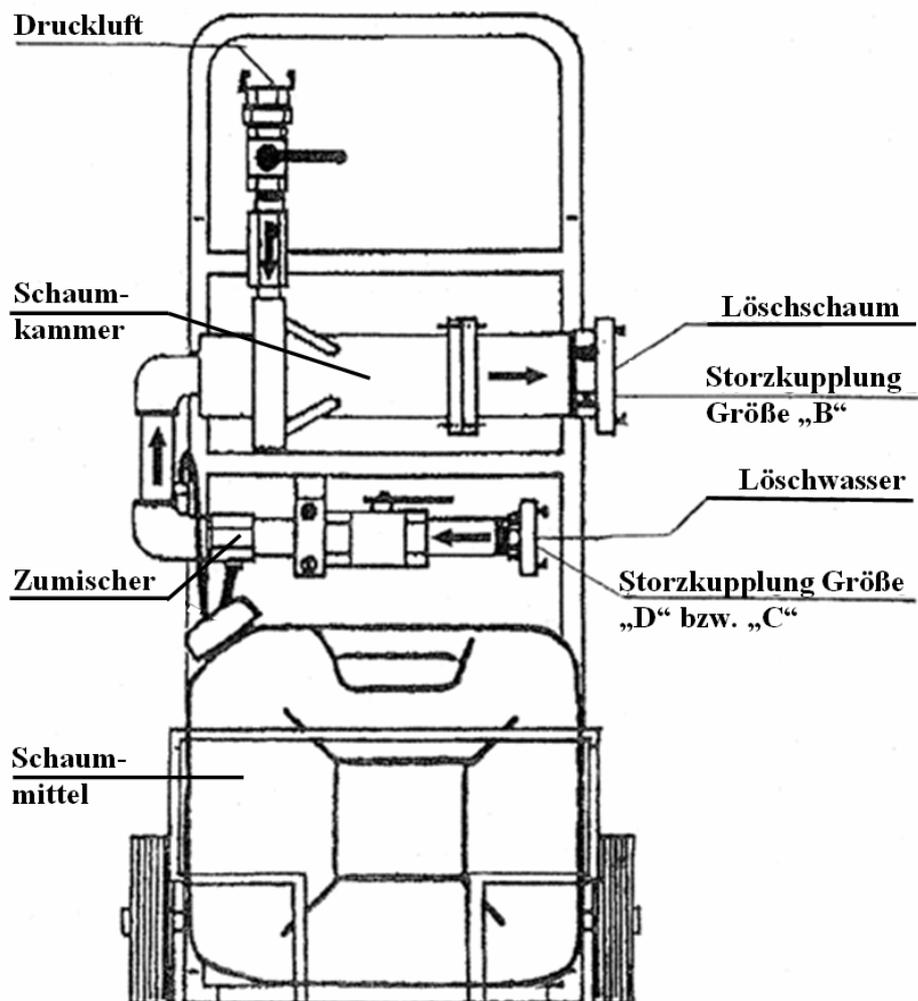


Abbildung 5-2 Prinzipskizze des Schaumerzeugers BG50 [69]

Schaumkammer mit Druckluft beaufschlagt, wodurch an den Siebmaschen die einzelnen Schaumblasen, wie in Abschnitt 3.2.5 genauer beschrieben, erzeugt werden.

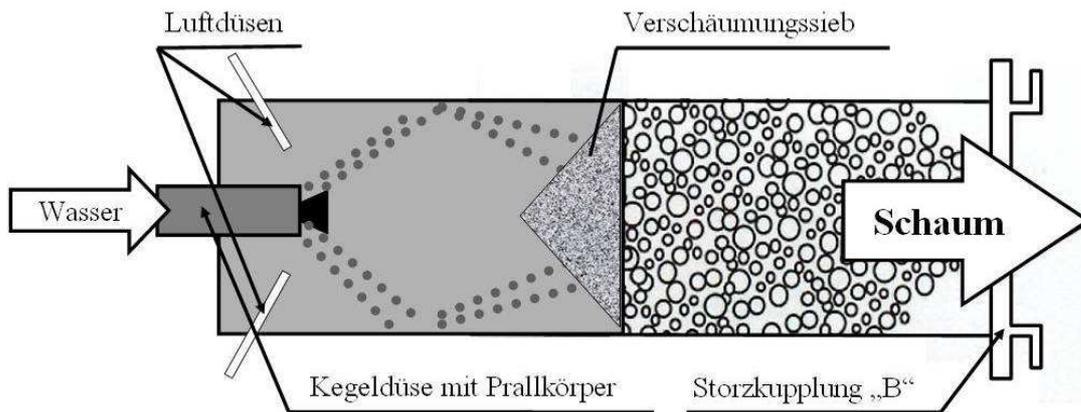


Abbildung 5-3 Funktion der Schaumerzeugung in der Schaumkammer

### 5.1.2. Ermittlung des ursprünglichen Leistungsspektrums

Da zu dem Beschäumungsgerät keine Leistungsangaben zur Verfügung standen, sollte zunächst als Grundlage für die geplanten Versuche ein entsprechendes Leistungsspektrum erstellt werden. Somit wurde das Gerät mit einer Wasseruhr und jeweils mit einem Druckminderer für Luft und Wasser ausgestattet und einem ersten Leistungstest unterzogen. Dazu wurden Zumischrate, Wasser-, Luftdurchfluss und Verschäumungszahl ermittelt. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

- Zumischrate

Da an dem Beschäumungsgerät ein einstellbarer HD-60 Zumischer von AWG verbaut war, wurde zunächst überprüft, bei welcher Grundeinstellung die Zumischrate möglichst nahe bei 3% liegt. (Laut Hersteller ist der Zumischer HD-60 für den Einsatz im Hochdruckbereich konstruiert, daher konnte keine Voraussage für eine stetige Zumischung im Niederdruckbereich getroffen werden.) Die Verstellung ist über ein Einstellrad mit Markierungen stufenlos von Z 0 – Z 6 zu realisieren. Da die



Abbildung 5-4 Zumischer AWG HD-60

maßgebliche Zumischrate von 3 % von allen Einstellpositionen > „Z 1“ überschritten wird, werden im untenstehenden Diagramm lediglich die Zumischraten der Einstellungen „Z 1“, „Z 2“ und „Z 3“ wiedergegeben.

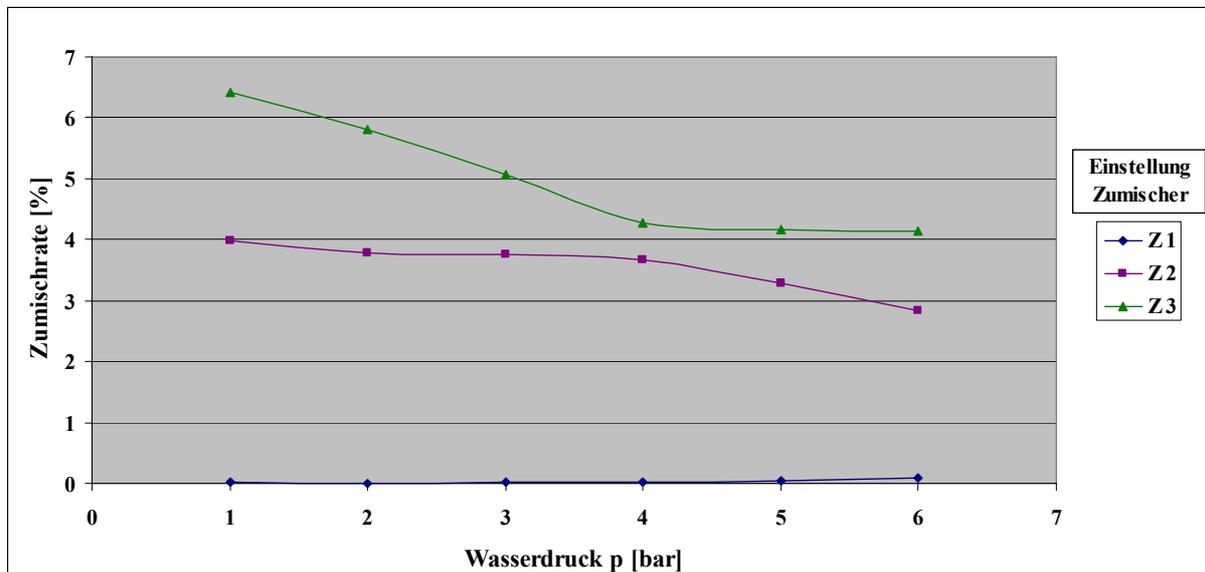


Abbildung 5-5 Darstellung der Zumischrate mit AWG-HD - 60 Zumischer

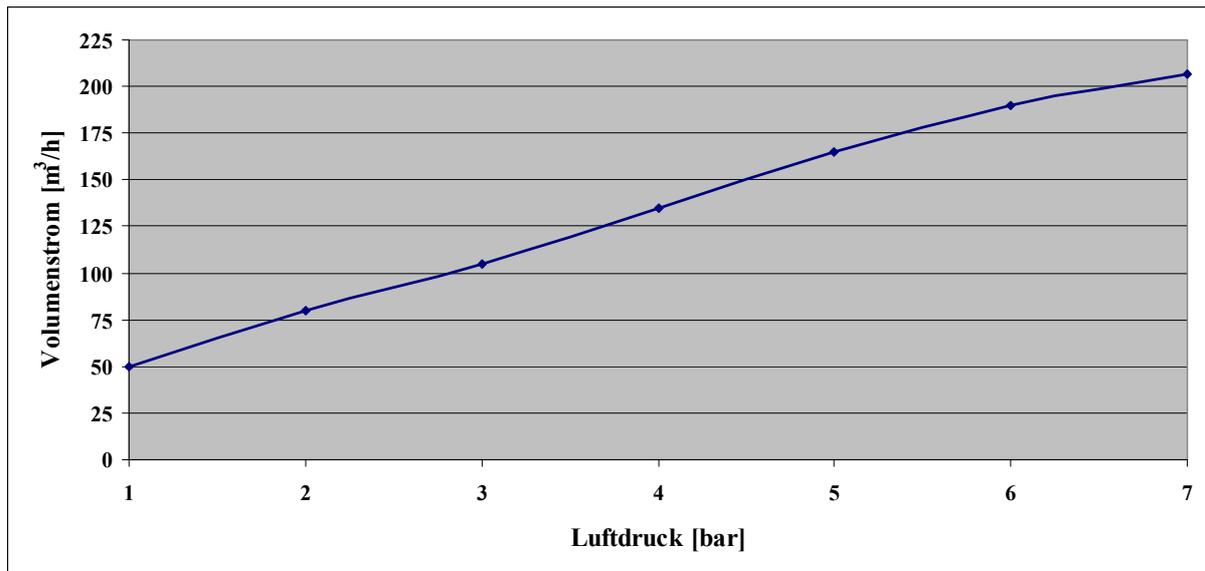
Die Einstellung „Z 1“ liefert nahezu keine Ansaugung, während bei „Z 3“ bereits in allen Bereichen 4 % übertroffen werden. Bei „Z 2“ zeigt der Kurvenverlauf zunächst eine gleichmäßige Zumischung zwischen 4 und 3,7 % und sinkt dann oberhalb von 4 bar ab. Bei 6 bar Wassereingangsdruck erreicht die Zumischung einen Wert von nur noch 2,8 % - ist damit jedoch noch sehr nahe an den anvisierten 3 %. Eine geeignete Zwischenstufe konnte nicht ermittelt werden, da die Zumischung dann sofort wieder einbrach und kaum Schaummittel angesaugt wurde.

- Luftvolumenstrom

Die volumenbestimmende Fraktion im Schaum ist der Luftanteil. Da dieser im BG50 nur durch die eingespeiste Druckluftleitung beeinflusst wird, sollte er als wesentliche Kennzahl bestimmt werden. Dazu wurde die Ausgangsleitung so angepasst, dass sie an einen Luftmengenmesser (Fa. Krohne, siehe Abbildung 5-6) angeschlossen werden konnte. Das nachfolgende Diagramm zeigt die gemessenen Werte. Der statische Druck wird bei geschlossenem Kugelhahn vor jedem Durchlauf eingestellt und sinkt beim Öffnen des Ventils ab.



Abbildung 5-6 Luftmengenmesser



**Abbildung 5-7 Ermittelter Luftvolumenstrom im Beschäumungsgerät BG50 - original RWE**

Der Luftvolumenstrom zeigt einen nahezu linearen Anstieg mit nur geringen Abweichungen. Diese sind durch Messfehler bzw. Undichtigkeiten der Ausgangsleitung zu erklären. Im obersten Bereich (ab 6 bar) flacht der Anstieg der Kurve etwas ab. Da der hohe Druck im Bereich 7 bis 9 bar bei dem vorhandenen Volumenstrom durch den zur Verfügung stehenden Kompressor (1m<sup>3</sup> Druckspeicher) nur kurzfristig zu realisieren war, konnten für die nachfolgenden Versuche ohnehin nur Drücke bis 6 bar sichergestellt werden.

- Wasservolumenstrom

Die dritte wesentliche Komponente für die Schaumproduktion ist der gewichtsbestimmende Wasseranteil. Zur Ermittlung des Volumenstroms wurde eine geeichte Wasseruhr eingesetzt. Sie wurde in den Wasserzulauf integriert und die Zeit gestoppt, die eine bestimmte Menge an Wasser für den Durchlauf benötigt. Im nachfolgenden Diagramm sind die ermittelten Werte abgebildet. Der auf der Abszisse aufgetragene Wasserdruck wurde bei geschlossenem Kugelhahn vor jedem Durchlauf eingestellt.

Auch der Flüssigkeitsdurchfluss zeigt einen nahezu linearen Anstieg über den gesamten Bereich (siehe Abbildung 5-8). Durch den druckbedingten Anstieg des Durchflusses ist die Möglichkeit gegeben, Einfluss auf den Wasseranteil im Schaum zu nehmen. Somit konnten bei dem verwendeten Schaumerzeuger bei gleichem Luftvolumenstrom verschiedene Verschäumungszahlen erzielt werden.

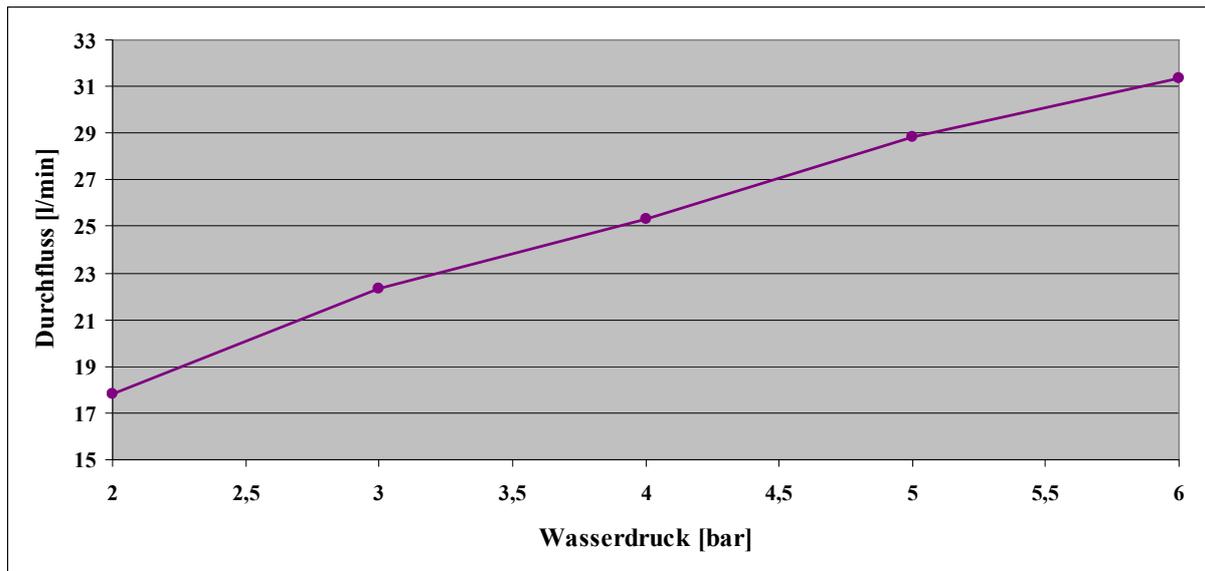
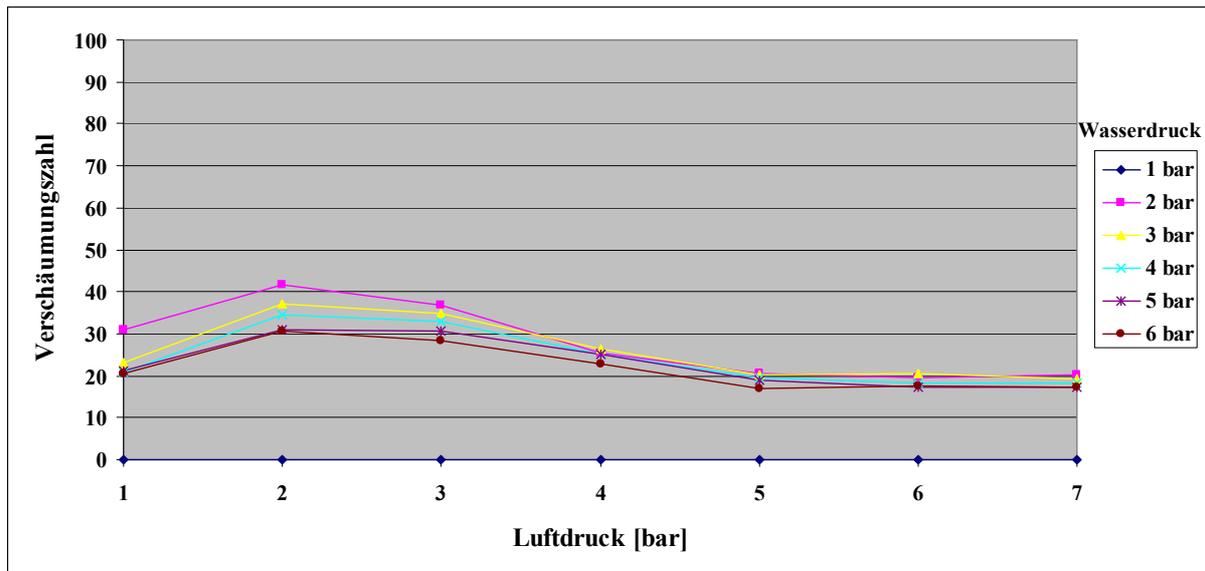


Abbildung 5-8 Ermittelter Volumenstrom Wasser-Schaummittelgemisch des BG50 - original RWE

- Verschäumungszahl

Die erreichte Verschäumungszahl stellt die letzte wichtige Komponente eines Schaumerzeugers dar. Sie wird bei Schaumgeräten jedoch regulär nicht angegeben, da sie von diversen äußeren Bedingungen abhängig ist und daher stark variieren kann.

Das folgende Diagramm stellt die ermittelte Verschäumungszahl in Abhängigkeit des eingestellten Luftdrucks dar. Die Abbildung zeigt die Verschäumungszahl auf der Ordinate, während der zugehörige Luftdruck auf der Abszisse aufgetragen ist. Als variierender Parameter wurde der Wasserdruck in den Durchgängen von 1 bis 6 bar eingestellt. Die jeweiligen Kurven dazu werden sowohl farblich, als auch durch andere Symbole dargestellt und sind am Rand in der Legende erklärt. Um eine bessere Vergleichbarkeit mit den nachfolgenden Diagrammen zu gewährleisten, ist die Verschäumungssachse bis 100 ausgelegt, auch wenn in Abbildung 5-9 nur Maximalwerte im Bereich von 40 erreicht werden.

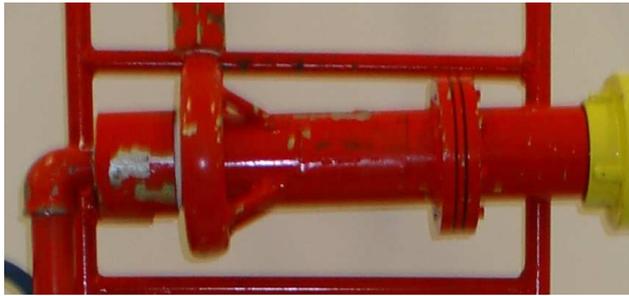


**Abbildung 5-9 Erreichte Verschäumungszahlen in Abhängigkeit von Luft- und Wasserdruck BG50 - original RWE als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.**

Die Verschäumungszahlen bilden ein gleichmäßiges Band über den gesamten Druckluftbereich. Die maximal erreichten Werte (zwischen 30 und 40) werden bei 2 bar erreicht, fallen dann jedoch schnell wieder ab, sodass sie von 5 bis 7 bar wieder bei einer 20 fachen Verschäumung liegen. Das frühe Maximum und vor allem die niedrigen Werte im oberen Druckluft - Bereich sind unerwartet, da sie in keinem Verhältnis zu den eingesetzten Volumenströmen stehen. Da diese Konstellation weder für die geplanten Versuche noch für den praktischen Einsatz geeignet schien, sollte zunächst eine Optimierung des Schaumerzeugers erfolgen. Daher wurden die, für die Schaumbildung relevanten Bauteile bestimmt, um deren Einfluss auf die Verschäumung zu testen und dadurch Ansätze für eine Verbesserung zu erhalten.

### 5.1.3. Anpassung und Vergleich leistungsspezifischer Bauteile

Die Einspeisung der Luft zeigte sich als erste Problemstelle. Durch die ungenaue Verarbeitung und bei dem gebrauchten Gerät mittlerweile eingesetzte Korrosion waren die Bohrungen der Luftzuleitung teilweise zugesetzt und damit sehr ungleichmäßig. Um einen einheitlichen, gleichmäßigen Durchfluss zu gewährleisten und weitere Veränderungen zu erleichtern, wurde der vorhandene Stahlkörper durch ein, aus einem Kunststoffrohr nachmodelliertes, Bauteil ersetzt. Als weitere Veränderung erhielt die Kammer einen Plexiglasinsatz um einen Einblick ins Innere (Strahlbild der Düsen) zu ermöglichen. Dabei wurden die Luftzuleitungen von 4 auf 10 mm erweitert um einen ausreichend großen Volumenstrom sicherzustellen.

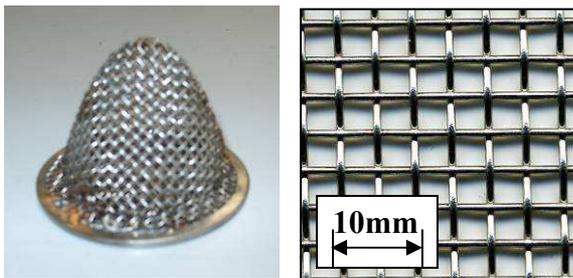


**Abbildung 5-10 Schaumkammer BG50**

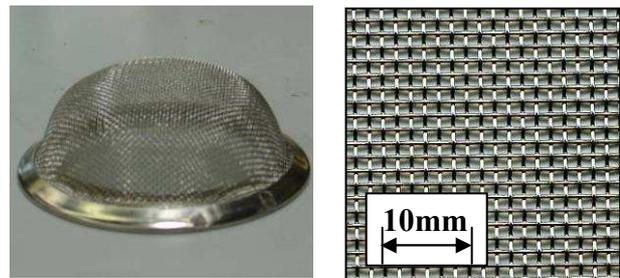


**Abbildung 5-11 Verbesserte Schaumkammer**

Als weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Schaumausbeute wurden das grobmaschige Sieb (3 mm Maschenweite) und die verbaute Kegeldüse angesehen. Als Alternative zu dem groben Sieb wurde ein wesentlich feinmaschigeres, mit 0.5 mm großen Maschen, ausgewählt. Die installierte Kegeldüse erzeugt lediglich einen Hohlstrahl, der beim Auftreffen auf die Gehäusewand zurückspritzt und das Sieb nur indirekt und sehr ungenau benetzt (schematisch in Abbildung 5-3 dargestellt). Als Verbesserung wurde hierfür eine Dralldüse konstruiert, die mit ihrem Vollkegel das Sieb direkt benetzt.



**Abbildung 5-12 Grobmaschiger Siebeinsatz BG50**



**Abbildung 5-13 Feinmaschiger Siebeinsatz zum Vergleich**



**Abbildung 5-14 Oben: feste und unten: verstellbare Kegeldüse aus einem BG50**

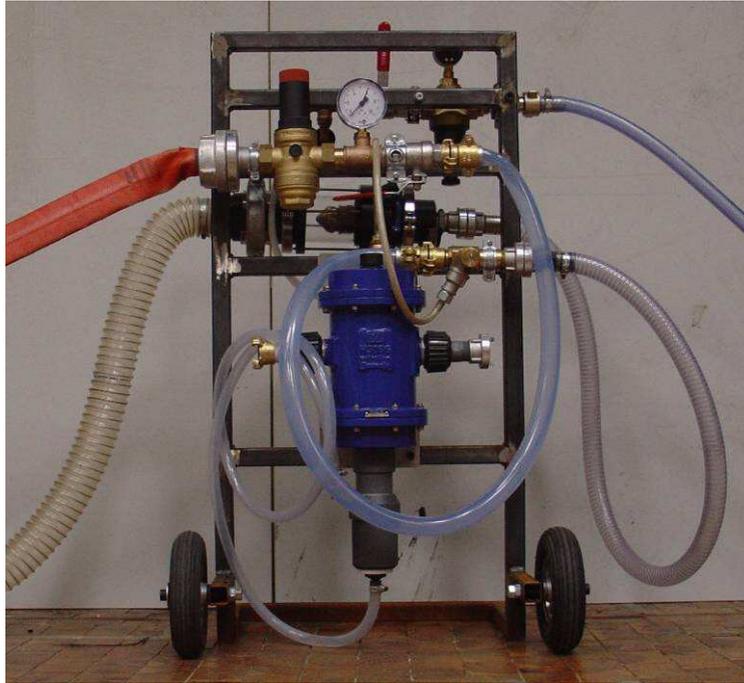


**Abbildung 5-15 Einzelteile der selbstentwickelten Dralldüse mit einsetzbarem Drallkörper**

Da verschiedene Druckspektren beabsichtigt waren, sollte zudem noch der druckempfindliche Zumischer durch eine Variante auf Wassermotorbasis ersetzt werden. Das Modell H306G von MSR-Dosiertechnik zeigte die passenden Durchflusswerte. Der Vorteil bei der Zumischung

über das Wassermotorprinzip ist die Unabhängigkeit von Durchfluss und eingespeistem Druck.

Um eine einfachere Kombination der verschiedenen Komponenten zu gewährleisten, wurden alle Bauteile an einem Gestell (siehe Abbildung 5-16) befestigt und durch Schläuche mit Schnellkupplungen verbunden. Somit konnte ein unkomplizierter Wechsel der Zumischer erfolgen. Für den Austausch der Düsen und Schaumsiebe war an der Schaumkammer aus Kunststoff ebenfalls ein Schnellverschluss angebracht.



