

Lehrstuhl für Thermodynamik
Technische Universität München

Thermo-fluiddynamische Eigenschaften von Brandunterdrückungslöschern mit Gasgeneratoren

Stephan Pettinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR – INGENIEURS
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Wolfgang H. Polifke Ph.D. (CCNY)

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hein, i. R.

Die Dissertation wurde am 19.09.2005 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.12.2005
angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Thermodynamik der Technischen Universität München im Rahmen des von der Bayern-Chemie, Aschau am Inn, geförderten Forschungsvorhabens „BUL: Humanverträglicher Brandunterdrückungslöcher“.

Meinem sehr verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer gilt mein ganz besonderer Dank für sein reges Interesse am Fortgang meiner Arbeit und für die intensiven und richtungsweisenden Gespräche, die mir eine wertvolle Hilfe waren, wie auch für die Freiheit bei der wissenschaftlichen Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hein danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Wolfgang Polifke Ph.D. (CCNY) für den Vorsitz bei der mündlichen Prüfung.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Thermodynamik für die Unterstützung im Zusammenhang mit dieser Arbeit. Hierbei seien besonders Dr.-Ing. Marco Auer, Dr.-Ing. Andreas Fischer, Dr.-Ing. Jassin Fritz, Udo Glückert, Dr.-Ing. Christoph Hirsch, Dr.-Ing. Martin Kröner, Volodymyr Ilchenko, Dr.-Ing. Anita Lucic und Ulrich Zech genannt.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Reinhold Maurus, Dr.-Ing. Thomas Lex und Dr.-Ing. Markus Rothenwöhrer für ihre Freundschaft und die vielen angeregten Diskussionen in der Kaffeeküche.

Des Weiteren möchte ich mich an dieser Stelle bei allen studentischen Mitarbeitern und Praktikanten bedanken, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Jürgen Grünwald, Oleg Kotliar, Evdokia Katsimpiri, Giovanni Popolizio und Bernd Faber.

Ebenso gilt mein Dank den Mitarbeitern der Mechanischen und der Elektrowerkstatt für die hervorragende Zusammenarbeit beim Aufbau der Versuchsanlage.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Sonja, meinen Töchtern Annika und Emily und meinen Eltern.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	V
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Grundlagen der Brandentstehung	4
2.1.1 Verbrennung	4
2.1.2 Zündung	5
2.1.3 Grundbegriffe der Verbrennung	5
2.1.4 Brandklassen	6
2.2 Grundlagen der Brandlöschung	7
2.2.1 Löschen durch Stören der quantitativen Reaktionsbedin- gungen	7
2.2.2 Löschen durch Abkühlen	9
2.2.3 Löschen durch inhibitorische Wirkung	10
2.3 Löschmittel	11
2.3.1 Wasser	12
2.3.2 Löschschaum	14
2.3.3 Löschpulver	17
2.3.4 Halone	18
2.3.5 Kohlendioxid	19
2.4 Wassernebel-Technologie	20
2.4.1 Stationäre MicroDrop-Löschanlage von Total Walther	21

2.4.2	IFEX Impulslöschtechnologie	22
2.4.3	HI-FOG Wasserdampftechnologie von Marioff	22
2.4.4	Wasserschokklöcher (WSL) der Bayern-Chemie	23
2.5	Fluiddynamische Grundlagen	24
2.5.1	Zerfallsprozesse von Flüssigkeitsstrahlen	24
2.5.2	Tröpfchenverdunstung	29
2.5.3	Kritische Strömung	34
2.5.4	Strömungseinschnürung	39
3	Konzept	42
3.1	Wasserschokklöcher	42
3.2	Humanverträglicher Brandunterdrückungslöcher	43
4	Versuchsanlage	45
4.1	Modularer Aufbau	45
4.2	Die einzelnen Module des BUL/WSL	45
4.2.1	Gasgenerator	45
4.2.2	Berstmembran	47
4.2.3	Blenden	49
4.2.4	Löschmittelbehälter	49
4.2.5	Ausströmöffnung und Feinsprühdüsen	50
4.3	Die Auslegung des Wasserbehälters	51
4.4	Der Anlagenaufbau	51
4.5	Sensorik und Messtechnik	54
4.5.1	Drucksensoren	54
4.5.2	Temperatursensoren	54
4.5.3	Messwerterfassung	54
4.5.4	Sensoranordnung	55
4.6	Versuchsdurchführung	55
4.7	Messung des Schalldrucks	56
5	Analysemethoden	58
5.1	Analyse des Druck- und Temperaturverlaufs	58
5.1.1	Druckverlauf	58

5.1.2	Temperaturverlauf	58
5.2	Optische Messmethoden	59
5.3	Digitale Bildfolgenanalyse	63
5.4	Sprühkegel-Analyse	65
5.5	Analyse des Sprays	70
5.6	Gittersensor	73
6	Versuchsergebnisse WSL	75
6.1	Versuchsbeschreibung	75
6.2	Versuchsablauf	75
6.3	Versuche mit unterschiedlichen Berstdrücken	76
6.4	Schalldruckmessungen	78
6.5	Zusammenfassung der WSL-Versuche	81
7	Versuchsergebnisse BUL	83
7.1	Versuchsbeschreibung und -ablauf	84
7.2	Volumenänderungsarbeit	84
7.3	Innenströmung	85
7.3.1	Phasenmischung	86
7.3.2	Volumenstrom, K -Wert der Düse	92
7.4	Außenströmung	93
7.4.1	Sprühkegelwinkel	93
7.4.2	Tröpfchengrößenverteilung	96
7.5	Energetische Betrachtung der Zerstäubung	98
7.6	Kriterium Humanverträglichkeit	102
7.6.1	Schalldruck	102
7.6.2	Temperatur	105
7.6.3	Mechanische Belastungsgrenzen	106
8	Zusammenfassung	107
	Literaturverzeichnis	110
	Abbildungsverzeichnis	119

Tabellenverzeichnis	124
----------------------------	------------

Anhang	126
---------------	------------

A	Berstscheiben	126
B	Generierung des Heißgases	133
C	Schalldruckmessungen	134
	C.1 Schalldruckmessungen mit dem BUL	136
	C.2 Schalldruckmessungen mit dem WSL	140
D	Gittersensor-Messungen	142
	D.1 Kaltgasversuche	143
	D.2 Heißgasversuche mit BS1	145
	D.3 Heißgasversuche ohne BS1	146

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Q	$[J]$	Wärmeenergie
c	$\left[\frac{J}{kg\ K}\right]$	Wärmekapazität
m	$[kg]$	Masse
T	$[K]$	Temperatur
Δh	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	Verdampfungsenthalpie
D	$[m]$	Durchmesser
K	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Verdampfungsrate
t	$[s]$	Zeit
VZ	$[-]$	Verschäumungszahl
A	$[m^2]$	Fläche
k	$\left[\frac{1}{s}\right]$	Geschwindigkeitskoeffizient
A'	$\left[\frac{m^3}{kmol\ s}\right]$	Frequenzfaktor der Arrhenius-Gleichung
R_m	$\left[\frac{J}{kmol\ K}\right]$	molare Gaskonstante
E_A	$\left[\frac{J}{kmol}\right]$	Aktivierungsenergie
r	$[m]$	Radius eines Kreises bzw. einer Kugel
D	$[m]$	Kugel- bzw. Tröpfchendurchmesser
\dot{m}	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	Massenstrom
ΔT	$[K]$	Temperaturdifferenz
V	$[m^3]$	Volumen
K	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Verdunstungsrate

B	$[-]$	Spalding Number oder Transferzahl
T_∞	$[K]$	Umgebungstemperatur
c_p	$\left[\frac{J}{kgK}\right]$	Spezifische isobare Wärmekapazität
\dot{m}	$[kg/s]$	Massenstrom
p	$[Pa]$	Druck
Ψ	$[-]$	Ausflussfunktion
M	$[-]$	Machzahl
c	$[m/s]$	Gasgeschwindigkeit
a	$[m/s]$	Schallgeschwindigkeit
s	$[-]$	Schlupf zwischen Gas- und Flüssigphase
w	$[m/s]$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
\dot{x}	$[-]$	massebezogener Strömungsdampfgehalt
v	$[m^3/kg]$	spezifisches Volumen
p_s	$[Pa]$	Schalldruck
W_V	$[J]$	Volumenänderungsarbeit
u	$[m/s]$	Phasengrenzflächengeschwindigkeit
F_A	$[N]$	Auftriebskraft
F_W	$[N]$	Widerstandskraft
g	$[m/s^2]$	Ortsbeschleunigung
v_l	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit
c_w	$[-]$	Widerstandsbeiwert
DV_{10}	$[m]$	größter Durchmesser der kleinsten 10 % des Tropfenvolumens
DV_{50}	$[m]$	größter Durchmesser der kleinsten 50 % des Tropfenvolumens
DV_{90}	$[m]$	größter Durchmesser der kleinsten 90 % des Tropfenvolumens
d_{32}	$[m]$	Sauterdurchmesser
E	$[J]$	Energie
σ	$[N/m]$	Oberflächenspannung

Griechische Buchstaben

α	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	Wärmeübergangskoeffizient
ϱ	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Dichte
λ	$\left[\frac{W}{m K} \right]$	Thermische Leitfähigkeit
κ	$[-]$	Isentropenexponent
ϱ	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Dichte
ε	$[-]$	Volumenanteil des Gases
μ	$[-]$	Kontraktionskoeffizient
φ	$[^\circ]$	Sprühkegelwinkel
δ	$[m]$	Eindringtiefe

Indices

0	Anfangszustand
x	Endzustand
Br	Brennstoff
LM	Löschmittel
l	flüssiger Aggregatzustand (engl. <i>liquid</i>)
g	gasförmiger Aggregatzustand
Tr	Tröpfchen
ges	Gesamt
L	Luft
W	Wasser
e	Austrittszustand
$crit$	kritischer Zustand
$2ph, Spr$	zweiphasige Sprühströmung
$2ph, Sgl$	zweiphasige Schichtenströmung
$2ph, Blasen$	zweiphasige Blasenströmung
G	Gas
F	Flüssigkeit
HU	Homogenes Ungleichgewichtsmodell
VC	<i>Vena Contracta</i>

1 Einleitung

Wasser ist eines der ältesten Löschmittel. Seine thermodynamischen Eigenschaften und seine Verfügbarkeit sind dafür verantwortlich, dass es auch heute noch das am häufigsten eingesetzte Löschmittel ist. Durch das Verbot der ozonschädigenden Halonlöschmittel und durch neue Technologien der Zerstäubung erlebt das klassische Löschmittel Wasser eine Renaissance. Die Wassernebel-Technologie führt zu einer erheblichen Steigerung der Effektivität beim Löschen eines Brandes und erweitert die Anwendungsmöglichkeiten. Ein Brand kann somit schneller und mit weniger Wasserverbrauch gelöscht werden, dadurch verringern sich auch anfallende kontaminierte Löschmittelrückstände und die Umweltbelastung.

Feuerlöschgeräte auf Basis der Wassernebel-Technologie erzeugen einen feinen Wassernebel. Liegt der mittlere Tröpfchendurchmesser eines herkömmlichen Löschsystems im Bereich von 1-5 mm, so weisen die Nebeltröpfchen einen mittleren Durchmesser von lediglich 100-200 μm auf. Aufgrund der wesentlich größeren Oberfläche der Wassernebeltröpfchen verdunsten diese erheblich schneller und kühlen einen Brand wesentlich effektiver.

Die meisten Wassernebel-Löschgeräte versprühen das Löschmittel Wasser mit Hilfe von Feinsprühdüsen unter hohem Druck. Dieser Druck wird im Auslösefall mit Hilfe von Pumpen erzeugt oder über Druckspeicher bereitgestellt. Pumpensysteme haben aber den Nachteil, dass sich der Druck durch den Anlaufprozess der Pumpe und das Rohrleitungssystem relativ langsam aufbaut, Druckspeichersysteme unterliegen der wartungs- und kostenintensiven Druckbehälterverordnung.

Die Bayern-Chemie, Aschau a. Inn, verfolgt mit ihrem Wasserschocklöscher (WSL) einen gänzlich anderen Ansatz: ähnlich wie bei einem Airbag wird ein hoher Gasdruck durch einen Feststoffgasgenerator erst zum Zeitpunkt der Auslösung des WSL erzeugt. Das Löschwasser wird nicht durch eine Düse gepresst, sondern

über den gesamten Querschnitt des Löschmittelbehälters ausgetrieben und im Raum als Wassernebel versprüht. In Abb. 1.1 ist der prinzipielle Aufbau des WSL gezeigt:

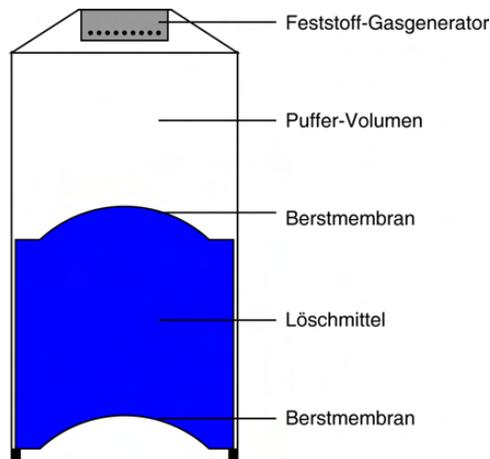


Abbildung 1.1: Aufbau eines explosionsunterdrückenden Wasserschocklöschers aus einem Feststoff-Gasgenerator, einem Puffervolumen, zwei Berstmembranen und dem Löschmittel

Durch den Verzicht auf Rohrleitungen und durch die dynamische Druckgenerierung wird die Ansprechzeit des konzipierten Löschsystems wesentlich verkürzt, das gesamte Wasservolumen von 1,5 l wird innerhalb von etwa 30 ms fein zerstäubt. Abb. 1.2 zeigt eine Sequenz von Bildern eines ausgelösten WSL. Der WSL befindet sich auf der linken Bildseite, die Ausbreitung der Wassertröpfchenwolke findet von links nach rechts statt. Gut zu sehen ist die schnelle räumliche Ausbreitung der Tröpfchenwolke. Dadurch ist der WSL sogar geeignet, anlaufende Explosionen zu verhindern.

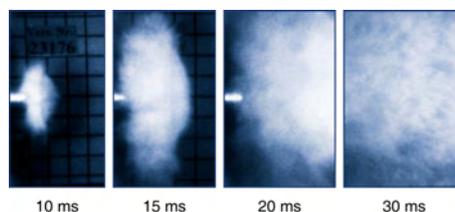


Abbildung 1.2: Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen eines WSL nach der Zündung des Gasgenerators

Die hohe Geschwindigkeit der ablaufenden Vorgänge hat aber zur Folge, dass der WSL nicht humanverträglich ist. Einerseits werden Fragmente der Metallberstscheiben im Raum verteilt, andererseits ist der Schalldruck zu hoch.

Im Rahmen dieser Arbeit ist, in Kooperation mit der Bayern-Chemie, ein Konzept erforscht worden, das auf dem Prinzip des WSL aufsetzt und humanverträglich ist. In diesem Zusammenhang war eine Versuchsanlage zu konstruieren, um die thermo- und fluiddynamischen Eigenschaften des Systems bei Laborbedingungen zu untersuchen. Das modulare System erlaubt auch einen WSL-ähnlichen Aufbau der Versuchsanlage und gewährleistet die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Für die Analyse der Experimente wurden in dieser Arbeit verschiedene Methoden entwickelt, die auf der digitalen Bildverarbeitung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen basieren. Zusätzlich wurde im Rahmen des Projekts ein Gittersensor zur lokalen Leitfähigkeits- bzw. Gasgehaltsmessung entwickelt, der nicht wie üblich senkrecht zur Strömungsrichtung, sondern in der Mittelachse in Strömungsrichtung eingesetzt wird. Dadurch können erstmals Gasgehaltsmessungen als Schnitt durch die Mittelachse des Löschmittelbehälters durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus der Hochgeschwindigkeitskinematographie und des Gittersensors werden miteinander verglichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit ermöglichen das Design eines Löschgeräts, das eine Optimierung der Effektivität des Löschvorgangs unter Berücksichtigung des Aspektes der Humanverträglichkeit darstellt.

2 Stand der Technik

2.1 Grundlagen der Brandentstehung

2.1.1 Verbrennung

Als Verbrennung bezeichnet man die die schnelle, stark exotherme chemische Umwandlung von brennbaren Stoffen in ihre Oxide.

Eine Verbrennungsreaktion beginnt mit der Auslösung der Startreaktionen dieser Stoffumwandlung, der so genannten Zündung. Diese führt zur Bildung von Radikalen, also hochreaktiven Molekülen, die die so genannten Kettenreaktionen auslösen. Diese Kettenreaktionen bilden den Kern der Verbrennungsvorgänge.

Ist die Energie- und Radikalenbilanz der Kettenreaktion erfüllt, läuft die sich selbst erhaltende Verbrennungsreaktion ab. Wird diese Bilanz gestört, z.B. durch ein Löschmittel, bricht die Kettenreaktion zusammen und die Verbrennung erlischt.

Freie Radikale können durch hohe Temperaturen oder auch durch katalytische Wirkung erzeugt werden. In jedem Fall ist jedoch zeitgleiches Vorliegen von Brennstoff und Oxidator in der Reaktionszone erforderlich, so dass der Verbrennungsprozess neben der angesprochenen Kettenreaktion maßgeblich von Transport- und Mischungsprozessen bestimmt wird. Erst der simultane Ablauf von chemischer Reaktion, Transport und Mischung von Sauerstoff und Brennstoff ermöglicht die sich selbst erhaltende Verbrennungsreaktion. Der langsamste Vorgang limitiert die Geschwindigkeit des gesamten Ablaufs.

Für die sich selbst erhaltende Verbrennungsreaktion müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Quantitative Reaktionsbedingung:
ein bestimmtes Mengenverhältnis bzw. eine bestimmte Mindestkonzentration der Reaktanden
- Thermische Reaktionsbedingung:
Zündtemperatur bzw. Mindest-Verbrennungs-Temperatur
- Katalytische Reaktionsbedingung:
Abwesenheit von Inhibitoren (Reaktionshemmern) bzw. Anwesenheit von Katalysatoren (Reaktionsbeschleunigern)

Unter einem Brand versteht man eine ungewollte und ungesteuerte Verbrennung.

2.1.2 Zündung

Der brennbare Stoff muss so aufbereitet sein, dass zumindest ein Teil in Radikale gespalten werden kann. Die nach der Zündung freigesetzte Wärme muss ausreichen, um die weitere, zumeist gasförmige Aufbereitung des Stoffes sicherzustellen.

Die für den selbständigen Ablauf einer Verbrennung notwendige Aktivierungsenergie wird durch die Zündquelle aufgebracht, die dafür notwendige Zündenergie ist in erster Linie von der Art des Brennstoffes und seiner Aufbereitungsform abhängig (s. Abb. 2.1). Beispielsweise kann es durch das Aufwirbeln von Stäuben zu einer sehr guten Durchmischung von Brennstoff und Oxidator kommen, so dass sehr geringe Zündenergien zu einer Staubexplosion führen können.

2.1.3 Grundbegriffe der Verbrennung

Die Verbrennung wird nach dem Typus des brennbaren Gemisches und der Flammenfrontgeschwindigkeit klassifiziert.

Bei der vorgemischten Verbrennung liegen Brennstoff und Oxidationsmittel vollständig durchmischt vor (homogenes Gemisch) [WMD96] [Tur00]. Bei nicht

Brennstoffe		Zündenergie
Feststoffe	↑	1700 kJ (Kohle)
Stäube		40 mJ (Kohlenstaub)
Flüssigkeiten		0,1 - 10 mJ
Gase/Dämpfe		0,01 - 2 mJ

Abbildung 2.1: Zündenergien in Abhängigkeit von verschiedenen Brennstoffen

vorgemischten Verbrennungen (sog. Diffusionsverbrennungen) laufen der Mischprozess und die Verbrennung synchron ab. Beispiele hierfür sind die Verbrennung von Kohle und Holz, eine Kerzenflamme und direkt einspritzende Motoren.

Der Begriff der Explosion wird allgemein für sehr schnell ablaufende exotherme Reaktionen verwendet, dabei wird die im Brennstoff chemisch gespeicherte Energie annähernd sofort in thermische Energie umgewandelt.

Breitet sich dabei die Flammenfront mit einer niedrigeren Geschwindigkeit als der Schallgeschwindigkeit des Gemisches aus, liegt eine Deflagration vor [Ede01]. Das unverbrannte Gasgemisch wird dabei durch Strahlung, Wärmeleitung und Diffusion heißer, reagierender Bestandteile gezündet.

Bei der Detonation breitet sich die Flammenfront mit Überschallgeschwindigkeit aus. In einem Verdichtungsstoß wird das Brennstoff-Luft-Gemisch über die Selbstzündbedingungen aufgeheizt, komprimiert und somit gezündet. Die Stoßwelle läuft der Flammenfront unmittelbar voraus.

Als Flamme wird der Bereich brennender Gase bezeichnet, von dem eine meist bläulich bis rot flackernde sichtbare Strahlung ausgeht. Feste Brennstoffe können durch Glutbildung ohne für das Auge sichtbare Flammen verbrennen.

2.1.4 Brandklassen

Die verschiedenen Brandarten werden in Abhängigkeit des Brennstoffs in die Brandklassen A, B, C und D eingeteilt (s. Tab. 2.1). Da Löschmittel und Löschver-

fahren für diese Brandklassen klassifiziert werden, kann somit bei der Brandbekämpfung schnell das für den Brand adäquate Löschmittel genutzt werden.