**Abbildung 5-16 Versuchsstand zur Ermittlung der geeigneten Baugruppen**

Der abgebildete Versuchsstand ermöglicht eine unkomplizierte Kombination der ausgewählten Baugruppen (Zumischer, Düse und Schaumsieb) bei gleichzeitiger Beeinflussung von Luft und Wasserdruck. Im Vordergrund sind der Wasseranschluss mit dahinterliegendem Druckminderer und Manometer zu erkennen. Danach kann der Schlauch durch Schnellkupplungen an einem der beiden Zumischer angeschlossen werden. Die dabei entstehende Schaummittellösung wird über einen Schlauch zur Schaumkammer geführt, in der sowohl die beiden Düsen, als auch Schaumsiebe eingebaut werden können. Für die Druckluftinspeisung ist ebenfalls ein Druckminderer (erkennbar im Hintergrund) verbaut.

Durch unterschiedliche Kombination der einzelnen Bauteile (Zumischer, Düse und Verschäumungssieb) sollte eine geeignete Abstimmung der Komponenten gefunden werden. Gleichzeitig kann anhand der ermittelten Daten der Kurvenverlauf beurteilt und so Aussagen über die möglichen Druckeinstellungen getroffen werden, um einen optimalen Arbeitsbereich für nachfolgende Versuchsreihen zu definieren.

Die im weiteren Verlauf dargestellten Diagramme zeigen die erreichten Verschäumungszahlen in Abhängigkeit von Luft und Wasserdruck. Dabei ist die

Verschäumungszahl auf der Ordinate, während der zugehörige Luftdruck auf der Abszisse aufgetragen ist. Als Parameter ist der Wasserdruck in den jeweiligen Kurven dargestellt. Diese werden für jeden Durchgang mit unterschiedlichem Druck sowohl farblich, als auch durch andere Symbole wiedergegeben und sind am Rand in der Legende erklärt.

### Kombinierte Bauteile: AWG – Zumischer, Kegeldüse, grobes Sieb

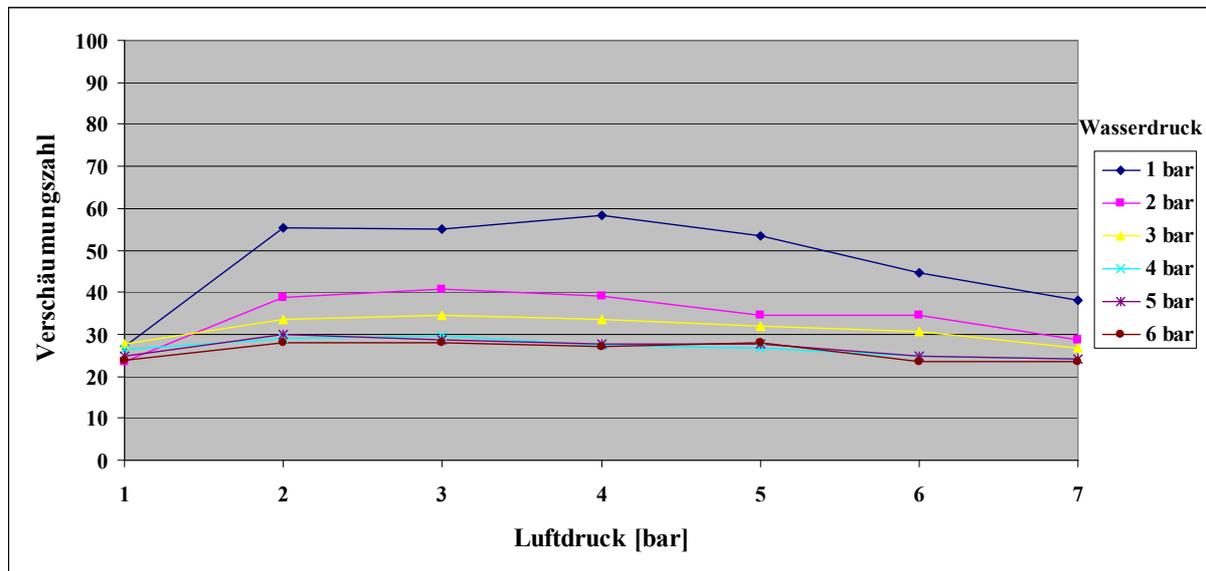


Abbildung 5-17 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Kegeldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.

Die Kurven zeigen einen gleichmäßigen Verlauf, der nur bei niedrigem Wasserdruck streut. Die Kurve von 1 bar Wasserdruck ausgenommen, liegen die Verschäumungszahlen insgesamt zwischen 20 und 40, wobei eine Verringerung der Werte mit steigendem Wasserdruck zu beobachten ist. Die bei niedrigem Wasserdruck entstehenden höheren Verschäumungszahlen spiegeln keine realistischen Werte wider. Die dabei erzeugte Schaumstruktur ist sehr ungleichmäßig, da durch den niedrigen Druck ein unsauberer Strahl entsteht und damit keine gleichmäßige Benetzung des Siebes ermöglicht wird. Somit entstehen wiederum viele große Blasen, die anschließend im Messbehälter aufschwimmen, ein völlig heterogenes Schaumbild erzeugen (oben große Blasen und wenig Flüssigkeit, darunter feuchter kleinblasiger Schaum) und dadurch eine abgefälschte Verschäumungszahl widerspiegeln.

Eine Erhöhung des Luftdrucks und damit des durchgesetzten Luftvolumens bei gleichbleibendem Wasserdruck bringt keine korrelierende Erhöhung der Verschäumungszahl mit sich. Im Bereich von 1 auf 2 bar ist ein leichter Anstieg erkennbar, darüber bleiben die Werte nahezu gleich bzw. fallen wieder leicht ab. Bei 7 bar sind die Zahlen trotz vielfach höherem Luftdurchsatz mit denen von 1 bar Luftdruck vergleichbar.

### Kombinierte Bauteile: MSR – Zumischer, Kegeldüse, grobes Sieb

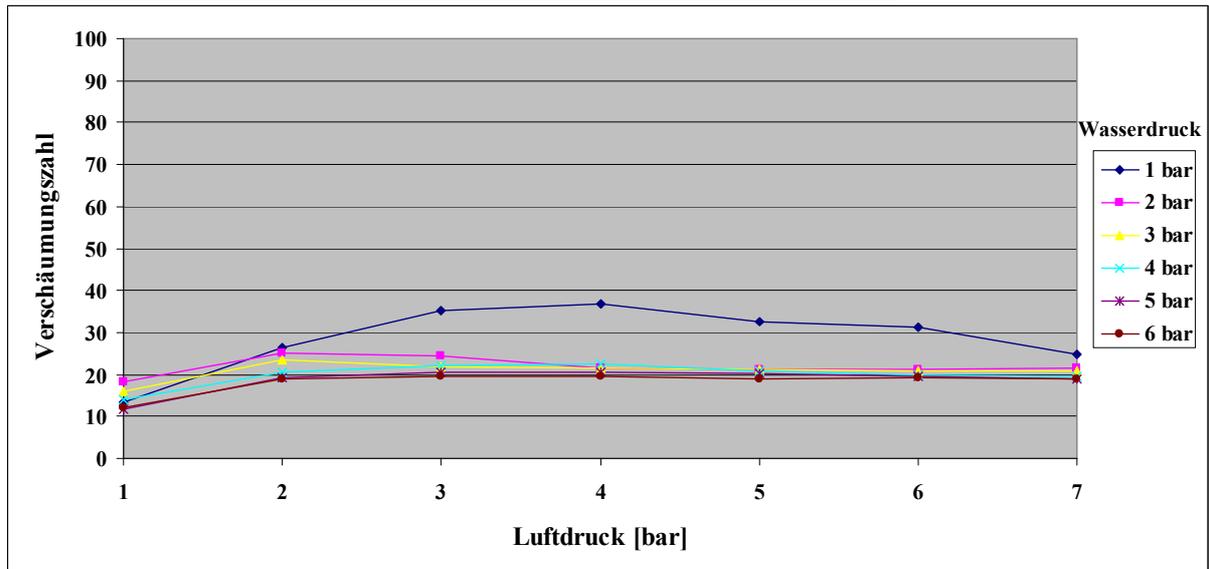


Abbildung 5-18 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Kegeldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.

Der Austausch des Zumischers bewirkte eine Verringerung der Verschäumungszahl. Allerdings sind die Kurven gleichmäßiger. Außer den Werten für 1 bar Wasserdruck liegen die anderen Kurven alle sehr eng beieinander, sind im oberen Luftdruckbereich sogar nahezu deckungsgleich.

Die Maximalwerte werden bei 2 bar Luftdruck erreicht. Oberhalb von 3 bar Luftdruck liegen die Verschäumungszahlen alle sehr dicht bei 20.

### Kombinierte Bauteile: AWG – Zumischer, Kegeldüse, feines Sieb

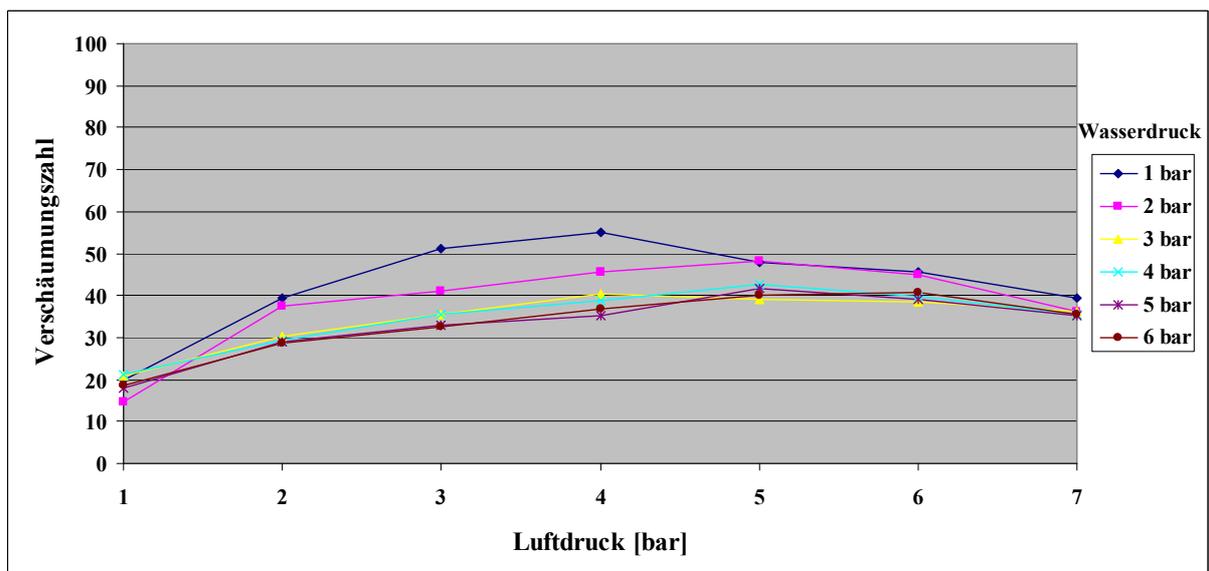
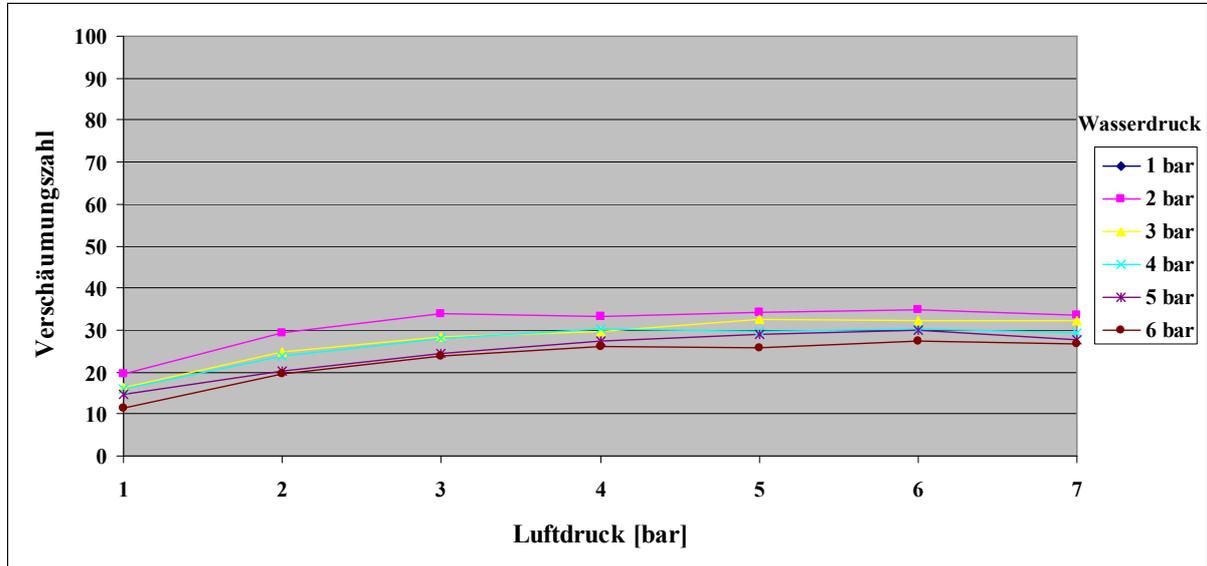


Abbildung 5-19 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Kegeldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.

Als weitere Variation wurde das grobe Schaumsieb gegen ein feinmaschigeres ausgetauscht, was eine deutliche Veränderung im Kurvenverlauf ergab. Die Maximalwerte befinden sich

nun im oberen Luftdruckbereich (bei 5 und 6 bar) und sind wesentlich höher als bei den vorigen Versuchen. Eine Erhöhung des Wasserdrucks liefert allerdings auch hier wieder schlechtere Ergebnisse in der Verschäumungszahl.

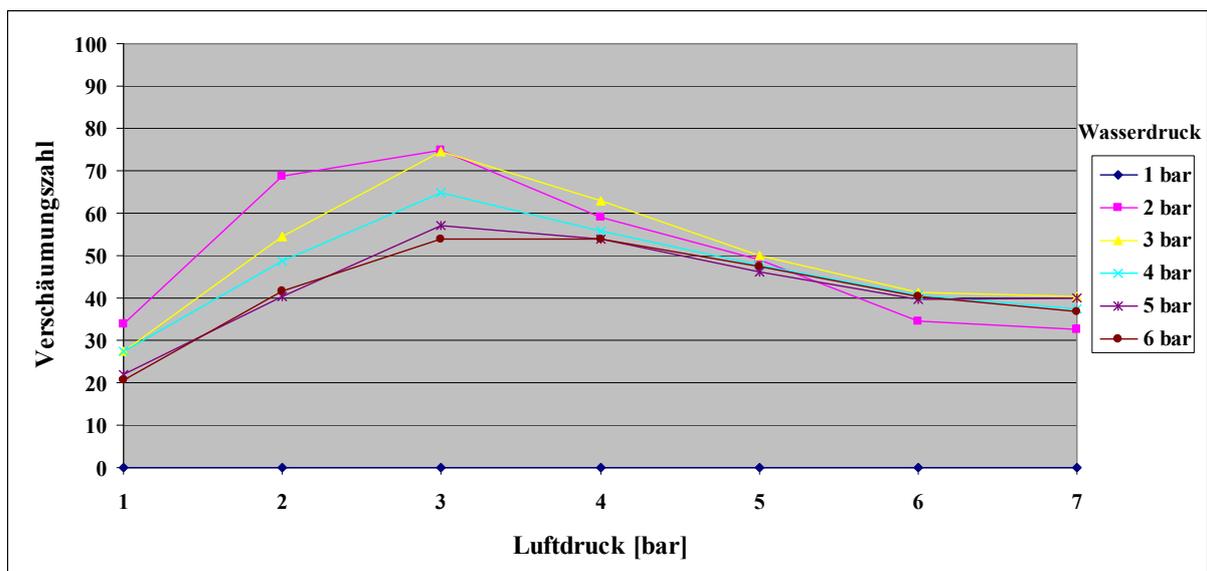
**Kombinierte Bauteile: MSR – Zumischer, Kegeldüse, feines Sieb**



**Abbildung 5-20 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Kegeldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.**

Der Austausch des AWG- durch den MSR - Zumischer ergab, wie auch beim vorigen Beispiel schlechtere Werte. Allerdings werden auch hier durch das feinmaschigere Sieb die maximalen Verschäumungszahlen bei hohem Luftdruck (bei 6 bar) erreicht. Die Kurven liegen nun nicht mehr so dicht beieinander, zeigen aber ein einheitliches Band, bei dem wiederum durch steigenden Wasserdruck niedrigere Verschäumungszahlen entstehen.

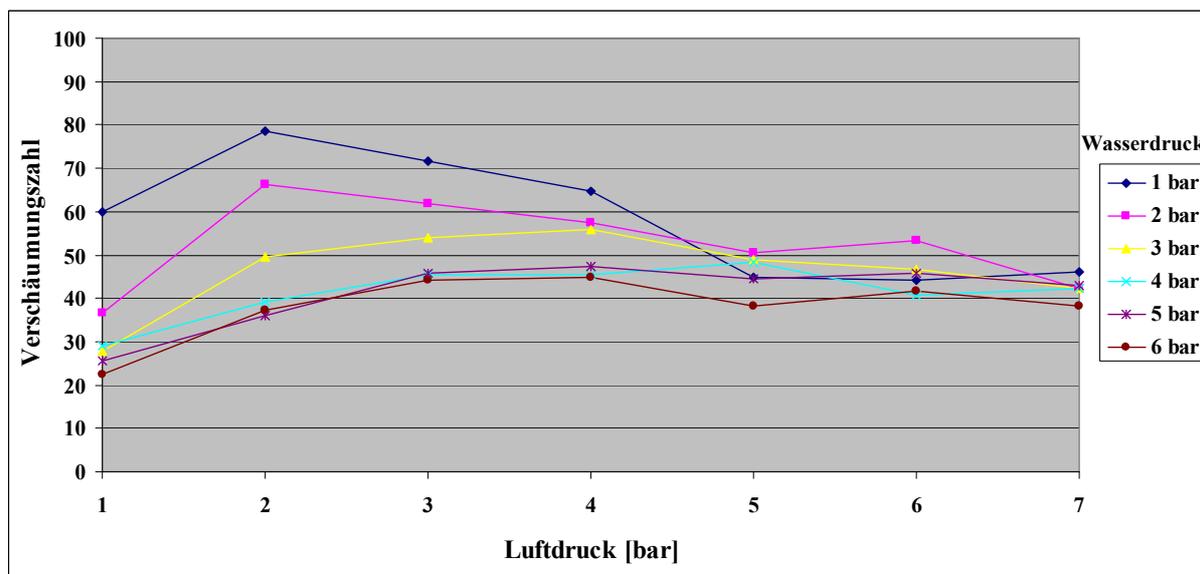
**Kombinierte Bauteile: AWG – Zumischer, Dralldüse, grobes Sieb**



**Abbildung 5-21 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Dralldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.**

Als weitere Abänderung sollte die Düse für das Wasser-Schaummittelgemisch getauscht werden, um durch eine gleichmäßigere Benetzung des Schaumsiebes die Auswirkungen auf die Verschäumung zu beobachten. Das Ergebnis zeigt eine deutlich bessere Verschäumung im unteren Druckluftbereich (bis zu 55 – 75 -fache Verschäumung bei 3 bar), allerdings fallen die Werte nach dem Maximum wieder stark ab.

**Kombinierte Bauteile: MSR – Zumischer, Dralldüse, grobes Sieb**



**Abbildung 5-22 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Dralldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.**

Auch der MSR-Zumischer erreicht in Verbindung mit der Dralldüse bessere Ergebnisse als mit der Kegeldüse, kommt jedoch nicht an die Maximalwerte des AWG-Zumischers heran. Allerdings fallen die Verschäumungszahlen nicht so stark ab und sind damit im oberen Druckluftbereich etwas höher als im vorangegangenen Versuch.

**Kombinierte Bauteile: AWG – Zumischer, Dralldüse, feines Sieb**

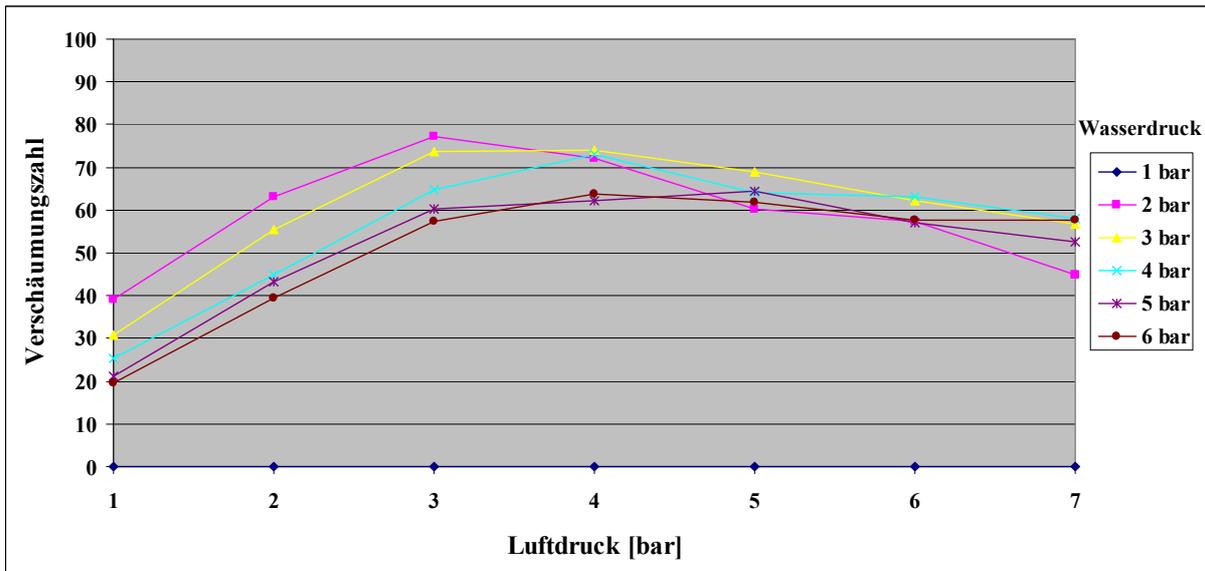


Abbildung 5-23 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Dralldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.

Durch Einbau des feinen Schaumsiebes in Verbindung mit der Vollkegeldüse und dem AWG-Zumischer konnte ein steiler Anstieg im unteren Druckluftbereich erreicht werden. Alle Maximalwerte liegen oberhalb der 60-fachen Verschäumung. Zudem bilden alle Kurven ein gleichmäßiges Band über den gesamten Bereich. Das feine Sieb erreicht auch hier, dass die Verschäumung im oberen Luftdruckbereich nicht so stark abfällt. Dadurch wird der Bereich der maximalen Werte wiederum breiter als bei den vorherigen Kombinationen.

**Kombinierte Bauteile: MSR – Zumischer, Dralldüse, feines Sieb**

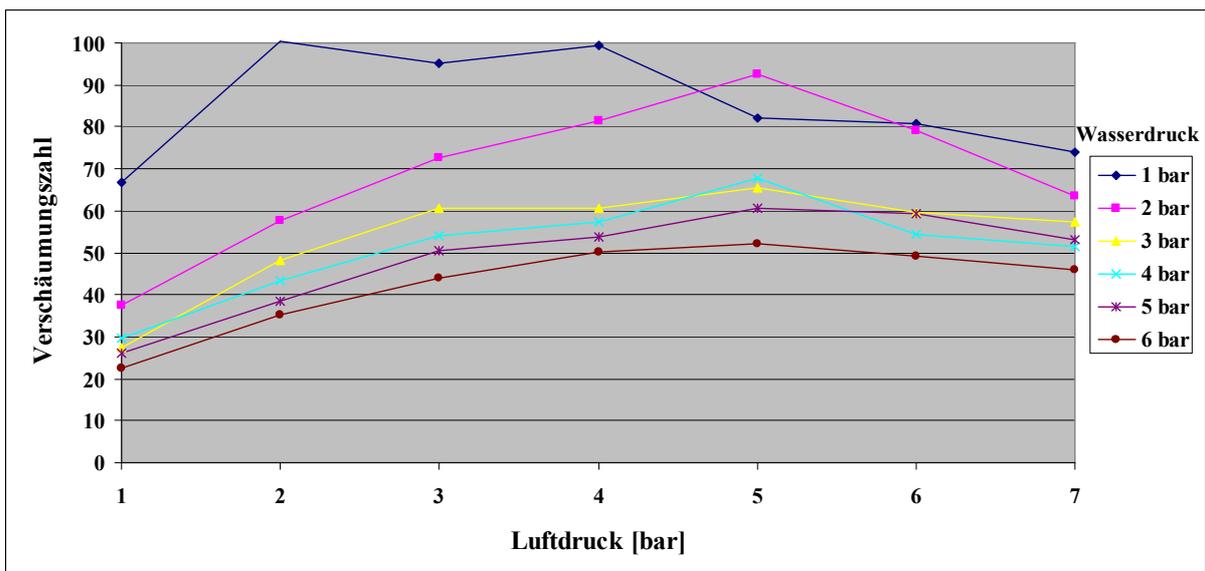


Abbildung 5-24 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Dralldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.

Als letzte Kombinationsvariante der verwendeten Bauteile kam der MSR-Zumischer mit Vollkegeldüse und feinem Sieb zum Einsatz. Der Anstieg der Kurven fällt nicht ganz so steil

aus wie bei Verwendung des AWG-Zumischers. Auch die Maximalwerte werden von den Kurven oberhalb 2 bar nicht erreicht. Die Werte im niedrigen Wasserdruckbereich (1 und 2 bar) fallen dagegen sehr stark aus dem gleichmäßigen Bandbereich der anderen Kurven heraus. Allerdings zeigt sich im Gesamtverlauf auch hier eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum Einsatz des groben Siebes.

### **Vergleich und Bewertung der Ergebnisse**

Zusammenfassend lässt sich ein eindeutiges Bild von den Einflüssen der verschiedenen Bauteile erstellen. Durch die Kombination und Gegenüberstellung der Ergebnisse ist der direkte Vergleich, sowohl der einzelnen Bauteile, als auch der letztendlichen Zusammenstellung, möglich. Weiterhin kann durch die Diagramme eine Tendenz für den optimalen Arbeitsbereich erstellt bzw. eine nachfolgende Optimierung ermöglicht werden.

- **Vergleich der Düsen:**

Die Kegeldüse, die den Wasserstrahl durch den inhärenten Störkörper aufbricht und dadurch einen Hohlkegel bildet, zeigt die niedrigsten Verschäumungszahlen. In Abbildung 5-25 ist das Strahlbild der Düse dargestellt. Es entsteht ein geschlossener „Wassermantel“, der dann in große Tropfen zerreißt. Im Inneren der Schaumkammer prallt der Strahl an die Wandungen und wird von da aus zurückgeworfen. Das wird zwar vom Druckluftstrom unterstützt, doch eine gleichmäßige Benetzung des Schaumsiebes ist so nicht realisierbar.

Die Dralldüse zeigt dagegen einen sehr feinen, gleichmäßigen Vollkegelstrahl. Bei exakt abgestimmter Entfernung vom Schaumsieb kann so die ganze Siebfläche gleichmäßig und effektiv benetzt werden.



**Abbildung 5-25 Hohlstrahl der Kegeldüse**



**Abbildung 5-26 Feinverteilter Vollstrahl der Dralldüse**

- **Gegenüberstellung der Siebstruktur**

Auch bei den zwei verwendeten Sieben ergibt sich eine klare Tendenz. Bei Verwendung des grobmaschigen Siebes vom Ursprungsgerät werden nicht so hohe Verschäumungszahlen erreicht wie beim Einsatz des feinmaschigen Siebes. Weiterhin werden bei der kleineren Maschenweite auch im oberen Bereich (5 und 6 bar) maximale Werte erreicht, womit eine effektive Verschäumung in einem breiteren Spektrum des Druckluftbereichs möglich wird. Bei dem gröberen Siebeinsatz entstehen bei niedrigem Luftdruck höhere Werte, die dann wieder abfallen. Der Unterschied der Verschäumungszahlen ist zwar nicht so deutlich wie der Einfluss beim Austausch der Düsen, dafür zeigt aber das Blasenbild deutliche Unterschiede. Beim grobmaschigen Sieb entsteht ein sehr ungleichmäßiges Blasenbild mit einem breiten Spektrum an unterschiedlichen Blasengrößen. Das feinmaschige Sieb erzeugt einen homogenen feinblasigen Schaum.

- **Vergleich der Zumischer**

Der Zumischer hat grundsätzlich kaum Einfluss auf die Verschäumungszahl. Er ist für die richtige prozentuale Gemischaufbereitung wichtig, die wiederum eine Grundvoraussetzung für die Schaumentstehung darstellt. Allerdings sind Arbeits- und Funktionsweise des Zumischers beispielsweise für den Durchfluss und Druckabfall verantwortlich. Der Nachteil des AWG – Venturizumischers ist das selbstansaugende Prinzip, welches mit druckabhängiger Zumischung und einem starken Druckabfall verbunden ist.

Der MSR-Zumischer arbeitet nach dem Wassermotorprinzip und ist daher (in seinem ausgeschriebenen Arbeitsbereich) druck- und durchflussunabhängig in Bezug auf die voreingestellte Zumischrate. Da in dem vorhandenen Durchflussbereich lediglich ein Modell mit Kolbenpumpe existiert, kam es bei jeder Kolbenbewegung zu einem Druckstoß, der den ungleichmäßigen Verlauf der Kurven, insbesondere bei niedrigen Wasserdrücken verursachte. Der vom Hersteller beschriebene geringe Druckabfall konnte bei den Versuchen nicht bestätigt werden. Insbesondere der intern gekoppelte Antrieb der Kolbenpumpe bewirkte Druckverluste und erzeugte die bereits erwähnten Schwankungen.

Insgesamt zeigt der Venturizumischer von AWG ein gleichmäßigeres Bild und erreicht im direkten Vergleich trotz der beschriebenen Nachteile leicht bessere Ergebnisse. Die effektivste Kombination der einzelnen Bauteile bilden also AWG-Zumischer, Dralldüse und das feine Schaumsieb. Somit wurden diese als Grundlage für die weiteren Versuche genutzt.

- **Effektivität der Schaumerzeugung**

Da sich der Kurvenverlauf aller getesteten Kombinationen nicht an den eingesetzten Parametern orientierte, wurde der erzeugte Schaumvolumenstrom (aus Durchfluss und Verschäumungszahl berechnet) mit dem zuvor ermittelten Luftvolumenstrom verglichen. Dabei wurden, u.a. beim Ursprungsgerät (siehe Abbildung 5-27), enorme Differenzen festgestellt. Insbesondere das eingeleitete Luftvolumen wird, vor Allem bei hohen Drücken, nicht annähernd in Schaum umgesetzt.

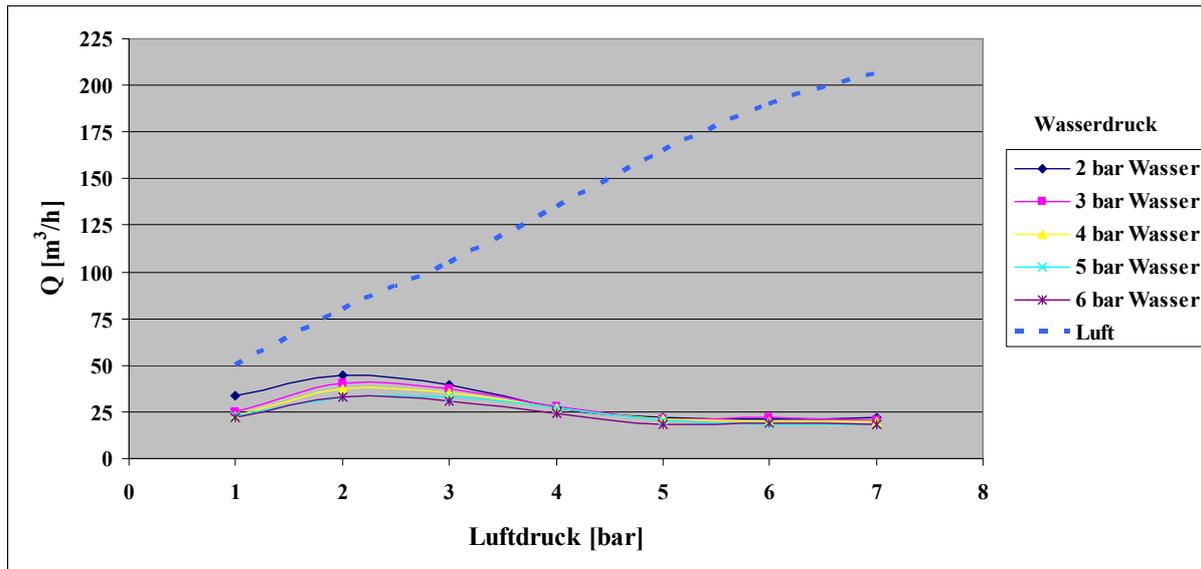


Abbildung 5-27 Gegenüberstellung von eingesetztem Luft- und erreichtem Schaumvolumenstrom im Ursprungsgerät BG50

Der eingesetzte Luftvolumenstrom übertrifft die erzeugte Schaumausbeute um ein Vielfaches. Je höher der eingespeiste Druck und damit der Durchfluss ist, um so ineffizienter wird die Schaumausbeute. Dass letztendlich nicht alle Luft in Schaum umgewandelt wird, ist nachzuvollziehen, aber diese immensen Abweichungen sprechen für ein anderes Phänomen, was bereits *Orlow, Reutt* und *Samsonow* 1967 in ihrem Artikel „Die Erzeugung von hochverschäumten Schaum“ beschrieben hatten. Bei Versuchen zur Schaumausbeute (insbesondere zum minimalen Luftstrom) stellten sie fest, dass es nur einen relativ kleinen Bereich gleichmäßiger, steter Schaumerzeugung gibt. Bei zu hoher Luftgeschwindigkeit verringert sich die Schaumausbeute bzw. kann laut ihren Aussagen sogar ganz verschwinden. „Dieses Phänomen wird durch die Diffusion der Tensidmoleküle aus dem Inneren an die Flüssigkeit – Luft Grenzfläche begründet. Wenn die Deformierung der Tropfen zu schnell wird, können die Moleküle des Schaumbildners nicht schnell genug in die Randbereiche gelangen, sodass die Blasen zerplatzen und keine gleichmäßige Blasenbildung möglich ist.“ [31]

Daher wird auch die Verschiebung der Maxima beim Einsatz des feinmaschigen Schaumsiebes erklärt. Durch die kleineren Radien sind auch die Diffusionswege kürzer, sodass die Tensidmoleküle eher die Grenzflächen erreichen können und somit die Blasenbildung bei gleicher Luftgeschwindigkeit im Vergleich zum grobmaschigeren Sieb besser möglich ist.

Letztendlich ist jedoch die Entstehungsgeschwindigkeit zu hoch, die wiederum hauptsächlich vom Luftvolumenstrom beeinflusst wird. Grundsätzlich sollte aber das gesamte System überdacht werden, da sich diverse Problemstellen und Verbesserungsmöglichkeiten gezeigt hatten. Unter anderem könnte die Verringerung der Bildungsgeschwindigkeit auch durch eine Vergrößerung des Siebdurchmessers realisiert werden. Weiterhin war eine Verbesserung der Lufteinspeisung möglich (Gleichmäßigkeit, Impulsverringern), die bisher durch vier kleine Löcher realisiert wurde.

Eine Verkürzung der Schaumkammer würde durch eine abgeänderte Siebaufnahme zwar keine potentielle Verbesserung bezüglich des Schaumvolumens bringen, jedoch den Siebwechsel vereinfachen und durch Platzersparnis und Gewichtsreduzierung die Bedienung erleichtern. Weitere Versuche zur Optimierung der Siebform (Vergrößerung der Oberfläche durch mehrere Sieblagen, Kegel- oder Halbkugelförmige Siebflächen brachten keine wesentlichen Erkenntnisse, so dass von Nun an flache runde Siebeinsätze genutzt wurden.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollten im Folgenden eine weitere Optimierung des Schaumerzeugers bewirken, um eine möglichst optimale Abstimmung der Bauteile mit einer stabilen und maximal erreichbaren Schaumleistung sicherzustellen.

#### **5.1.4. Optimierung der Schaumkammer**

Um die Schaumbildungseffektivität zu erhöhen, wurde die Schaumkammer, das Herzstück des Schaumerzeugers, umgeändert. Sie wurde im Durchmesser vergrößert, sodass die Siebfläche und der Ausgangsdurchmesser von der 2 ½ Zoll Storz - „B“ Kupplung auf eine 4 Zoll - „A“ Kupplung umgerüstet werden konnte. Damit vergrößert sich die Siebfläche, sodass sich die Strömungsgeschwindigkeit bei der Schumbildung verringert. Anstelle der selbstgebauten Dralldüse wurde auf eine Düse von Lechler mit vergleichbaren Leistungsdaten, aber wesentlich geringerem Platzbedarf (siehe Abbildung 5-28) umgerüstet. Weiterhin wurde das Schaumsieb (wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben) nun als flache runde Scheibe direkt in die Storkupplung eingebaut, um somit den unnötigen Platzbedarf des Siebvorsatzes hinter der Schaumkammer einzusparen. Trotz nahezu doppelten Querschnittes konnte somit die Länge der Schaumkammer um nahezu ca. 65 % verringert werden.

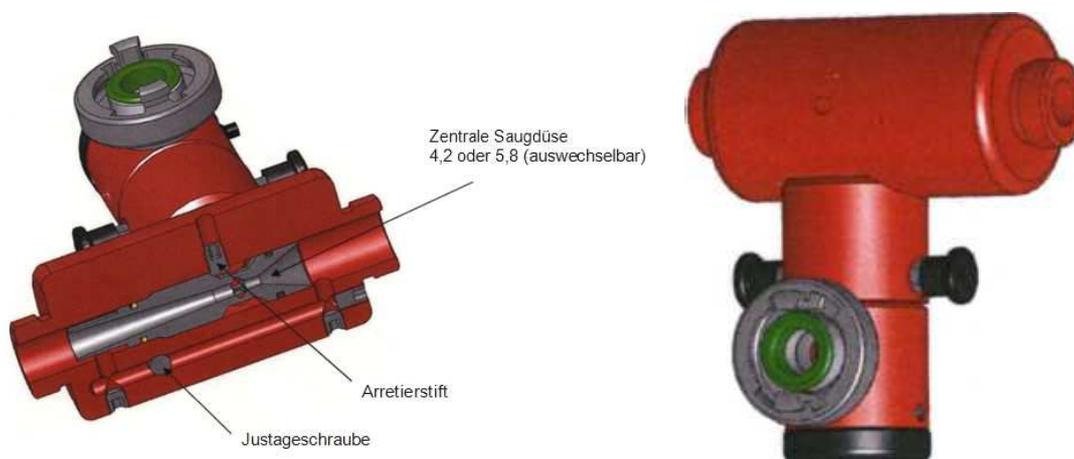


**Abbildung 5-28 Gegenüberstellung der beiden Dralldüsen (Eigenbau und Fa. Lechler)**

Dadurch konnte der Zumischer direkt vor die Schaumkammer verbaut werden, um einerseits eine bessere Bedienung zu ermöglichen und andererseits Druckverluste durch die unnötigen Rohrleitungen (insbesondere durch die Bögen) einzudämmen.

Auch die Zumischung bedurfte noch weiterer Verbesserungen. Der AWG – Zumischer arbeitete druckabhängig und konnte nicht genau auf 3 % eingestellt werden. Der Zumischer von MSR – Dosiertechnik arbeitete mit präzise einstellbarer druckunabhängiger Zumischung, erzeugte aber (durch die Kolbenbewegung) störende Druckstöße, brauchte sehr lange zum Ansaugen und war sehr aufwendig in Bezug auf Entleerung und Reinigung. Auf Rückfrage und nach Beratung durch die Entwicklungsabteilungen beider Firmen konnten die bestehenden Probleme diskutiert und weitere Zumischer getestet werden.

Durch AWG (in Kooperation mit dem Ingenieurbüro Safe-Tec - Vertriebspartner für „Fire-Sorb“ - Feuerlöschgel) wurde ein Zumischer-Prototyp für Feuerlöschgel erprobt, der von den Abmaßen und Leistungsdaten mit dem HD-60 vergleichbar ist.



**Abbildung 5-29 Schnittdarstellung und Außenansicht des AWG-Safetec-Zumischers [70]**

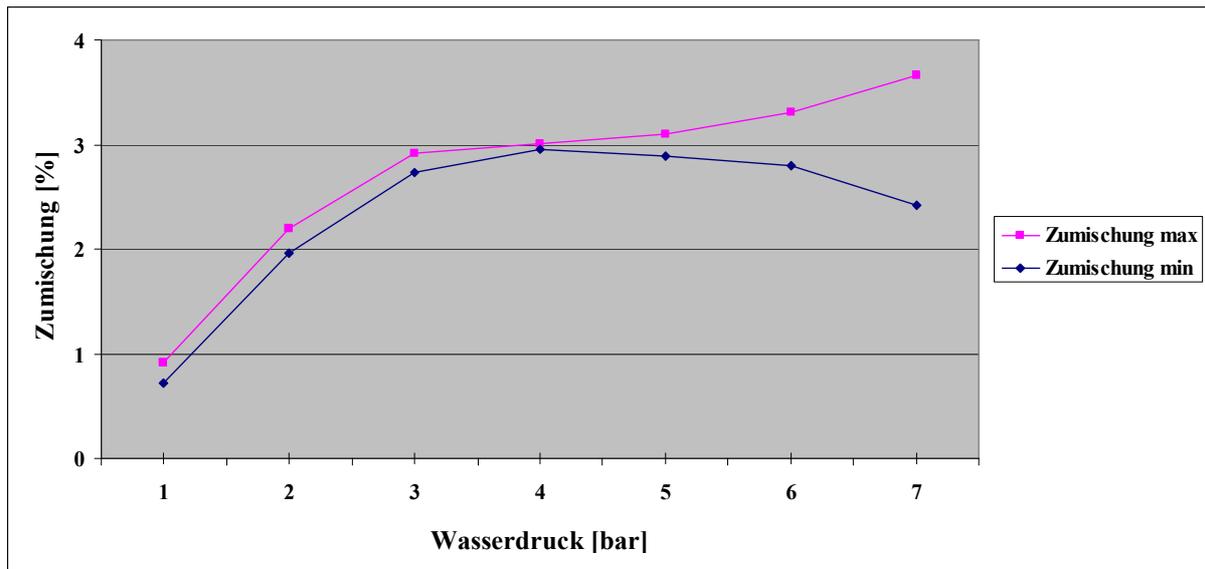
Dieser Zumischer verfügte über eine austauschbare Venturidüse (bessere Abstimmung und Veränderung des Durchflusses möglich) und eine Bypassleitung zur Feineinstellung von Durchfluss und Ansaugleistung. Dadurch konnte die Zumischung individuell an Druck und Düse angepasst werden. Weiterhin wurde ein leicht abzunehmender Saugstutzen verbaut, der die Reinigung und Wartung bzw. Instandsetzung nach Verunreinigung sehr erleichtert. Nach Anpassung und Abstimmung von Dralldüse und Zumischer konnten sehr gute Ergebnisse bezüglich Durchfluss und gleichmäßiger Ansaugleistung erzielt werden. Somit fiel die Auswahl auf den FireSorb - Zumischer.

### **5.1.5. Das Leistungsspektrum nach Optimierung**

Aus der veränderten Schaumkammer und den ausgetauschten Komponenten (Firesorb - Zumischer und Lechler - Dralldüse) wurde der Schaumerzeuger neu zusammengestellt und die einzelnen Bauteile aufeinander abgestimmt. Aufgrund der Veränderungen wurde als Basis für die weiteren Versuche erneut das Leistungsspektrum bestimmt. Die einzelnen Anpassungen und deren Merkmale werden im Folgenden genau erläutert.

- Zumischrate

Als Zubehör wurden von SafeTec zwei verschiedene Saugdüsen (4,2 und 5,8 mm Durchgangsbohrung) mitgeliefert. Die kleine Saugdüse des neuen Zumischers erbrachte in Verbindung mit der Dralldüse eine zu hohe Ansaugung, sodass sie gegen den zugehörigen größeren Einsatz mit erweiterter Bohrung und folglich höherem Durchfluss ausgetauscht werden musste. Letztlich wurde die Ausgangsbohrung der Lechler - Dralldüse zur Feinabstimmung der Zumischrate noch auf 7,5 mm vergrößert, um den Gegendruck zu verringern und somit die Zumischung weiter zu optimieren. (Durch den kleineren Durchmesser im Vergleich zur zuvor verbauten Hohlkegeldüse und insbesondere den in der Düse befindlichen Drallkörper ist die Gegendruckempfindlichkeit der Dralldüse bei ansteigendem Eingangsdruck höher – die Verwendung der Dralldüse ermöglicht eine wesentlich bessere Wasserverteilung – bedarf jedoch einer genaueren Einstellung.) Das nachfolgende Diagramm zeigt die Zumischrate der abgestimmten Variante von AWG-Safetec-Firesorb – Zumischer und aufgebohrter Lechler - Dralldüse.

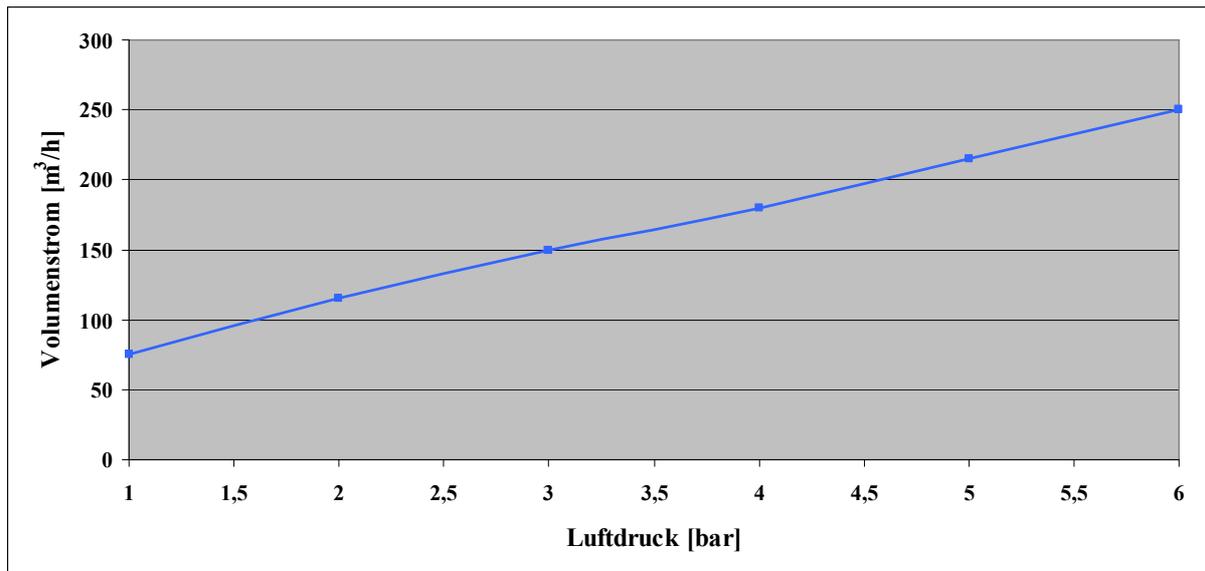


**Abbildung 5-30** Zumischrate AWG-Safetec-Zumischer in Verbindung mit aufgebohrter Dralldüse (Lechler)

Der Kurvenverlauf zeigt ab 3 bar eine Zumischung im Bereich von 3%. Bei einem Druck über 5 bar wird die Beimengung von Schaummittel in der „max“ – Einstellung erhöht und in der „min“ - Einstellung verringert. Prinzipiell kann aber über die stufenlos verstellbare Regulierschraube eine passende Einstellung gefunden werden. Für den geplanten Arbeitsbereich war diese Abstimmung zwischen Zumischer und Düse sehr hilfreich.

- Luftvolumenstrom

Da bei den vorigen Versuchen (Abschnitt 5.1.2 und 5.1.3) eine zu große Luftgeschwindigkeit am Schaumsieb die Schaumproduktion negativ beeinflusste, sollte der Volumenstrom am überarbeiteten Schaumerzeuger beeinflussbar sein und an der tatsächlichen Schaumrate eingestellt werden. Die Möglichkeit wurde durch Kunststoffstopfen realisiert, die in die Schlauchtüllen der Luftzuleitung eingepresst wurden. Diese wurden stufenweise aufgebohrt, bis die maximale Verschäumungszahl bei vollem Luftdurchgang erreicht wurde. Anschließend wurde der Luftvolumenstrom entsprechend der folgenden Abbildung ermittelt.

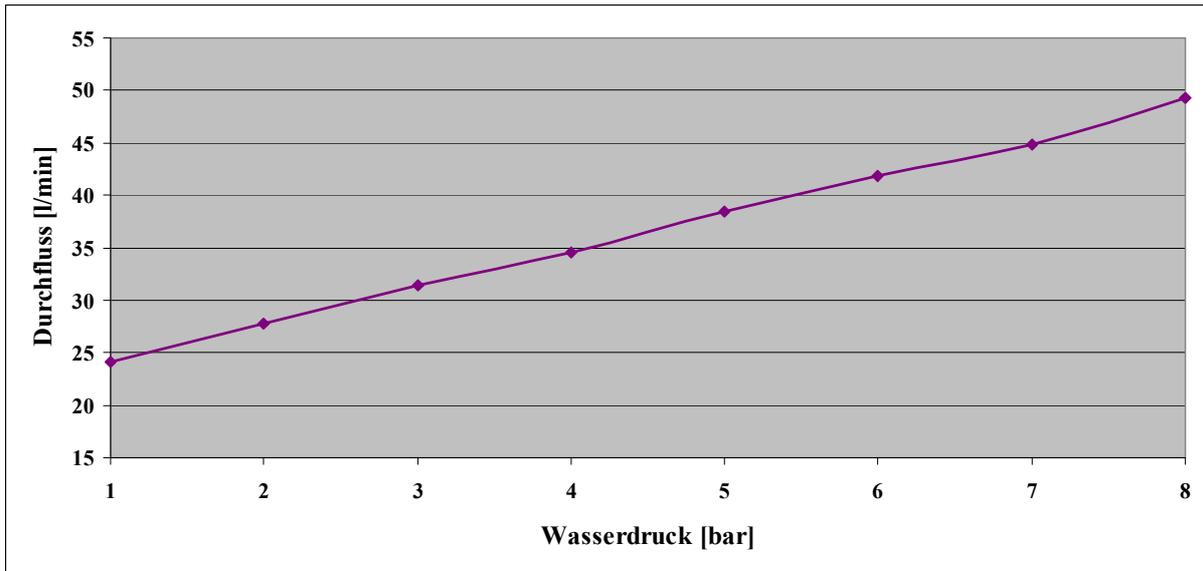


**Abbildung 5-31 Luftvolumenstrom im optimierten Schaumerzeuger**

Die Kurve in Abbildung 5-31 hat einen nahezu linearen Anstieg. Der Vergleich zum Ursprungsgerät (Abbildung 5-7) zeigt trotz der Kunststoffeinsätze einen höheren Luftvolumenstrom (ursprünglich 190 m<sup>3</sup>/h bei 6 bar). Dies liegt vor allem an den vergrößerten Luftzuleitungen und dem erhöhten Luftbedarf durch den erweiterten Querschnitt der Schaumkammer. Aufgrund der Vergrößerung von 65 mm auf 100 mm, ist die tatsächliche Bildungsgeschwindigkeit der Schaumblasen immer noch kleiner als beim Ursprungsgerät. Somit bestätigt das die Theorie der Blasenbildung, die in Abschnitt 5.1.3 erläutert wird. (Bei 6 bar entsteht beim alten System eine Luftgeschwindigkeit von ca. 57 km/h im Gegensatz zu 32 km/h bei der neueren Variante. Damit halbiert sich die Geschwindigkeit nahezu.)

- Wasservolumenstrom

Der Wasservolumenstrom in der oben beschriebenen Verbindung von AWG-Safetec – Zumischer und Lechler - Dralldüse wurde analog zum ursprünglichen Modell ermittelt und im folgenden Diagramm dargestellt.