Klasse	Brandart	Bildzeichen
A	Brände fester Stoffe hauptsächlich organischer Natur, die normalerweise unter Flammen- und Glutbildung verbrennen (z.B. Holz, Stroh, Kohle, Papier)	
B	Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen (z.B. Benzin, Alkohol, Öle, Fette, Lacke, Paraffin, Teer)	
C	Brände von Gasen (z.B. Wasserstoff, Methan, Acetylen, Propan)	
D	Brände von Metallen (insbesondere brennbare Leichtmetalle wie Magnesium und Aluminium sowie Natrium und Kalium)	

Tabelle 2.1: Brandklasseneinteilung nach DIN EN 2

2.2 Grundlagen der Brandlöschung

Der Mechanismus des Löschens beruht auf der Unterbrechung der sich selbst erhaltenden Verbrennungsreaktion. Angriffspunkte hierfür sind die in Kap. 2.1.1 aufgezeigten Reaktionsbedingungen.

2.2.1 Löschen durch Stören der quantitativen Reaktionsbedingungen

Für die selbsterhaltende Verbrennungsreaktion muss ein bestimmtes Mengenverhältnis von Brennstoff und Sauerstoff vorliegen. Die minimale bzw. maximale Brennstoffkonzentration wird als untere bzw. obere Zündgrenze bezeichnet. In Abb. 2.2 ist ein Dreiecksdiagramm für Methan, Sauerstoff und Stickstoff dargestellt. In Abhängigkeit der molaren Konzentrationen sind die Zündgrenzen für das homogene Gemisch eingezeichnet. Liegt die Gemischzusammensetzung inner-

halb der Zündgrenzen (roter Bereich), läuft die Verbrennung selbständig ab, liegt sie außerhalb erlischt die Verbrennung. Das Ziel beim Löschen einer Verbrennung durch Stören der quantitativen Reaktionsbedingung liegt also darin, die jeweiligen Konzentrationen so zu verändern, dass die Verbrennung selbständig erlischt, dies wird auch als *Ersticken* bezeichnet.

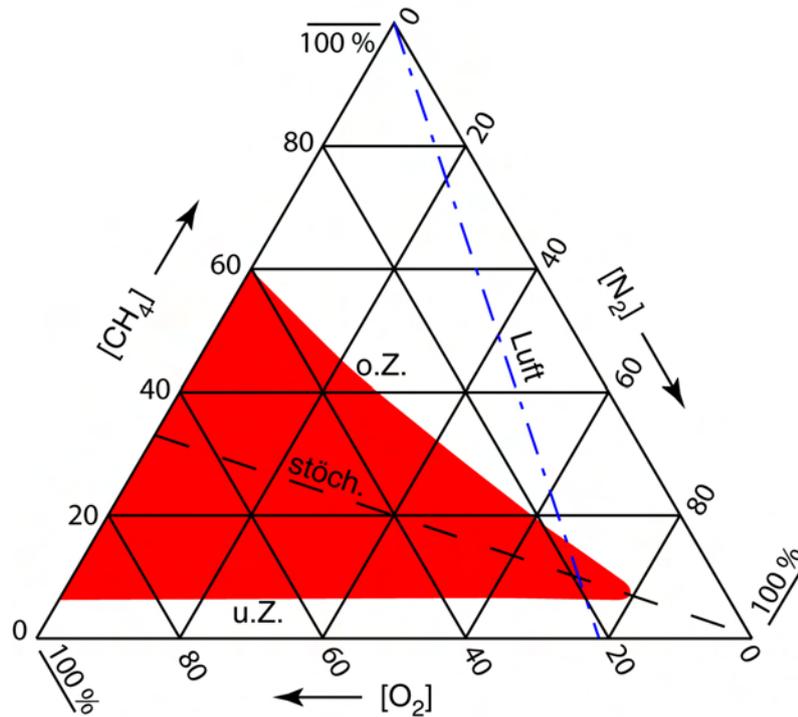


Abbildung 2.2: Darstellung der oberen (o.Z.) und unteren Zündgrenze (u.Z.) eines Methan-Sauerstoff-Stickstoff-Gemisches

Es bieten sich die folgenden drei Angriffspunkte:

- **Verdünnen der Sauerstoff-Konzentration**

Die Verringerung der Sauerstoff-Konzentration von ca. 21 Vol.-% auf weit unter 11 Vol.-% führt bei den meisten brennbaren Stoffen zum Abbruch der Verbrennungsreaktion. Erreicht werden kann dies z.B. durch Einbringen eines Löschgases.

- **Abmagern des Brennstoffs**

Das Abmagern des Brennstoffs ist nur in einigen Fällen möglich, da in der Regel der Brennstoff in einer hohen Konzentration zur Verbrennung vorliegt. Es besteht praktisch nur die Möglichkeit, die weitere Zufuhr des Brennstoffs in die Reaktionszone zu drosseln, z.B. durch Abkühlen einer brennenden Flüssigkeit unter ihren Flammpunkt oder durch Abschaltung der Brennstoffzufuhr.

- **Trennung von Sauerstoff und Brennstoff**

In diesem Fall werden Sauerstoff und Brennstoff räumlich getrennt, so dass sie nicht zusammen in der Reaktionszone vorliegen. Dies ist z.B. der Fall beim Löschen einer brennenden Flüssigkeit mit Löschschaum (s. Kap. 2.3.2).

2.2.2 Löschen durch Abkühlen

Die Arrhenius-Gleichung beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit k von der Arrheniusschen Aktivierungsenergie E_A und der Reaktionstemperatur T :

$$k = A' e^{-\frac{E_A}{R_m T}} . \quad (2.1)$$

Der Frequenzfaktor A' der Arrhenius-Gleichung zeigt teilweise eine Temperaturabhängigkeit [WMD96]. Diese ist aber üblicherweise klein im Vergleich zur exponentiellen Abhängigkeit. Die Aktivierungsenergie E_A stellt eine Energieschwelle dar, die durch die Stossenergie $R_m \cdot T$ überwunden werden muss, damit es zur Reaktion kommt.

Als Faustregel für die Brandlöschung gilt, dass eine Erhöhung der Temperatur um 10 K die Reaktionsgeschwindigkeit um das zwei- bis dreifache des Ausgangswertes steigert.

Im Vordergrund steht beim Löschen durch Abkühlen nicht nur die Abkühlung der Flammen- bzw. Reaktionszone, sondern auch die Kühlung des noch nicht aufbereiteten Brennstoffs bei Glut- bzw. Flüssigkeitsbränden.

Die abkühlende Wirkung des Löschmittels wird unterteilt in zwei Phasen:

Erwärmen des Löschmittels

Die zur Erhöhung der Temperatur des Löschmittels zugeführte Wärme Q ist proportional zu dessen Masse m , der spezifischen Wärmekapazität c und der Temperaturdifferenz ΔT :

$$Q = c m \Delta T . \quad (2.2)$$

Die damit verbundene Abkühlung des Brennstoffs auf die Temperatur T_x berechnet sich damit aus

$$c_{Br} m_{Br} (T_{Br} - T_x) = c_{LM} m_{LM} (T_x - T_{LM}) . \quad (2.3)$$

Je höher die spezifische Wärmekapazität c eines Löschmittels ist, desto mehr Wärme kann es der Reaktionszone entziehen. Dies ist nur gültig, solange sich der Aggregatzustand des Löschmittels nicht ändert.

Verdampfen des Löschmittels

Ändert sich der Aggregatzustand des Löschmittels durch z.B. Überschreiten des Siedepunkts findet der Wärmeaustausch ohne Temperaturänderung statt. Für die Änderung des Aggregatzustands muss eine bestimmte Wärmemenge zugeführt werden, beim Übergang vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand spricht man von der Verdampfungsenthalpie, die aufgenommene Energie verbleibt im Dampf als *latente Wärme*.

Geht das Löschmittel ohne zu sieden in den gasförmigen Aggregatzustand über, so spricht man von Verdunstung.

2.2.3 Löschen durch inhibitorische Wirkung

Verbrennungsreaktionen verlaufen als Kettenreaktionen mit verschiedenen Zwischenreaktionen und Verzweigungen. Für den Ablauf der Reaktionen spielen Katalysatoren und Inhibitoren eine große Rolle. Ein Katalysator ist eine Substanz,

deren Vorhandensein einen Prozess ermöglicht, verbessert, intensiviert oder beschleunigt ablaufen lässt, ohne selbst wesentlich von diesem Prozess betroffen zu sein. Die Wirkung beruht auf Herabsetzung der Aktivierungsenergie. Entsprechend erhöht ein Inhibitor die Aktivierungsenergie und verlangsamt oder verhindert sogar die chemische Reaktion. Katalysatoren und Inhibitoren werden während einer Reaktion nicht verbraucht.

Durch Einsatz eines Inhibitors kann ein Brand zum Erlöschen gebracht werden. Es wird zwischen homogener und heterogener Inhibition unterschieden:

Homogene Inhibition:

Der Inhibitor hat denselben Aggregatzustand wie der Brennstoff (meist gasförmig) und unterbricht die chemische Kettenreaktion, indem er bestimmte Zwischenglieder der Reaktion (Radikale, Moleküle, Ionen) chemisch bindet. Dies führt zum Kettenabbruch und dem Löschen des Brandes.

Heterogene Inhibition

Hier liegen Inhibitor und Reaktionspartner in verschiedenen Phasen vor, die Inhibition beruht v.a. auf der kettenabbrechenden Wirkung kühler Oberflächen (z.B. Wand oder auch Löschpulver). Durch den Kontakt mit der kühlen Oberfläche verlieren die freien Radikale einen Teil ihrer Energie, so dass Rekombinationen eintreten.

2.3 Löschmittel

Es werden fünf Löschmittelgruppen unterschieden:

- Wasser
- Schaum
- Löschpulver
- Halonlöschmittel
- Kohlendioxid

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Löschmittelgruppen vorgestellt und ihre besonderen Eigenschaften analysiert.

2.3.1 Wasser

Löschwirkung

Wasser ist neben Asche und Sand sicherlich das älteste Löschmittel und hat auch bei der heutigen Brandbekämpfung einen herausragenden Stellenwert. Dies verdankt das Wasser in erster Linie seinen thermodynamischen Eigenschaften, die es als Löschmittel besonders geeignet erscheinen lassen:

- hohe spezifische Wärmekapazität ($c = 4,182 \frac{kJ}{kgK}$ bei $20^\circ C$)
- hohe Verdampfungsenthalpie ($\Delta h_{lg} = 2256 \frac{kJ}{kg}$)

Dadurch hat das Löschmittel Wasser ein hervorragendes Wärmebindungsvermögen, das von keinem anderen Löschmittel erreicht wird. Um dieses Potential nutzbar zu machen wird es in mehr oder weniger kleine Tröpfchen zerteilt.

Beim Verdunsten der Wassertröpfchen entsteht Wasserdampf, der eine ersticken-de Wirkung hat (s. Kap. 2.2.1). Dabei entsteht bei Normbedingungen aus 1 l Wasser durch restlose Verdampfung 1700 l Wasserdampf.

Anwendungsarten

Das Löschmittel Wasser kommt in den in Tab. 2.2 aufgeführten Anwendungsarten zum Einsatz, charakteristisch sind die mittlere Tröpfchengröße und Wurfweite.

Anwendungsart	mittlere Tröpfchen- größe	mittlere Wurf- weite
Vollstrahl	> 1,5 mm	10 - 100 m
Sprühstrahl	0,5 - 1,5 mm	5 - 10 m
Wassernebel	< 0,2 mm	wenige m

Tabelle 2.2: Anwendungsarten des Löschmittels Wasser

Durch die Zerkleinerung des Wassers in Wassertröpfchen vervielfacht sich die Wasseroberfläche und kann so Wärme schneller binden. Eine ausführliche Analyse von Tröpfchengröße und Wärmeübergang findet sich in Kap. 2.5.2.

Anwendungsbereich

Wasser ist besonders geeignet für die Bekämpfung von Bränden fester und glutbildender organischer Stoffe, also Brände der Brandklasse A (s. Kap. 2.1). Dies liegt einerseits an seiner hohen spezifischen Wärmekapazität und an seiner hohen Verdampfungsenthalpie, andererseits auch an seiner variablen Reichweite.

Die Verwendung von Wasser verursacht aber z.T. hohe Folgeschäden, also Schädigung von wasserempfindlichen Materialien und Gegenständen. Ein sparsamer Einsatz dieses Löschmittels ist erforderlich. Abfließendes Löschwasser kann durch Chemikalien und Brandrückstände belastet sein und erfordert evtl. notwendige Schutzmassnahmen.

Wasser darf außerdem nicht angewendet werden bei Metallbränden, Schornsteinbränden und Chemikalien, die mit Wasser heftig reagieren. Nur bedingt anwendbar ist Wasser bei:

- Bränden der Brandklasse B
Eine Abkühlung der Flüssigkeit unter den Flammpunkt muss möglich sein. Bei Mischung der brennbaren Flüssigkeit mit Wasser kann durch Verdünnung der Flammpunkt erhöht werden. Hat die brennbare Flüssigkeit eine größere Dichte als Wasser, kann sie durch das Wasser abgedeckt werden.
- Bränden der Brandklasse C
Die Kühlung eines Gasbrands kann zwar mit einem Sprühstrahl oder mit Wassernebel durchgeführt werden, allerdings ist der Einsatz von z.B. Löschpulver effektiver.
- Bränden elektrischer Anlagen
Aufgrund seiner Leitfähigkeit kann Wasser als Löschmittel v.a. bei Hochspannungsanlagen nicht eingesetzt werden.

- Staubbränden
Durch Auf- und Verwirbelung von Stäuben durch den Einsatz von Löschwasser kann dies zur Staubexplosion oder einer Verpuffung führen.
- Glutbränden in geschlossenen Räumen
Hier besteht die Möglichkeit der Wassergas-Bildung bei sehr stark kohlenstoffhaltigen Materialien. Dieses enthält einen hohen Anteil an dem Atemgift Kohlenmonoxid.
- Phosphorbrände
Brennender Phosphor kann mit Wasser zwar vorübergehend gelöscht werden, aufgrund seiner geringen Zündgrenze von 50°C entzündet er sich aber wieder. Beim Löschen mit Wasser besteht die Gefahr, dass der Phosphor mit dem Wasser an unübersichtliche Stellen gespült oder großflächig verteilt wird und sich der Brand dadurch ausbreiten kann. Außerdem kann er nach dem Abtrocknen versteckte Brände (z.B. in Fußböden) entfachen.

Durch bestimmte Zusätze zum Löschmittel Wasser kann die Löschwirksamkeit in bestimmten Fällen erhöht werden. Durch die Zugabe von Netzmitteln (z.B. Alkalien, Tenside, etc.) kann die Oberflächenspannung des Wassers verringert werden, dies hat eine effektivere Zerteilung des Wassers zur Folge.

2.3.2 Löschaum

Löschwirkung

Für viele Brände von Flüssigkeiten ist Wasser ungeeignet, da es eine höhere Dichte hat als die meisten brennbaren Flüssigkeiten. Es versinkt wirkungslos in der brennenden Flüssigkeit. Mit bestimmten Zusätzen kann das Wasser mit einem Gas zu einem genügend stabilen Schaum verschäumt werden. Durch die geringe Dichte des Schaums können brennbare Flüssigkeiten durch eine schwimmende geschlossene Schaumschicht abgedeckt werden. Dies verhindert den Transport weiterer brennbarer Dämpfe in die Reaktionszone und hat somit eine erstickende Wirkung durch Trennung von Brenn- und Sauerstoff. In Abhängigkeit vom Flüssigkeitsgehalt hat der Schaum auch eine abkühlende Wirkung.

Anwendungsarten und -bereiche

Es kommt fast ausschließlich das so genannte Luftschaum-Verfahren zum Einsatz, hierbei wird Luft als Füllgas eingesetzt. Über die Verschäumungszahl VZ wird das dimensionslose Verhältnis zwischen Schaum- zu Flüssigkeitsvolumen angegeben. In Abhängigkeit der Verschäumungszahl werden Schäume eingeteilt in:

Anwendungsart	Verschäumungszahl VZ
Schwerschaum	< 20
Mittelschaum	20 - 200
Leichtschaum	200 - 1000

Tabelle 2.3: Unterteilung der Schaumarten

Schwerschäume werden hauptsächlich zum Löschen von brennbaren Flüssigkeiten, festen glutbildenden Stoffen und zum Schutz von brandgefährlichen Objekten verwendet. Die Schaumdecke hat eine Dicke von 20 cm bis 2 m. Die Löschwirkung beruht auf Ersticken und Abkühlen.

Mittel- und Leichtschaum hat mit einer hohen Verschäumungszahl einen hohen Luftvolumenanteil und damit auch einen relativ hohen Sauerstoffgehalt. Es stellt sich die Frage, wie Löschschaum eine erstickende Wirkung haben kann: Betrachtet man das Verhältnis der Massenströme von Luft und Wasser

$$\frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_W} = VZ \frac{\rho_L}{\rho_W}, \quad (2.4)$$

so ergibt sich aufgrund des hohen Dichteunterschieds zwischen Luft und Wasser ein wesentlich geringerer Anteil von Sauerstoff, wenn von einer kompletten Verdunstung des Wassers ausgegangen wird. Bei einer Verschäumungszahl von 1000 ergibt sich ungefähr

$$\dot{m}_L \approx \dot{m}_W, \quad (2.5)$$

d.h. die lokale Sauerstoffkonzentration fällt auf die Hälfte ab. Bei einer höheren

Sauerstoffkonzentration kann nicht mehr von einer erstickenden Wirkung ausgegangen werden (s. Kap. 2.2.1).

Mittel- und Leichtschäume haben aufgrund des geringeren Wassergehaltes eine erheblich geringere Kühlwirkung, es kommt somit nur die erstickende Wirkung zur Geltung. Beim Auftragen des Leichtschaums wird der größte Teil des Schaums zerstört. Dadurch wird das Wasser mit einer sehr großen Oberfläche wieder freigesetzt und kann (analog zu der Wassernebel-Technik, s. Kap. 2.3.1) sehr schnell verdampfen. Zusätzlich wird der Wasserdampf durch die Sperrschicht des Schaums am Entweichen gehindert und sorgt für eine Verdünnung des Luftsauerstoffs.

Mittel- und Leichtschäume eignen sich hervorragend zum Fluten von Räumen und zum Sichern von brandgefährdeten Objekten und verursachen einen geringeren Löschmittelschaden aufgrund ihres geringeren Wassergehaltes. Bei der Herstellung von Mittelschaum kommen im Prinzip dieselben Geräte zum Einsatz wie beim Schwerschaum, die Erzeugung von Leichtschaum erfordert aber einen wesentlich höheren apparativen Aufwand. Außerdem ist die Förderung des Leichtschaums in Höhe und Weite limitiert, Leichtschaum ist auch erheblich windanfälliger. Diese Eigenschaften prädestinieren den Leichtschaum für den ortsfesten Einsatz in geschlossenen Räumen (z.B. Flugzeughangars).

Die Verschäumungszahl ist in erster Linie von der Art und Qualität des verwendeten Schaummittels abhängig. Je nach Schaummittel und Anwendung unterscheidet man diese in Schwer-, Mehrbereichs- und Spezialschaummittel.

Schwerschaummittel

Diese basieren grundsätzlich auf einem Protein-Schaummittel. Sie werden wie folgt unterschieden:

- **Protein-Schaummittel (PS)**

Diese bestehen üblicherweise zu etwa 20 % aus Proteinen und werden mit Stabilisatoren für einen höheren Abbrandwiderstand und Konservierungsmitteln für eine höhere Haltbarkeit versetzt.

- **Wasserfilmbildende Schaummittel (AFFF)**

Schaum mit AFFF-Effekt (*aqueous film forming foam*) bildet auf der

Flüssigkeit eine Sperrschicht in Form eines dünnen wasserhaltigen Films und verhindert bzw. erschwert den Durchtritt von brennbaren Dämpfen, auch nach Zerstörung des Schaums

- **Fluor-Protein-Schaummittel (FPS)**

basierend auf Protein-Schaummitteln enthalten diese zusätzlich ein Fluortensid. Dadurch verbessern sich Eigenschaften wie Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Flüssigkeit, der Schaum kann auch unter der Oberfläche der zu löschenden Flüssigkeit zugeführt werden (z.B. vom Tankboden), ist sehr elastisch und hat sehr gute Fließeigenschaften

Mehrbereichsschaummittel

Wesentliches Merkmal ist die Verwendbarkeit in allen drei Schaumbereichen. So muss die Feuerwehr nur ein Schaummittel mitführen und bevorraten, kann aber, je nach Einsatzart, einen Leicht-, Mittel- oder Schwertschaum erzeugen.

Spezialschaummittel

Sie sind v.a. für bestimmte Einsatzzwecke konzipiert, z.B. als alkoholbeständige Schaummittel, für Einsatz an elektrischen Anlagen oder bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt von Wasser.

2.3.3 Löschpulver

Löschwirkung

Löschpulver setzen sich aus weitgehend ungiftigen Bestandteilen zusammen, z.B. aus Kaliumsulfat, Natrium- oder Kaliumhydrogencarbonat, Natrium- oder Kaliumchlorid. Diese Basisstoffe liegen als feine Stäube (2 - 200 μm) vor und müssen aus Gründen der Haltbarkeit hydrophobisiert sein.

Den Löschpulvern ist gemein, dass in einer endothermen Reaktion die Basisstoffe chemisch umgesetzt werden, z.B. wird das in BC-Löschern weit verbreitete Natriumhydrogencarbonat unter Wärme in Soda, Wasser und Kohlendioxid umgesetzt:



Löschpulver werden entsprechend ihrer Anwendung in BC-Löschpulver, ABC-Löschpulver und Sonderlöschpulver für Metallbrände unterschieden.

Als ausschlaggebende Löschwirkung kommt die heterogene Inhibition (s. Kap. 2.2.3) in Frage. Neben der heterogenen Inhibition sorgen weitere Mechanismen für einen effektiven Löschvorgang bei ABC-Löschpulvern: die in ABC-Löschpulvern enthaltenen Ammoniumverbindungen bilden bei hohen Temperaturen eine Glasurschicht, die die Sauerstoffzufuhr zur Glutzone verhindern und gegen die Strahlungswärme isolieren. Bei der Zersetzung des Löschpulvers bildet sich frei werdender Ammoniak, der eine inhibierende Wirkung auf Flammen hat und Ammoniumphosphate fördern die Verkohlungs fester Stoffe. Ammoniak ist zwar entflammbar, brennt jedoch nur mit einer Stützflamme. Die Verkohlungsschicht wirkt isolierend gegen Strahlungswärme und verringert die Wärmeleitung, so dass keine oder weniger brennbare Gase aufbereitet werden.