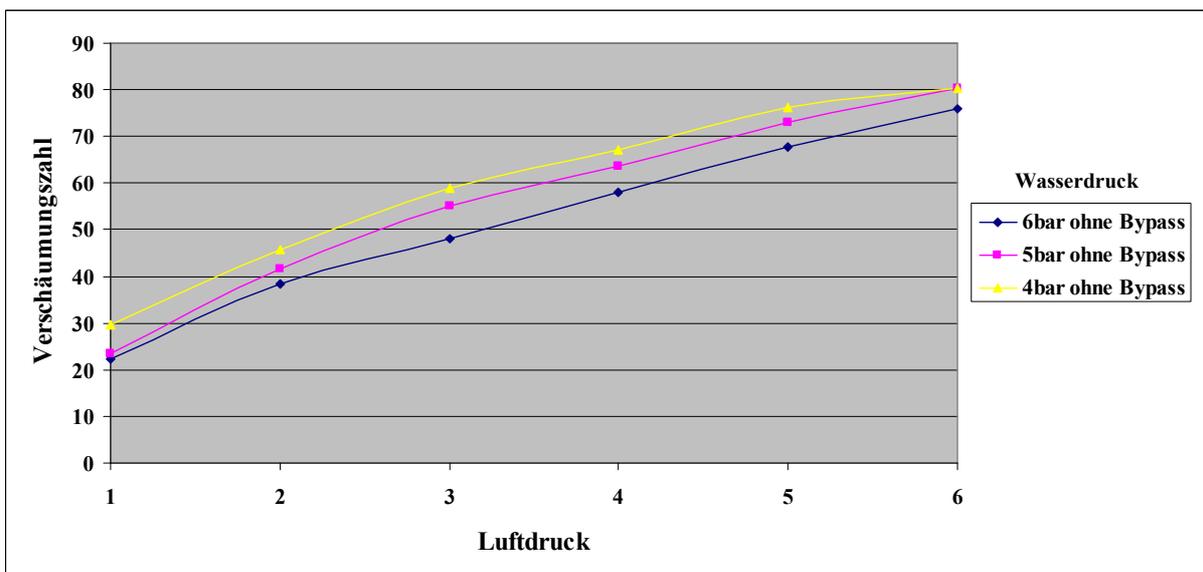


**Abbildung 5-32** Durchflusskennlinie AWG-SafeTec-Zumischer in Kombination mit Lechler-Dralldüse

Durch die größere Saugdüse im Zumischer in Verbindung mit der aufgebohrten Dralldüse ist der Wasserdurchfluss nun auch wesentlich höher. In Abbildung 5-32 ist wiederum ein nahezu linearer Anstieg erkennbar. Bei 1 bar werden mit knapp 25 l/min bereits die Werte vom Vorgängermodell bei 4 bar erreicht. Durch die Querschnittsvergrößerung ist jedoch auch die Siebfläche um nahezu 58% angewachsen, sodass die effektiv durchgesetzte Wassermenge pro Fläche nicht zugenommen hat, sondern sogar noch geringer geworden ist.

- Verschäumungszahlen

Durch die Veränderungen am Schaumerzeuger, insbesondere die Querschnittsvergrößerung und die verbesserte Benetzung des Schaumsiebes in Verbindung mit dem angepassten Luftvolumenstrom, konnten wesentlich höhere Verschäumungszahlen erreicht werden.

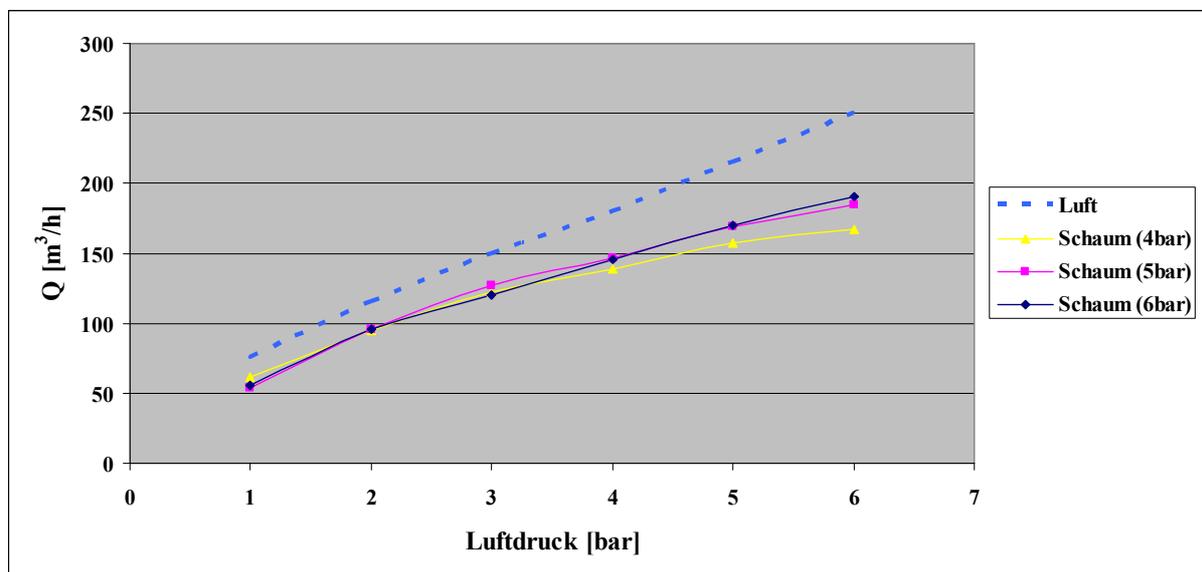


**Abbildung 5-33** erreichte Verschäumungszahlen beim optimierten Schaumerzeuger

Abbildung 5-33 zeigt das Diagramm mit den ermittelten Werten für einen Wasserdruck von 4, 5 und 6 bar. Die Kurven steigen alle drei stetig über den gesamten Luftdruckbereich bis auf Werte von 80 an. Dabei erreichen die Kurven mit niedrigerem Wasserdruck im gesamten Verlauf höhere Werte, was im geringeren Wasserdurchfluss und damit Gewichtsanteil des entstehenden Schaumes begründet liegt. Dass die maximale Verschäumung nun bei 6 bar Luftdruck erreicht wird und wesentlich höher als bei den Vorgängermodellen ist, liegt insbesondere an der besseren Abstimmung des Luftdurchsatzes an der tatsächlich erreichten Verschäumung.

- Effektivität des Schaumerzeugers

Wie bereits beim Ursprungsmodell, sollte als Leistungskriterium eine Gegenüberstellung von eingesetztem Luft- und erzeugtem Schaumvolumenstrom erfolgen. Bei dem verwendeten Basisgerät (siehe Abschnitt 5.1) entstand bei steigendem Luftdruck ein sehr ungünstiges Verhältnis zwischen ein- und umgesetztem Luftvolumen. Durch die Abstimmung des Luftdurchsatzes an der erreichten Verschäumungszahl (Aufbohren der Kunststoffüllen in den Luftzuleitungen) sollte auch das Verhältnis von Luft zum Schaum wesentlich besser ausfallen als beim Ursprungsgerät. Das untenstehende Diagramm zeigt den ermittelten Vergleich beim angepassten Schaumerzeuger.



**Abbildung 5-34 Vergleich von eingesetztem Luft- und erhaltenem Schaumvolumenstrom**

Die Kurven des Schaumvolumenstroms liegen sehr nah beieinander. Nur die Kurve des geringsten Wasserdrucks zeigt ab 4 bar Luftdruck etwas niedrigere Ergebnisse. Alle drei Kurven orientieren sich im gesamten Verlauf an der nahezu linear ansteigenden Luftvolumenkennlinie, fallen jedoch bei steigendem Luftdruck und damit -volumenstrom

etwas ab. Über den gesamten Bereich von 1 bis 6 bar Luftdruck wird ca. 1/3 mehr Luft eingespeist als letztendlich im Schaum gebunden wird.

Die Übereinstimmung der drei unterschiedlichen Wasserdruckkennlinien im erreichten Schaumvolumenstrom trotz unterschiedlicher Verschäumungszahlen ergibt sich daher, dass bei höherem Wasserdruck auch ein größerer Volumenstrom des Wasser-Schaummittelgemisches erzeugt wird. Dabei verringert sich jedoch analog die Verschäumungszahl. Beide Effekte gleichen sich somit nahezu gegenseitig aus. Die Werte des Schaumvolumenstroms liegen somit für 1 bar Luftdruck bei 1000 l/min und steigen bis 6 bar auf nahezu das Dreifache an.

## ***5.2. Das Arbeitsgerät zur Erzeugung der Schaumproben***

Durch die Vorversuche und Abstimmung der ausgewählten Komponenten konnten der erzeugbare Schaum und der Entwicklungsstand des Beschäumungsgerätes als adäquate Grundlage für die angedachten Versuche betrachtet werden. Um nachträglicher Korrosion vorzubeugen wurden alle Bauteile in Edelstahl beschafft und zusätzlich die Anordnung der Komponenten überdacht.

### **5.2.1. Aufbau**

Der grundsätzliche Aufbau und die Abfolge der Bauteile gleichen dem Ursprungsgerät. Sie waren aufgrund der Funktion vorgegeben und konnten folglich nicht verändert werden. Jedoch war es nun durch die stark verkürzte Schaumkammer möglich die Bauteile nacheinander (in einem Strang) anzuordnen. Die Vorteile dabei waren:

- eine erhöhte Standfestigkeit, durch beidseitigen Anschluss der Leitungen
- bessere Übersichtlichkeit und Bedienbarkeit (Eingangs- und Ausgangsseite, bessere Erreichbarkeit der Kugelhähne)
- Vermeidung von unnötiger Leitung und Rohrbögen und dadurch
- Material-, Gewicht- und Kostenersparnis

Die Umbauten wurden dokumentiert und technische Zeichnungen und Baupläne für die RWE-Power AG zur Nachfertigung erstellt.

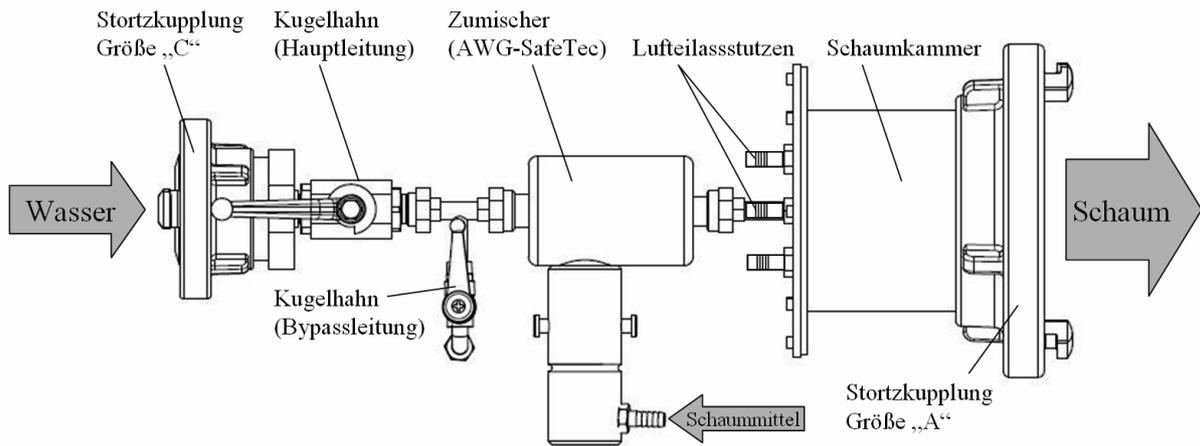


Abbildung 5-35 Anordnung der wesentlichen Bauteile am optimierten Schaumerzeuger

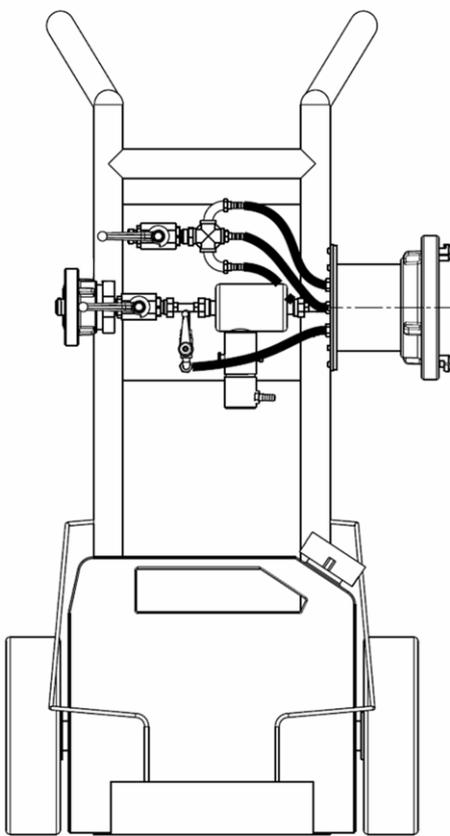


Abbildung 5-36 technische Zeichnung Beschäumungsgerät (optimierte Ausführung)



Abbildung 5-37 Beschäumungsgerät (optimierte Ausführung)

## 5.2.2. Funktion des Schaumerzeugers

Die Funktion des optimierten Beschäumungsgerätes entspricht der des Ursprungsmodells. Allerdings ist durch den Einsatz der Dralldüse, die einen Vollkegel erzeugt, eine weitaus optimalere Benetzung des Siebes gegeben. Prinzipiell läuft die Schaumerzeugung (siehe

Abbildung 5-38) wie in einem gewöhnlichen Feuerwehr-Mittelstrahlrohr ab, nur wird die Luft hier nicht selbst angesaugt, sondern über einen externen Kompressor als Druckluft (2) in die Mischkammer eingeleitet. Parallel dazu erzeugt der Wasserfluss nach Öffnen des Kugelhahnes im Venturizumischer einen Unterdruck, durch den Schaummittel aus dem Kanister angesaugt und dem Löschwasser zugesetzt wird. Das Wasser-Schaummittelgemisch (1) wird anschließend in der Verschäumungskammer durch die Dralldüse (3) in feine Tropfen (4) zerstäubt und auf das verbaute Sieb (5) gesprüht. In Verbindung mit der eingeleiteten Druckluft entsteht der Schaum (6) an den Maschen des Siebes.

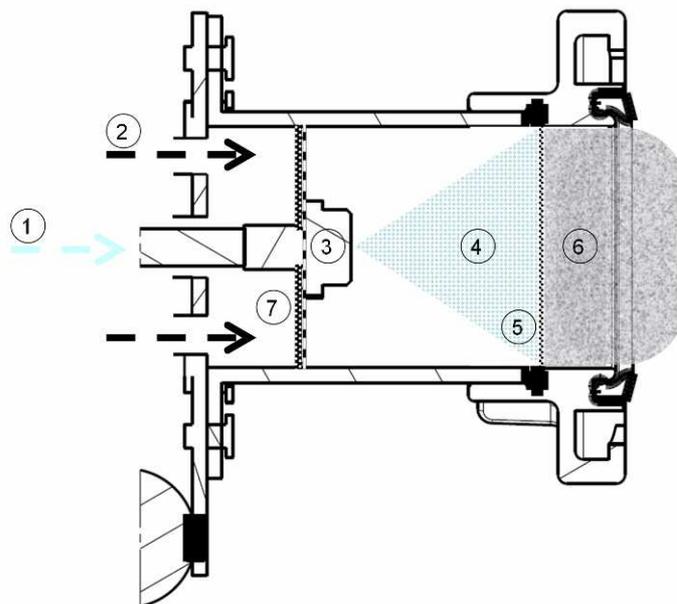
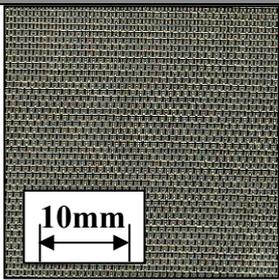
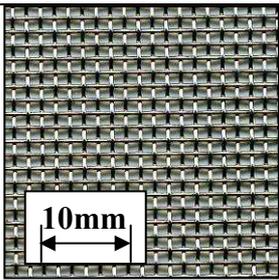
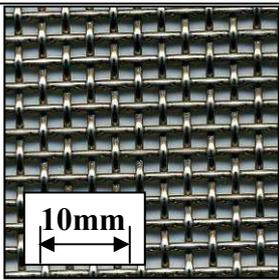
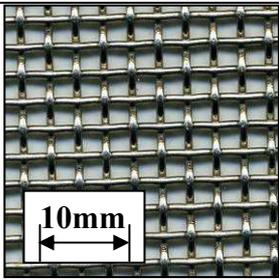
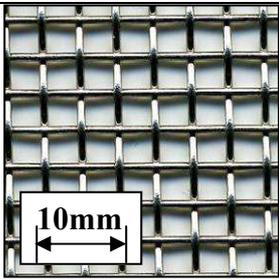


Abbildung 5-38 Darstellung und Funktion der Schaumkammer

### 5.2.3. Verwendete Verschäumungssiebe

Da in den Vorversuchen aufgefallen war, dass trotz verschiedener Siebe gleiche Verschäumungszahlen bei unterschiedlicher Schaumstruktur erreichbar sind, wurde dies als Grundlage für die weiteren Untersuchungen ausgenutzt. Zusätzlich zu den zwei bisher eingesetzten Sieben wurden drei ergänzende, ein noch feineres und zwei, als Abstufung zwischen den bisher verwendeten Größen, ausgewählt. Diese Konfiguration ermöglicht verschiedene Schaumstrukturen und Blasengrößen unter sonst gleichen Arbeitsbedingungen (Luft- und Wasserdurchfluss, Temperatur, Schaummittel, etc.). Anhand der dadurch hergestellten Schäume, kann die Fließfähigkeit bei den verschiedenen Schaumstrukturen ermittelt werden. Dazu wurden aus den fünf Sieben Einsätze für die Schaumkammer hergestellt. Die Siebe hatten folgende Struktur: ( $w$  = Maschenweite  $d$  = Drahtdurchmesser)

Tabelle 5-1 Benennung der verwendeten Siebe

Siebbenennung	Maschenweite	Drahtdurchmesser	
Sieb 1	w = 0,3 mm	d = 0,2 mm Ø	
Sieb 2	w = 1,0 mm	d = 0,5 mm Ø	
Sieb 3	w = 1,6 mm	d = 1,0 mm Ø	
Sieb 4	w = 2,0 mm	d = 1,0 mm Ø	
Sieb 5	w = 3,0 mm	d = 1,0 mm Ø	

#### **5.2.4. Parameter während der Schaumerzeugung**

Das Löschwasser wurde, wie bei den Vorversuchen, aus dem hausinternen Hydrantennetz genommen. Der maximal verfügbare Druck liegt hier bei 6 bar, unterliegt aber tageszeitbedingt leichten Schwankungen. Um diese herauszufiltern wurde der Druckminderer auf 5 bar eingestellt.

Zumischer und Dralldüse waren im Vorhinein so abgestimmt, dass eine Ansaugung von 3 % Schaummittel (Sthamex F-15) zu jedem Zeitpunkt gegeben war. Druckluft wurde ebenfalls aus dem hausinternen Netz entnommen. Der Druckminderer wurde hier auf 6 bar reguliert. Damit waren die grundlegenden Einstellungen festgelegt. Um tages- und wetterbedingte Einflüsse so gering wie möglich zu halten, wurden die Versuche so geplant, dass sie an Tagen mit Schwachwindwetterlagen zeitnah nacheinander durchgeführt werden konnten.

## 6. Praktische Versuche

Mit den Versuchen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, die Fließfähigkeit von Schaum differenzieren und zu quantifizieren. Als Grundlage für die Schaumerzeugung wurde das in Abschnitt 5 beschriebene Schaumgerät entwickelt bzw. optimiert, sodass es realitätsnahe Versuche im Labormaßstab zuließ und ebenso in der Praxis als Löschgerät eingesetzt werden kann. Durch verschiedene Siebeinsätze und verstellbare Bedieninstrumente waren Möglichkeiten gegeben die Verschäumung zu beeinflussen. Somit konnten verschiedene Szenarien in den Experimenten dargestellt werden. Für den geplanten praktischen Einsatz ermöglicht dies ein breites Spektrum für verschiedene Anwendungsgebiete. Diese sind allerdings zu weitläufig und daher nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

Anhand der theoretischen Grundlagen, die Orlow, Reutt und Samsonow in [31] erörtern, wurden die Einflüsse von Luft- und Wasserdruck auf die Verschäumungszahl des Basisgerätes ermittelt und aus den gewonnenen Erkenntnissen ein optimiertes Gerät für die Versuche und einen späteren realen Einsatz entwickelt. Das Ziel war, einen möglichst optimalen Bereich zu finden, der eine sichere und stabile Verschäumung zulässt, die wiederum als Grundlage für die Untersuchung des Fließverhaltens genutzt werden sollte.

Um dabei die Auswirkungen des Wassergehaltes so gering wie möglich zu halten, wurden außer den Verschäumungssieben alle Parameter beibehalten. Auf diese Weise konnten fünf Schaumproben – jeweils mit unterschiedlicher Struktur, aber nahezu gleicher Verschäumungszahl – hergestellt und in einem weiteren dazu entwickelten Versuchsaufbau in ihrem Fließverhalten gegenübergestellt werden.

### ***6.1. Versuchsaufbau zum Ermitteln der zu bewertenden Schaumparameter***

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung und Bewertung der Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum teilt sich in vier Bereiche auf:

- Schaumerzeuger
- Ermittlung der Verschäumungszahl
- Bestimmung der Schaumstruktur (Blasengröße und -zusammensetzung)
- Ermittlung des Wasseraustritts (Wasserhalbzeit)
- Bestimmung von Ausbreitungsverhalten und Fließfähigkeit

### **6.1.1. Aufbau und Funktion des Schaumerzeugers**

Aufbau und Funktion des Schaumerzeugers wurden, wie im Abschnitt 5.2 erläutert, übernommen.

### **6.1.2. Versuchsaufbau zur Ermittlung der Verschäumungszahl**

Die Schaumgüte von Feuerlöschschaum wird nach dem Stand der Wissenschaft über das Schaumgewicht ermittelt und als Verschäumungszahl angegeben. Im Rahmen dieser Arbeit kam der Bestimmung dieser Kenngröße eine besondere Bedeutung zu. Einerseits sollte anhand von Versuchen der praktische Nachweis für die Ausführungen von *Orlow*, *Reutt* und *Samsonow* (siehe [31]) erbracht werden, um somit die optimalen Einstellungen des Schaumerzeugers herauszufinden und die Einflüsse von Luft- und Wasserdruck darzulegen. Andererseits sollte die Betrachtung der Fließfähigkeit von Schäumen gleicher Verschäumungszahl erfolgen. Somit war diese Kenngröße das wesentliche Beurteilungskriterium zur Charakterisierung der Schaumproben.

Bei den anschließend beschriebenen Versuchen erfolgte die Ermittlung der Verschäumungszahl in Anlehnung an die Vorgehensweise in *DIN EN 1568-1* „*Feuerlöschmittel – Schaummittel - Teil 1: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum zum Aufgeben auf nichtpolare Flüssigkeiten*“ - Anhang G (vergl. Abschnitt 3.5.3). Da in Abhängigkeit von Behältergröße und -volumen auch unterschiedliche Messwerte entstehen können, wurde für die Auswertung ein Behälter beschafft, der in den Abmessungen dem in der DIN beschriebenen Behälter gleicht (zylindrisches Gefäß Ø 650 mm, h = 600 mm). Lediglich die Ablassöffnung zur Bestimmung der Wasserviertel- bzw. Halbwertszeit war nicht vorhanden, da zum Zeitpunkt der Versuchsplanungen nicht beabsichtigt war, diese im Rahmen der Untersuchungen näher zu betrachten (bei der Auswertung der Versuchsdaten wurde wie in Abschnitt 6.1.4 beschrieben, nachträglich eine Analyse der Wasserhalbzeit vorgenommen und dafür ein separater Behälter mit Ablassöffnung hergestellt).

### **6.1.3. Vorgehen zur Bestimmung der Schaumstruktur**

Um ein möglichst genaues Bild des erzeugten Schaumes zu erhalten sollte die Schaumstruktur näher bestimmt werden. Nach Aussage der bisherigen Fachliteratur und Vorgehensweise in den Normen werden lediglich Verschäumungszahl und Wasserausscheidung ermittelt. Hier in dieser Arbeit war durch Verwendung unterschiedlicher Siebeinsätze davon auszugehen, dass verschiedene Schaumstrukturen bei gleicher Verschäumungszahl entstehen konnten. Die

Bestimmung der unterschiedlichen Schäume sollte über Blasengröße und -zusammensetzung bzw. -verteilung erfolgen. Dazu wurde jeweils nach Bestimmung der Verschäumungszahl eine Schaumprobe auf einer Petrischale entnommen und auf einem Flachbettscanner unter Zuhilfenahme eines Maßstabes als Referenz eingelesen. Die Bilder wurden anschließend über ein Bildverarbeitungsprogramm vergrößert und die abgelichteten Blasen manuell ausgezählt.

#### **6.1.4. Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wasserhalbzeit**

Im Verlauf der Versuchsauswertung ließen einige Ergebnisse einen möglichen Zusammenhang des Fließ- bzw. Ausbreitungsverhaltens der erzeugten Schaumproben mit dem Wasserauslauf des Schaumes vermuten. Daher sollte für die jeweiligen Schaumstrukturen nachträglich die Wasserhalbzeit ermittelt werden. Da lediglich orientierende Werte benötigt wurden und der Behälter für die Bestimmung der Verschäumungszahl keine geeignete Vertiefung für einen Auslauf vorwies, wurde ein separater Auslaufbehälter hergestellt, der jedoch mit 150 l und den Abmessungen  $\varnothing = 57 \text{ mm}$ ,  $h = 59 \text{ mm}$  ein kleineres Volumen vorwies als der Behälter der *DIN EN 1568-1*.

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wasserauslaufs besteht aus einer geeichten Feinwaage, die zur Gewichtsbestimmung der ausgelaufenen Flüssigkeit genutzt wird, einem Messbecher (Fassungsvermögen 1 l), dem Schaumbehälter und einer Stoppuhr zur Zeitbestimmung.

Die Ermittlung der Werte erfolgt dann wieder in Anlehnung an die DIN. Der mit Schaum gefüllte Behälter wird zuvor zur Bestimmung der Verschäumungszahl gewogen und anschließend über der Wage positioniert, auf der der Messbecher zum Auffangen der austretenden Flüssigkeit steht. Über das Gewicht des sich allmählich füllenden Messbechers, wird der zeitliche Wasserverlust des Schaumvolumens ermittelt.

#### **6.1.5. Versuchsaufbau zur Bestimmung der Fließfähigkeit**

Für die Bestimmung der Fließfähigkeit wurde, ausgehend von einem Versuchsaufbau aus 1967 von Dipl.-Ing. R. John der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Karlsruhe, ein neuer Versuchsstand abgeleitet. Als Kenngröße wird dabei das Ausbreitungsverhalten, also die Fläche genutzt, die ein aus einem zylindrischen Behälter auslaufender Schaum (bei *John* und *Trierweiler* erfolgten die Versuche mit Schwerschaum) einnimmt. Die Versuchsaufbauten bestanden jeweils aus einer runden Plexiglasplatte und einem Gestell zum Anheben des zylindrischen Schaumbehälters. Ziel der Untersuchungen war, einen Vergleich der Fließfähigkeit zwischen Schäumen verschiedener Schaummittel zu erhalten. [54, 66]

Bei diesen Versuchen an der Bergischen Universität Wuppertal sollte ein Vergleich von Schäumen gleicher Verschäumungszahl im Mittelschaumbereich erfolgen. Daher musste der zu entwickelnde Versuchsaufbau an die zu erwartenden Schaumeigenschaften angepasst werden.

- Versuchsaufbau „konische Schaumhülse“

Für den Nachbau des Versuchsstandes an der Bergischen Universität Wuppertal beliefen sich die wichtigsten Abänderungen auf den Schaumbehälter. Da die Verschäumungszahlen im Bereich von Mittelschaum lagen, musste das Behältervolumen, wegen der zu erwartenden Anhaftungen, vor allem aber der Behälterdurchmesser vergrößert werden. Mittelschaum hat durch seine besseren Hafteigenschaften bei gleichzeitig geringerer Dichte ein wesentlich schlechteres Auslaufverhalten. Weiterhin gestaltet sich der Befüllvorgang bei einem kleineren und vor allem engen und hohen Behälter sehr problematisch. Einerseits müssen Lufteinschlüsse im Gefäß vermieden werden, andererseits ist durch Verengungen oder Umlenkungen eine teilweise Schaumzerstörung im Zulauf zu erwarten. Beides macht sich in der Schaumqualität bemerkbar und hat Auswirkungen auf das Schaumgewicht und damit die Verschäumungszahl. Die Möglichkeit eine Sonde im Schaumstrom zu installieren, wie *John* sie in seinem Versuchsaufbau verwandt hat, konnte bei den Versuchen im Labormaßstab (insbesondere in Bezug auf die so anfallenden überschüssigen Schaummengen) nicht praktikabel umgesetzt werden.

Als Schaumbehälter wurde, nach vorherigen visuell beurteilten Versuchsläufen, ein konisches Gefäß mit einem Volumen von 30 l ausgewählt. Die Abmessungen waren: Höhe 400 mm und Durchmesser oben 290 mm, unten 330 mm. Die konische Form sollte dabei einen besseren Schaumauslauf ermöglichen als die zylindrische Ursprungsvariante, die von *John* verwendet wurde. Aus dem Gefäß wurde der Boden herausgetrennt und stattdessen eine abnehmbare, dichtschießende Grundplatte mit zwei seitlichen Führungen hergestellt, sodass eine Art verschließbare Hülse (ähnlich dem Ursprungsmodell) entstand. Die Führungen dienten einerseits dem gleichmäßigen Anheben des Behälters und konnten weiterhin als Griffe zum Anheben und Umsetzen genutzt werden. In der Mitte der Grundplatte war eine Stange angebracht. Unterhalb der Platte diente diese als Führungsbolzen für die genaue Arretierung auf der Ausbreitungsebene. Oberhalb waren Markierungen angebracht, die bei der

Höhenbestimmung des ausgelaufenen Schaumes als Skala dienen.

Das Gestell zum Anheben des Schaumbehälters und die Ausbreitungsfläche orientierten sich sehr stark an dem Aufbau von *Trierweiler*. Als Grundebene kam allerdings anstelle von Plexiglas eine quadratische, braune Kunststoffplatte von 1 m<sup>2</sup> zum Einsatz. Hierdurch ist eine weitaus bessere optische Abgrenzung des Schaums möglich. Im Zentrum der Ebene wurde eine Bohrung angebracht, die die korrekte Ausgangsstellung des Schaumbehälters (durch den Führungsbolzen in der Grundplatte) ermöglichte. Die Schaumhülse wird für die Versuche über einen Seilzug angehoben, der an einem mittig angeordneten Bügel des Gestells angebracht ist. Die Auswertung sollte dabei über zwei Digitalkameras erfolgen. An einem diagonal auf der Ecke der Ausbreitungsfläche angebrachten Kragarm wird die Höhe bzw. das Profil des ausgelaufenen Schaumes

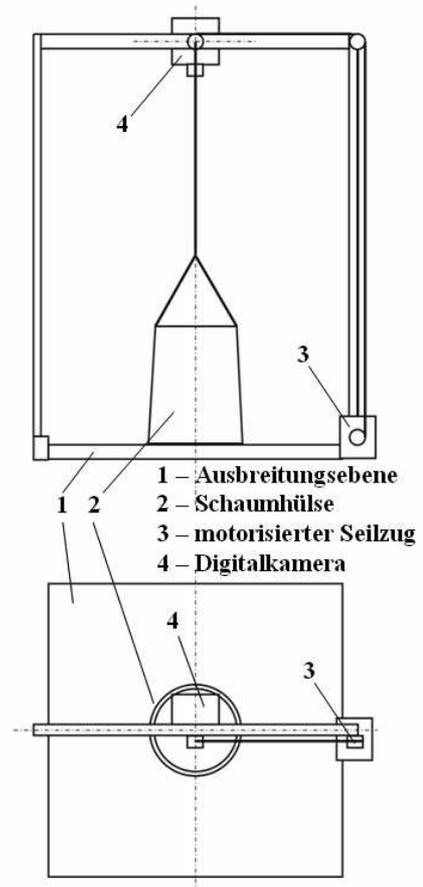


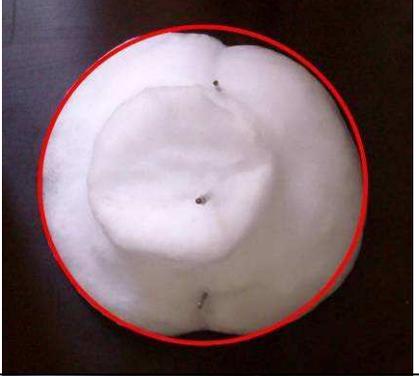
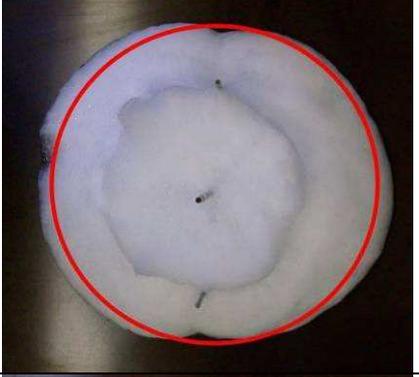
Abbildung 6-1 Versuchsaufbau "Schaumhülse"

aufgenommen. Die Dokumentation der vom Schaum bedeckten Fläche erfolgt mit einer weiteren Kamera, die oberhalb der Ausbreitungsfläche am mittig angeordneten Bügel, direkt neben dem Seilzug befestigt ist.

Zur Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens wird die Schaumhülse auf die Abdeckplatte gestellt, befüllt, abgestrichen und auf der Ausbreitungsfläche positioniert. Die Enden des Seilzuges werden an den seitlichen Haken der Schaumhülse eingehängt. Der motorbetriebene Seilzug wird betätigt, sodass sich der Behälter gleichmäßig anhebt und der Schaum auslaufen kann.

- Probleme

Die Versuche zeigten jedoch, dass auch die Anpassung des Versuchsaufbaus immer noch nicht genug an die Charaktere von Mittelschaum angepasst war. Der Schaum des feinsten Siebes blieb bei drei von vier Versuchen im Behälter haften und zeigte daher keinen ausreichenden Ausfluss. Für die Schaumausbreitung der anderen Sieben konnte bei der Auswertung der Bilder nicht der erwartete charakteristische Unterschied bestimmt werden.

Sieb 1 (VZ=86,7)	Sieb 2 (VZ=88,8)	Sieb 3 (VZ=86,5)	Sieb 4 (VZ=84,9)	Sieb 5 (VZ=87,0)
				
				

Die dargestellten Abbildungen zeigen die Ausläufigkeiten der fünf Schaumproben (ermittelt bei 5 bar Wasser- und 6 bar Luftdruck) nach angehobener „Schaumhilse“. Jede Spalte stellt die Ergebnisse eines Siebes nach ca. 4 min dar. In der oberen Zeile wird die unbearbeitete Schaumlache dargestellt. Darunter sind zur Verdeutlichung der Ergebnisse Kreise gleichen Durchmessers in die Bilder eingefügt.

Anmerkung: Bei Sieb 1 konnte nur ein Durchgang ausgewertet werden, der Versuch wurde hier auch eher abgebrochen, sodass die Ausbreitungszeit nicht ganz mit der, der anderen Siebe übereinstimmt. Die Ausdehnung der Schaumflächen, insbesondere der, von Sieb 3,4 und 5 zeigen keinen wesentlichen Unterschied, wodurch eine genauere Auswertung in Frage gestellt wird. Als Ergebnis erfolgt ein Überdenken und Neustrukturierung des Versuchsaufbaus.

Als wesentliche Ursache wurde das immer noch verhältnismäßig kleine Behältervolumen von 30 l angesehen. Bei einer Verschäumungszahl von 80 befinden sich im Schaum gerade 0,375 l Flüssigkeit. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erreichen, war ein weiterer Umbau mit größerem Probenvolumen erforderlich.

Eine weitere Schwachstelle waren die manuell ausgelösten Bilder. Zum einen ergab die genaue zeitliche Abfolge der Bildauslösung Ungenauigkeiten, zum anderen musste die am Seilzug befestigte Hülse erst abgehängt werden, da sie sonst die Sicht versperrte. Genau in den ersten Sekunden passierte jedoch das wesentliche Auslaufen und konnte somit nicht von oben dokumentiert werden.

Anhand der verschiedenen Problematiken sollte der Versuchsaufbau erneut überdacht und umgeändert werden. Durch die räumlichen Beschränkungen im Labormaßstab, insbesondere am vorhandenen Versuchsstand, konnte der Schaumbehälter jedoch nicht weiter vergrößert werden, ohne immense Umbauten und räumliche Probleme (Auf- und Abbau, Durchführung) nach sich zu ziehen. Für einen höheren Behälter müssten zumindest das Gestell und der Seilzug abgeändert werden. Ohne gleichzeitige Änderung des Durchmessers könnte steifer Schaum durch zu starke Anhaftungen Probleme beim Auslaufen bereiten. Bei einer Vergrößerung des Schaumbehälterdurchmessers wäre wiederum die Fläche der Ausbreitungsebene zu gering.

- Versuchsaufbau „Schaumbox“

Die Modifikation des Versuchsaufbaus konnte sich folglich nicht nur auf eine Vergrößerung des Schaumbehälters beschränken. Die Beibehaltung des Grundgestells (und insbesondere der Abmessungen der Ausbreitungsfläche) zog jedoch eine Abänderung der Versuchsmethodik nach sich.

Die zuvor verwendete Hülse wurde durch ein wesentlich größeres, quaderförmiges Gefäß – die Schaumbox – mit den Abmaßen 410x410x740 mm (125 l Schaumvolumen) ersetzt. Sie ist oben offen und hat an einer Seite unten eine Auslassöffnung von 21x39 mm, die mit einer Falltür verschlossen wird. Die Schaumbox wird für die Versuche nicht zentral, sondern an der Seite der Auslaufebene positioniert, sodass die Auslassöffnung mittig an der Kante der Platte ausgerichtet ist. An dieser Position bleibt sie während des Versuchs stehen. Der Seilzug des ebenfalls an die Seite versetzten Bügels dient nun zum Öffnen des frontalen Schaumauslasses. Nach Betätigen des Seilzuges breitet sich der Schaum also in diesem Fall nicht mehr allseitig aus, sondern fließt aus der Öffnung kommend quer über die Ausbreitungsfläche. Da nun der Seilzug nicht mehr zentral über der Ausbreitungsfläche angebracht ist, kann die obere Kamera

(an einem Kragarm) exakt mittig ausgerichtet werden, sodass die die Sicht auf den auslaufenden Schaum frei ist und die Verzerrung bei der Bildverarbeitung minimiert wird.

Weiter werden nun anstelle der manuell ausgelösten Fotos von der oberen Kamera Videos aufgenommen. Dadurch ist im Nachlauf eine genaue Dokumentation und Zuordnung der Zeiten möglich. Anhand von Standbildern kann zu jedem gewünschten Zeitschritt ein Bild der Ausbreitungsfläche erstellt werden. Die Bilder liefern, wie beim ersten Versuchsaufbau bereits angedacht, eine Aussage über die bedeckte Fläche, die wiederum als Maß für die Fließfähigkeit herangezogen wird.

## 6.2. Bestimmung der Versuchsdaten

Die Versuchsdaten setzen sich jeweils aus drei Versuchsreihen zusammen. Dazu wurden zwei Reihen am gleichen Tag durchgeführt. Ein weiterer Durchgang wurde an einem anderen Tag ausgerichtet um Wettereinflüsse auszugleichen (die Versuche zur Wasserausscheidung wurden nachträglich geplant und fanden daher zu einem späteren Zeitpunkt statt).

Eine Versuchsreihe setzte sich wie folgt zusammen:

- Befüllung des Behälters zur Bestimmung der Verschäumungszahl
- Zeitgleich dazu Entnahme der Schaumproben für den Scanner (Auswertung der Blasengröße und Schaumstruktur)
- Befüllung der Schaumhülse bzw. Schaumbox zur Auswertung des Fließverhaltens
- Aufstellen des Behälters, Starten der Videokameras, Betätigen der Auslassöffnung und Dokumentation der Messergebnisse

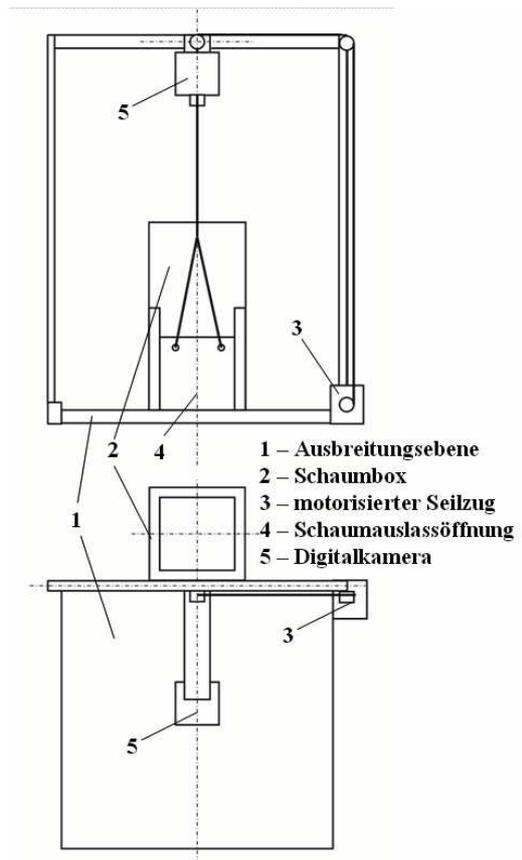


Abbildung 6-2 Versuchsaufbau Schaumbox

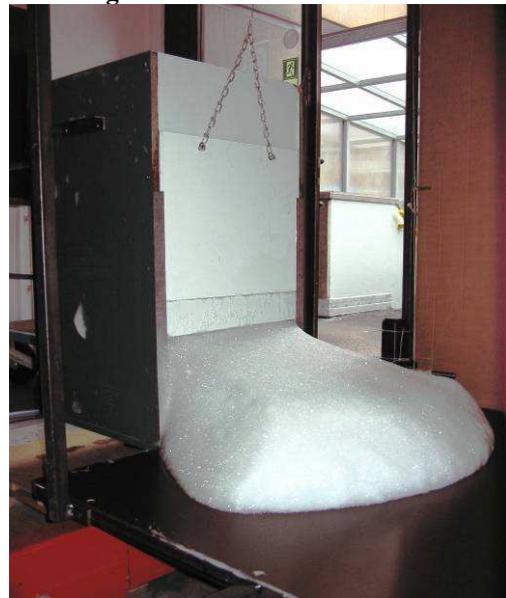


Abbildung 6-3 Schaumbox während eines Auslaufversuchs

- Nachträglich erfolgte die Bestimmung der Wasserhalbzzeit

### 6.2.1. Grundeinstellung der Versuchsparameter und Vorbereitung der Versuche

- **Bestimmung der Zumischrate**

Die wesentliche Grundvoraussetzung für die Löschschaumerzeugung ist die Zumischung des verwendeten Schaummittels. Für die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, belief sich die Wahl des Schaummittels auf das Mehrbereichsschaummittel „Sthamex – F15“. Exemplarisch wurden auch andere Schaummittel (BIO-FOR - C, BIO-FOR-N) ausprobiert, jedoch aufgrund des hohen Verbreitungsgrades, der nahezu universellen Einsatztauglichkeit und der Geräteabstimmung (Zusammenarbeit mit RWE-Power AG - Einsatz des Beschäumungsgerätes im Braunkohlebereich, dort verwendeten Löschmittel) die vorstehende Auswahl getroffen.

Für das Erreichen der dreiprozentigen Schaummittellösung wurden, wie in den vorangegangenen Passagen beschrieben, verschiedene Zumischer in Kombination mit diversen Düsen bei wechselnden Durchflüssen und Betriebsdrücken getestet und im Schaumerzeuger exakt aufeinander abgestimmt.

Die Grundeinstellung erfolgte mit Wasser anstelle von Schaummittel (Wasser hat in etwa die gleiche Dichte wie das gewählte Schaummittel Sthamex F15). Dazu wurde ein Messbecher befüllt und genau ausgewogen. Nach Einhängen des Ansaugschlauches wurde der Wasserzufluss in Gang gesetzt. Durch die Wasseruhr konnte nach Schließen des Kugelhahns der genaue Wasserdurchfluss bestimmt werden. Anschließend wurde der Messbecher erneut gewogen, um mit Durchfluss und der fehlenden Wassermenge im Messbecher die Zumischleistung nach folgender Gleichung zu bestimmen.

$$\text{Zumischung} [\%] = \frac{m_{MB1} - m_{MB2}}{WZ_2 - WZ_1} * 100$$

**Gleichung 6-1 Bestimmung der prozentualen Zumischung des Schaummittels**

Dabei sind:	$m_{MB1}$	Gewicht des Messbechers vor dem Versuch
	$m_{MB2}$	Gewicht des Messbechers nach dem Versuch
	$WZ_1$	Wasserzählerstand vor dem Versuch
	$WZ_2$	Wasserzählerstand nach dem Versuch

- **Bestimmung Luftdurchsatz**

Der Luftdurchsatz ist eine wesentliche Kenngröße in einem Schaumerzeuger. Ausgehend von Volumenstrom und der jeweiligen Querschnittsfläche kann damit die Strömungsgeschwindigkeit im gesamten System ermittelt werden. Der Luftanteil ist im Schaum der volumenbestimmende Faktor und macht beispielsweise bei Mittelschaum, je nach Verschäumungszahl, 95 bis 99,5 % des Gesamtvolumens aus. Bei dem druckluftunterstützten Beschäumungsgerät, das für die Versuche entwickelt und eingesetzt wurde, besteht die Möglichkeit, Einfluss auf den Volumenstrom zu nehmen. Dies kann durch Veränderung des Luftdrucks am vorgeschalteten Druckminderer oder durch Veränderung des Querschnitts der Luftzuleitungen (Nadelventil, Kugelhahn bzw. Einbauten mit unterschiedlichen Querschnitten) geschehen.

Die Gegenüberstellung von Luftdurchsatz und erreichter Verschäumungszahl zeigt an, wie effizient das Gerät arbeitet und wie gut die Bauteile aufeinander abgestimmt sind. Der Luftvolumenstrom des Schaumerzeugers wurde analog, wie bereits beim Basisgerät (siehe Abschnitt 5.1.2), mit einem Durchflussmessgerät der Fa. Krohne (Messbereich von 30 bis 300 m<sup>3</sup>/h) ermittelt. Dazu wurde der Druck in kleinen Schritten von 1 bis 6 bar erhöht und der zugehörige Durchfluss dokumentiert. Der ermittelte Volumenstrom zeigt, wie in Abschnitt 5.1.5 dargestellt, ein nahezu lineares Verhalten und ist im Diagramm (Abbildung 5-31) ersichtlich.

- **Bestimmung Wasserdurchsatz und Sprühbild**

Zwei weitere Kenngrößen für die Leistungsfähigkeit bzw. Effektivität des Schaumerzeugers sind Wasserdurchsatz und -verteilung auf dem Schaumsieb. Die Flüssigkeit hat zwar den kleineren Volumenanteil, bestimmt aber das Gewicht des Schaumes. Wenn bei gleichem Luftanteil die Flüssigkeitsmenge verdoppelt wird, verringert sich die Verschäumungszahl entsprechend um die Hälfte. Eine schlecht arbeitende bzw. ungenau positionierte Düse verursacht wiederum eine ungleichmäßige Benetzung des Siebes und hat damit großen Einfluss auf eine gleichmäßige Schaumerzeugung und die Leistungsfähigkeit des entsprechenden Gerätes.

Die Ermittlung des Wasserdurchflusses erfolgte mittels kalibriertem Wasserzähler und Stoppuhr. Wie auch beim Luftdurchsatz verändert sich der Wasservolumenstrom mit einer Druckänderung. Durch den Arbeitsbereich des Zumischers (Druckverlust und Gegendruckempfindlichkeit) werden der minimale und maximale Druck vorgegeben. Bei der Abstimmung der verwendeten Komponenten und durch die Vorversuche unter

Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten wurde der Wasserdruck, wie bereits in Abschnitt 5.2.4 erläutert, auf 5 bar festgelegt und am Druckminderer eingestellt. Die genauen Durchflusswerte sind in Abbildung 5-32 dargestellt. Bei 5 bar wird ein Flüssigkeitsdurchfluss von circa 38,5 l/min erreicht.

Die Durchflussleistung muss vom System verarbeitet werden können und möglichst gleichmäßig über den Querschnitt des Verschäumungssiebes verteilt werden. Erst dadurch ist eine optimale Umsetzung der Luft- und Flüssigkeitsströmung möglich. Hierfür ist eine geeignete Düse und deren exakte Positionierung vor dem Sieb nötig (bei zu geringem Abstand bzw. dezentraler Ausrichtung wird das Sieb nicht vollständig benetzt und der aufgegebene Druckluftstrom kann nicht vollständig ausgenutzt werden, bei einer zu großen Entfernung zwischen Düse und Sieb kommt es im Randbereich zu einer Anhäufung der Flüssigkeit und wiederum ungleichmäßigen Benetzung).

Zur quantitativen Kontrolle des Sprühbildes wurde die Storzkupplung mit dem eingelegten Schaumsiebeinsatz entfernt und dafür am Ausgang der Mischkammer eine Vorrichtung angebracht, die es erlaubt den Durchfluss über den gesamten Querschnitt rasterförmig zu ermitteln. Damit konnte ein genauer Einblick in die Benetzung des Verschäumungssiebes erfolgen.

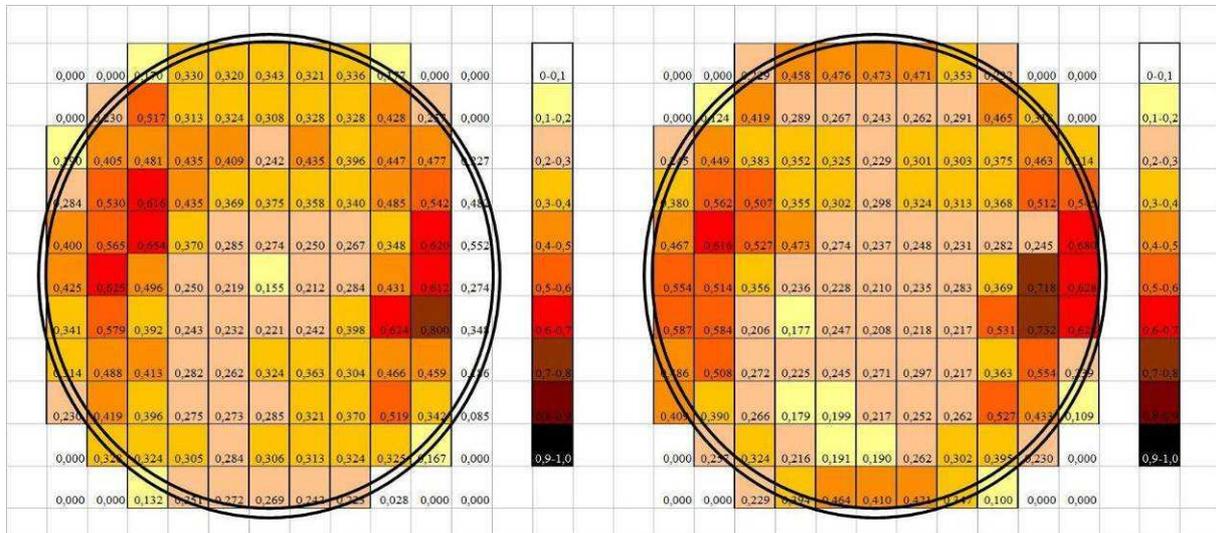
Der runde Querschnitt der Mischkammer wurde fiktiv durch ein quadratisches Raster unterteilt. Für jeden Quadranten wurde die Durchflussleistung ermittelt. Für die Kreisfläche ergaben sich somit 109 Messbereiche. Als Entnahme-Sonde diente ein Kupferrohr, das eingangsseitig zu einer quadratischen Öffnungsfläche von 10 x 10 mm umgearbeitet



**Abbildung 6-4 Aufbau zur Ermittlung der Wassermassenverteilung an einem Prototypen der Schaumerzeuger**

war. Die Flüssigkeit konnte am anderen Ende durch einen Kunststoffschlauch in einen Messbecher ablaufen. Dieser wurde anschließend gewogen und die Messwerte für jedes Feld dokumentiert.

Die Messebene der Blende entsprach der späteren Position des Siebeinsatzes. Diese Messanordnung wurde einmal bei Betrieb mit Wasser und einmal bei Betrieb mit Wasser und Druckluft durchgeführt. Dadurch konnte der Einfluss und die damit verbundene Veränderung durch den Luftvolumenstrom auf das Sprühbild der Düse ermittelt werden. [71]



**Abbildung 6-5 Sprühbild der Lechler-Dralldüse im optimierten Beschäumungsgerät bei 5 bar Wasserdruck (links ohne und rechts mit Druckluftstrom)**

## 6.2.2. Bestimmung der Verschäumungszahl

Die Verschäumungszahl wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise in DIN EN 1568-1 „Feuerlöschmittel – Schaummittel - Teil 1: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum zum Aufgeben auf nichtpolare Flüssigkeiten“ - Anhang G (siehe Abschnitt 3.5.3 Normative Anforderungen) ermittelt. Der dazu genutzte Versuchsaufbau ist in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Die Berechnung erfolgt aus der Division des Schaumvolumens durch das Flüssigkeitsvolumen (Schaumgewicht). Sie zeigt den Luftanteil und damit die Volumenvergrößerung im Vergleich zur eingesetzten Grundflüssigkeit an.