Metallbrandpulver setzt sich überwiegend aus Natriumchlorid zusammen und hat v.a. eine abdeckende Wirkung. Ähnlich wie beim ABC-Löschpulver kommt es zum Sintern und Schmelzen des Pulvers, was den Transport des Sauerstoffs an die Metalloberfläche verhindert und diese gleichzeitig kühlt. Dabei verlöschen Metallbrände aber nicht sofort, sondern erst nach bis zu 10 min unter der dicht schließenden Pulverkruste.

Anwendungsarten und -bereich

Mit den nahezu universell einsetzbaren ABC-Löschpulvern können die meisten Brandarten gelöscht werden, sie haben im Vergleich mit anderen Löschmitteln den weitesten Einsatzbereich. Dies ermöglicht auch dem Laien die einfache Verwendung des passenden Löschmittels. Beim Einsatz von Löschpulvern kommt es aber zu einer erheblichen Verschmutzung und somit hohen Löschschäden. Die beim Einsatz auftretende hohe Staubeentwicklung sorgt für eine Sichtbehinderung und kann u.U. die Rettung von Menschen erschweren.

2.3.4 Halone

Unter dem Löschmittel Halone versteht man Löschmittel, die auf halogenierten Kohlenwasserstoffen (u.a. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)) basieren. Die

als Löschmittel eingesetzten Halone sind seit dem Jahre 1992 gesetzlich verboten und dürfen aufgrund ihrer schädigenden Wirkung auf die Ozon-Schicht nicht mehr hergestellt, in den Verkehr gebracht oder verwendet werden.

Die Löschwirkung der im Normalzustand meist gasförmig vorliegenden Halone beruht auf dem Mechanismus der homogenen Inhibition (s. Kap. 2.2.3): die Halogene werden bei hohen Temperaturen als Radikale abgespalten, diese reagieren mit den Radikalen des Brennstoffs und unterbrechen somit die Reaktionskette der Verbrennung. Aufgrund dieser Löschwirkung kann nicht davon ausgegangen werden, dass es einen vergleichbaren nicht umweltschädlichen Ersatzstoff als Löschmittel geben wird.

Halonlöschmittel haben eine sehr gute Löschwirkung bei z.T. geringer Toxizität und hinterlassen nahezu keine Löschmittelrückstände. Sie eignen sich für die Brandbekämpfung in den Brandklassen B und C und wurden hauptsächlich zum Schutz von elektrischen Anlagen oder in Fahr- und Flugzeugen eingesetzt.

2.3.5 Kohlendioxid

Kohlendioxid (CO_2) ist das Oxidationsprodukt einer vollständigen Verbrennung von Kohlenstoff. Es ist verhältnismäßig reaktionsträge, kann jedoch mit starken Basen heftig reagieren. In Anwesenheit von bestimmten Metallen (z.B. Magnesium) kann Kohlendioxid zu Kohlenstoff reduziert werden, d.h. diese Metalle können unter Luftabschluss in einer CO_2 -Atmosphäre brennen.

Seine Löschwirkung bezieht das CO_2 aus seiner erstickenden Wirkung. Um eine ausreichende Stickwirkung zu entfalten, muss der Luftsauerstoff auf mindestens 15% verdünnt werden, dies entspricht einer CO_2 -Konzentration von etwa 30%. Diese Volumenkonzentration führt beim Menschen innerhalb von Sekunden zu Bewusstlosigkeit, Atemstillstand und nach wenigen Minuten zum Tod. Die CO_2 -Konzentration von trockener Luft beträgt etwa 0,03%, ab etwa 5% (in Zusammenhang mit der Einwirkzeit) treten Gesundheitsschäden auf.

CO_2 kann als Löschmittel nur bei Bränden der Brandklassen B und C eingesetzt werden, seine erstickende Wirkung hat es praktisch nur in geschlossenen Räumen. Dabei muss beachtet werden, dass die Dichte von CO_2 etwa 1,5-mal größer ist als von Luft und somit absinkt bzw. sich vom Boden her ausbreitet.

Kohlendioxid hinterlässt keine Rückstände, daraus definiert sich der Einsatzbereich: es wird nur eingesetzt, wenn andere Löschmittel zu große Schäden verursachen würden.

Das Löschmittel CO₂ wird in seinen folgenden Aggregatzuständen eingesetzt:

Kohlendioxid-Schnee

Die Kühlwirkung des CO₂-Schnees ist vernachlässigbar, angestrebt wird Schnee mit möglichst kleinen Kristallen zur Oberflächenvergrößerung. CO₂-Schnee eignet sich besonders gut für den Einsatz in der Brandklasse B

Kohlendioxid-Nebel

CO₂-Nebel hat denselben Anwendungsbereich wie CO₂-Schnee, ist aber nochmals verfeinert und hat eine größere Oberfläche. Der Löschstrahl tritt sehr weich aus.

Kohlendioxid-Gas

Da Kohlendioxid-Gas nicht erst durch Verdampfen bereitgestellt wird, eignet es sich besonders zum Löschen von Gasbränden. Durch seine hohe Austrittsgeschwindigkeit besteht bei Flüssigkeitsbränden aber die Gefahr, dass die brennende Flüssigkeit im Raum verteilt wird.

2.4 Wassernebel-Technologie

Die Tröpfchengröße für Wassernebel liegt im Mittel bei etwa 100 μm . Der Vorteil des Wassernebels liegt in der großen Oberfläche der Tröpfchen, dies ermöglicht einen schnelleren Wärmeübergang (s. Kap. 2.5.2). Die Nebeltröpfchen haben durch ihre geringere Masse einen kleineren Impuls und werden aufgrund der Luftreibung stärker abgebremst. Durch die geringere Geschwindigkeit erhöht sich aber die Verweilzeit in der heißen Reaktionszone, d.h. die Nebeltröpfchen verdunsten nahezu vollständig.

Analog zum Löschschaum (s. Kap. 2.3.2) verringert der Wassernebel durch Verdunstung der Tröpfchen den lokalen Sauerstoffgehalt unter die Zündgrenze und erstickt den Brand bei gleichzeitig kühlender Wirkung.

Durch die feine Zerteilung wird das Löschmittel Wasser sehr viel effektiver eingesetzt, Löschmittelschäden durch Wasserüberschuss können bei optimalem Einsatz vermieden werden oder sind auf jeden Fall gering. Ebenfalls wird die Strahlungswärme eines Brandherds stark reduziert, so dass auch Rückkopplungseffekte und Wiederentzündungen unterbunden werden können.

Im Folgenden werden einige Wassernebeltechnologien detaillierter vorgestellt, die sich z.T. schon seit einigen Jahren bewähren.

2.4.1 Stationäre MicroDrop-Löschanlage von Total Walther

Die MicroDrop-Löschtechnologie der Firma Total Walther¹ basiert im Prinzip auf einer konventionellen Sprinkleranlage, bei der die Sprinklerdüse durch eine Feinsprühdüse ersetzt wird. Der so erzeugte Wassernebel (DV50: 200-500 μm) kann einen Brand sehr schnell löschen, durch die hohe Wasserlöslichkeit von Rauch und Brandgasen werden schädliche Emissionen gebunden und die Strahlungswärme wird stark reduziert. Das System kann auch mit Löschmittelzusätzen (z.B. zur Schaumerzeugung) kombiniert werden.

MicroDrop-System (Total Walther)	
Vorteile	Nachteile
einfache und günstige Installation	verhältnismäßig geringer Druck
einfache Erweiterungsmöglichkeit einer bestehenden Sprinkleranlage	relativ große Wassertröpfchen
	langsames Ansprechverhalten durch langes Rohrsystem mit großem Durchmesser
	nur stationäre Installation

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile des MicroDrop-Systems von Total Walther

¹ Hersteller-Homepage: <http://www.total-walther.de>

2.4.2 IFEX Impulslöschtechnologie

Die Impulslöschtechnologie der Firma IFEX² basiert auf einem Verfahren, das Wasser unter hohem Druck in einem längeren Rohr beschleunigt und durch eine Düse zerstäubt. Der hohe Druck wird durch einen Gasdruckbehälter bereitgestellt. Bei einer Austrittsgeschwindigkeit des Tropfensprays von 120 m/s an der Mündung werden die erzeugten Tröpfchen aufgrund der Luftreibung weiter stark zerteilt (DV50: 2 bis 200 μm). Die Reichweite beträgt je nach System 10 bis 60 m. Es gibt neben stationären Installationen v.a. Systeme für den schnellen und mobilen Einsatz: tragbare Systeme, Löschkanonen für Fahrzeuge und Hubschrauber.

Impulslöschtechnologie (IFEX)	
Vorteile	Nachteile
hohe Mobilität	regelmäßige Wartung der Druckspeicher
autark (Druck- und Löschmittelreservoir können mittransportiert werden)	
skalierbar	
große Reichweite	
Breite und Länge des Wassernebels können eingestellt werden	

Tabelle 2.5: Vor- und Nachteile der Impulslöschtechnologie von IFEX

2.4.3 HI-FOG Wassernebeltechnologie von Marioff

Bei diesem System der Firma Marioff³ wird unter hohem Druck (3 - 14 MPa) der Wassernebel durch die Zerstäubung in speziellen Düsen erzeugt. Der hohe Druck wird über Pumpen oder Gasdruckbehälter (Flaschenbündel) bereitgestellt, der Wassernebel hat eine durchschnittliche Wassertröpfchengröße (DV50) von 50 bis 120 μm . Diese Technologie kommt ausschließlich in stationären Installationen zum Einsatz, v.a. in Schiffen, Maschinenräumen, Rechenzentren und U-Bahn-Stationen.

² Hersteller-Homepage: <http://www.ifextechnologies.com>

³ Hersteller-Homepage: <http://www.marioff.com>

HI-FOG (Marioff)	
Vorteile	Nachteile
homogenes Spray	hoher Druck
kleine Tröpfchengröße	geringer Massenstrom
geringer Rohrdurchmesser	geringe Reichweite
	aufwändige Installation
	Installation nur stationär bzw. in sehr großen Fahrzeugen
	regelmäßige Wartung der Druckspeicher

Tabelle 2.6: Vor- und Nachteile der HI-FOG-Technologie von Marioff

2.4.4 Wasserschocklöscher (WSL) der Bayern-Chemie

Der Wasserschocklöscher der Bayern-Chemie⁴ unterscheidet sich von den bisher vorgestellten Systemen hauptsächlich dadurch, dass der hohe Gasdruck erst im Bedarfsfall erzeugt wird. Dazu wird ein Feststoffgasgenerator, ähnlich wie in einem Airbag, gezündet. Unter hohem Druck und hoher Geschwindigkeit werden 1,5 l Wasser über den gesamten Querschnitt ausgetrieben und fein zerstäubt. Die Zerstäubung erfolgt nicht durch eine Düse, so dass der Massenstrom des Wassers kaum limitiert ist. Der gesamte Zerstäubungsvorgang läuft dadurch innerhalb von nur 30 ms ab (s. Kap. 1).

Aufgrund der extrem schnellen kompletten Zerstäubung des Wassers ist der WSL geeignet, eine anlaufende Explosion zu verhindern.

WSL (Bayern-Chemie)	
Vorteile	Nachteile
Druck wird im Bedarfsfall durch Feststoffgasgenerator erzeugt (unterliegt nicht der Druckbehälterverordnung)	nicht humanverträglich (Berstscheibenfragmente, hoher Impuls, sehr hoher Schalldruck)
extrem schnell	räumliche Anordnung hat entscheidenden Einfluss
explosionsunterdrückend	nur ein Löscheinsatz
kompaktes Design	

Tabelle 2.7: Vor- und Nachteile des Wasserschocklöschers der Bayern-Chemie

⁴ Hersteller-Homepage: <http://www.bayern-chemie.com>

2.5 Fluiddynamische Grundlagen

2.5.1 Zerfallsprozesse von Flüssigkeitsstrahlen

Die Zerstäubung von Flüssigkeiten kommt in vielen technischen Anwendungen zum Einsatz. Die grundlegenden Mechanismen sind seit längerer Zeit Gegenstand der Forschung, sie sind umfassend z.B. in [Lef89] dargestellt.

Generell unterscheidet man den Primär- und den Sekundärzerfall. Der Primärzerfall wird von der Düsenart und -geometrie beeinflusst, der Sekundärzerfall beschreibt die Wechselwirkung der bewegten Tropfen mit der Umgebung.

Die verschiedenen Zerfallsarten können durch die dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-, Weber- und Ohnesorgezahl beschrieben werden.

Reynoldszahl

Die Reynoldszahl beschreibt das Verhältnis zwischen Trägheitseinfluss (Trägheitskraft) und Einfluss der Viskosität des Umgebungsmediums (Reibungskraft). Beim Flüssigkeitszerfall bietet sich als geometrische Länge der Tropfendurchmesser an. Die Reynoldszahl für den Flüssigkeitszerfall Re_d lautet somit:

$$Re_d = \frac{w \cdot \varrho_L \cdot D_{Tr}}{\eta_L} . \quad (2.7)$$

Dabei gehen die Strömungsgeschwindigkeit w , die Dichte der Flüssigkeit ϱ_L , der Tröpfchendurchmesser D_{Tr} und die dynamische Viskosität η_L ein.

Weberzahl

Die Weberzahl We bezeichnet das Verhältnis von Trägheitskräften zu Oberflächenkräften. Sie setzt somit die zerstörenden aerodynamischen Kräfte zur stabilisierenden Oberflächenspannung ins Verhältnis. Bezogen auf den Flüssigkeitszerfall lautet sie:

$$We_d = \frac{w^2 \cdot \varrho_G \cdot D_{Tr}}{\sigma} . \quad (2.8)$$

Die Weberzahl We_d ist abhängig von der quadratischen Strömungsgeschwindigkeit w , der Dichte des Umgebungsgases ϱ_G , des Tröpfchendurchmessers D_{Tr} und der Oberflächenspannung σ .

Ohnesorgezahl

Die Ohnesorgezahl Oh ergibt sich aus Reynolds- und Weberzahl:

$$Oh = We^{0,5} \cdot Re^{-1} . \quad (2.9)$$

Die Ohnesorgezahl ist damit unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und enthält nur noch Stoffgrößen:

$$Oh_d = \frac{\eta_L}{(\sigma \cdot \rho_L \cdot D_{Tr})^{0,5}} . \quad (2.10)$$

Unter Berücksichtigung der Viskosität beschreibt sie den Einfluss der Zähigkeit auf den Zerteilungsprozess [Geb96], deshalb eignet sie sich besonders gut für die Charakterisierung der verschiedenen Zerfallsmechanismen.

Primärzerfall

Der Primärzerfall ist abhängig von der Düsengeometrie, man unterscheidet Film- und Strahlzerfall. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Experimente mit einer Hohlkegeldralldüse (s. Kap. 4.2.5) durchgeführt. Das Prinzip ist in Abb. 2.3 abgebildet.

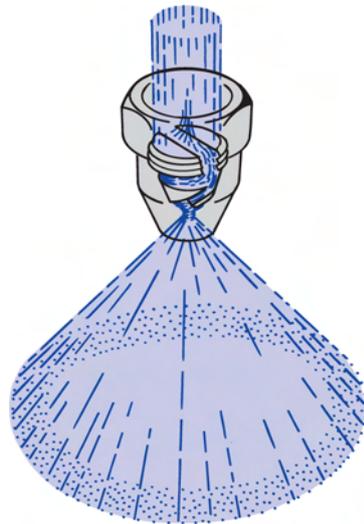


Abbildung 2.3: Prinzip einer Hohlkegeldralldüse

Der axial zugeführte Flüssigkeitsstrahl wird über eine Dralleinheit in Rotation versetzt und über die konische innere Düsenoberfläche unter hohem Druck und hoher axialer und radialer Geschwindigkeit ausgetrieben. Das dabei zugrundeliegende Zerfallsprinzip ist der Filmzerfall:

Nach dem Modell von Fraser [Lef89], basierend auf den mehrfach weiterentwickelten Ableitungen von Rayleigh [Dor94], bewirken kleine Störungen ein Auftreten von Wellen in einem Flüssigkeitsfilm, wobei Wellen unterschiedlicher Frequenz und Ausbreitungsrichtung (in Strömungsrichtung oder senkrecht dazu) zur selben Zeit in einem Film vorliegen können. Im hier vorgestellten, gängigen Modell sind in erster Linie diejenigen Wellen für den Filmzerfall verantwortlich, die sich in Strömungsrichtung des Films ausbreiten. Die hier auftretenden Wellen weisen die größten Amplituden auf. In Abhängigkeit der Wellenlänge nehmen die Amplituden mit zunehmender Entfernung von der Düse zu. Diejenige Wellenlänge, deren Amplituden am stärksten anwachsen, wird als kritische Wellenlänge bezeichnet. Unter Einwirkung der kritischen Wellenlänge zerfällt der Film ab einer bestimmten Amplitude in Lamellen [ML99] [Lef89], welche anschließend in Tropfen zerfallen (s. Abb. 2.4).

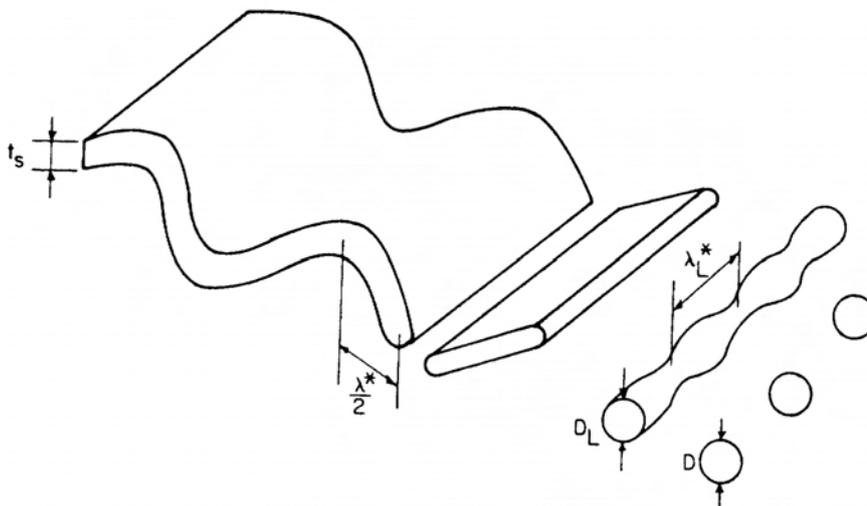


Abbildung 2.4: Filmzerfallsmodell nach Fraser [Lef89]

Folglich setzt die Lamellenbildung bei kritischer Wellenlänge mit dem geringstmöglichen Abstand von der Düse ein, so dass die Lamellenbildung aufgrund an-

derer Wellenlängen nicht mehr zum Zuge kommt. Die Lamelleneinschnürung und in Folge der Lamellenzerfall kann nach Weber [Dor94] aufgrund von Oberflächenspannungskräften beschrieben werden. Da die Lamellenbreite mit der kritischen Wellenlänge korreliert und die Lamellenstärke dem Filmdurchmesser entspricht, kann eine Korrelation zwischen der kritischen Wellenlänge und dem primären Tropfendurchmesser gefunden werden. Demnach gibt es verschiedene Ansätze für theoretisch abgeleitete Tropfendurchmesser, abhängig von der Düsegestalt und vom Modellierer [Dor94]. Im weiteren Verlauf der Tropfenbewegung zerfallen diese in feinere Tropfen, was als sekundäre Zerstäubung bezeichnet wird [Lef89].

Sekundär-Tropfenzerfall

Grundsätzlich zerfällt ein Tropfen in kleinere Tröpfchen, wenn die Energie der Reibung des Tropfens in der Luft die Energie zum Zerteilen des Tropfens überwinden kann [Lef89]. Im Grenzfall sind also Reibungskraft und Kraft zum Auseinanderbrechen des Tropfens (in zwei Halbkugeln) gleich groß:

$$c_D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot 0,5 \cdot \varrho_A \cdot U_R^2 = \pi \cdot D \cdot \sigma . \quad (2.11)$$

Durch Umformung erreicht man, dass links die Weberzahl steht, die hier als Kritische Weberzahl bezeichnet wird, da der Grenzfall (s.o.) dargestellt wird

$$\left(\frac{\varrho_A \cdot w_{rel}^2 \cdot D}{\sigma} \right)_{crit} = \frac{8}{c_D} , \quad (2.12)$$

und damit:

$$We_{crit} = \frac{8}{c_D} . \quad (2.13)$$

c_D ist der Widerstandsbeiwert des Flüssigkeitstropfens. Wird die kritische Weberzahl erreicht, so zerfällt der Tropfen [Lef89].