Zur Bestimmung der Verschäumungszahl wird (nach erfolgter Grundeinstellung des Schaumerzeugers) das Gerät in Gang gesetzt und der Schaum in den zuvor angefeuchteten und ausgewogenen Behälter geleitet. Der überstehende Schaum wird abgestrichen, sodass das auszuwertende Volumen immer gleich ist. Anschließend wird das Schaumgewicht durch Auswiegen (die Masse vom vorher angefeuchteten und ausgewogenen Behälter wird vom Gesamtgewicht abgezogen) nach folgender Gleichung bestimmt.

$$VZ = \frac{V}{M_2 - M_1}$$

**Gleichung 6-2 Bestimmung der Verschäumungszahl**

Dabei sind:	$VZ$	die Verschäumungszahl
	$V$	das Volumen des Gefäßes in Litern
	$M_1$	die Masse des leeren Gefäßes in Kilogramm
	$M_2$	die Masse des gefüllten Gefäßes in Kilogramm

Für die Versuche zur Bestimmung der Fließfähigkeit wurde vor jedem Durchgang die Verschäumungszahl zur Kontrolle und Dokumentation bestimmt und jeweils eine Schaumprobe in einer Petrischale für die Auswertung der Blasengröße und -struktur entnommen. Die Befüllung der verwendeten Behälter zur Bestimmung der Fließfähigkeit erfolgte in gleicher Weise und sofort im Anschluss.

### **6.2.3. Auswertung der Blasengröße und Schaumstruktur**

Um Einflussparameter der Fließgeschwindigkeit bestimmen zu können, die vor allem auf den Einsatz der fünf unterschiedlichen Siebstrukturen zurückzuführen sind, erfolgte parallel zur Bestimmung der Verschäumungszahl die Entnahme von Schaumproben in einer Petrischale. Diese wurden auf einem Flachbettscanner eingelesen. Als Referenz für die anschließende Auswertung wurde beim Scannen ein Millimeterpapier aufgelegt. Auf diese Weise kann ein Überblick über Blasengröße und -zusammensetzung gewonnen und damit eine Aussage über die Schaumstruktur getroffen werden. Eine nachgestellte manuelle Auszählung und Auswertung der Blasen erfolgte im Anschluss an die Versuche mit Hilfe des Bildverarbeitungsprogramms Corel Draw.

### **6.2.4. Wasserauslauf**

Die Bestimmung der Auslaufzeiten erfolgte wiederum in Anlehnung an die DIN EN 1568-1 „*Feuerlöschmittel – Schaummittel - Teil 1: Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum zum Aufgeben auf nichtpolare Flüssigkeiten*“ - Anhang G. Dazu wurde der in Abschnitt 6.1.4 beschriebene Behälter von innen befeuchtet und ausgewogen, mit Schaum befüllt und das Schaumgewicht, wie oben beschrieben ermittelt, um die Verschäumungszahl zu bestimmen. Dann wurde der Behälter über dem auf der Waage abgestellten Messbecher positioniert und der Wasseraustritt dokumentiert, bis die Hälfte des Schaumgewichts in den Messbecher ausgelaufen war. Dazu wurde die Zeit gestoppt und jeweils nach 30 sec das ausgelaufene Gewicht der Flüssigkeit festgehalten.

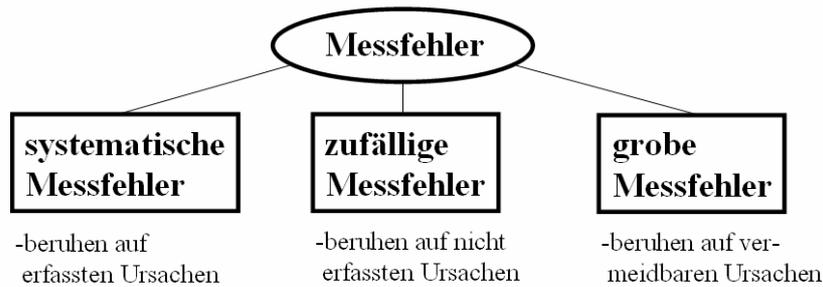
### **6.2.5. Bestimmung von Ausbreitungsverhalten und Fließfähigkeit**

Der abgeänderte Versuchsaufbau zur Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens, der dem Prüfstand der Forschungsstelle für Brandschutztechnik Karlsruhe nachempfunden und angepasst war, konnte, wie in Abschnitt 6.1.5 aufgeführt, nicht für die Versuche genutzt werden. Die Verwendung der daraufhin gefertigten Schaumbox und der leicht modifizierte Aufbau ergaben aber dann die beabsichtigten aussagekräftigen Ergebnisse.

Für die Bestimmung des Fließverhaltens wurde wie folgt vorgegangen: Vor den eigentlichen Versuchen wurden die Versorgungsleitungen an den Schaumerzeuger anschlossen und die Grundeinstellung vorgenommen. Als Grundlage musste zu jeder Siebvariante und Versuchsreihe zunächst die Verschäumungszahl bestimmt und eine Probe in einer Petrischale zur Ermittlung der Blasenstruktur eingescannt werden. Als Siebeinsatz kam jeweils eine der fünf in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Ausführungen zum Einsatz. Nach den vorangehenden Arbeiten wurde die bereitstehende Schaumbox gefüllt und der überstehende Schaum abgestrichen. So wurde die Box an der Seite der Ausbreitungsfläche aufgestellt und ausgerichtet. Dann wurden die Enden des Seilzuges an der Klappe eingehängt und die Videokameras gestartet. Nun konnte der Versuch beginnen. Dazu wurde die Klappe der Schaumbox durch den am anderen Ende des Seilzuges befindlichen Motor emporgezogen (das Betätigen des Motors war für die spätere Auswertung der Videos der Ausgangspunkt der Zeitnahme). Die Schaumausbreitung wurde nun von den beiden Digitalkameras aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Nach Öffnen der Klappe breitet sich der aus der Schaumbox auslaufende Schaum quer über die Ausbreitungsebene aus. Dabei entsteht, je nach vorliegender Schaumstruktur ein unterschiedlich breiter fächerförmiger Schaumteppich. Über die Aufzeichnungen der Digitalkameras kann nachträglich die entstandene Fläche zu jedem beliebigen Zeitpunkt ausgewertet werden.

### **6.3. Betrachtung der Messfehler**

Zu einer experimentellen Arbeit, bei der am Versuchsaufbau Einstellungen zu tätigen und Messergebnisse zu ermitteln sind, gehört auch eine Abschätzung und Beachtung der möglichen Fehlerquellen. Der Fehler bzw. die Abweichung bei einer Messung setzt sich aus zwei Bereichen, dem systematischen und dem zufälligen (statistischen) Anteil, zusammen. Hierbei sollen grobe Messfehler ausgeschlossen werden, da sie, wie Abbildung 6-6 zeigt, auf vermeidbaren Ursachen beruhen. Eine genauere detaillierte Unterteilung ist [72] zu entnehmen.



**Abbildung 6-6 Einteilung der Messfehler nach [72]**

Obendrein besteht bei Weiterverarbeitung der erhaltenen Werte die Möglichkeit der Fehlerfortsetzung. Der systematische Fehler zeigt bei Wiederholung einer Messung unter identischen Messbedingungen einen konstanten Wert und kann somit schwer erkannt und beseitigt werden. Der zufällige Fehler bezeichnet das zufallsbedingte Schwanken (Streubereich) der Messwerte um einen Mittelwert. Hierunter fallen beispielsweise auch Ablese- und Kalibrierfehler. Durch mehrfache Wiederholung und Mittelwertbildung können statistische Fehler relativiert werden.

Eine geeignete Auswahl der Messtechnik, regelmäßige Überprüfung und Abstimmung der Einstellungen (möglichst nicht in Randbereiche der Messinstrumente und Leistungsfähigkeit der Arbeitsausrüstung hineingehen) und weiterverarbeitenden Programme begrenzen den systematischen Fehleranteil. Konzentration bei der Durchführung der Versuche, Auswahl geeigneter Schwachwindwetterlagen und eine systematische Reihenfolge der verschiedenen Versuchsdurchgänge sind weitere wichtige Grundvoraussetzungen für zuverlässige Messergebnisse.

Systematische Fehler können aber auch durch die verwendeten Messgeräte und Apparaturen selbst verursacht werden. Beispielsweise können die Verwendung der Wasseruhr (Durchflussmessung) und des Druckminderers im Zulauf des Schaumerzeugers sowohl den Druck, als auch die Durchflussmenge herabsetzen. Beide Armaturen wurden jedoch so ausgewählt, dass ihr Leistungsbereich einen möglichst kleinen Einfluss auf die Messungen hat. Dies wurde durch Mehrfachmessung (Druck vor und hinter den Geräten) und vergleichende Messungen mit anderen Geräten überprüft. Die Messinstrumente wurden für die Untersuchungen frisch kalibriert, sodass auch hierdurch eine systematische Fehlerquote möglichst gering gehalten wird. Sich wiederholende, verfälschte Werte, die durch Fehleinstellungen, Verstellen der Armaturen oder Druckschwankungen entstehen, wurde so begegnet, dass die Anzeigen und Armaturen vor jedem Durchgang überprüft und separat justiert wurden.

Die wesentlichen Vorgänge, bei denen auf eine Fehlerminderung zu achten war, sind die Parameter bei der Schaumerzeugung, die Befüllung und Gewichtsbestimmung der Schaumbehälter (Ermittlung der Verschäumungszahl und Wasserhalbzeit) und die Erstellung und Auswertung der Videomitschnitte zur Bestimmung des Ausbreitungsverhaltens.

Als Waage kam für die Versuche eine hochauflösende elektronische Tischwaage der Firma Söhnle mit einem Wägebereich von 0 – 30 kg (Messgenauigkeit 1 g) zum Einsatz.

Die Waage wurde bei jedem Durchgang neu tariert um Ungenauigkeiten durch Wasseranhaftungen (Schaumbehälter muss vor der Verwendung benetzt werden) auszuschließen. Das Volumen des auf Bestellung nach Maß angefertigten Behälters beträgt 200 l bei einem Durchmesser von 65 cm und einer Höhe von 60 cm. Durch Ungenauigkeiten im Zuschnitt und Unterschiede in der Wandstärke (Materialfehler) bzw. einen sich verformenden Boden (z.B. nach innen bzw. außen ausgebeult) gehen wir hier beispielhaft von einem 2 cm zu hohen Behälter aus. Dadurch ergibt sich ein Fehler im Bereich von 6,6 l (und damit 3,3 % des Volumens). Die Masse des auszuwertenden Schaumvolumens (als zweite Berechnungsgrundlage der Verschäumungszahl) beträgt bei 200 l und einer angenommenen Verschäumungszahl von 90 ca. 2,2 kg. Damit liegt die Fehlerquote durch Auf- bzw. Abrunden der Anzeige der Waage bei 0,045 %. Bei der Ermittlung des Wasserauslaufes verringert sich die zu ermittelnde Masse der sich absetzenden Flüssigkeit aufgrund des kleineren Behälters und der Halbierung der Masse (Zeitpunkt bis die Hälfte der im Schaum befindlichen Flüssigkeit ausgelaufen ist) auf ca. 800 g. Da hier die gleiche Waage zur Bestimmung genutzt wird (Messgenauigkeit 1 g), ist der mögliche Fehler wiederum sehr klein.

Beim Befüllen der Schaumbehälter wurde auf ein möglichst gleichmäßiges impulsarmes Einlassen des Schaumes geachtet, damit sich dieser beim Anprall nicht selbst zerstört. Ebenso wurde darauf geachtet, dass sich keine Lufteinschlüsse bilden. Um weiterhin keine unterschiedlichen Volumina zu erhalten, wurden die Schaumbehälter so gefüllt, dass ein Schaumüberschuss bestand. Dieser wurde mit einer Lehre genau am oberen Rand abgestrichen und weitere Schaumanhaftungen von der äußeren Behälterwand entfernt, sodass jeweils vom gleichen Volumen ausgegangen werden konnte.

Zur Auswertung der Ausbreitungsfläche wurde ein dunkler Untergrund und eine gut eingestellte Beleuchtung eingerichtet. Somit konnte eine genaue Abgrenzung zwischen Schaum und Untergrund erreicht werden. Dies erleichterte einerseits die Einstellungen der Kamera und andererseits die exakte Erstellung der Hüllkurve am Computer anhand der Bildsequenzen.

## 7. Auswertung

Für die Auswertung der Fließfähigkeit wurden, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, fünf verschiedene Schäume (mit nahezu gleicher Verschäumungszahl), jedoch unterschiedlicher Struktur (Blasengröße und -zusammensetzung) hergestellt und deren Fließverhalten verglichen. Dazu musste zuerst die in Abschnitt 6 beschriebenen Schaumparameter ermittelt und daraufhin das Auslauf- und Ausbreitungsverhalten per Digitalkamera aufgenommen werden. Anhand der Bildsequenzen wurde der Flächeninhalt der ausgetretenen Schaumlache für verschiedene Zeiten ermittelt und somit die Ausbreitungs- bzw. Fließfähigkeit bestimmt. Die Auswertung erfolgte jeweils durch Zusammenfassen der Daten von drei aussagekräftigen Versuchsreihen jedes Siebes unter Bildung der Mittelwerte.

### 7.1. Verschäumungszahlen

Mit den Verschäumungszahlen, die in Verbindung mit der Bestimmung der Fließfähigkeit ermittelt wurden, konnten die Werte, die im Rahmen der Leistungsermittlung erstellt wurden, sogar noch übertroffen werden. Im Mittel wurde das Wasser-Schaummittelgemisch bei 5 bar Wasser und 6 bar Druckluft auf das 89,4-fache Volumen vergrößert. Ein detaillierter Überblick ist den folgenden Diagrammen zu entnehmen.

**Tabelle 7-1 erreichte Verschäumungszahlen und die Mittelwerte der drei Versuchsreihen für die Siebe 1-5**

VZ	Sieb 1	Sieb 2	Sieb 3	Sieb 4	Sieb 5
1	87,8	91,0	89,8	91,0	88,4
2	89,1	89,2	91,4	88,6	89,9
3	88,6	89,4	88,1	90,5	88,5
Ø	88,5	89,9	89,8	90,0	88,9

In Tabelle 7-1 sind die erreichten Verschäumungszahlen jeder Versuchsreihe und der daraus berechnete Mittelwert gegenübergestellt. Alle Werte liegen im Bereich der 90-fachen Verschäumung und bilden dadurch trotz unterschiedlicher Blasenstruktur eine gleichmäßige Datenbasis und gute Grundlage zum Vergleich der zu ermittelnden Fließfähigkeit. Die genaue Gegenüberstellung der Mittelwerte zeigt die folgende Abbildung.

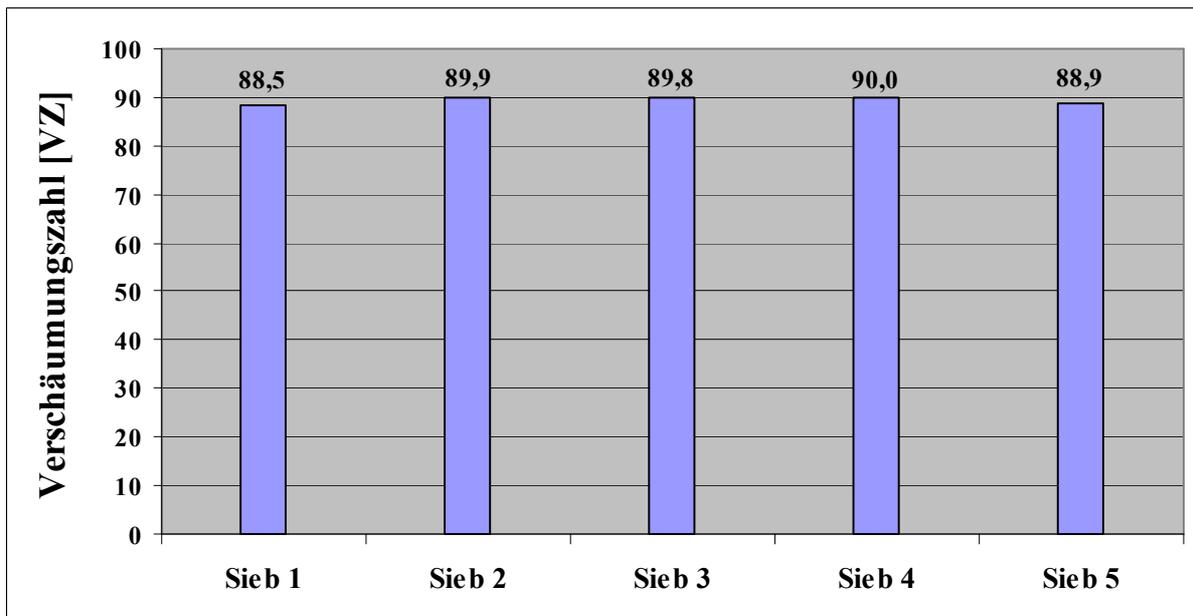


Abbildung 7-1 Gegenüberstellung der durchschnittlich erreichten Verschäumungszahlen Sieb 1-5

## 7.2. *Blasenstruktur der erzeugten Schäume*

Durch den Einsatz der fünf unterschiedlichen Siebe wurden unterschiedliche Schaumstrukturen erzeugt, die wiederum Auswirkungen auf das betrachtete Fließverhalten hatten. Daher sollte die Struktur der einzelnen Schäume bestimmt werden. So könnte einerseits der Unterschied genau dargelegt und weiterhin eine mögliche Einflusskriterium bestimmt werden.

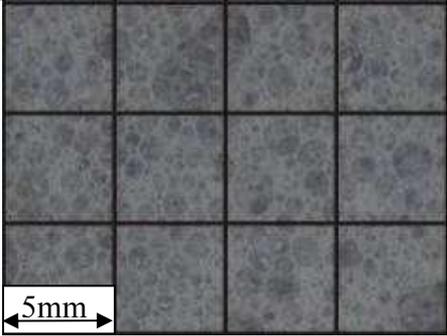
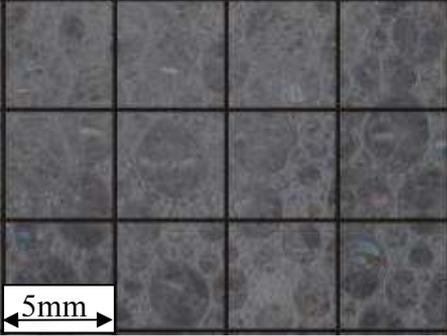
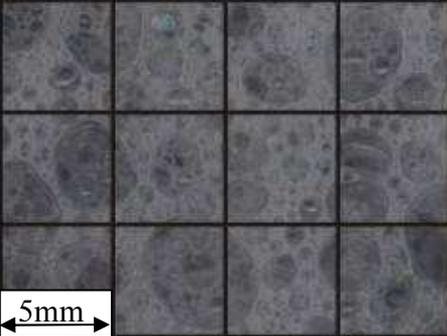
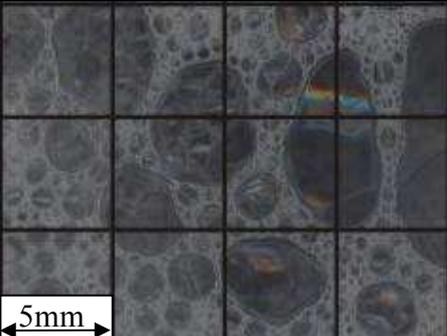
### 7.2.1. **Gegenüberstellung der Blasengröße und -verteilung**

Nach den subjektiven visuellen Beobachtungen (feines Sieb – gleichmäßiger, feinblasiger Schaum, grobes Sieb sehr diffuser Schaum mit sehr unterschiedlichen Blasengrößen) erfolgte die Dokumentation und Auswertung der Blasenstruktur. Anfangs wurde vergebens versucht, mit Hilfe von Fotografie und Mikroskopie ein geeignetes, vergleichbares Abbild der Schaumoberfläche zu erstellen. Die mit den vorliegenden Möglichkeiten beste, wenn auch nicht umfassende (da nur zweidimensionale), Wiedergabe der Schaumstruktur erfolgte somit, wie in Abschnitt 6.1.3 beschrieben, über einscannen von Schaumproben, die auf einer Petrischale direkt nach der Erzeugung entnommen wurden. Dadurch sollte mit der Aussage über die vorherrschende Blasengrößen und -zusammensetzung und damit ein charakteristisches Abbild der unterschiedlichen Schaumstrukturen gewonnen werden. Dafür wurden die Bilder in Corel Draw weiterverarbeitet. Dort konnten die Bilder durch Einfügen eines Rasters, das anhand des ebenfalls eingescannten Millimeterpapiers erstellt wurde, in

Quadranten eingeteilt und ausgezählt werden. Hierdurch (zweidimensionale Bildebene) ist allerdings nur eine qualitative und orientierende Bewertung der Schaumproben möglich. Da Schaum ein dreidimensionales, Medium mit räumlicher Struktur ist, müsste eine Auszählung folglich nicht nur in der Ebene, sondern über ein bestimmtes Volumen erfolgen, um ein quantitativ korrektes Ergebnis zu liefern. Dies konnte jedoch mit den Möglichkeiten vor Ort nicht erfolgen, insbesondere in Anbetracht der stetigen Schaumveränderung (siehe Abschnitt 2.2) musste nach der Erzeugung eine zeitnahe Abbildung erfolgen. Weiterhin werden die Blasen (ab einem bestimmten Durchmesser, der von der Dicke der Flüssigkeitsschicht abhängt) durch die Wandhaftung am Boden der Petrischale verformt. Die betrachteten Blasen bilden eine Halbkugel, die bei der Draufsicht größer erscheint als der eigentliche Blasendurchmesser. Die gewonnenen Bilder geben aber eine erste quantitative Aussage und ermöglichen so einen optischen Vergleich der vorliegenden Blasenzusammensetzung.

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils einen Ausschnitt von 20 x 15 mm der fünf unterschiedlichen erzeugten Schaumstrukturen (Parameter bei der Schaumerzeugung wie in Abschnitt 5.2.4 erläutert: 5 bar Wasser- und 6 bar Luftdruck). Der gesamte Bildausschnitt, der zur Auswertung genutzt werden konnte, ist jeweils auf eine Fläche von 5 x 5 cm beschränkt. Das darüber gelegte Raster verläuft im 5 mm - Abstand. Für eine übersichtlichere Darstellung wurden für Tabelle 7-2 entsprechend charakteristische Ausschnitte gewählt.

**Tabelle 7-2 Darstellung der Blasenstruktur der erzeugten Schäume (Sieb 1-5)**

Sieb	VZ	Beispielausschnitt (20 x 10 mm)	Bemerkungen
1	87,8		<ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr gleichmäßige Blasenstruktur</li> <li>- charakterist. Blasengröße ~ 1 mm</li> </ul>
2	91,0		<ul style="list-style-type: none"> <li>- gleichmäßiges Blasenbild, jedoch schon erste kleine Blasen in den Zwischenräumen erkennbar</li> <li>- charakterist. Blasengröße ~ 2,5 mm</li> </ul>
3	89,8		<ul style="list-style-type: none"> <li>- gleichmäßiges, jedoch nicht einheitlichen Blasenbild (viele größere, aber auch kleine Blasen, größere Spannweite als bei Sieb 1 und 2)</li> <li>- charakterist. Blasengröße ~ 4 mm</li> </ul>
4	91,0		<ul style="list-style-type: none"> <li>- stark durchmischt Blasenbild von ganz fein bis sehr groß</li> <li>- keine charakterist. Blasengröße erkennbar</li> </ul>
5	88,4		<ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr stark durchmischt Blasenbild mit vielen kleinen, teilweise aber auch mit extrem großen Blasen</li> <li>- keine charakterist. Blasengröße erkennbar</li> </ul>

Die Bildausschnitte aus Tabelle 7-2 sind zwar sehr begrenzt, lassen aber (insbesondere anhand der Bemerkungen aus Spalte 4) die wesentlichen Unterschiede der Schaum- und Blasenstruktur erkennen. Bereits durch die auf den Bildern ersichtlichen Unterschiede kann eine grobe Einteilung des erzeugten Schaumes erfolgen. Mit Sieb 1 (Maschenweite 0,3 mm), Sieb 2 (Maschenweite 1,0 mm) und Sieb 3 (Maschenweite 1,6 mm) lässt sich jeweils ein gleichmäßiges Schaumbild erzeugen. Die Schaumblasen werden dabei im direkten Zusammenhang mit dem verwendeten Sieb größer. Mit ansteigender Maschenweite und Blasengröße steigt jedoch auch der Anteil an kleinen und kleinsten Blasen in den Zwischenräumen.

Bei Sieb 4 (Maschenweite 2,0 mm) und Sieb 5 (Maschenweite 3,0 mm) wird ein so unterschiedliches Blasenbild erzeugt, dass visuell keine charakteristische Blasengröße zu erkennen ist. Es sind sowohl sehr große, als auch sehr kleine Blasen auf den Bildern auszumachen. Mit beiden Siebeinsätzen wird folglich sehr ungleichmäßiger und inhomogener Schaum mit einem sehr breiten Blasenspektrum erzeugt.

Die Begründung liegt hierbei im Zusammenhang zwischen Tropfengröße und Maschenweite der Siebfläche. Um so besser Tropfen- und Maschendurchmesser aufeinander abgestimmt sind, desto besser und gleichmäßiger können die einzeln auftreffenden Tropfen das Sieb benetzen und auf der Masche eine Art Membran bilden (siehe Abschnitt 3.2.5). Bei ansteigender Maschenweite werden viele kleine Tropfen durch die Masche hindurchgeschleudert. Wenn diese dann eine Membran oder Blase treffen, kommt es je nach vorhandener Geschwindigkeit zum Durchschlagen der Wandung, sodass sich dadurch kleine „Sekundärblasen“ bilden bzw. sich aneinandergrenzende Blasen zu einer größeren vereinigen. Wenn Geschwindigkeit und Masse entsprechend klein sind, bleiben die Tropfen auf der Membran haften, verstärken diese und erhöhen damit den Flüssigkeitsanteil im Schaum.

Da mit den Ausstattungsmöglichkeiten des Labors an der Bergischen Universität Wuppertal keine Bestimmung des tatsächlichen Tropfenspektrums zu ermitteln war, konnte nach Rücksprache mit dem Düsenhersteller Lechler ein vergleichbares Datenblatt angefordert werden. Durch Aufbohren des Düsendurchmessers bei der Abstimmung an dem verbauten Zumischer entsprechen die erhaltenen Daten jedoch nicht mehr ganz den Herstellerangaben. Allerdings verändert sich das Tropfenbild durch den eingeleiteten Drucklufteintrag ohnehin noch, wie Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 zeigen.