Durch Umformung von Gl. 2.12 kann aber auch eine Beziehung für die Geschwindigkeit abgeleitet werden, bei welcher der Tropfen zerfällt:

$$w_{rel,crit} = \left(\frac{8 \cdot \sigma}{c_D \cdot \varrho_A \cdot D} \right)^{0,5} . \quad (2.14)$$

Nach Lane und Hinze [Lef89] wird die Art und Weise, des Tropfenzerfalls dadurch bestimmt, ob der bereits durch Film- oder Strahlzerfall entstandene Tropfen plötzlich einer mit hoher Geschwindigkeit auftretenden Gasströmung ausgesetzt und damit schlagartig beschleunigt wird, oder ob er gleichmäßig beschleunigt bzw. abgebremst wird. Der zweitgenannte Mechanismus ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

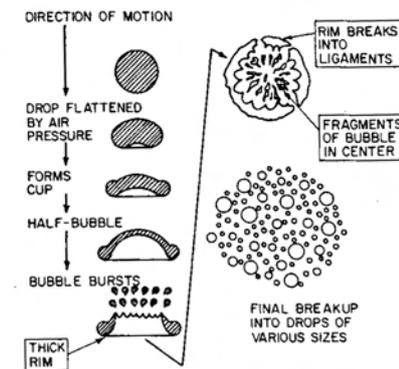


Abbildung 2.5: Tropfenzerfall durch Wechselwirkung mit der Umgebungsluft (aus: [Lef89])

Für den oben dargestellten Fall kontinuierlicher Beschleunigung gilt für den angegebenen Bereich [Lef89]:

$$w_{rel,crit} \sim \left(\frac{\sigma}{D_{Tr}} \right)^{0,5} \quad \text{mit } 0,028 \leq \sigma \leq 0,475 \text{ kg/s}^2 . \quad (2.15)$$

Speziell für Wasser in Luft bei Umgebungsdruck wird folgende Zahlenwertgleichung genannt [Lef89]:

$$w_{rel,crit} = \frac{784}{\sqrt{D_{Tr}}} \quad \text{mit } [w_{rel,crit}] = m/s \quad [D_{Tr}] = \mu m . \quad (2.16)$$

Daraus folgt auch, dass Tropfen nicht beliebig klein werden können, da die kritische Geschwindigkeit ab einer minimalen Tropfengröße unterschritten wird. Gl. 2.16 ist in Abbildung 2.6 veranschaulicht.

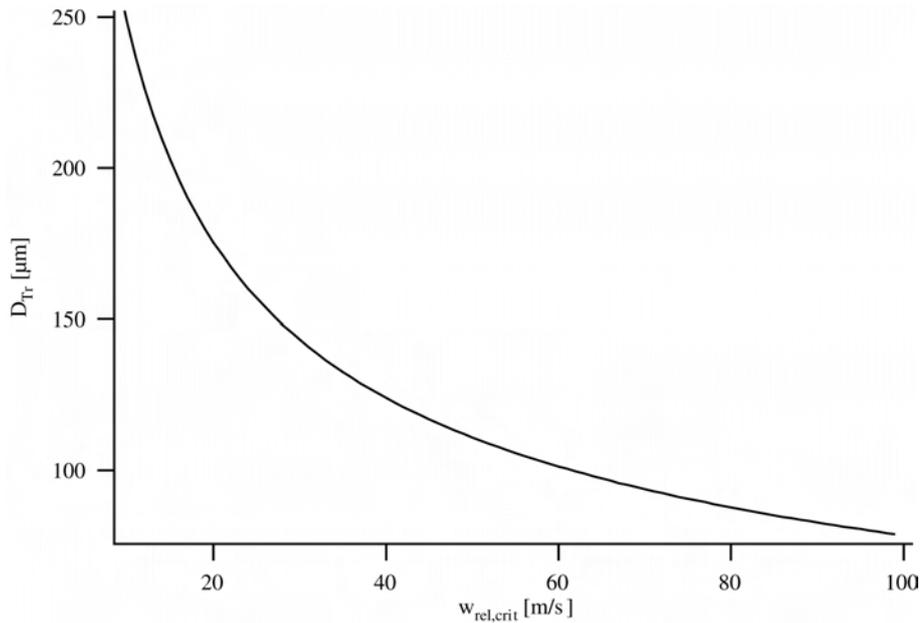


Abbildung 2.6: Erzielbare Tropfendurchmesser D_{Tr} in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit $w_{rel,crit}$ zum Gas an der Austrittsöffnung zur Umgebung bei nicht schlagartiger Beschleunigung nach Gl. 2.16

2.5.2 Tröpfchenverdunstung

Dieser Abschnitt beschreibt den Mechanismus der Tröpfchenverdunstung zunächst für den stationären Fall eines ruhenden Einzeltröpfchens. Im Anschluss wird ein Ausblick für die Modellierung eines bewegten Tröpfchens und eines Tropfenkollektivs gegeben.

Wärmeübergang

Durch die Zerkleinerung des Wassers in kleine Wassertröpfchen vervielfacht sich die Wasseroberfläche und kann so Wärme schneller binden. Der Wärmestrom ist definiert als

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A \Delta T \quad (2.17)$$

und hängt somit direkt von der Übergangsfläche A ab. Eine gute Löschwirkung durch Abkühlen (s. Kap. 2.2.2) wird erreicht, wenn der Wärmeübergang möglichst

schnell und vollständig erfolgt. Sie kann also durch die Vergrößerung der Oberfläche der Wassertröpfchen und dem vergrößerten Wärmestrom gesteigert werden.

Geht man davon aus, dass ein Wassertröpfchen eine ideale Kugelform hat, berechnet sich die Oberfläche eines Tröpfchens zu

$$A_{Tr} = 4 \pi r^2 = \pi D^2 \quad (2.18)$$

mit dem Volumen

$$V_{Tr} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{\pi}{6} D^3 . \quad (2.19)$$

Unter der Annahme, dass das Tröpfchenspray homogen ist, also alle Tröpfchen denselben Durchmesser haben, kann die gesamte Oberfläche bei einem gegebenen Wasservolumen in Abhängigkeit des Tröpfchendurchmessers D wie folgt berechnet werden:

$$A_{ges} = \frac{V_{ges}}{V_{Tr}} A_{Tr} = 6 \frac{V_{ges}}{D} . \quad (2.20)$$

In Abb. 2.7 ist die Abhängigkeit der Gesamtoberfläche vom Tröpfchendurchmesser nach Gl. 2.20 dargestellt.

Einzeltröpfchen

Die Verdunstung eines Wassertröpfchens kann nach dem D^2 -Gesetz beschrieben werden ([Tur00] [Lef89] [FWS02] [FR00]):

$$D_0^2 - D^2(t) = K \cdot t . \quad (2.21)$$

Dabei ist $D(t)$ der Tröpfchendurchmesser zur Zeit t , D_0 ist der ursprüngliche Durchmesser und K ist die Verdunstungsrate. Die Stoffeigenschaften des Dampfes werden mit denjenigen der Umgebungsluft gleich gesetzt. Das Modell vernachlässigt den Wärmetransport im Tropfen und geht von einer homogenen

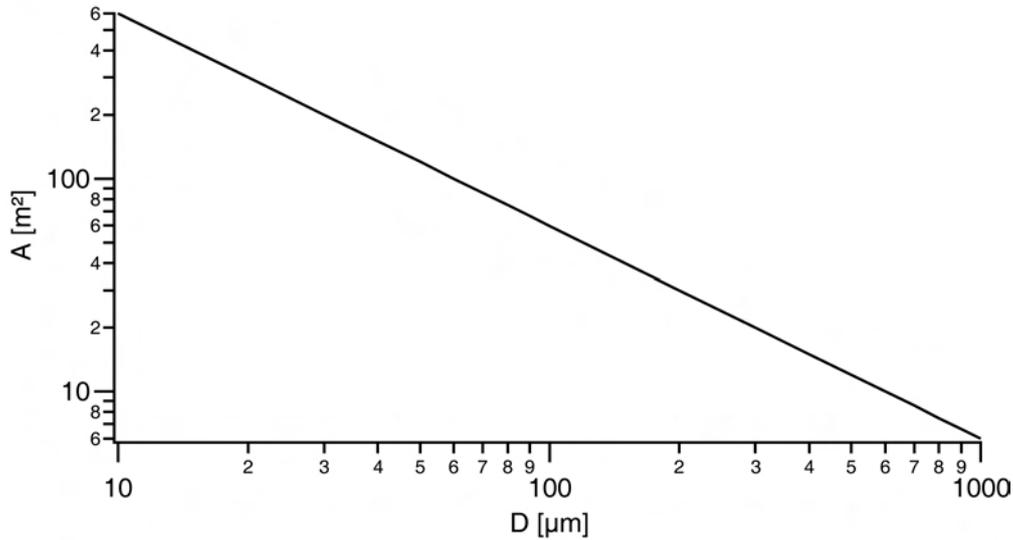


Abbildung 2.7: Abhängigkeit der Gesamtoberfläche vom Tröpfchendurchmesser eines homogenen Sprays bei einem Gesamtvolumen von $10^{-3} m^3$

Temperaturverteilung aus. Sinnvolle Ergebnisse sind mit diesem Modell zu erwarten, wenn die Aufheizphase im Vergleich zur Tropfenlebensdauer vernachlässigbar ist. Dies ist z.B. bei niedrig siedenden Flüssigkeiten in einer Umgebung hoher Temperatur der Fall (s. Abb. 2.8).

Die Verdunstungsrate K ist proportional zur Oberfläche eines Tröpfchens. In Abb. 2.8 ist der zeitliche Verlauf des quadratischen Tröpfchendurchmessers von Wasser bei einer Umgebungstemperatur von 893 K auf Basis experimenteller Ergebnisse dargestellt [Tur00].

Die Verdunstungsrate K aus Gl. 2.21 kann über

$$K = \frac{8\lambda}{\rho c_p} \ln(1 + B) \quad (2.22)$$

nach [Tur00] und [Lef89] bestimmt werden. Der Parameter B ist ein dimensionsloser Parameter, der als *Spalding Number* oder *Transferzahl* bezeichnet wird. Er ist in diesem Fall wie folgt definiert:

$$B = \frac{c_p(T_\infty - T_{boil})}{\Delta h} \quad (2.23)$$

Die Zeit t_{vap} , bis das Tröpfchen mit dem Anfangsdurchmesser D_0 komplett

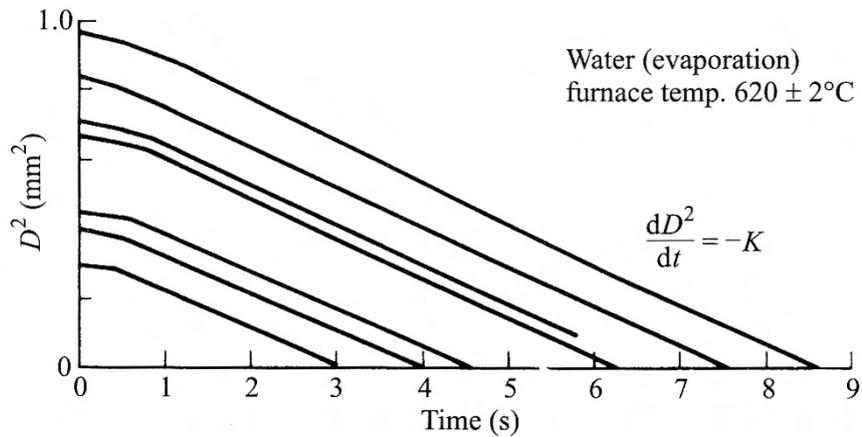


Abbildung 2.8: Zeitlicher Verlauf des quadratischen Tröpfchendurchmessers von Wasser (aus: [Tur00])

verdunstet, lässt sich wie folgt berechnen:

$$t_{vap} = D_0^2 / K . \quad (2.24)$$

Die Ergebnisse der Verdampfungszeiten t_{vap} von verschiedenen Tröpfchendurchmessern in Abhängigkeit von verschiedenen Umgebungstemperaturen sind in Abb. 2.9 zu sehen. Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- die Tropfen sind kugelförmig
- die Flüssigkeit hat nur einen Siedepunkt
- die Tropfentemperatur entspricht dem Siedepunkt
- Strahlung wird vernachlässigt
- der Wärmetransport im Tropfen ist unendlich hoch, d.h. die Tropfentemperatur ist konstant

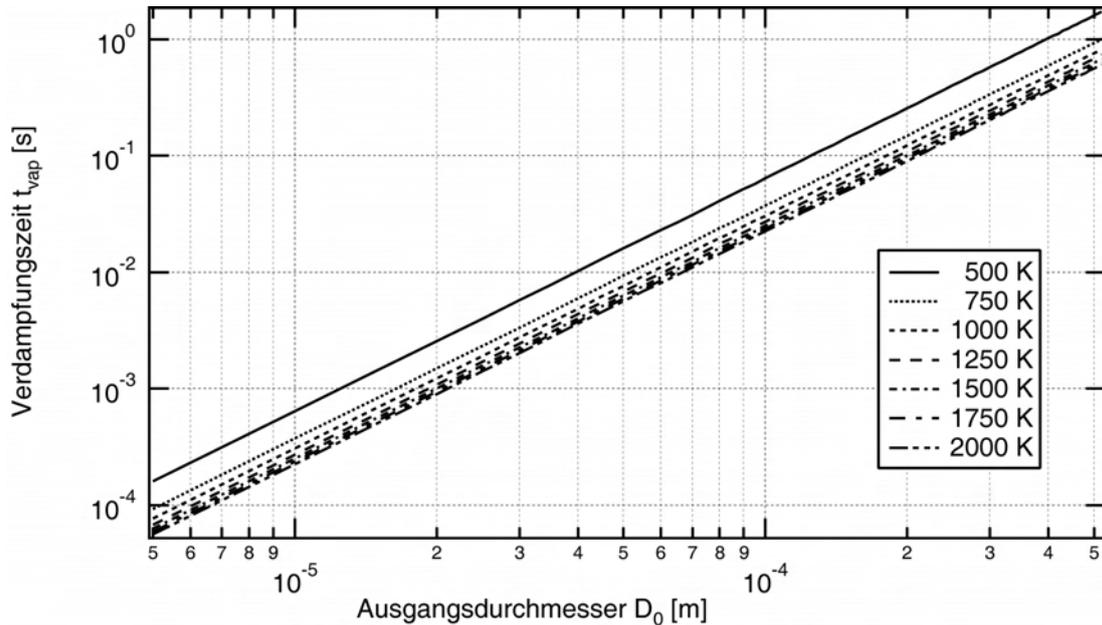


Abbildung 2.9: Doppelt logarithmisch aufgetragene Verdampfungszeit von Wassertropfen unterschiedlicher Ausgangsgröße bei verschiedenen Umgebungstemperaturen unter Vernachlässigung der Aufheizzeit

Einfluss der Bewegung des Tröpfchenkollektivs

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde die Bewegung eines Tröpfchens und der Gasphase vernachlässigt. Eine Relativgeschwindigkeit zwischen Tröpfchen und Gasphase sorgt aber für einen größeren Wärme- und Stofftransport über die angeströmte Oberfläche des Tröpfchens. Der Einfluss der Konvektion auf die Tröpfchenverdunstung kann mittels globaler Korrekturfaktoren auf Wärme- und Massenstrom zwischen Tröpfchen und Gasphase angewendet werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Bewegungseinflusses wird auf [Kne93] verwiesen.

Die Verdampfung eines Tröpfchens wird durch die Anwesenheit von Nachbartröpfchen stark beeinflusst. So reduziert sich beispielsweise nach [Lab80] die Verdampfungsrate eines Tröpfchens in einem 3-Tröpfchen-Modell auf 72% gegenüber einem isoliert betrachteten einzelnen Tröpfchen. Der Abstand der 3 Tröpfchen beträgt dabei 2,5 Tröpfchen-Durchmesser. Eine detaillierte Übersicht unterschiedlicher Lösungsansätze bei verschiedenen Randbedingungen findet sich in [NRDR91].

2.5.3 Kritische Strömung

Einphasige kritische Strömung

Bei der Strömung eines Gases durch eine konvergente Düse wird bei gegebenem Innendruck der maximal ausströmende Massenstrom durch die kritische Geschwindigkeit begrenzt. Die engste Stelle in der Düse kann maximal mit der kritischen Geschwindigkeit durchströmt werden, welche bei einphasiger Strömung gleich der Geschwindigkeit der Schallausbreitung (Schallgeschwindigkeit) ist. Eine Druckabsenkung in der Umgebung bringt nach Erreichen der kritischen Geschwindigkeit im engsten Strömungsquerschnitt keinen höheren Massendurchsatz [Sat02a]. Es entscheidet nur noch der Innendruck. Definitionsgemäß ist dort, wo die kritische Geschwindigkeit a vorherrscht, der kritische Querschnitt A_{crit} und es herrscht der kritische Druck p_{crit} . Die im Folgenden angeführten Gleichungen und Definitionen gelten nur für isentrope Zustandsänderungen, eine Einschränkung, die bei Düsen in der Regel näherungsweise zutrifft.

Der kritische Massenstrom eines Gases durch den Querschnitt A ist allgemein:

$$\dot{m} = \Psi \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot p_0 \cdot \varrho_0} , \quad (2.25)$$

mit der Ausflussfunktion Ψ :

$$\Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} . \quad (2.26)$$

Die Ausflussfunktion Ψ hat ihr Maximum bei der kritischen Geschwindigkeit und hängt nur vom Isentropenexponenten und dem Druckverhältnis $\frac{p_e}{p_0}$ und somit der Machzahl M ab. Die Machzahl M stellt das Verhältnis von Strömungs- zu Schallgeschwindigkeit dar:

$$M = \frac{c}{a} . \quad (2.27)$$

Die isentrope Druckänderung ist definiert als:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{1}{1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} . \quad (2.28)$$

Die kritische Geschwindigkeit a der Strömung eines idealen Gases unter isentropen Bedingungen beträgt:

$$a = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} . \quad (2.29)$$

Der kritische Druck bei isentroper Entspannung beträgt:

$$\frac{p_{crit}}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} . \quad (2.30)$$

Eine isentrope Druckänderung korreliert wie folgt mit der Dichteänderung eines idealen Gases:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\kappa . \quad (2.31)$$

Die Querschnittsfläche A steht in folgender Beziehung zur Machzahl und der Strömungsgeschwindigkeit c :

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{dc}{c} . \quad (2.32)$$

In einer konvergenten Düse ist die Änderung der Querschnittsfläche negativ ($dA < 0$), während die Strömung aus dem Ruhezustand beschleunigt wird ($dc > 0$). D.h. die Machzahl hat maximal den Wert 1, die Strömung lässt sich nicht auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigen.

Die Austrittsgeschwindigkeit eines idealen Gases aus einer konvergenten Düse für $p_e/p_0 > p_{crit}/p_0$ ist:

$$c_e = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} . \quad (2.33)$$

Für $p_e/p_0 \leq p_{crit}/p_0$ ist die Strömungsgeschwindigkeit gleich der Schallgeschwindigkeit (s. Gl. 2.29).

In Abbildung 2.10 ist die Ausströmgeschwindigkeit von Luft in die Umgebung über dem Innendruck eines Behälters nach Gl. 2.33 aufgetragen. Der Austrittsquerschnitt entspricht dabei dem kritischen Querschnitt (konvergente Düse). Aus Gl. 2.30 ergibt sich für Luft für das Verhältnis von p_{crit} zu p_0 ein konstanter Wert von 0,528.

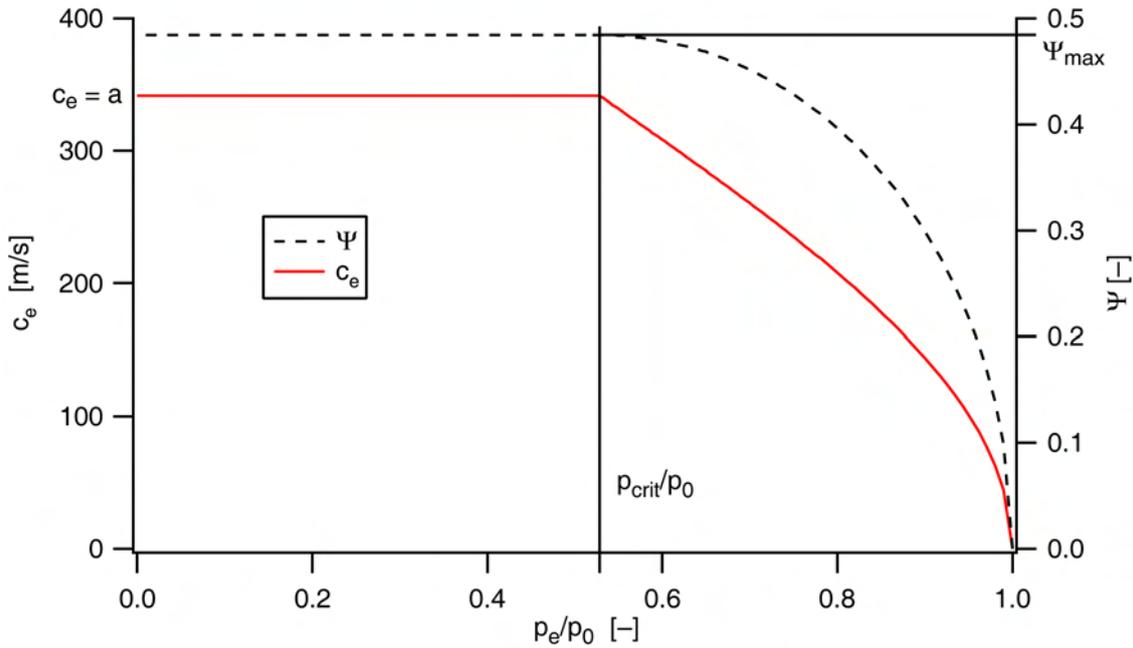


Abbildung 2.10: Ausströmgeschwindigkeit c_e und Ausflussfunktion Ψ von Luft ($\kappa = 1,4$) beim Ausströmen durch eine konvergente Düse in Abhängigkeit vom Druckverhältnis p_e/p_0

Schallgeschwindigkeit in zweiphasiger Strömung

Liegt in der Strömung ein Gemisch aus Gas und Flüssigkeit vor, dann wird die Beschreibung der kritischen Strömung komplexer. Die Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus der Kompressibilität des Mediums bei konstanter Entropie zu:

$$a^2 = \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_S. \quad (2.34)$$

Die Ausbreitung von Schallwellen in Gas-Flüssigkeitsgemischen ist abhängig von der Strömungsform [May82] (s. Abb. 2.11). Die folgenden Berechnungsgrundlagen gelten für den Fall, dass kein Wärmeaustausch zwischen den Phasen stattfindet und keine Relativgeschwindigkeiten bzw. Schlupf zwischen den Phasen auftreten. Der Stoffaustausch wird ebenfalls vernachlässigt. Für eine Sprühströmung (im Gas verteilte Tropfen) gilt:

$$a_{2ph,Spr} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho_G}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \cdot \varepsilon^2 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_F}{(1 + \varepsilon) \cdot \rho_G}}{\varepsilon^2 + \varepsilon \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\rho_G}{\rho_F}}}. \quad (2.35)$$

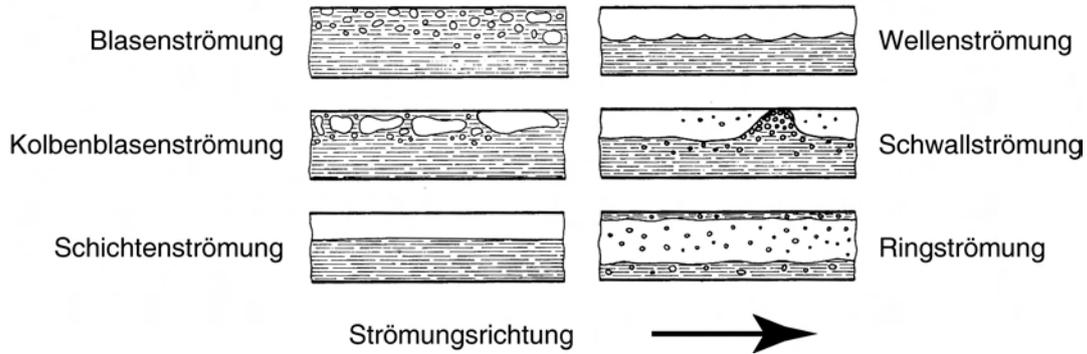


Abbildung 2.11: Strömungsformen im horizontalen Rohr (nach: [May82])

Bei Ring- und Schichtenströmung gilt:

$$a_{2ph, Sgl} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho_G}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_F}} . \quad (2.36)$$

Dabei ist ε der Gasvolumenanteil. Bei Blasenströmung ist für kleine Blasen näherungsweise die folgende Beziehung gültig [Wal69]:

$$a_{2ph, Blasen} = \{[\varepsilon \cdot \rho_g + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_f] \cdot [\varepsilon / (\rho_g \cdot a_g^2) + (1 - \varepsilon) / (\rho_f \cdot a_f^2)]\}^{-1} . \quad (2.37)$$

Die Abb. 2.12 zeigt die deutliche Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Luftvolumenanteil eines Luftblasen-Wassergemisches unter atmosphärischen Bedingungen [POW84] [Wal69]. Die beiden Kurven ergeben sich aus der isotherm (durchgezogene Linie) bzw. isentrop (gestrichelte Linie) berechneten Schallgeschwindigkeit.

Zweiphasige kritische Strömung

Im Folgenden wird auf das kritische Ausströmen eingegangen. Es wird zwischen Einfluidmodellen und Zweifluidmodellen unterschieden. Bei den Einfluidmodellen wird davon ausgegangen, dass beide Phasen gleiche mittlere Geschwindigkeiten haben. Bei den Zweifluidmodellen, auch Schlupfmodelle genannt, wird berücksichtigt, dass die mittlere Geschwindigkeit der Gasphase in der Regel höher ist als diejenige der flüssigen Phase.

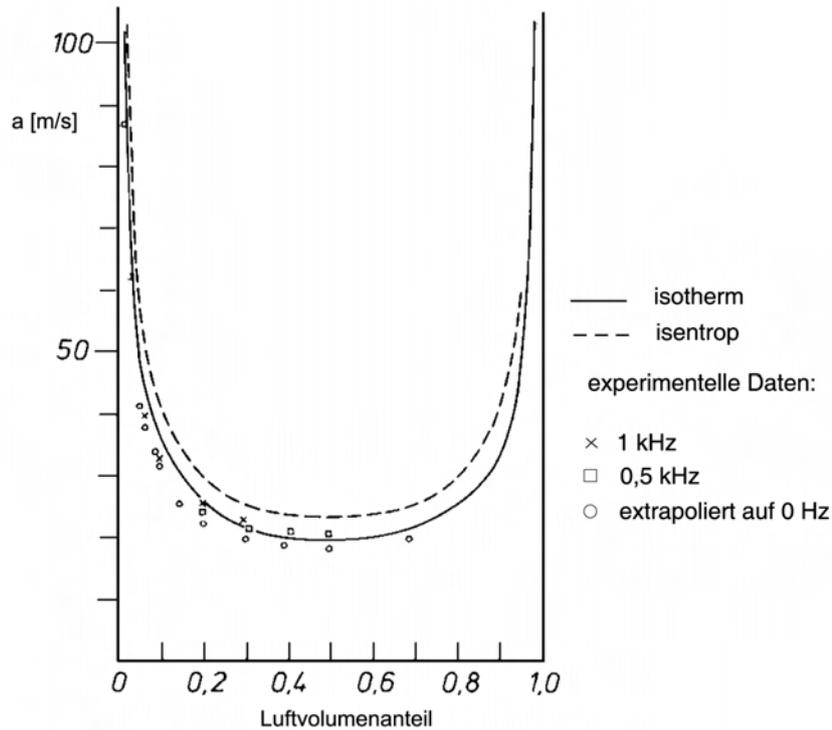


Abbildung 2.12: Schallgeschwindigkeit eines Luftblasen-Wassergemisches

Dazu wird der so genannte Schlupf s definiert [Ton96]:

$$s = \frac{w_G}{w_F} = \frac{\dot{x}}{1 - \dot{x}} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_G}, \quad (2.38)$$

wobei $\dot{x} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_F + \dot{m}_G}$.

Der Schlupf ist somit das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeit der Gasphase zur mittleren Geschwindigkeit der flüssigen Phase [May82]. Er kann Werte bis zu zehn annehmen [Rae95]. Als Ursachen für den Schlupf gelten der Auftrieb der leichteren Phase und der Druckabfall zwischen den Phasen. Durch den Impulsaustausch zwischen den Phasen wird der Schlupf dagegen vermindert [May82].

Bei den Einfluidmodellen (homogene Modelle) wird unterschieden zwischen dem homogenen Gleichgewichtsmodell und dem homogenen Ungleichgewichtsmodell. Beim homogenen Gleichgewichtsmodell sind die gasförmige und die flüssige Phase homogen verteilt und strömen mit der gleichen Geschwindigkeit, bei Einkomponenten-Gemischen stehen die dampfförmige und die flüssige Phase im

thermodynamischen Gleichgewicht. Beim homogenen Ungleichgewichtsmodell hingegen treten kein Wärme- und Stofftransport zwischen den Phasen auf. Die treibende Kraft zum Ausströmen ist dabei nur die Expansion des Gases.

Den geringsten Aufwand (bezüglich der Bereitstellung bekannter Größen) benötigt das homogene Ungleichgewichtsmodell [May82]. Die Massenstromdichte ist:

$$\dot{m}_{krit_{HU}} = \frac{1}{v} \cdot \left(2 \cdot x_0 \cdot v_{G_0} \cdot p_0 \cdot \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \right) \cdot \left(1 - n^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \right)^{0,5}, \quad (2.39)$$

mit dem spezifischen Volumen v des Gemisches:

$$v = (1 - \dot{x}_0) \cdot v_{F_0} + \dot{x}_0 \cdot v_{G_0} \cdot n^{\frac{1}{\kappa}} \quad (2.40)$$

und der Größe n :

$$n = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}. \quad (2.41)$$

Die mit dem Index 0 bezeichneten Größen sind auf den Ruhezustand unmittelbar vor Düsen Eintritt bezogen. Unabhängig vom verwendeten Modell ergibt sich eine kritische Geschwindigkeit der Zweiphasenströmung, die je nach Phasenanteil wesentlich niedriger liegt als die Schallgeschwindigkeiten einphasiger Fluide [Rae95].

2.5.4 Strömungseinschnürung

In einer Stufendüse oder beim Durchfluss von Blenden verkleinert sich die Querschnittsfläche A_1 auf die Fläche A_2 . Unmittelbar nach der Querschnittsverkleinerung beobachtet man eine Einschnürung oder Kontraktion der Strömung. Dies wird als *Vena Contracta* bezeichnet (s. Abb. 2.13). Durch die Verkleinerung des Strömungsquerschnitts erfährt die Strömung eine Beschleunigung, in der *Vena Contracta* mit der minimalen Querschnittsfläche A_{VC} erreicht sie ihre höchste Geschwindigkeit [Lex04].

Die zunächst verengte Strömung erfährt stromabwärts eine Erweiterung auf den Querschnitt A_2 . Zwischen der Strömungskontraktion und der Rohrwand kommt es zur Wirbelbildung. Dies hat einen Druckverlust der Strömung zur Folge.

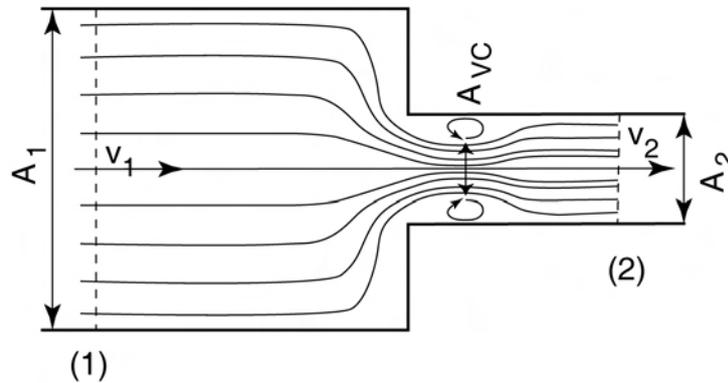


Abbildung 2.13: Stufendüse mit Strömungseinschnürung (*Vena Contracta*)

Das Flächenverhältnis von eingeschnürter zu offener Querschnittsfläche wird als Kontraktionskoeffizient μ bezeichnet:

$$\mu = \frac{A_{VC}}{A_2} . \quad (2.42)$$

Dieser ist nach [Per63] in Abhängigkeit vom Flächenverhältnis A_2/A_1 für einphasige Strömungen gegeben (s. Tab. 2.8).

A_2/A_1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
μ	0,586	0,598	0,625	0,686	0,790	1,0

Tabelle 2.8: Einschnürungskoeffizienten nach [Per63]

Für Strömungen von Gas-Flüssigkeitsgemischen kann aufgrund der guten Durchmischung der Phasen im Einschnürbereich davon ausgegangen werden, dass die beiden Phasen homogen verteilt sind und mit gleicher Geschwindigkeit strömen [May82].

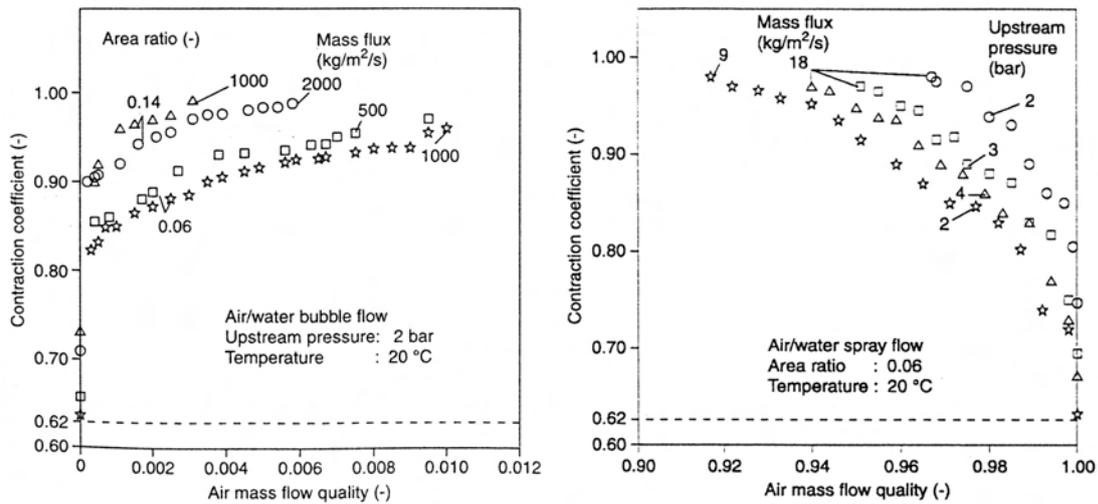


Abbildung 2.14: Kontraktionskoeffizient einer 2-Phasen-Strömung bei niedrigen und hohen Luftmassenströmen

In der Literatur werden hauptsächlich Ergebnisse zum Druckverlust einer Strömungskontraktion gefunden [AB96] [May82] [Fis95]. In [SFAA99] werden Angaben zum Kontraktionskoeffizienten μ in einem 2-Phasen-Gemisch bei der Durchströmung einer Blende gemacht. Es hat sich gezeigt, dass sich die Kontraktion für sehr kleine (bis 1,2 %) und sehr große (größer 90 %) Luftmassen-Ströme stark ändert. Dies entspricht einer Blasenströmung (bis 1,2 %) bzw. einer Spray-Strömung (ab 90 %). Im Bereich von 1,2 bis 90 % ist der Kontraktionskoeffizient gleich 1. Dies ist für verschiedene Flächenverhältnisse von A_1/A_2 und für verschiedene Massenströme gültig (s. Abb. 2.14).

3 Konzept

3.1 Wasserschocklöscher

Der Wasserschocklöscher (WSL) ist ein explosionsunterdrückendes Feuerlöschsystem auf pyrotechnischer Basis (s. Kap. 2.4.4).

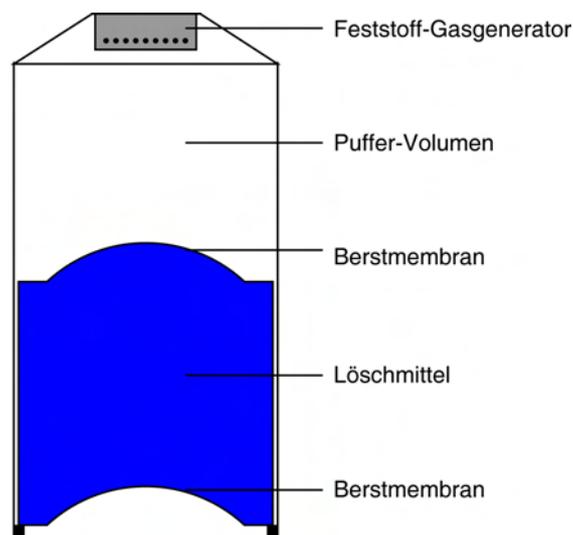


Abbildung 3.1: Aufbau eines explosionsunterdrückenden Wasserschocklöschers aus einem Feststoff-Gasgenerator, Puffervolumen, zwei Berstmembranen und dem Löschmittel

Der WSL besteht aus einem Feststoff-Gasgenerator in einem Puffer-Volumen, das Löschmittel Wasser ist in einem Blechzylinder eingeschweißt, die „Deckel“ sind sog. *Schnapp-Umkehr-Berstscheiben* (s. Abb. 3.1). Bei der Auslösung des WSL wird der Feststoff-Gasgenerator gezündet, der Druck im Puffervolumen steigt innerhalb weniger Millisekunden stark an. Bei Erreichen des Berstdrucks fragmentieren beide Berstscheiben fast zeitgleich und geben nahezu den gesamten

Querschnitt frei. Durch die Expansion des Gases wird der Wasserblock aus dem Löschmittelbehälter ausgetrieben und in einem bestimmten Raumvolumen fein zerstäubt (s. Abb. 1.2). Dieser fein zerstäubte Wasserdampf entzieht dem Brandherd durch Verdampfen in kürzester Zeit viel Wärme, durch den Wasserdampf wird der relative Sauerstoffgehalt verringert, so dass der Brand bzw. die Explosion noch in der Entstehungsphase gelöscht bzw. unterdrückt werden kann.

Der Löschvorgang ist sehr schnell und aufgrund der feinen Zerstäubung sehr effizient. Prinzipbedingte Nachteile (s. Kap. 2.4.4) haben zur Folge, dass der WSL nur eingeschränkt humanverträglich im Auslösungsfall ist.

3.2 Humanverträglicher Brandunterdrückungslöcher

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein neues Konzept erarbeitet worden, das auf dem Prinzip eines WSL aufsetzt und diesen humanverträglich gestaltet. Verschiedene Lösungsansätze wurden in einem Konzept realisiert, das nachfolgend vorgestellt wird. Es wird gefordert, dass die Einhaltung der Humanverträglichkeit der Prozessabläufe in Bezug auf Druck, Temperatur, Schalldruck und Abgaszusammensetzung gewährleistet ist. Die Erfahrungen mit dem bereits existierenden Wasserschocklöcher wurden bei der Konstruktion der neuen Anlage, des humanverträglichen Brandunterdrückungslöchers (BUL), berücksichtigt

Um den oben angeführten Forderungen zu genügen, muss der zeitliche Ablauf des Zerstäubungsvorgangs des WSL von unter 100 ms auf einige Sekunden erhöht werden. Die Zerstäubung erfolgt hierbei über eine Düse. Der Grundaufbau des WSL wird dabei übernommen (s. Abb. 3.2).

Der Gasgenerator produziert innerhalb kürzester Zeit heißes Gas mit hohem Druck, analog zum WSL-Konzept (s. Kap. 3.1) zerreißen die beiden Berstmembranen, das Löschmittel wird unter hohem Druck durch die Düse gepresst und zerstäubt. Durch die Düse wird der Massenstrom des Löschmittels in den umgebenden Raum im Vergleich zum WSL so verringert, dass die Sprühdauer einige Sekunden beträgt. Dies verringert im Vergleich zum WSL den Druckanstieg in

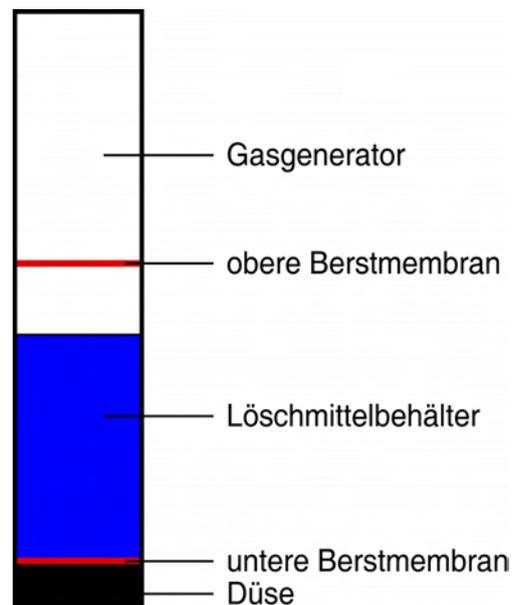


Abbildung 3.2: Konzept eines humanverträglichen Brandunterdrückungslöschers

der Umgebung, der Schalldruck sinkt und das heiße Gas wird durch die längere Verweildauer abgekühlt. Fragmente der Berstscheiben können durch geeignete Materialwahl vermieden bzw. durch eine Rückhaltevorrichtung in der Anlage zurückgehalten werden.

4 Versuchsanlage

4.1 Modularer Aufbau

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine modulare Versuchsanlage konstruiert. Die Vorteile des modularen Aufbaus sind hauptsächlich:

- Variation einzelner Parameter
- Austauschbarkeit
- vereinfachte Reparatur

Durch einfaches Kombinieren der einzelnen Module (s. Abb. 4.1) lassen sich eine Fülle von verschiedenen Versuchsaufbauten realisieren. Die Module werden ausführlich in Kap. 4.2 beschrieben. Erst die modulare Bauweise ermöglichte die Variation der Versuchsparameter in dem erforderlichen großen Umfang.

4.2 Die einzelnen Module des BUL/WSL

4.2.1 Gasgenerator

Es sind drei Betriebsmodi mit Kaltgas, mit Heißgas und mit dem Gas eines Feststoffgasgenerators (Airbag-Patrone) vorgesehen. Bei Kaltgasversuchen können Luftdrücke bis 1,3 MPa über die Laborinfrastruktur erreicht werden, bei höheren Drücken (bis 4,0 MPa) wird Stickstoff aus einer Gasflasche eingesetzt. Das Heißgas wird über die Zündung eines Gas-Luft-Gemisches erzeugt, vorzugsweise mit Wasserstoff als brennbarem Gas. Die Versuche werden bei einem Wasserstoffanteil von 10 - 25 mol-% durchgeführt. Dabei werden Luft- und Wasserstoffdruck

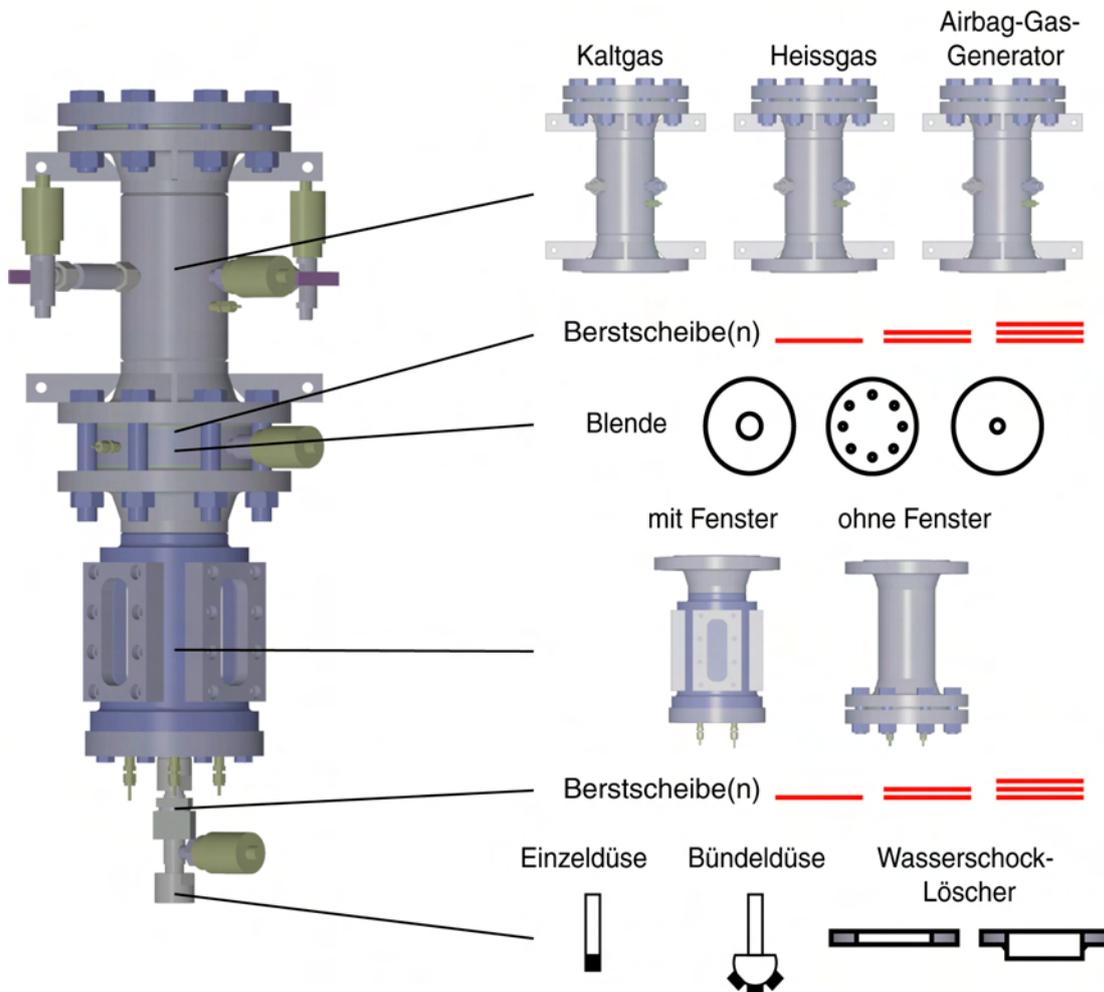


Abbildung 4.1: Modulare Versuchseinrichtung. Durch Kombination von z.B. Heißgas-Generator, Blende, Löschmittelbehälter mit Fenster und einem WSL-Kopf lässt sich ein WSL-Versuch aufbauen, durch einfachen Austausch des Kopfes gegen eine Einzeldüse entsteht ein BUL-Aufbau

im Gasgenerator auf einen bestimmten Druck genau eingestellt und durch eine Piezo-Zündanlage gezündet.