Abbildung 7-2 Tropfenbild ohne Druckluftstrom



Abbildung 7-3 Tropfenbild mit gleichzeitigem Druckluftstrom

Nach Herstellerdatenblatt hat die verwendete Düse (vor der Anpassung) folgende Kenndaten:

**Tabelle 7-3 Daten zur Tropfengröße Lechler Vollkegeldüse nach [73]**

<b>Erzeugnis-Nr.</b>	<b>461.046</b>
Datum der Messung	22 NOV 1996
Flüssigkeitsdruck	2,00 bar
Volumenstrom Flüssigkeit	39,50 l/min
Tropfenanzahl	= 18017
Arithmetischer Mittelwert	= 382,75 µm
Standardabweichung	= 61,30 %
Flächen-Mittelwert	= 448,94 µm
Volumen-Mittelwert	= 533,21 µm
Ø (Anzahl)10%	= 130,15 µm
Ø (Anzahl)50%	= 301,06 µm
Ø (Anzahl)90%	= 625,50 µm
Ø (Volumen) 10%	= 386,72 µm
Ø (Volumen) 50%	= 842,42 µm
Ø (Volumen) 90%	= 2214,13 µm
Sauterdurchmesser	= 752,15 µm

Anhand dieser Daten kann das erhaltene Blasenbild bei Verwendung der unterschiedlichen Siebe erklärt werden. Bei Annahme der Herstellerangaben (durch Aufweiten der Düsenbohrung ist evtl. eine Verschiebung zu größeren Tropfendurchmessern möglich) ist in Verbindung mit dem kleinsten Sieb (Sieb 1 - Maschenweite 0,3 mm) mehr als die Hälfte der Tropfen und mehr als 90 % des durchgesetzten Volumens größer als der Maschendurchmesser. Somit wird der Großteil der gebildeten Tröpfchen vollständig auf den Maschen des feinen Siebes verteilt und durch den Luftstrom in Blasen umgewandelt. Damit lässt sich auch das einheitliche Blasenbild begründen.

Durch Verwendung von Sieben mit größerer Maschenweite wird das Verhältnis von Tropfen- zu Maschengröße immer ungünstiger. Ein immer größerer Anteil an Flüssigkeit wird so nicht mehr vom Sieb direkt aufgefangen um zur Membran- und damit Blasenbildung beizutragen. Weiterhin werden kleine Tropfen durch das Sieb getragen und zerschlagen infolgedessen die bereits bestehenden Maschen und Blasen. Dadurch werden das Blasenbild und die damit verbundene Schaumstruktur immer mehr verändert. Das kann anhand der eingescannten Schaumproben sehr anschaulich nachvollzogen werden.

### **7.2.2. Auswertung der Auszählung**

Wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben, sollte ein möglichst genaues Abbild der Schaumstruktur erstellt werden. Die Auszählung der Blasen erbrachte jedoch nicht das erwartete, eindeutige und damit aussagekräftige Ergebnis, welches bereits auf einen Unterschied zur möglichen Vorhersage schließen ließ. Dazu war die Zusammensetzung, insbesondere bei den groben Sieben, zu diffus. Als weitere wesentliche Fehlerquelle kam hinzu, dass die Auszählung der eingescannten Schaumoberfläche in der Ebene stattfand, die Blasen jedoch eine dreidimensionale Ausdehnung haben. Dadurch wird das tatsächliche Verhältnis verschoben, insbesondere bei den Schäumen mit hoher Bandbreite an verschiedengroßen Blasen. Theoretisch müsste die Auszählung über ein Volumen mit der Tiefe der größten darin befindlichen Blase erfolgen.

Beim Auszählen selbst kommt es weiterhin zu falschen Ergebnissen, wenn Blasen aus einer anderen, darüberliegenden Ebene mitgezählt werden. Aufgrund der durchsichtigen Lamellen kann nicht immer genau zugeordnet werden, welche Blase direkt auf dem Glas anhaftet. Weiterhin wird durch die Randanhaftung die Blase für den Betrachter vergrößert, da eine Halbkugel einen größeren Durchmesser aufweist, als eine Vollkugel gleichen Volumens. Die somit erhaltenen Daten sind folglich nur bedingt aussagekräftig mit Vorsicht auszulegen. Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, wird hier auf eine genaue Darlegung verzichtet. Für eine korrekte Auswertung sollte für weitere Versuchsreihen eine geeignetere Methode gefunden werden. Diese sollte, wie oben erläutert, eine dreidimensionale Auszählung erlauben um die beschriebenen Fehlerquellen auszuschließen.

### **7.3. Fließfähigkeit**

Als zentraler Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sollte die Fließfähigkeit der fünf Schäume mit unterschiedlicher Blasenzusammensetzung, jedoch nahezu gleicher Verschäumungszahl, beurteilt werden. Dazu wurde das Auslaufverhalten anhand des in Abschnitt 6.1.5 beschriebenen Versuchsaufbaus bestimmt und die Ergebnisse der fünf Schaumqualitäten

miteinander verglichen. Durch eine belegbare Abweichung wäre unter Umständen ein weiteres Beurteilungskriterium gegeben. Bisher wird die Fließfähigkeit eines Schaumes am Wassergehalt festgemacht. Ein Unterschied bei Schäumen gleicher Verschäumungszahl würde somit zeigen, dass dies Kriterium nicht ausreichend aussagekräftig ist.

### **7.3.1. Gegenüberstellung der Ergebnisse und Vergleich der Fließfähigkeiten**

Nach aktuellem Stand des Wissens steigt die Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum mit sinkender Verschäumungszahl und damit ansteigendem Wasseranteil. Da bei den Versuchen außer den verwendeten Verschäumungssieben alle Bedingungen beibehalten wurden und somit verschiedene Schäume, mit jedoch nahezu gleicher Verschäumungszahl entstanden, kann der Zusammenhang zwischen eingesetztem Sieb und hervorgerufenem Schaumverhalten explizit dargelegt werden. Die ermittelten Verschäumungszahlen der beurteilten Proben liegen mit kleinen Abweichungen bei ca. 90 (siehe Tabelle 7-1) und lassen sich somit einen guten Vergleich der Eigenschaften zu. Trotz der nahezu gleichen Verschäumungszahlen zeigt sich bei den Versuchen ein abweichendes Bild im Auslaufverhalten. Bereits optisch ist ein Unterschied zwischen den einzelnen Schaumzungen in Form und Ausdehnung (siehe Abbildungen in Tabelle 7-4) zu erkennen. Während die rechteckige Form der Auslassöffnung bei Sieb 1 sehr prägnant erhalten bleibt und sich eine stabile nahezu quaderförmige „Schaumraupe“ aus der Öffnung der Schaumbox schiebt, bilden die anderen vier Siebe eine fächerartige Lache aus. Diese nimmt bis zu Sieb 3 in der Fläche zu, um dann bei Sieb 4 und 5 wieder kleiner zu werden. Eine Darstellung aussagekräftiger Bildsequenzen der zeitlichen Abfolge ist in Tabelle 7-4 dargestellt.

Tabelle 7-4 Beispielhafte Darstellung der Ausbreitungsflächen

T[s]	Sieb 1	Sieb 2	Sieb 3	Sieb 4	Sieb 5
10					
30					
60					
120					
180					

Die nebenstehende Tabelle zeigt die Bildsequenzen jeweils eines Versuchsdurchganges der fünf verwendeten Siebe.

Horizontal ist der Vergleich zwischen den verschiedenen Schaumkonsistenzen, die durch den Einsatz von Sieb 1 - 5 entstehen, dargestellt.

Vertikal sind verschiedene Zeitschritte dargestellt, sodass der Verlauf der Schaumausbreitung erkenntlich wird.

Dabei ist von Sieb 1 bis Sieb 3 ein deutlicher Zuwachs der bedeckten Fläche zu erkennen, der bei Sieb 4 und 5 wieder abnimmt.

Für die Auswertung des Ausbreitungsverhaltens wurden mit einer oberhalb des Versuchsaufbaus angebrachte Digitalkamera Videos angefertigt. Aus den erstellten Videos konnte mithilfe der jeweiligen Bildsequenz zu jedem beliebigen Zeitpunkt eine Aussage über die eingenommene Fläche getroffen werden. Dazu wurden die Bilder in Auto - CAD 2008 eingelesen und darin eine Hüllkurve um den Schaumteppich gezogen. Durch das Programm war die Möglichkeit gegeben, die Eigenschaften der erstellten Kurve, u.a. den exakten Flächeninhalt, zu bestimmen. Alle Proben wurden über einen Zeitraum von fünf Minuten beobachtet. Zu diesem Zeitpunkt zeigten sich zum Teil erste Wasserspuren (Drainage aus den Schaumlamellen) am Rand der Schaumlache. Außerdem veränderte sich die Fläche kaum noch und die fließfähigeren Schaumproben erreichten bereits die Ränder der Ausbreitungsfläche.

Zur Auswertung des Ausbreitungsverhaltens wurden jeweils drei Schaumproben pro Sieb herangezogen (siehe Abschnitt 7.1), mit Auto - CAD bestimmt und daraus ein Mittelwert gebildet. Im untenstehenden Diagramm sind diese dann zu jedem der fünf eingesetzten Siebe aufgetragen.

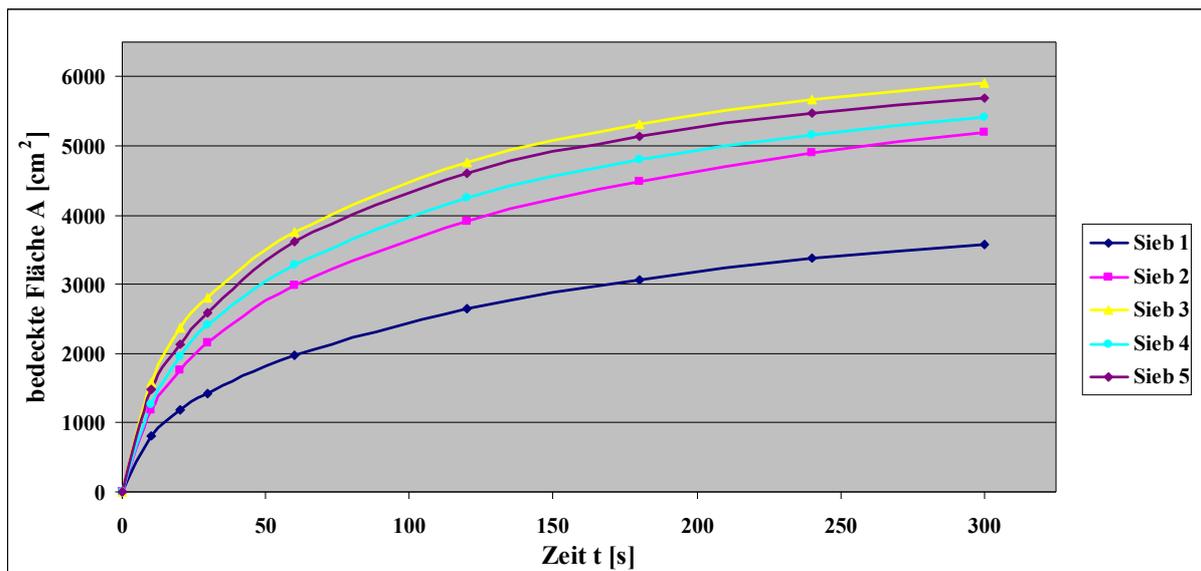


Abbildung 7-4 Vergleich des Ausbreitungsverhaltens anhand der bedeckten Fläche

### 7.3.2. Einfluss von Sieb und Schaumstruktur auf die Fließfähigkeit

Wie bereits in den Abbildungen (siehe Tabelle 7-4) ersichtlich, zeigt auch das Diagramm einen deutlichen Unterschied im Ausbreitungsverhalten und bestätigt die visuellen Beobachtungen der erstellten Videos. Während der Schaum von Sieb 1 die geringste Steigung und damit Auslaufgeschwindigkeit vorweist und nach 5 min eine Fläche von ca. 3500 cm<sup>2</sup>

einnimmt, zeigen die Schäume von Sieb 2 und 3 ein wesentlich besseres Auslaufverhalten. Sieb 2 bedeckt nach der gleichen Zeit mehr als 5000 cm<sup>2</sup> und Sieb 3 sogar fast 6000 cm<sup>2</sup>.

Bei Sieb 4 und 5 nehmen Ausbreitungsgeschwindigkeit und die vom Schaum bedeckte Fläche wieder leicht ab, sodass sich deren Fließfähigkeit zwischen der von Sieb 2 und 3 einpegelt. Überraschend ist hierbei, dass die Ausbreitungsfläche von Sieb 5 wieder oberhalb von Sieb 4 liegt. Das Fließverhalten lässt sich aber auch über die Schaumstruktur erklären. Wie bereits in Abschnitt 7.2.1 erläutert, ist bei Sieb 1, 2 und 3 eine gleichmäßige Blasenstruktur mit ansteigender charakteristischer Blasengröße zu beobachten. Parallel dazu steigt auch die Fließfähigkeit bei den drei Schäumen an. Bei den Schäumen von Sieb 4 und 5 konnte keine charakteristische Blasengröße zugeordnet werden. Hier überlagern sich dementsprechend die Eigenschaften, die von den verschiedenen Blasengrößen hervorgerufen werden.

Prinzipiell ist bei einem hohen Teilungsgrad (viele kleine Blasen) ein schlechterer Schaumauslauf zu beobachten. Da hier durch die hohe Unterteilung eine Vergrößerung der Fläche bei gleichzeitiger Ausdünnung der Wandstärke stattfindet, ist von einem wesentlich stärkeren Blasenverbund auszugehen. Bei dünnen Wandstärken mit weniger Flüssigkeitsinhalt wird das Kanalsystem (siehe Abschnitt 2.2) immer enger und die Berührungsflächen und damit der Verband unter den Blasen immer größer, sodass die Fließfähigkeit kleiner wird.

Bei den Schäumen aus Sieb 4 und 5 wird ein breites Spektrum an Blasengrößen erzeugt. Dadurch überlagern sich hier die Effekte großer und kleiner Blasen, sodass die Fließfähigkeit entgegen der ursprünglichen Erwartung wieder geringer wird. Hinzu kommt, dass die kleinen und sehr kleinen Blasen zwar in großer Anzahl auftreten, jedoch offensichtlich eine dickere Lamellenstärke als Flüssigkeitsfilm zwischen den Blasen auftritt (geringerer Teilungsgrad und durch das Sieb gewanderte kleine Tropfen). Dadurch ist auch der Blasenverband nicht so stark wie bei Verwendung der feinmaschigen Siebe.

Um dies mit Beispielen aus dem alltäglichen Leben zu unterstreichen wurden von Rasierschaum, Schlagsahne und Bierschaum typische Verschäumungszahlen ermittelt. Diese drei Schaumsorten sind jedermann bekannt, doch konnten keine Aussagen bezüglich der zugehörigen Raumgewichte gefunden werden. Zur Ermittlung der zugehörigen Zahlenwerte wurde nach dem gleichen Verfahren vorgegangen, wie es die *DIN EN 1568 (Teil 1-4)* beschreibt, es wurden jedoch kleinere Behälter zum Befüllen und Auswiegen genutzt.

Die ermittelten Werte belaufen sich auf:

Rasierschaum:	VZ ~ 15
Schlagsahne:	VZ ~ 3,5 – 5
Bierschaum:	VZ ~ 3-4

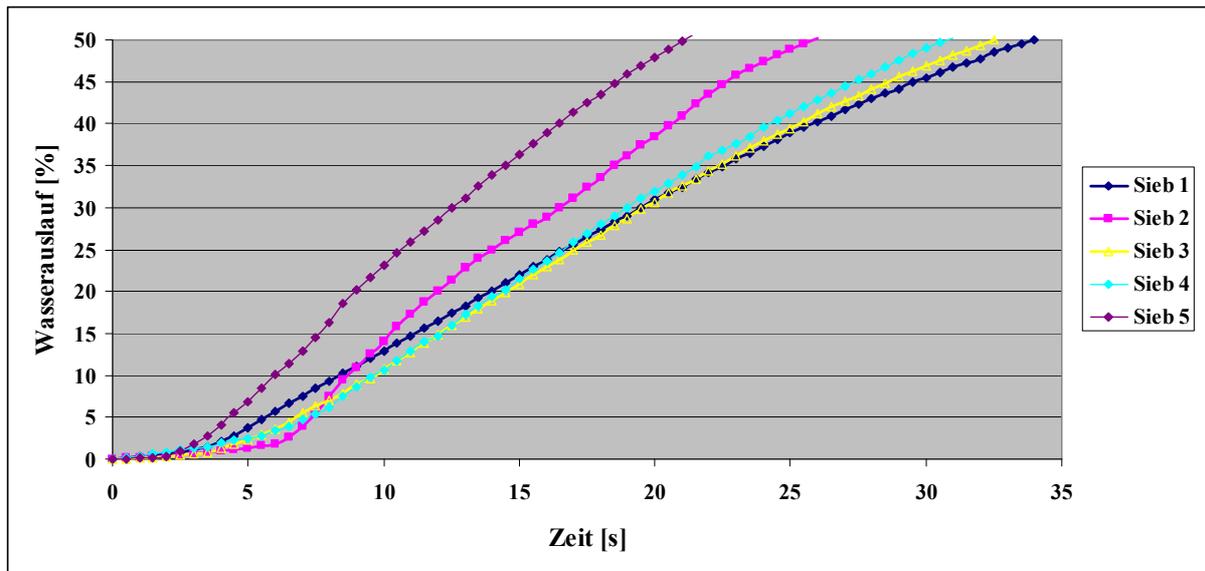
Die Beispiele spiegeln die Aussage der Untersuchungen sehr ansehnlich wieder. Rasierschaum ist trotz der im Vergleich zum Löschschaum niedrigen Verschäumungszahl als ein sehr steifes, nahezu kaum fließfähiges Medium bekannt. Die Blasengröße ist sehr klein und konnte mit dem Verfahren (auf dem Flachbettscanner) nicht sichtbar gemacht werden. Trotzdem ist die Verschäumungszahl im Schwerschaumbereich, also mit einem hohen Flüssigkeitsanteil, was wiederum (laut bisherigem Kenntnisstand) eine gute Fließfähigkeit bedingt.

Sehr gut lassen sich die zwei Schaumsorten von Schlagsahne und Bier miteinander vergleichen. Die beiden dazu ermittelten Bereiche des Raumgewichts überdecken sich. Blasengröße und -zusammensetzung unterscheiden sich jedoch stark (konnten allerdings auch nicht ermittelt werden, bei Schlagsahne ist die Struktur wiederum zu fein, Bierschaum zersetzt sich zu schnell). Trotz der ähnlichen Verschäumungszahlen unterscheiden sich beide Schaumsorten wieder extrem in der Fließfähigkeit. Während Schlagsahne sehr zähflüssig ist, breitet sich Bierschaum schnell auf der Flüssigkeitsoberfläche aus.

#### ***7.4. Wasserauslauf***

Durch Beobachtungen, die während der Ausbreitungsversuche getätigt wurden, entstand die Vermutung, dass die Fließeigenschaften in engem Zusammenhang mit dem Wasserauslauf stehen könnten. Da sich Schaum auf einer Flüssigkeitsschicht fortbewegt und diese u.a. durch den Wasserauslauf entsteht, sollte auch dieser Zusammenhang überprüft werden.

Somit wurden im Nachhinein von den fünf Sieben erneut Schaumproben erzeugt und deren Wasserhalbzzeiten mit dem in Abschnitt 6.1.4 erläuterten Versuchsaufbau ermittelt. Abbildung 7-5 zeigt den Verlauf des Wasseraustritts und die zugehörige Wasserhalbzeit der fünf Schäume.



**Abbildung 7-5 Darstellung der ermittelten Wasserhalbzzeiten der 5 unterschiedlichen Schäume**

Die Wasserhalbzzeiten der fünf Schaumproben zeigen prinzipiell einen typischen Verlauf, liegen allerdings recht weit auseinander. Sie bestätigen auch nicht den vermuteten Zusammenhang mit dem Ausbreitungsverhalten. Die Erwartung war, dass bei einem Schaum mit gleichmäßigen kleinen Blasen durch den hohen Teilungsgrad dünnere Schaumlamellen zwischen den Blasen sind, die den Flüssigkeitsanteil auch nur langsam auslaufen lassen. Die Schaumprobe von Sieb 1 weist zwar die längste Wasserhalbzzeit auf, zeigt aber anfänglich einen, im Vergleich zu den anderen Kurven, zu schnellen und unerwarteten Anstieg. Ohnehin lassen die anderen vier Kurven weder einen Zusammenhang zu dem zuvor ermittelten Ausbreitungsverhalten, noch zu den vorweg aufgekommenen Vermutungen zu.

Die Unabhängigkeit von Wasserauslauf und Fließverhalten wird weiterhin durch das Diagramm deutlich sichtbar. Der Beginn des aus den Lamellen austretenden Wassers liegt bei ca. drei Minuten. Zu diesem Zeitpunkt ist bei den Auslaufversuchen (siehe Abbildung 7-4) der größte Teil der Fläche bedeckt und die Ausbreitungsgeschwindigkeit stark zurückgegangen, sodass ein Einfluss nur noch unerheblich ist.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Bestimmung der Fließfähigkeit von Feuerlöschschäumen erfolgten, zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zur Blasengröße und -zusammensetzung. Der Einfluss der Schaumstruktur auf das Ausbreitungs- bzw. Fließverhalten konnte durch Kombination aus durchgeführten Versuchen (mit anschließender Auswertung der Videomitschnitte) und Nachweis der Blasenstruktur über eingescannte Schaumproben abgeleitet werden.

Anhand der Versuche konnte belegt werden, dass die Fließfähigkeit von Feuerlöschschaum nicht nur vom Wassergehalt – ermittelt über die Verschäumungszahl – abhängt. Durch den Vergleich von fünf Schäumen gleicher Verschäumungszahl konnte sogar nachgewiesen werden, dass hierbei unterschiedliche Fließfähigkeiten erreichbar sind und somit weitere Einflüsse verantwortlich sein müssen. Trotz eines Großteils an gleichgehaltenen Einstellungen sind bei den Versuchen noch einige Parameter offen, die mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht endgültig erforscht werden konnten. Durch Festlegung und Beibehaltung der äußeren Einstellungen, wie Luft- und Wasserdruck (sowie der damit verbundenen Durchflussmenge), Wasserqualität, Zumischrate etc. konnte jedoch ein ausreichendes, gleichmäßig gutes und reproduzierbares Schaumergebnis erreicht werden. Der abweichende Baustein zur Erzeugung der unterschiedlichen Schaumstrukturen wurde durch den Einsatz verschiedener Siebeinsätze realisiert. Allein durch den Austausch des jeweiligen Verschäumungssiebes konnten mit dem verwendeten Schaumerzeuger fünf verschiedene Schaumstrukturen bei gleicher Verschäumungszahl erzeugt werden. Allerdings kann, bauartbedingt durch die gröber werdende Maschenweite in Verbindung mit gleichbleibender Tropfengröße, nur bei drei von fünf verwendeten Sieben gleichmäßiger Schaum mit einer abschätzbaren, charakteristischen Blasengröße hergestellt werden. Bei ansteigender Siebmaschenweite wird die Blasenstruktur immer inhomogener. Somit ist zwar eine Tendenz zu erkennen, diese kann jedoch nicht für alle fünf erzeugten Schäume vollends nachgewiesen werden. Bei den zwei groben Sieben überlagern sich die Einflüsse der stark differierenden Blasengrößen, sodass hier noch weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf besteht. Das vom Sieb abhängige, teils stark inhomogene Blasenspektrum erschwert durch Vermischung und Überlagerung der hervorgerufenen Eigenschaften eine gezielte Einschätzung des Fließverhaltens. Hier wäre es beispielsweise denkbar, den Schaumerzeuger weiter anzupassen um zusätzlich auch einen gleichmäßigen, grobblasigen Schaum erzeugen zu können.

Weiterhin könnten die Abstufungen bei den verwendeten Schaumsieben verringert werden um auch die bisher ausgelassenen Zwischenstufen durch Ergebnisse auszufüllen.

Zur besseren Bestimmbarkeit der Blasenstruktur fehlt zudem die Möglichkeit, den erzeugten Schaum dreidimensional auszuzählen. Für die vorliegende Arbeit wurden einzelne Schaumproben in einer Petrischale eingescannt. Damit wird allerdings nur eine zweidimensionale und bedingt hinreichende Auswertung ermöglicht. So lassen sich zwar die einzelnen Blasengrößen (je nach verwendetem Hilfsmittel im sichtbaren Bereich) genau auswerten, es lässt sich jedoch nicht die tatsächliche räumliche Verteilung ableiten. Grundsätzlich kann damit ein Zusammenhang nachgewiesen werden. Eine gezielte Aussage über die entsprechenden Eigenschaften sollte jedoch mit einem weiteren Versuchsaufbau bestätigt werden. Mit heutigem Knowhow besteht sicher die Möglichkeit – beispielsweise mit computerunterstützten Methoden – einen Schaum räumlich zu bestimmen. Dies konnte mit der vorliegenden Laborausstattung und in Anbetracht der stetigen Schaumveränderung nicht realisiert werden.

Durch die Beobachtungen zum Fließ- und Auslaufverhalten des Schaumes konnten die theoretischen Grundlagen sehr gut bestätigt und sogar in weiten Teilen ergänzt werden. Da sich der Schaum beim Fließen als Volumenelement in einer Einheit bewegt und auf einer Flüssigkeitsschicht gleitet, die in erster Linie durch die Lamellendicke der unteren Blasenschicht bestimmt wird, ist deren Dicke ein wichtiges Beurteilungskriterium. Diese konnte aber bei den Versuchen nicht bestimmt werden. Die Lamellendicke steht wiederum in direktem Zusammenhang zur Blasengröße (bei großen Blasen besteht ein geringer und bei kleinen Blasen ein hoher Teilungsgrad, sodass die Wand- und Lamellenstärke abnimmt). Bei gleichmäßigem Blasenbild könnten somit zumindest Rückschlüsse gezogen werden. Insbesondere die Verwendung der größeren Siebe erzeugte aber eine unterschiedliche Blasenzusammensetzung, was sich wiederum im Auslaufverhalten bemerkbar machte. Insofern bei den Testreihen eine gleichmäßige Blasenstruktur erkennbar war, zeigte das Fließverhalten den erwarteten Zusammenhang zur Blasengröße und der damit einhergehenden Lamellenstärke. Kleine Blasen ergaben eine festere Schaumstruktur mit zäherem Fließverhalten. Bei größeren Blasen verteilte sich der Schaum besser auf der Ausbreitungsfläche. Dadurch wurde der theoretische Einfluss der Lamellendicke bestätigt.

Die bei der Auswertung der ersten Versuchsreihen aufgekommene Vermutung, dass sich der Wasserauslauf ebenfalls in der Fließfähigkeit eines Schaumes bemerkbar macht, konnte nicht bestätigt werden. Zu dem Zeitpunkt, zu dem der Wasseraustritt beginnt, hat – zumindest auf dem begrenzten Versuchsstand – der Schaumfluss nahezu seinen Endstand erreicht.