Wasserstoff hat gegenüber anderen brennbaren Gasen wie Methan und Ethan zwar einen geringeren Heizwert ($10,8 \text{ MJ/m}^3$ gegenüber $35,9$ bzw. $64,5 \text{ MJ/m}^3$), bildet mit Luft aber über einen wesentlich breiteren Mischungsanteil ein zündfähiges Gemisch und verbrennt ohne Rußbildung. Der Heißgas-Generator dient in erster Linie der Simulation des Gas-Generator-Verhaltens eines Feststoffgasgenerators, da die TU München aufgrund gesetzlicher Vorschriften diese Gasgeneratoren nicht verwenden darf. Durch einen einfachen Umbau des Gasgeneratordeckels kann ein Feststoffgasgenerator integriert werden.

Der Gasgenerator ist aus einem Edelstahlrohr gefertigt, hat einen Innendurchmesser von 100 mm und eine Länge von 300 mm (Kaltgas, Volumen: 2,4 l). Durch ein zusätzliches Rohr kann die Länge des Gasgenerators auf 1200 mm verlängert werden (Heißgas, Volumen = 9,4 l). Dies ist nötig, um eine Angleichung der produzierten Gasmassen zwischen Kalt- und Heißgasversuchen zu erreichen. Der Gasgenerator ist für einen statischen Druck von bis zu 4,0 MPa ausgelegt.

4.2.2 Berstmembran

Die Berstmembranen bilden ein zentrales Element dieses Versuchsaufbaus. Sie erfüllen dabei folgende Funktionen: Sie trennen die Gas- und Wassergrenzfläche und sind druckstabil bis zur Berstgrenze. Die verwendeten Berstmembranen bersten fragmentationsfrei in sehr kurzer Zeit und sind sehr kostengünstig. Dabei sind sie durch das Stapeln mehrerer Folien gut skalierbar, Berstvorgang und Berstdruck sind dabei gut reproduzierbar.

In verschiedenen Tests haben sich Polyester-Folien als am besten geeignet herausgestellt, die zwischen den zwei DIN-Flanschen des Gasgenerators und des Löschmittelbehälters eingespannt werden. Es werden Folien von 0,1 bis 0,35 mm mit bis zu 3 Lagen eingesetzt (Berstdruckbereich: 0,5 bis 4,1 MPa). Aufgrund der hohen Stabilität der Polyester-Folien konnten diese im BUL-Sprühkopf nicht eingesetzt werden. Hierfür wurde eine Polyethylen-Folie mit einer Dicke von 0,05 mm und einem Berstdruck von etwa 0,1 MPa eingesetzt. Die Polyester-Folien wurden von der Firma Bleher Folientechnik bezogen, bei der Polyethylen-Folie

handelt es sich um eine handelsübliche Folienrolle für Overhead-Projektoren. Eine Analyse der Berstscheibeneigenschaften findet sich in Anhang A.

Zur Unterscheidung der beiden Berstmembranen werden diese als Berstscheibe 1 (BS1) und Berstscheibe 2 (BS2) unterschieden. Die Berstscheibe 1 trennt den Gasgenerator und den Löschmittelbehälter voneinander, die Berstscheibe 2 sorgt hauptsächlich dafür, dass das Wasser bis zum Versuchsbeginn im Löschmittelbehälter bleibt.

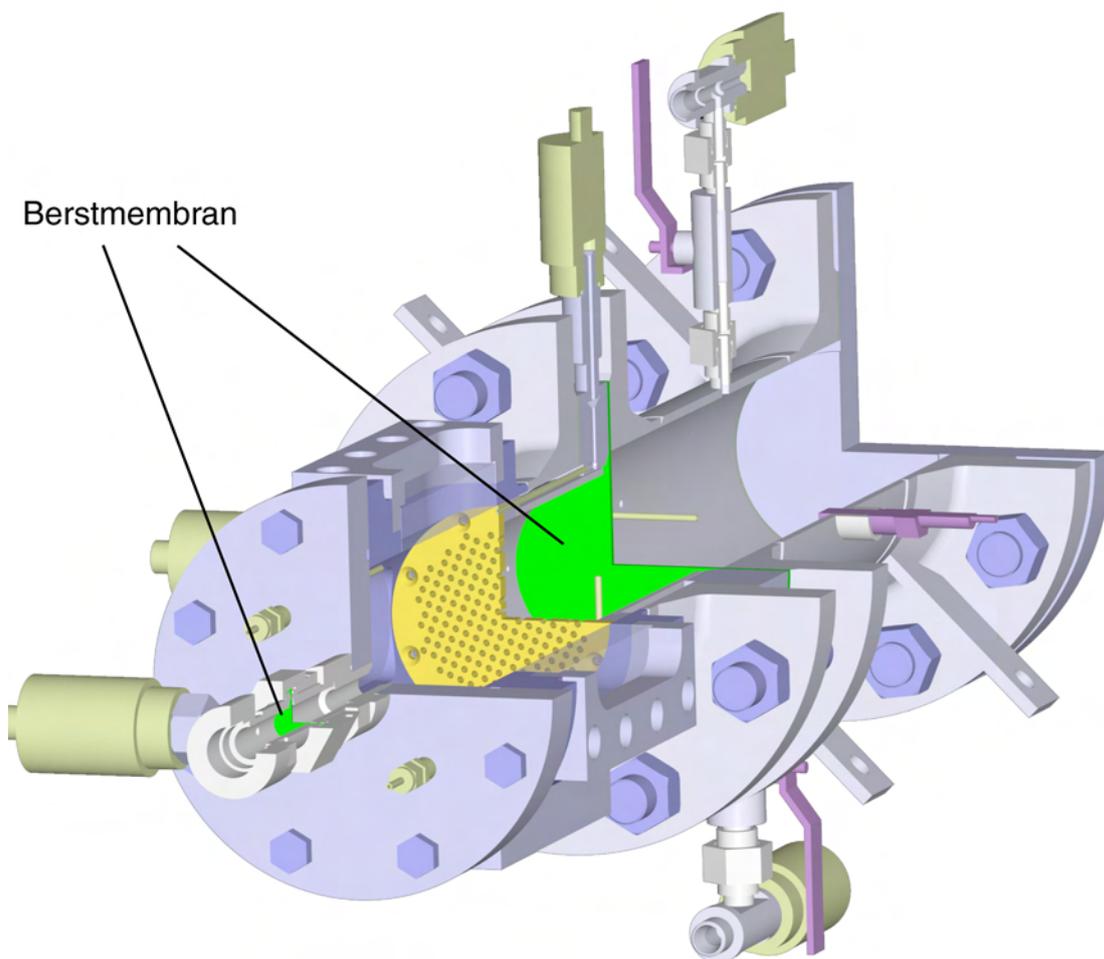


Abbildung 4.2: BUL-Versuchsaufbau im Schnitt von der Düsenaufnahme mit den beiden Berstscheiben

4.2.3 Blenden

Zwischen dem Puffervolumen und dem Löschmittelbehälter kann ein Blendeneinsatz eingebaut werden. Es kommen folgende Blenden zum Einsatz (s. Abb. 4.3):

- keine Blende (Blende 0)
- eine zentrale Bohrung mit Lochdurchmesser 16 mm (Blende 1)
- 16 kleine Löcher mit Durchmesser 4 mm, gleichmäßig auf einem Kreis mit Durchmesser 76 mm verteilt (Blende 2)
- eine zentrale Bohrung mit Lochdurchmesser 10 mm (Blende 3)

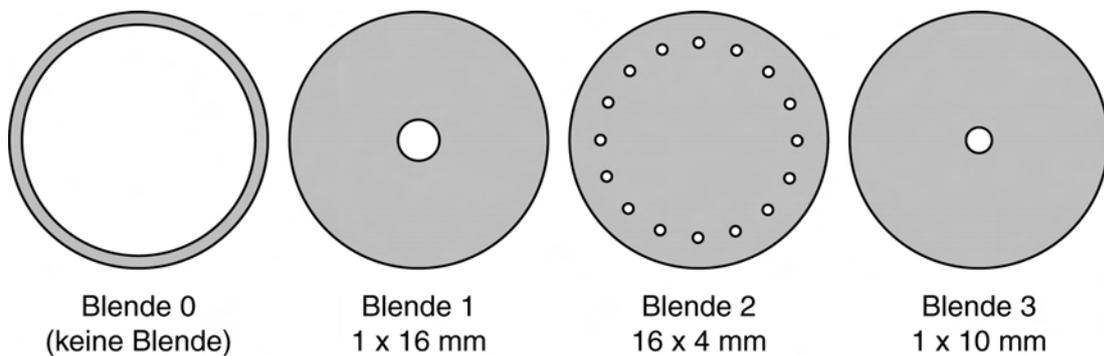


Abbildung 4.3: Die verwendeten Blendeneinsätze zur Modellierung und Begrenzung der Gasströmung

Die Blenden erfüllen mehrere Funktionen. Sie verhindern zum einen, dass etwaige Berstmembranfragmente in den Löschmittelbehälter gelangen und den Auslass blockieren. Zum anderen lässt sich dadurch die Gasströmung in den Löschmittelbehälter beeinflussen, beispielsweise kann die Durchmischung von Gas und Wasser verbessert werden.

4.2.4 Löschmittelbehälter

Im Löschmittelbehälter trifft in einem hoch instationären Vorgang die Gasfront unter hohem Druck auf den Wasserblock. Dadurch wird der Wasserblock beschleunigt und über die Öffnung (Düse = BUL bzw. ganzer Querschnitt = WSL)

ausgetrieben. Es kommt ein optisch zugänglicher Löschmittelbehälter für visuelle Untersuchungen (Löschmittelbehälter mit Fenster) und ein optisch nicht zugänglicher Löschmittelbehälter für höhere Betriebsdrücke (Löschmittelbehälter ohne Fenster) zum Einsatz. Der Löschmittelbehälter ohne Fenster wurde aufgrund seiner Robustheit v.a. in der Anfangs- und Test-Phase der Versuchsreihen eingesetzt, hauptsächlich zur Optimierung des Verbrennungsvorgangs des Wasserstoff-Luft-Gemisches. Die Auslegung des optisch zugänglichen Löschmittelbehälters ist in [Grü99] beschrieben.

4.2.5 Ausströmöffnung und Feinsprühdüsen

Die Art der Ausströmöffnung legt den Versuchsmodus (WSL- bzw. BUL-Versuch) fest. Es existieren zwei Modi, die über die Fläche der Ausströmöffnung charakterisiert werden können:

- Freigabe nahezu des gesamten Löschmittelbehälter-Querschnitts beim WSL-Versuch: hierbei wird die untere Berstscheibe zwischen einen DIN-Flansch und den Löschmittelbehälter eingespannt. Die Berstmembran gibt beim Aufreißen mehr als 90% des Gesamt-Querschnitts frei
- Beschränkung der Ausströmöffnung durch eine Einzeldüse auf eine geringe Querschnittsfläche beim BUL-Versuch. Es kamen folgende Hohlkegeldralldüsen von Total Walther zum Einsatz:
 - FS 5-120
 - FS 7-90
 - FS 10-120
 - FS 14-120

Die Bezeichnung FS steht für Feinsprühdüse, die Zahlenkombination 7-90 bedeutet einen K -Wert der Düse von 7 bei einem Sprühkegelwinkel von 90° . Mithilfe des K -Werts kann über die folgende Beziehung auf den Volumenstrom \dot{V} (in l/h) in Abhängigkeit des Drucks p (in 10^5 Pa) geschlossen werden [KK94]:

$$\dot{V} = 60 \cdot K \cdot \sqrt{p} . \quad (4.1)$$

Um die Vergleichbarkeit der Versuche untereinander zu gewährleisten, wurden die Versuche, bis auf wenige Ausnahmen, ausschließlich mit der Düse FS 7-90 durchgeführt.

4.3 Die Auslegung des Wasserbehälters

Die Konstruktion des optisch zugänglichen Löschmittelbehälter-Moduls erforderte für eine gute optische Zugänglichkeit eine Maximierung der Schauglasfläche. Dem konnte mit einer Auslegung nach den AD-Merkblättern zur Druckbehälterauslegung nicht entsprochen werden. Aus diesem Grund wurde auf das FEM-Tool Ansys 5.4 zur Spannungs-Analyse und Struktur-Optimierung zurückgegriffen [Grü99].

4.4 Der Anlagenaufbau

In Abb. 4.4 ist der BUL-Versuchsaufbau abgebildet. Die abgebildete Verschraubung des Gasgenerators mit dem Löschmittelbehälter wurde durch eine hydraulische Flanschspannanlage substituiert: Aufgrund der Klemmvorrichtung der Berstscheiben zwischen zwei Standardflansche musste die Verbindung mit den 8 Schrauben nach jedem Versuch gelöst werden. Durch das erforderliche hohe und definierte Drehmoment und die Anzahl der Schraubverbindungen dauerte die Beschickung der Anlage relativ lang. Der Einbau der hydraulischen Flanschspannanlage brachte einen erheblichen Zeitvorteil bei größerer Sicherheit.

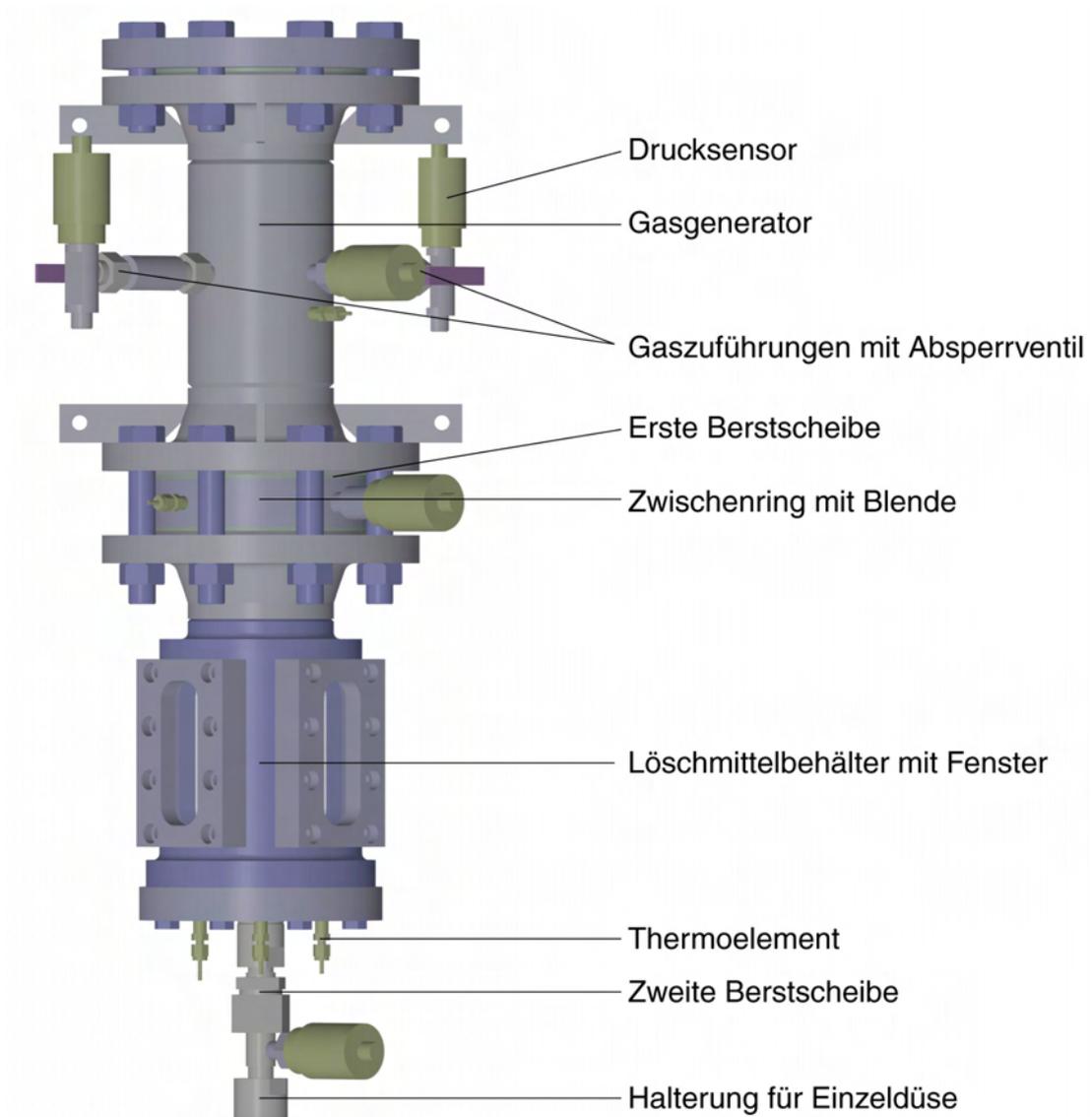


Abbildung 4.4: Die Versuchsanlage des BUL in der Seitenansicht incl. der Gaszuführungen und der Druck- und Temperatursensoren

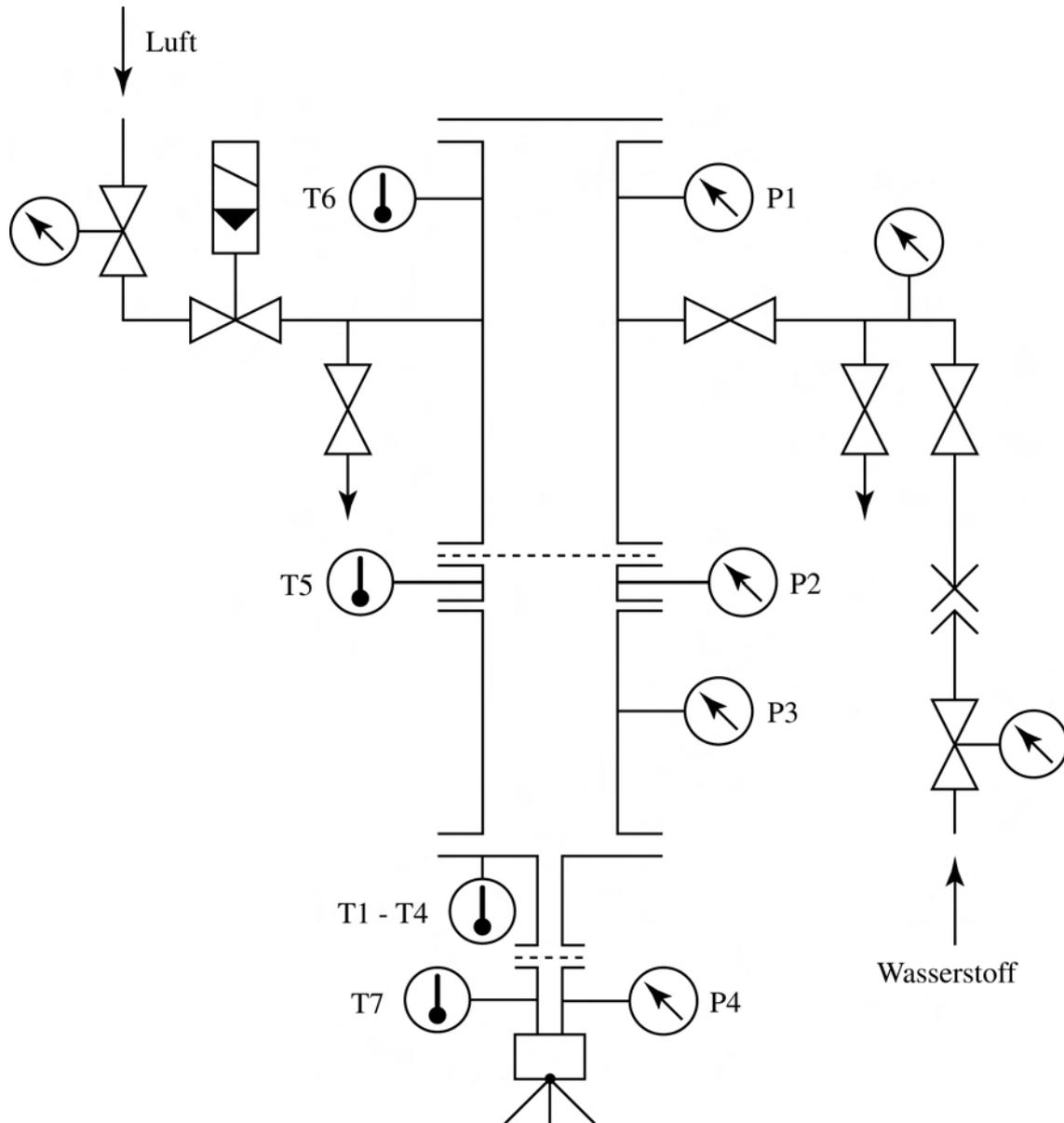


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der BUL-Anlage mit ihren Gasanschlüssen und den Sensoren für Druck- und Temperaturmessung (P1 bis P4 bzw. T1 bis T7)

4.5 Sensorik und Messtechnik

4.5.1 Drucksensoren

Es kommen folgende DMS-Drucksensoren der Firma Burster¹ zum Einsatz:

Nr.	Sensor	Maximaldruck	Maximale Messfrequenz
1	8201N	2,0 MPa	3,5 kHz
2, 3, 4	8201N	5,0 MPa	10 kHz

Tabelle 4.1: Eingesetzte Drucksensoren

Die gemessenen Drücke werden über einen Burster Messverstärker in eine analoge Spannung (0 - 10 V) umgesetzt und von der PC-Messdatenerfassung (s. Kap. 4.5.3) aufgenommen.

4.5.2 Temperatursensoren

Bei den Temperatursensoren handelt es sich um Thermoelemente aus Ni/Cr-Ni-Drähten (300 μm). Die Thermoelemente wurden im Eigenbau hergestellt und sind offen verschweißt. Dadurch sind diese Thermoelemente handelsüblichen Mantelthermoelementen in Bezug auf ihr Ansprechverhalten weit überlegen. Die Thermoelemente werden durch ein Stahlrohr (Durchmesser: 5 mm) bis auf wenige Millimeter vor der Schweißstelle stabilisiert. Es kommen insgesamt sieben Thermoelemente zum Einsatz. Das Messsignal wird über einen rauscharmen Verstärker für die PC-Messdatenerfassung umgesetzt. Als Referenztemperatur wurde die Raumtemperatur separat gemessen.

4.5.3 Messwerterfassung

Zur Messdatenerfassung wird eine PC-Karte ME-300 HG der Firma Meilhaus² eingesetzt. Die Ansteuerung und Programmierung der Karte erfolgt über ein HP-

¹ Produkthomepage: http://www.burster.de/katalog/sektion8/8201_n.htm

² Produkthomepage: <http://www.meilhaus.de/me/me300.htm>

Vee-Programm, die erfassten Messwerte werden nach Versuchsende in einer Datei gespeichert und anschließend weiter verarbeitet.

4.5.4 Sensoranordnung

Die Druck- und Temperatursensoren werden entsprechend Abb. 4.5 eingesetzt. Die Thermoelemente T1 bis T4 sind radialsymmetrisch auf dem Deckel des Wasserbehälters angeordnet und reichen unterschiedlich tief in den Löschmittelbehälter:

Thermoelement	vertikale Position
T1	37 mm
T2	75 mm
T3	112 mm
T4	150 mm

Tabelle 4.2: Vertikale Positionen der Thermoelemente T1 bis T4 im Löschmittelbehälter

4.6 Versuchsdurchführung

Die typische Versuchsdurchführung eines BUL-Versuches wird anhand des folgenden exemplarischen Versuchablaufs geschildert:

- Vorbereitungen:
 - Einsetzen der unteren Berstscheibe
 - Befüllen des Löschmittelbehälters mit Wasser
 - Einsetzen der oberen Berstscheibe
 - Verschraubung bzw. hydraulische Verspannung von Löschmittelbehälter und Gasgenerator
- Einstellen der Partialdrücke von Luft und H_2 im Gasgenerator (s. Anhang B)

- Start der Messwerterfassung von Druck und Temperatur
- Zündung
- Automatischer Start der Hochgeschwindigkeits-Video-Kamera (Trigger durch Druckgradient)
- Nachbereitungen:
 - Speichern der Hochgeschwindigkeits-Videos über Framegrabber auf dem PC
 - Lösen der Verbindung von Löschmittelbehälter und Gasgenerator
 - Ausbau der zerstörten Berstscheiben
 - Automatische Speicherung der Messdaten im Rohformat
 - Konvertierung der Messdaten mit Hilfe der Kalibrationsdaten

4.7 Messung des Schalldrucks

Zur Messung des Schalldrucks wurde ein Mikrofon der dänischen Firma *G.R.A.S. Sound & Vibration*³ und ein Mikrofonverstärker der Firma *Brüel & Kjaer*⁴ eingesetzt:

Mikrofon	G.R.A.S.:	Polarisationsspannung:	200V
	GRA-40-BP	Empfindlichkeit:	1,6 mV/Pa
	mit Vorverstärker:	Frequenzbereich	10 Hz bis 70 kHz
	GRA-26-AL:	Schallpegel	45-174 dB
Mikrofonverstärker	Brüel & Kjaer: Nexus Typ 2690A0S4	4 Kanäle großer Eingangsbereich geringes Eigenrauschen	

Tabelle 4.3: Spezifikationen der eingesetzten Messgeräte zur Bestimmung des Schalldrucks

³ Hersteller-Homepage: <http://www.gras.dk>

⁴ Hersteller-Homepage: <http://www.bruekjaer.de>

Das Mikrofon wurde vor den Messungen mithilfe eines Pistonphons kalibriert. Das Ausgangssignal des Mikrofonverstärkers wird über die Messwertaufnahmekarte eingelesen und parallel mit den Druck- und Temperaturwerten aufgenommen. Mit dem Verstärkungsfaktor von $0,01 \text{ mV/Pa}$ wird anschließend der Schalldruck berechnet.

5 Analysemethoden

5.1 Analyse des Druck- und Temperaturverlaufs

5.1.1 Druckverlauf

In Abb.5.1 wird der Druckverlauf eines typischen BUL-Versuchs gezeigt: Zum Zeitpunkt $t = 0,0 \text{ s}$ wird das Wasserstoff-Luft-Gemisch gezündet, der Druck steigt im Gasgenerator auf fast 20 bar an. Praktisch zeitgleich reißen die obere und untere Berstscheibe, der Druck im Löschmittelbehälter und der im Gasgenerator gleichen sich an. Durch das Ausströmen des Wassers aus dem Löschmittelbehälter durch die Düse sinkt der Druck in der Anlage, bei $t = 2,5 \text{ s}$ ist der Ausströmvorgang des Wassers weitgehend abgeschlossen. In der Sprühphase (in Abb. 5.1 grau hinterlegt) wird das Löschmittel Wasser nahezu einphasig über die Düse ausgetrieben, in der Nachlaufphase strömt das Gas mit einem geringen Anteil an Restwasser aus. Der Versuch ist nach ca. 8 s abgeschlossen.

5.1.2 Temperaturverlauf

Analog zum oben gezeigten Druckverlauf in Abb. 5.1 wird in Abb. 5.2 der Temperaturverlauf desselben Versuchs dargestellt: Durch die Zündung des Gasgemisches steigt die Temperatur im Gasgenerator sehr schnell auf $T \approx 800^\circ\text{C}$ an.

Die Einblendung in Abb. 5.2 konzentriert sich auf die Vorgänge im Löschmittelbehälter. Durch die unterschiedliche Einbauhöhe der Temperatursensoren (s. 4.5.4) lässt sich das Absinken des Wasserspiegels bzw. der Phasengrenzfläche gut erkennen. Während die Temperatur im Gasgenerator zu Beginn fast 800°C aufweist, liegen die Gastemperaturen im Löschmittelbehälter während der Sprühdauer deutlich darunter. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Messung der Gastemperatur durch noch vorhandenes Restwasser am Thermoelement

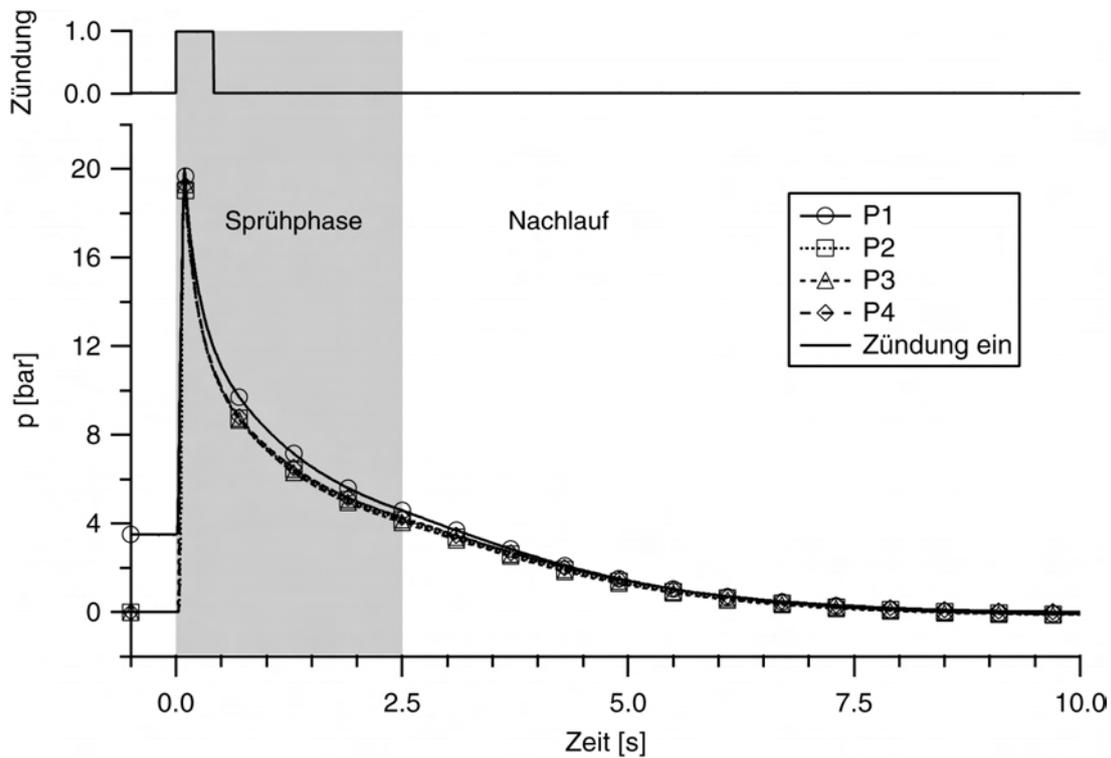


Abbildung 5.1: Druckverlauf eines BUL-Versuchs

verfälscht wird. Die Temperatur des ausströmenden Gases nach der Sprühphase liegt im Bereich von 40 - 50°C, was durch die (selbständige) Beimengung von Restwasser und die Entspannung des Gases erklärt werden kann.

5.2 Optische Messmethoden

Neben der Erfassung der Prozessparameter Druck und Temperatur lag der Schwerpunkt auf dem Einsatz optischer Messverfahren. Durch den hoch transienten Vorgang bot sich hier v.a. die Aufzeichnung der Versuche mittels der Hochgeschwindigkeits-Kinematographie an. Bei der hier verwendeten Kamera handelt es sich um einen Kodak EKTAPRO Motion Analyzer 4540 mit folgenden Eigenschaften:

- Bildauflösung: 256 x 256 Pixel bei 8 Bit Graustufenauflösung
- Aufnahmefrequenz: bis zu 4500 Hz bei voller Auflösung, bis zu 40500 Hz bei reduzierter Auflösung

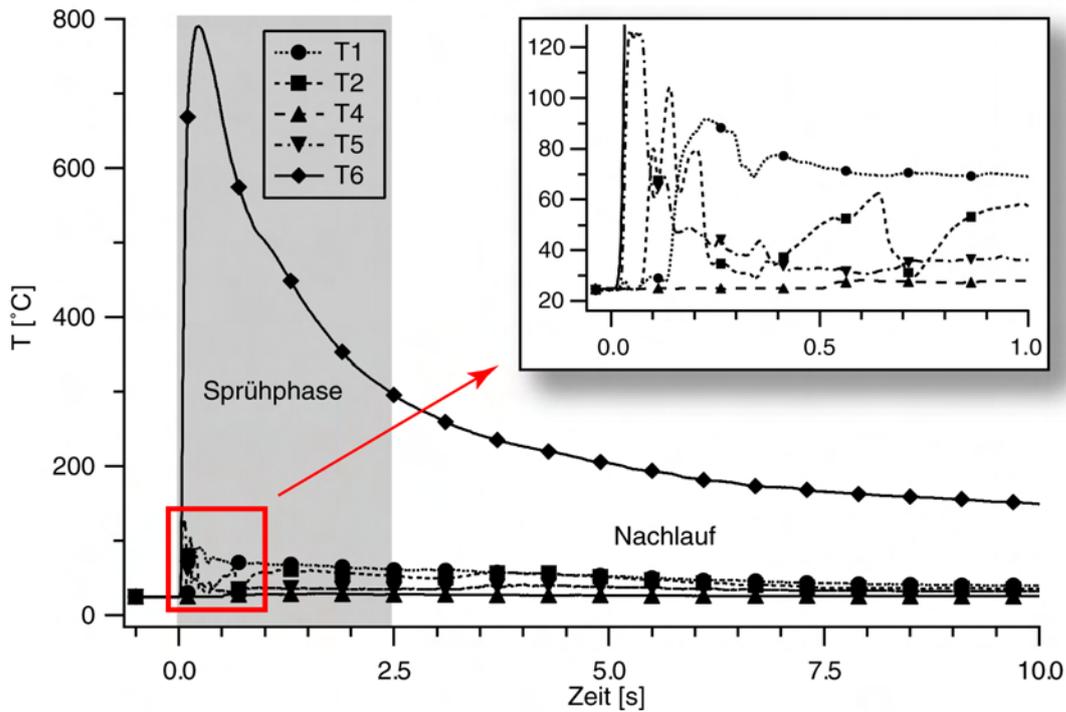


Abbildung 5.2: Temperaturverlauf eines BUL-Versuchs. Die Einblendung vergrößert den zeitlichen Temperaturverlauf für die Sensoren im Löschmittelbehälter

- Bildtransfer auf VHS-Video oder PC
- Objektiv: Nikon Nikkor 135mm, Blende 1 : 2.

Nach den Aufnahmen wurden die Bilder digital bearbeitet. Dabei wurden Helligkeit und Kontrast verstärkt, der Tonwert korrigiert und die Kanten leicht scharfgezeichnet. Diese so bearbeiteten Bilddaten stellen die Basis für die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Analysemethoden dar.

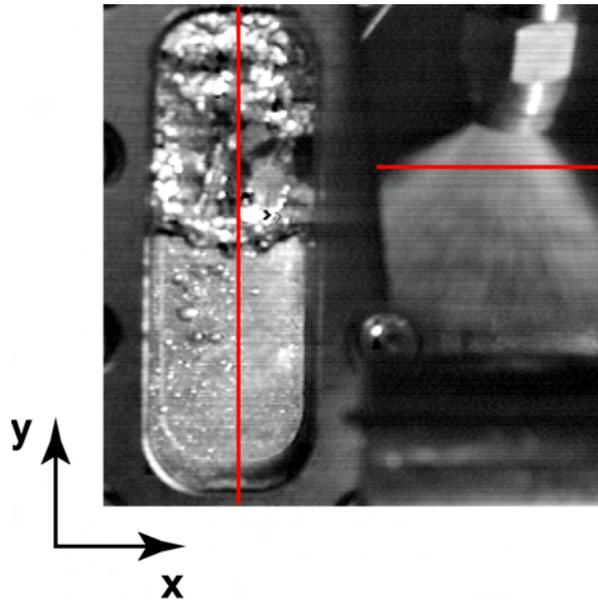


Abbildung 5.3: Einzelbild einer Hochgeschwindigkeits-Aufnahme. Die senkrechte und waagrechte rote Linie markiert die in Kap. 5.3 beschriebenen Schnittebenen

Die Abb. 5.3 zeigt ein Einzelbild eines Hochgeschwindigkeitsfilms. Die linke Hälfte des Bildes zeigt Einblick in den Löschmittelbehälter, die rechte zeigt eingespiegelt den Vorgang des Ausströmens aus der Düse.

In Abb. 5.4 sind einzelne Bilder eines Hochgeschwindigkeitsfilms dargestellt. Sehr gut zu erkennen ist der hoch instationäre Vorgang nach der Zündung, in der das Heißgas unter hohem Druck und hoher Geschwindigkeit auf das Löschmittel prallt und die beiden Phasen miteinander vermischt werden.

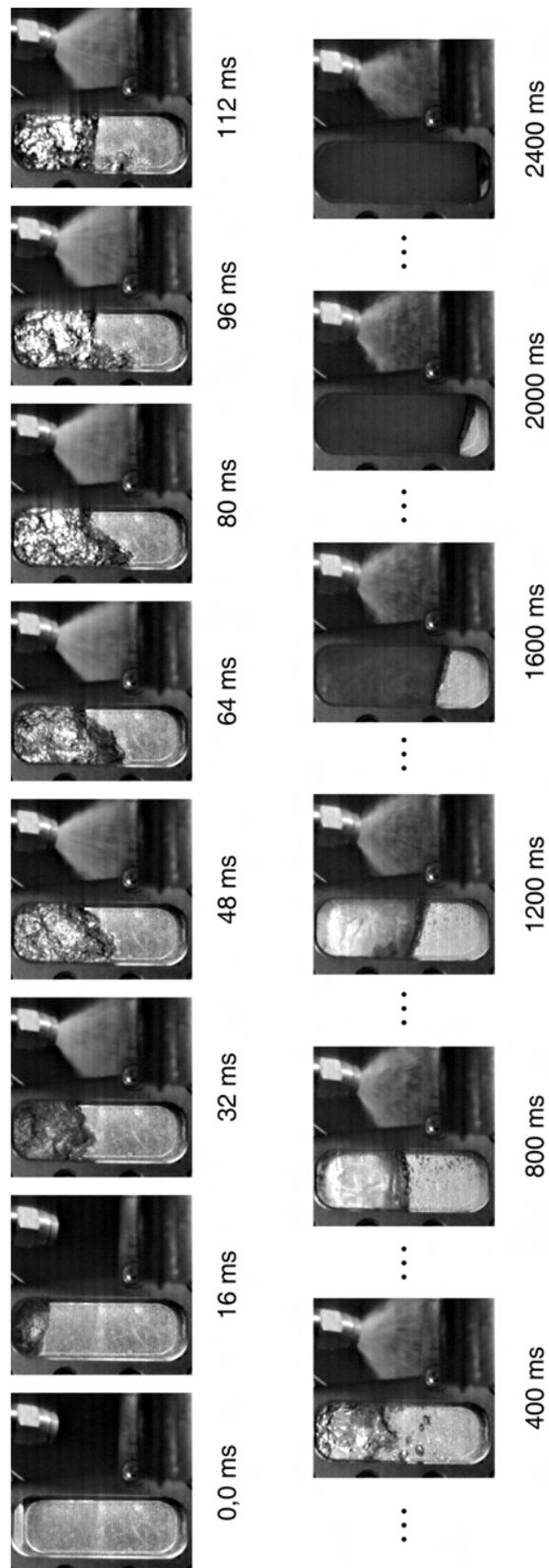


Abbildung 5.4: Einzelbilder aus einem Hochgeschwindigkeitsfilm

5.3 Digitale Bildfolgenanalyse

Die Einzelbilder eines Versuchsvideos werden nacheinander eingelesen und in einer dreidimensionalen Matrix gespeichert, dem so genannten 3D-Stack. Er beinhaltet die Ortskoordinaten x und y und als dritte Dimension die Zeit t (s. Abb. 5.5 und Abb. 5.6).

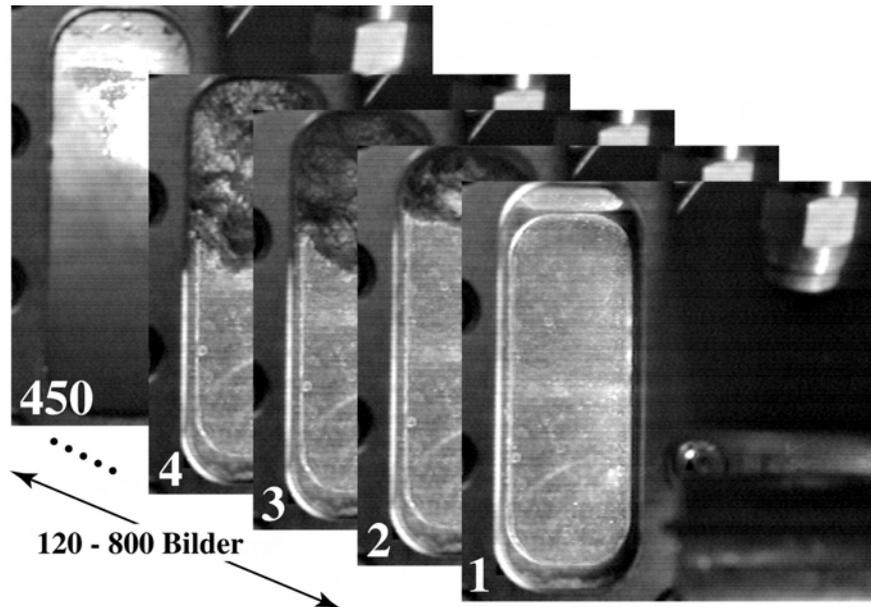


Abbildung 5.5: Bilder eines Hochgeschwindigkeits-Videos

Mit diesem 3D-Stack werden jetzt verschiedene 2D-Schnittbilder erzeugt. In der Abb. 5.6 sind zwei solche Schnittbilder mit ihrer Position in der Matrix zu sehen (s. a. Abb. 5.3). Auf diese Weise erhält man z. B. Abbildungen der t - x - oder t - y -Ebene (s. Abb. 5.7 bzw. 5.8).