Der Versuchsaufbau selbst zeigt noch Anpassungs- und Verbesserungsmöglichkeiten. Um das Spektrum der Schaumtests zu erweitern, könnte beispielsweise die Auslassöffnung der Schaumbox variiert werden. Größe und Form des Schaumauslasses könnten eine Beurteilung in Bezug auf Eindringöffnungen (z.B. minimale Öffnungsweite) ermöglichen. Durch eine Kanalisierung (seitliche Führungen) des auslaufenden Schaumstromes könnte eine tatsächliche Fließgeschwindigkeit ermittelt werden. Hierbei kommt jedoch zusätzlich zum Untergrund noch die Wandhaftung als Störgröße hinzu, deren Bestimmung wiederum intensive experimentelle Versuche erfordert. Weiterhin könnten andere Parameter und deren Einfluss auf die Fließfähigkeit erforscht werden. Hier wären vor allem das verwendete Schaummittel, die Verschäumungszahl, der Wasseraustritt oder die Zumischung und der Schaummittelgehalt zu nennen. Eine weitere Möglichkeit bietet der Austausch der Ausbreitungsebene. Durch verschiedene Materialien könnte die Schaumausbreitung auf unterschiedlichen Untergründen, bei Installation einer Wanne sogar auf Flüssigkeiten, getestet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der für die vorliegende Arbeit entwickelte Versuchsaufbau zum Vergleich von Fließgeschwindigkeit bzw. Ausbreitungsvermögen des Schaumes, besser und anwendungsnäher ist als die zuvor entwickelten Modelle, beispielsweise der zur radialen Ausbreitung nach John, der auch Grundlage für die erste Variante des Versuchstandes war. Ein Schaum bewegt sich in der Realität ebenso, wie bei der Schaumbox simuliert, von einem Punkt der Schaumerzeugung aus in Richtung Brandherd und soll sich nicht allseitig ausbreiten.

Allerdings ist der Aufbau selbst sicherlich zu komplex um ihn vom Anwender nachzuempfinden und zu bedienen. Um nicht durch ungeübte und unsachgemäße Bedienung und Interpretation der Messergebnisse noch mehr Unsicherheit zu erzeugen als bereits so schon verbreitet ist, sollte der vorgeschlagene Versuchsaufbau lediglich den entsprechenden Prüf- und Zulassungsinstitutionen vorbehalten bleiben.

Es bleibt jedoch zu empfehlen die entsprechenden Versuche insbesondere auch unter Anwendungsbedingungen – also nicht nur mit dem „DIN-Schaumrohr“ zu betreiben, sondern reale Einsatzschaumrohre zu verwenden, damit der Anwender ein Maß für seine zur Verfügung stehende Technik bekommt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Schreiber, H.-M., Porst, P.: Löschmittel: *Chemisch-physikalische Vorgänge beim Verbrennen und beim Löschen*, (Kapitel 3.3. Schaum),  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1972
- [2] Denis Weaire, Stefan Huntzler: *The Physics of Foams*,  
Oxford University Press New York 1999
- [3] Prof. Dr. Willenbacher, N.: Vorlesungsunterlagen *Stabilität von Dispersionen, Emulsionen und Schäumen*  
KIT (Karlsruher Institut für Technologie), Bereich Angewandte Mechanik 2010  
[http://www.mvm.kit.edu/682\\_1141.php](http://www.mvm.kit.edu/682_1141.php)
- [4] Pleß, G., Lubosch, E.: *Löschen mit Schaum*,  
Rudolf Haufe Verlag Berlin 1991
- [5] Sebba, F.: *Foams and biliquid Foams -aphrons*.  
John Wiley & Sons Ltd., Chichester 1987
- [6] Penz, C.: *Wirkungsmechanismus siloxanbasierender Schauminhibitoren in Mineralöl*  
Dissertation Uni Duisburg-Essen 2005
- [7] Anaya, D.: *Mathematisch- statistische Modellierung von Schäumen*  
Diplomarbeit Fachhochschule Weihenstephan 2008
- [8] 112 - Magazin der Feuerwehr; *Schaum- Dekontamination* 10/2000 (S. 628 – 630)
- [9] Klotz, J.: *Planung von Maßnahmen zur Bewältigung einer Tierseuche aus Sicht der Stadt Mannheim*  
Bachelorthesis Bergische Universität Wuppertal (2010)
- [10] Brandchemie GmbH Auf der Trift 8, 63329 Egelsbach <http://brandschutzschaum.com>  
(Stand 11.08.2011)
- [11] Helpenstein, J., Faulstich, S.: Feuerwehr-Magazin Sonderheft "*Brandbekämpfung mit Schaum*"  
2006
- [12] Scheichl, L.: *Prüfung von Luftschaummitteln und Luftschaum*  
Beitrag in VFdB Zeitschrift (Teil I - VFdB - Zeitschrift 1 1952, Teil II - VFdB - Zeitschrift 2 1952)
- [13] Kaufhold, F., Rempe, A.: *Feuerlöschmittel Eigenschaften – Wirkung - Anwendung*  
Verlag W. Kohlhammer GmbH 1976

- [14] Pleß, G.: „*Schwer- oder Mittelschaum*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 9  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [15] Rodewald, G.; Rempe, A.: *Feuerlöschmittel*, 7. überarbeitete und erweiterte Auflage  
Kohlhammer Verlag 2005
- [16] de Vries, H.: *Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum*, 1. Auflage  
ecommed verlagsgesellschaft AG & Co. KG 2000
- [17] Anleitung zum Laborpraktikum am IdF LSA (Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt)  
Studiengang „Sicherheit und Gefahrenabwehr“ *Löschen brennbarer Flüssigkeiten mit  
Schäumen – Untersuchung von Kennwerten –*  
[http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek\\_Feuerwehr/idf\\_dokumente/SGA/Labor-praktika/idf\\_praktikum\\_schaum.pdf](http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Feuerwehr/idf_dokumente/SGA/Labor-praktika/idf_praktikum_schaum.pdf) (Stand 23.09.2011)
- [18] DIN EN 1568-1 *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil: 1 Anforderungen an Schaummittel zur Erzeugung von Mittelschaum zum Aufgeben auf nichtpolare (mit Wasser nichtmischbare) Flüssigkeiten* (Stand: Juni 2008)
- [19] DIN EN 1568-2 *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil: 2 Anforderungen an Leichtschaum zum Aufgeben auf nichtpolare (mit Wasser nichtmischbare) Flüssigkeiten* (Stand: Juni 2008)
- [20] DIN EN 1568-3 *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil: 3 Anforderungen an Schwerschaum zum Aufgeben auf nichtpolare (mit Wasser nichtmischbare) Flüssigkeiten* (Stand: Juni 2008)
- [21] DIN EN 1568-4 *Feuerlöschmittel - Schaummittel - Teil: 4 Anforderungen zur Erzeugung von Schwerschaum zum Aufgeben auf polare (mit Wasser mischbare) Flüssigkeiten* (Stand: Juni 2008)
- [22] Kausch, O.: „*Das chem. Feuerlöschwesen*“ in Chemie und Technik der Gegenwart  
Verlag von S. Hirzel in Leipzig 1939
- [23] Brunswig, H.: „*25 Jahre Schaum, 25 Jahre Luftschaum*“ in VFdB – Zeitschrift 1 1952
- [24] Beythien, R.: „*Das Schaumlöschverfahren*“ in Feuerschutz Jahrgang 5 Nr. 8 Zeitschrift des Reichsvereins deutscher Feuerwehringenieur 1925
- [25] Archivbild Fabrik chemischer Präparate von Dr. Richard Sthamer GmbH & Co. KG  
Liebigstraße 5, D-22113 Hamburg [www.sthamer.de](http://www.sthamer.de)
- [26] Friedrich, W.: „*Das Komet-Schaumsystem*“ aus Feuerschutz 14.Jg Nr. 2 1934
- [27] Folke, F.: „*Chemische und mechanische Herstellung von Schaum zum Feuerlöschen*“ in Feuerschutz Nr. 10 Zeitschrift des Reichsvereins deutscher Feuerwehringenieur 1930

- [28] Folke, F.: *Probleme und Praxis im Schaumlöschverfahren* in Feuerschutz Nr. 12 Zeitschrift des Reichsvereins deutscher Feuerwehringenieur 1932
- [29] Feuerwehr Region Sursee, Allmendstrasse 1, 6210 Sursee  
[http://www.frsursee.ch/technik/cafs/cafs\\_overview.htm](http://www.frsursee.ch/technik/cafs/cafs_overview.htm) (Stand 09.08.2011)
- [30] Kaup, B., Zimmer, V.: „*Der Entwicklungsstand mobiler Hochverschäumungsgeräte in unserer Republik*“ in Unser Brandschutz: Zeitschrift für das Brandschutzwesen Heft 10 1967
- [31] Orlow, A., Reutt, W. T., Samsonow, W. W.: „*Die Erzeugung von hochverschäumten Schaum* „, in Unser Brandschutz: Zeitschrift für das Feuerwehrwesen Ausgabe B wissenschaftlich – technische Beilage 3/1967 / S. 62 – 72 (Teil 1)  
wissenschaftlich – technische Beilage 4/1967 / S. 86 – 90 (Teil 2) 1967
- [32] Oswald, W., Steiner, A.: „*Über Schaumfähigkeit und Oberflächenspannung, insbesondere von Humussolen*“ aus Kolloid-Zeitschrift 36 (1925)
- [33] Amsel, O.: „*Die Beurteilung von Schäumen zur Bekämpfung von Mineralölbränden*“ Öl u. Kohle: Zeitschrift für das gesamte Gebiet der Kraftstoffe, Mineralöle, Bitumen, Teere und verwandten Stoffe Nr. 12 Band 38 1942
- [34] Pleß, G, Kretschmar, A.: „*Abhängigkeit der Verschäumung vorgemischter Schaumbildnerlösungen von der Standzeit*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8 Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [35] Pleß, G, Kretschmar, A.: „*Verschäumbarkeit in Abhängigkeit von der Zumischung des Schaumbildners*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8 Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [36] Kretschmar, A., Breckau, Ch., Reichel, H.: „*Methode zur schnellen Bestimmung der Verschäumungszahl u. d. Wassergehaltes*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8 Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [37] Pleß, G, Kretschmar, A., Steinbach, K.: „*Fließfähigkeit von Schäumen im Freien auf festem Untergrund*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8 Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [38] Kretschmar, A., Schubring, K., Waage, H.-J., Stahl, M., Stahl, H.-M.: „*Entwässerung von Schäumen bei Einwirkung von Methanol- u. Hexandämpfen*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8 Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983

- [39] Kretschmar, A., Taeger, H., Datow, E.: „*Untersuchung des Rauch- u. Wärmeeinflusses auf die Verschäumbarkeit von Schaumbildnerlösungen*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [40] Pleß, G, Steinbach, K.: „*Untersuchung der in der DDR Handelsüblichen Schaumbildner u. Netzmittel für die Brandbekämpfung auf der Grundlage der Richtlinie zur Prüfung von Schaumbildnern u. Schäumen*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [41] Pleß, G.: „*Zusammenfassung der Ergebnisse der Großlöschversuche mit Schwer-, Mittel- u. Leichtschaum*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 8  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [42] Pleß, G., Steinbach, K.: „*Laborgerät zur Schaumerzeugung*“ in  
Brandschutz/Explosionsschutz 8  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [43] Kretschmar, A.: „*Leichtschaum zur Brandbekämpfung in Kabelkanälen*“ in  
Brandschutz/Explosionsschutz 9  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [44] Kretschmar, A.: „*Beschäumung von Räumen*“ in Brandschutz/Explosionsschutz 9  
Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik Berlin 1983
- [45] AWG Kombischaumrohr  
AWG Fittings GmbH, Postfach 1660, D-89531 Giengen/Brenz  
[http://awg-fittings.com/Umschaltbare\\_Schaumrohre\\_196826.html](http://awg-fittings.com/Umschaltbare_Schaumrohre_196826.html) (Stand 10.08.2011)
- [46] Flexi Foam System (Big Tempset)  
<http://www.truckenmueller.org/6/67/2001schaum/schm7954.jpg> [http://www.big-tempset.de/de/flexifoam\\_de.html](http://www.big-tempset.de/de/flexifoam_de.html)
- [47] Ulrich Braun "*Druckluftschaum*" in Die Roten Hefte/Ausbildung kompakt 211 2009  
Kohlhammerverlag
- [48] VFDB Technischer Bericht DRUCKLUFTSCHAUM (DLS) Oktober 2010  
erarbeitet vom Referat 5 „Brandbekämpfung – Gefahrenabwehr“ des Technisch-  
Wissenschaftlichen Beirates (TWB) der vfdb unter Mitwirkung weiterer, externer  
Brandschutzexperten
- [49] Baden-Württemberg Innenministerium, Landesbranddirektor, Unfallkommission  
„Tübingen“ zum „Tübinger Unfall“ Bericht:  
<http://www.feuerwehr.de/download/T%FCbingen-Unfallkommissions-Bericht.pdf>

- [50] Dehmel, J., T.: „*Einsatzmöglichkeiten und –grenzen von in Löschfahrzeugen eingebauten Druckluftschaumanlagen bei Brandeinsätzen unter besonderer Berücksichtigung des Unfallschutzes*“  
Abschnittsarbeit für die Laufbahn des gehobenen feuerwehrtechnischen Dienstes  
Berufsfeuerwehr Hagen 2006
- [51] One Seven of Germany GmbH, Rudolf-Breitscheid-Str. 78, 14943 Luckenwalde  
www.oneseven.de (Stand 23.08.2011)
- [52] Brunswig, H.: „*Prüfung von Luftschäum und Luftschäumerzeugern*“ in Zeitschrift des  
Reichsvereins deutscher Feuerwehringenieur 1942
- [53] Amsel O.: „*Die Beurteilung von Schäumen zur Bekämpfung von Mineralölbränden*“ in Öl  
u. Kohle: Zeitschrift für das gesamte Gebiet der Kraftstoffe, Mineralöle, Bitumen, Teere  
und verwandten Stoffe Nr. 12 Band 38 1942
- [54] John, R.: „*Entwicklung eines Verfahrens zur Schnellprüfung von Schaummitteln und  
Schaumerzeugern im Einsatzdienst der Feuerwehr*“ in Forschungsbericht Nr.1  
Arbeitsgemeinschaft der Landesdienststellen für Feuerschutz in den Bundesländern, (AGF)  
Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) 1967
- [55] DIN 13565\_1 *Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Schaumlöschanlagen – Teil 1:  
Anforderungen und Prüfverfahren für Bauteile* (Stand: Januar 2008)
- [56] DIN 14366 *Tragbare Schaumstrahlrohre PN16* (Stand Januar 2011)
- [57] Mittelschampestole: <http://www.total-feuerschutz.de/de/products/6395/>
- [58] PRO/pak: [http://tft.com/search/search.cfm?directoryName=PRO/pak Portable Foam  
System&showAllProducts=yes](http://tft.com/search/search.cfm?directoryName=PRO/pak%20Portable%20Foam%20System&showAllProducts=yes)
- [59] Zusammenfassung zum „Tübinger Unfall“: <http://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftschäum>
- [60] Dörfler, H.-D.: „*Grenzflächen- und Kolloidchemie*“  
Wiley-VCH-Verlag 1994
- [61] Calvert, J.R.: „*Foam in Motion*“ aus Wilson, A.J.: *Foams: Physics, Chemistry and  
Structure*  
Springer-Verlag Berlin 1989
- [62] Abb. Viskosität Universität Karlsruhe Projekt: Naturwissenschaft und Technik (NwT)  
[http://www.nat.nwt-bw.de/module/emulsionen/RBS\\_Grundlagen\\_Rheologie.pdf](http://www.nat.nwt-bw.de/module/emulsionen/RBS_Grundlagen_Rheologie.pdf)  
(Stand 07.09.2011)
- [63] Schütte, V., Wurm, F.-H., Kosmowski, I.: „*Ansätze zur Modellierung von  
Schaumströmungen*“ in Technische Mechanik 8 Heft 3 1987

- [64] Brunswig, H.: „*Luftschaum und Luftschaumerzeuger*“ in Feuerpolizei: Zeitschrift für Feuerschutz und Rettungswesen 38. Jahrgang Nr. 9, 10 und 11 1936
- [65] Daimler, K.: „*Eigenschaften und Anwendungsbereich der neuesten TUTOGEN - Marken N und E*“ in Feuerschutz 20 Zeitschrift des Reichsvereins deutscher Feuerwehringenieur 1940
- [66] Trierweiler, H.-G.: *Vergleichende Untersuchungen mechanischer Eigenschaften ausgewählter Löschsäume*  
Diplomarbeit Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal 1992
- [67] Böke, J.: *Experimente und Untersuchungen der Verdampfungsminderung durch Löschsäume als Konsequenzminderungsmaßnahme bei Störfällen mit Flüssiggaslachen*  
Dissertation 1994 Bergische Universität Wuppertal
- [68] Funktionsmodellbau Andrea Schmid, Schanenstr. 7, 60314 Frankfurt  
<http://www.funktionsmodellbau-bs.de/> (Stand 25.05.2011)
- [69] Prinzipskizze aus Arbeitsunterlagen BG50 (Originalgerät) RWE (abgeändert vom Verfasser)
- [70] Technisches Datenblatt zum Zumischer-Prototyp HD-60 (AWG Fittings GmbH)
- [71] Nemitz, A.: *Ermittlung sowie Veränderung der Parameter Druckluft, Wasser und Schaummittelzumischung eines mobilen Beschäumungsgerätes der RWE Power AG hinsichtlich gestellter Anforderungen an dessen Leistungsspektrum*  
Bachelorthesis Bergische Universität Wuppertal 2010
- [72] Technische Universität München (TUM) Physik-Department  
<http://users.physik.tu-muenchen.de/cucke/medprakt/Fehler.PDF> (Stand: 28.09.2011)
- [73] Lechler Datenblatt Düse 461.046 [http://www.lechler.de/index-de\\_DE](http://www.lechler.de/index-de_DE) Lechler GmbH  
Präzisionsdüsen.Tropfenabscheider, Ulmer Straße 128, D-72555 Metzingen

# Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 2-1 dreidimensionales Netz der Flüssigkeitskanäle [2]</i>	5
<i>Abbildung 2-2 Verformung von Schaumblasen durch Auslaufen der Flüssigkeit (Drainage) [2]</i>	5
<i>Abbildung 2-3 Zeitliche Abhängigkeit der VZ bei ruhendem Schaum nach [4]</i>	6
<i>Abbildung 3-1 Feuerwehrmann mit Luftschaumrohr [25]</i>	18
<i>Abbildung 3-2 Darstellung des Kometrohres nach Friedrich, W. [26]</i>	18
<i>Abbildung 3-3 Skizze eines Mittelschaumrohres nach [30]</i>	20
<i>Abbildung 3-4 Skizze eines Leichtschaumaggregates nach [30]</i>	20
<i>Abbildung 3-5 Entstehung von Blasen an einem benetzten Schaumsieb [31]</i>	21
<i>Abbildung 3-6 IFA W 50 mit Leichtschaumaggregat [16]</i>	26
<i>Abbildung 3-7 umschaltbares Kombinationsstrahlrohr</i>	26
<i>Abbildung 3-8 Flexi Foam System [46]</i>	26
<i>Abbildung 3-9 Mittelschaumpistole (integrierter Zumischer und Schaumbehälter) [57]</i>	31
<i>Abbildung 3-10 PRO/pak - tragbares Schaum-system mit Schwer-, Mittelschaumrohr und Netzmitteldüse [58]</i>	31
<i>Abbildung 4-1 Typische Fließ- und Viskositätskurven fließfähiger Systeme: (a) newtonsches Verhalten,</i>	35
<i>Abbildung 4-2 Darstellung der Rohrströmung bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten nach [61]</i>	36
<i>Abbildung 4-3 Schaumströmung auf einer Fläche</i>	36
<i>Abbildung 4-4 Schaumströmung auf einer Fläche mit innerer Umstrukturierung</i>	37
<i>Abbildung 4-5: Stilisierte Schaumströmung durch eine Verengung [61]</i>	38
<i>Abbildung 4-6 Prüfgerät nach Brunswig [64]</i>	46
<i>Abbildung 4-7 U-förmige Brandwanne nach Vorschlag von Daimler[65]</i>	46
<i>Abbildung 4-8 Teststand mit runder Auffangwanne nach Vorschlag von Brunswig [52]</i>	46
<i>Abbildung 4-9 Versuchsaufbau nach John [54]</i>	47
<i>Abbildung 5-1 Beschäumungsgerät BG50 (RWE)</i>	51
<i>Abbildung 5-2 Prinzipskizze des Schaumerzeugers BG50 [69]</i>	52
<i>Abbildung 5-3 Funktion der Schaumerzeugung in der Schaumkammer</i>	53
<i>Abbildung 5-4 Zumischer AWG HD-60</i>	53
<i>Abbildung 5-5 Darstellung der Zumischrate mit AWG-HD - 60 Zumischer</i>	54
<i>Abbildung 5-6 Luftmengenmesser</i>	54
<i>Abbildung 5-7 Ermittelter Luftvolumenstrom im Beschäumungsgerät BG50 - original RWE</i>	55
<i>Abbildung 5-8 Ermittelter Volumenstrom Wasser-Schaummittelgemisch des BG50 - original RWE</i>	56
<i>Abbildung 5-9 Erreichte Verschäumungszahlen in Abhängigkeit von Luft- und Wasserdruck BG50 - original RWE als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	57
<i>Abbildung 5-10 Schaumkammer BG50</i>	58
<i>Abbildung 5-11 Verbesserte Schaumkammer</i>	58
<i>Abbildung 5-12 Grobmaschiger Siebeinsatz BG50</i>	58
<i>Abbildung 5-13 Feinmaschiger Siebeinsatz zum Vergleich</i>	58
<i>Abbildung 5-14 Oben: feste und unten: verstellbare Kegeldüse aus einem BG50</i>	58
<i>Abbildung 5-15 Einzelteile der selbstentwickelten Dralldüse mit einsetzbarem Drallkörper</i>	58
<i>Abbildung 5-16 Versuchsstand zur Ermittlung der geeigneten Baugruppen</i>	59

<i>Abbildung 5-17 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Kegeldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	60
<i>Abbildung 5-18 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Kegeldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	61
<i>Abbildung 5-19 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Kegeldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	61
<i>Abbildung 5-20 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Kegeldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	62
<i>Abbildung 5-21 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Dralldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	62
<i>Abbildung 5-22 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Dralldüse - grobes Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	63
<i>Abbildung 5-23 Verschäumungszahlen der Kombination AWG-Zumischer - Dralldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	64
<i>Abbildung 5-24 Verschäumungszahlen der Kombination MSR-Zumischer - Dralldüse - feines Sieb als Funktion des Luftdrucks. Parameter ist der Wasserdruck.</i>	64
<i>Abbildung 5-25 Hohlstrahl der Kegeldüse</i>	65
<i>Abbildung 5-26 Feinverteilter Vollstrahl der Dralldüse</i>	65
<i>Abbildung 5-27 Gegenüberstellung von eingesetztem Luft- und erreichtem Schaumvolumenstrom im Ursprungsgerät BG50</i>	67
<i>Abbildung 5-28 Gegenüberstellung der beiden Dralldüsen (Eigenbau und Fa. Lechler)</i>	69
<i>Abbildung 5-29 Schnittdarstellung und Außenansicht des AWG-Safetec-Zumischer [70]</i>	69
<i>Abbildung 5-30 Zumischrate AWG-Safetec-Zumischer in Verbindung mit aufgebohrter Dralldüse (Lechler)</i>	71
<i>Abbildung 5-31 Luftvolumenstrom im optimierten Schaumerzeuger</i>	72
<i>Abbildung 5-32 Durchflusskennlinie AWG-SafeTec-Zumischer in Kombination mit Lechler-Dralldüse</i>	73
<i>Abbildung 5-33 erreichte Verschäumungszahlen beim optimierten Schaumerzeuger</i>	73
<i>Abbildung 5-34 Vergleich von eingesetztem Luft- und erhaltenem Schaumvolumenstrom</i>	74
<i>Abbildung 5-35 Anordnung der wesentlichen Bauteile am optimierten Schaumerzeuger</i>	76
<i>Abbildung 5-36 technische Zeichnung Beschäumungsgerät (optimierte Ausführung)</i>	76
<i>Abbildung 5-37 Beschäumungsgerät (optimierte Ausführung)</i>	76
<i>Abbildung 5-38 Darstellung und Funktion der Schaumkammer</i>	77
<i>Abbildung 6-1 Versuchsaufbau "Schaumhülse"</i>	84
<i>Abbildung 6-2 Versuchsaufbau Schaumbox</i>	87
<i>Abbildung 6-3 Schaumbox während eines Auslaufversuchs</i>	87
<i>Abbildung 6-4 Aufbau zur Ermittlung der Wassermassenverteilung an einem Prototypen der Schaumerzeugers</i>	90
<i>Abbildung 6-5 Sprühbild der Lechler-Dralldüse im optimierten Beschäumungsgerät bei 5 bar Wasserdruck (links ohne und rechts mit Druckluftstrom)</i>	91
<i>Abbildung 6-6 Einteilung der Messfehler nach [72]</i>	94
<i>Abbildung 7-1 Gegenüberstellung der durchschnittlich erreichten Verschäumungszahlen Sieb 1-5</i>	97
<i>Abbildung 7-2 Tropfenbild ohne Druckluftstrom</i>	101
<i>Abbildung 7-3 Tropfenbild mit gleichzeitigem Druckluftstrom</i>	101

<i>Abbildung 7-4 Vergleich des Ausbreitungsverhaltens anhand der bedeckten Fläche</i>	105
<i>Abbildung 7-5 Darstellung der ermittelten Wasserhalbzzeiten der 5 unterschiedlichen Schäume</i>	108

## **Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 2-1 Eigenschaften und Anwendungsbeispiele von Schaum in der Gefahrenabwehr</i>	8
<i>Tabelle 3-1 Einteilung der Verschäumungszahlen und Zuordnung von Schaumgeräten</i>	25
<i>Tabelle 4-1 Bestimmung der Verschäumungszahl von Mittelschaum in unterschiedlichen Normen</i>	44
<i>Tabelle 5-1 Benennung der verwendeten Siebe</i>	78
<i>Tabelle 7-1 erreichte Verschäumungszahlen und die Mittelwerte der drei Versuchsreihen für die Siebe 1-5</i>	96
<i>Tabelle 7-2 Darstellung der Blasenstruktur der erzeugten Schäume (Sieb 1-5)</i>	99
<i>Tabelle 7-3 Daten zur Tropfengröße Lechler Vollkegeldüse nach [73]</i>	101
<i>Tabelle 7-4 Beispielhafte Darstellung der Ausbreitungsflächen</i>	104