Anhand von Abb. 5.8 können die während eines Versuchs ablaufenden Phasen gut erklärt werden:

- Durch den starken Druckanstieg und das Reißen der Berstscheiben trifft das Heißgas auf die Wasseroberfläche
- Gas und Wasser vermischen sich kurzzeitig (2-Phasen-Mischgebiet)
- die Phasengrenzfläche bildet sich wieder aus

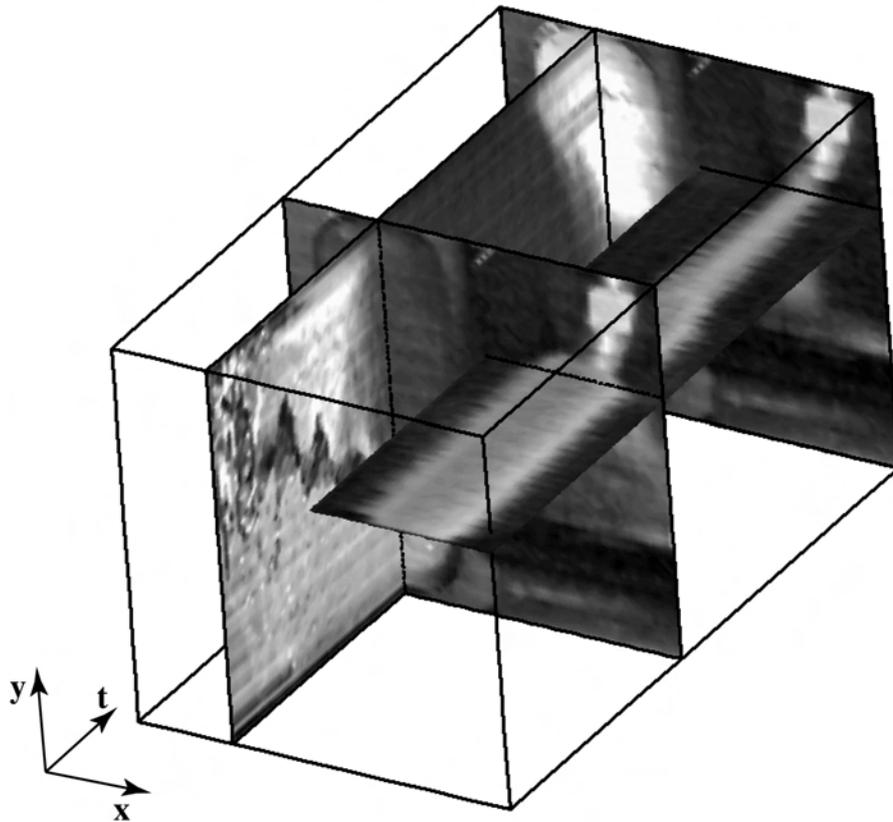


Abbildung 5.6: Hochgeschwindigkeits-Video-Stack in einer 3D-Matrix.

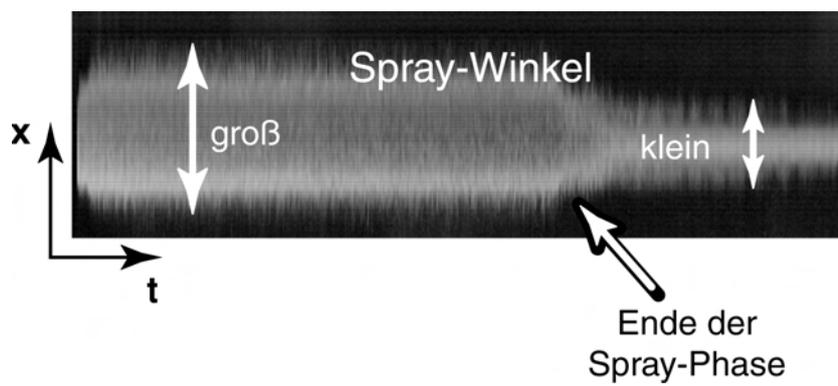


Abbildung 5.7: t - x -Schnitt der Außenströmung

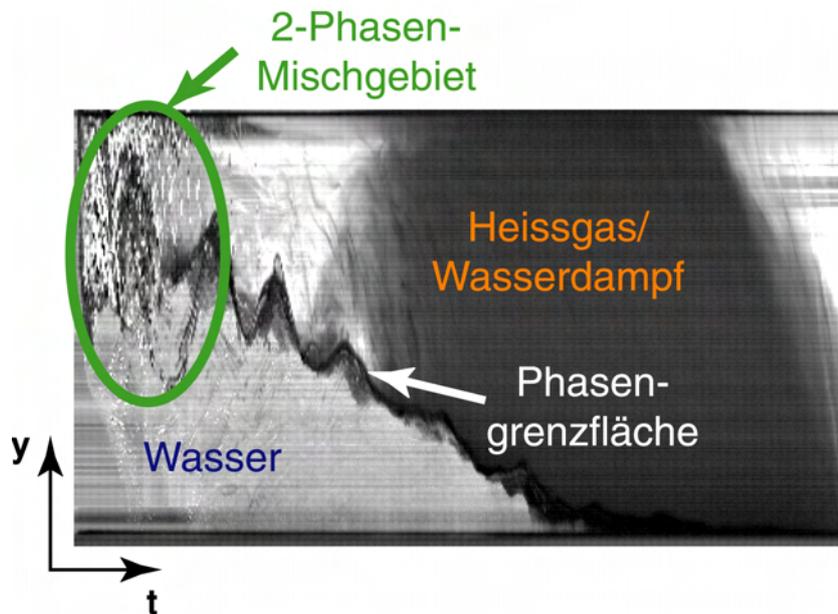


Abbildung 5.8: t-y-Schnitt der Innenströmung

- relativ konstante Austreibung des Löschmittels
- das restliche Gas entweicht mit einem geringen Wasseranteil

Der zeitliche Verlauf der Phasengrenzfläche wird digitalisiert (s. Abb. 5.9). Daraus lassen sich die mittlere Geschwindigkeit der Phasengrenzfläche und der mittlere Volumenstrom berechnen.

5.4 Sprühkegel-Analyse

Die räumliche Ausbreitung eines Sprays wird durch ihren Sprühkegelwinkel maßgeblich beeinflusst. Der Sprühkegelwinkel wird auf Video aufgezeichnet und anschließend analysiert.

In diesem Abschnitt wird ein selbst entwickelter Algorithmus zur automatischen Analyse und Quantifizierung des Sprühkegelwinkels beschrieben.

Voraussetzung für die Analyse des Sprühkegels nach dieser Methode ist die möglichst verzerrungsarme Video-Aufnahme des Sprays. Die in Kap. 5.2 erwähnte Einblendung des Sprühkegels mittels eines Spiegelaufbaus liefert dafür nicht

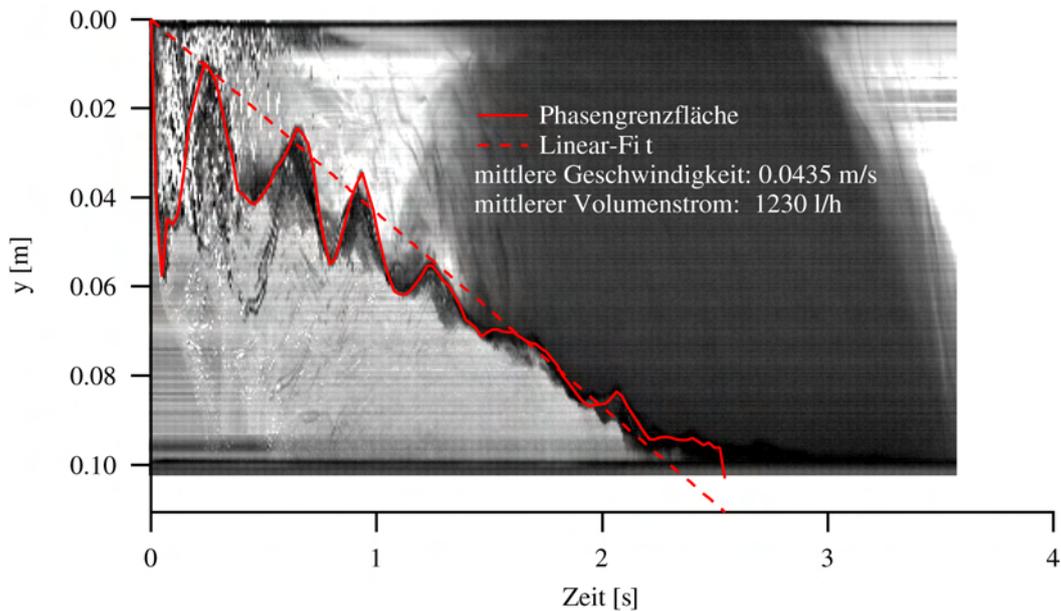


Abbildung 5.9: Digitalisierung des zeitlichen Verlaufs der Phasengrenzfläche und Berechnung von mittlerer Geschwindigkeit und mittlerem Volumenstrom

die erforderliche Qualität, deswegen wurden alle Versuche zur Bestimmung des Sprühkegels separat mit einer Video-Kamera aufgezeichnet.

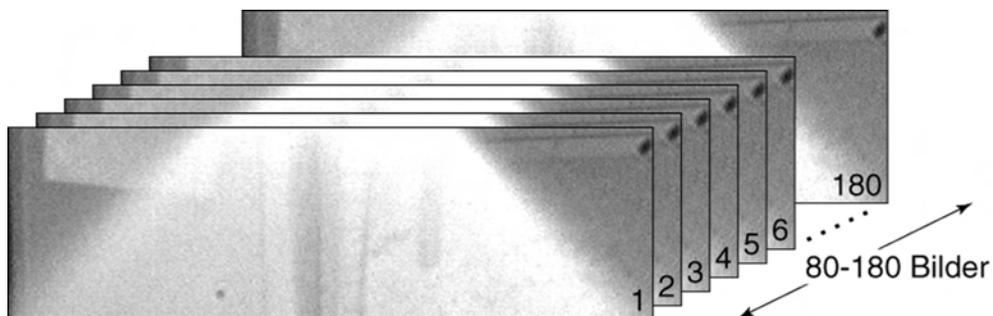


Abbildung 5.10: Video-Stack des Sprühkegels

In Abb. 5.10 ist ein entsprechender Video-Stack aus ca. 80 bis 180 Einzelbildern abgebildet. Diese Einzelbilder wurden nach der Digitalisierung in mehreren Schritten in Matlab¹ eingelesen und mit Hilfe der *Image Processing Toolbox* in Binärbilder der Spraygrenzen umgewandelt. Der Ablauf der einzelnen Schritte ist

¹ Produkthomepage: <http://www.mathworks.com>

in Abb. 5.11 gezeigt und kurz beschrieben. Bei den einzelnen Berechnungen wurde z.T. auf die *SDC Morphology Toolbox for MATLAB*² von SDC Information Systems, Naperville, USA zurückgegriffen.

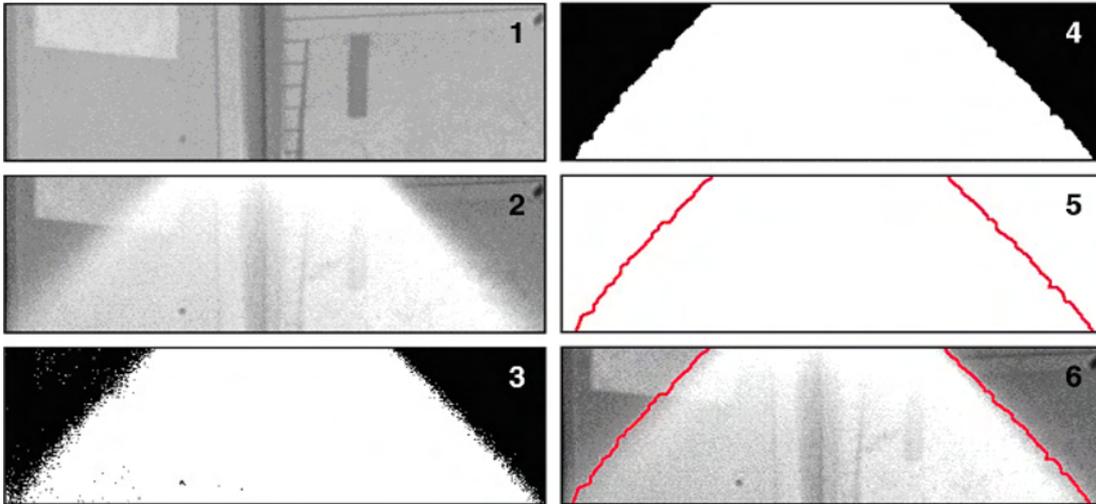


Abbildung 5.11: Einzelne Bearbeitungsschritte zur Bestimmung des Sprühkegels:

- 1) Hintergrundbild, 2) Aufnahme des Sprühkegels, 3) Subtraktion des Hintergrundbilds und Binärisierung, 4) Bildverbesserung mit morphologischen nichtlinearen Filtern, 5) Detektion des Sprühkegels, 6) Überlagerung der detektierten Spraygrenzen mit dem Sprühkegel

Aus dem Binärbild der Sprühkegelgrenze wird im weiteren Verlauf der Sprühkegelwinkel φ ermittelt (s. Abb. 5.12). Da der Sprühkegelwinkel aus jedem einzelnen Videobild analysiert wird, kann so der zeitliche Verlauf dokumentiert werden.

Die Radon-Transformation berechnet Projektionen einer Bildmatrix entlang angegebener Richtungen. Sie kann zur Implementierung einer Form der Hough-Transformation verwendet werden, die zur Erkennung gerader Linien dient, in diesem Fall wird sie aber zur Detektion und Quantifizierung des Sprühkegelwinkels verwendet: die Radon-Transformation berechnet das Linienintegral einer Bild-Projektion auf x' unter verschiedenen Rotationswinkeln Θ . Hat das transformierte Bild lange gerade Kanten, so ergibt sich bei der Projektion parallel zu diesen Kanten ein großer Wert des Integrals. Die Anwendung der Radon-

² Produkthomepage: <http://www.mmorph.com>

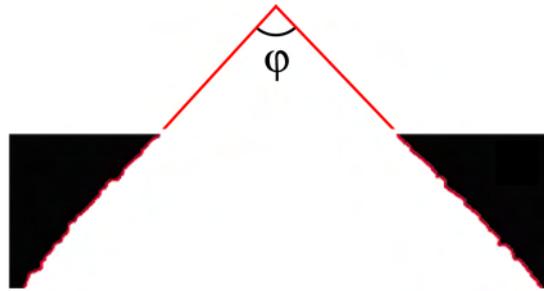


Abbildung 5.12: Sprühkegelwinkel

Transformation auf das Binärbild der Sprühkegelgrenzen ist in Abb. 5.13 gezeigt.

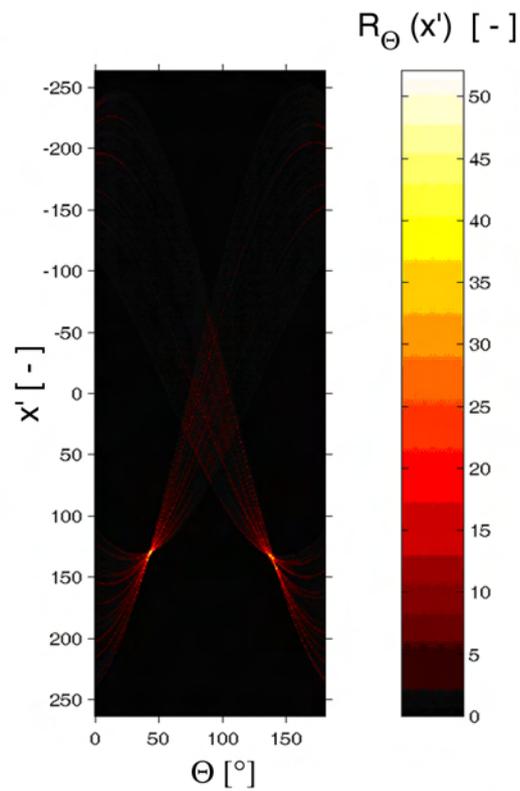


Abbildung 5.13: Analyse der Sprühkegelbegrenzung (s. Abb. 5.11.5)

Die Intensitäten des so entstandenen Projektionsbilds werden für konstante Winkel Θ aufsummiert, das Ergebnis wird in einem Diagramm dargestellt (s. Abb. 5.14). Hier sind bereits zwei deutliche Peaks zu erkennen, die die Sprühke-

gelgrenzen repräsentieren. Das Maximum dieser Peaks wird mit einer quadratischen Funktion angeglichen, die Differenz der beiden Winkel ergibt den gesuchten Sprühkegelwinkel φ .

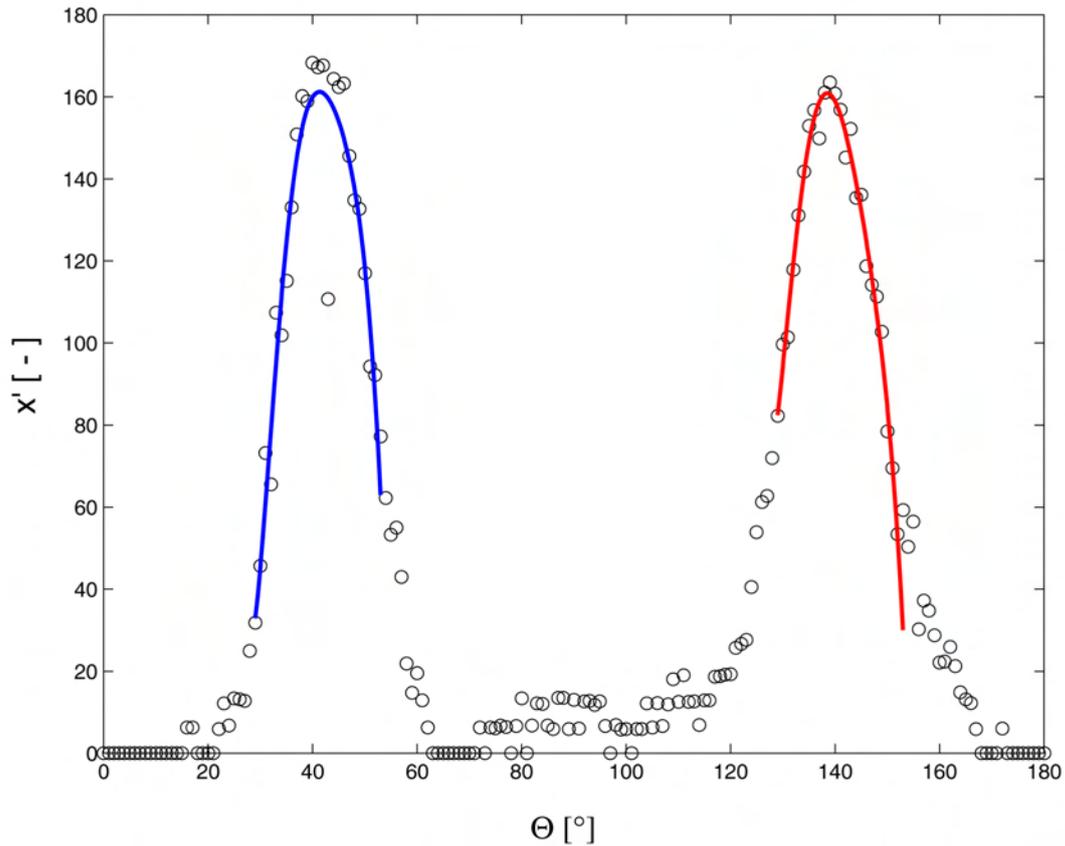


Abbildung 5.14: Automatische Detektion des Spraywinkels aus Abb. 5.13

Dieser Algorithmus wird für den gesamten Versuch wiederholt, somit ergibt sich der zeitliche Verlauf des Sprühkegelwinkels φ . Ein Beispiel dafür ist in Abb. 5.15 abgebildet.

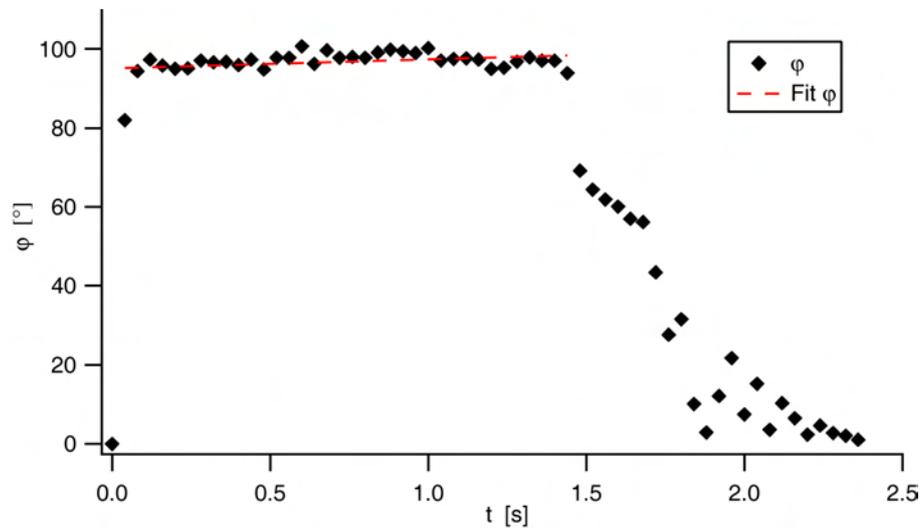


Abbildung 5.15: Zeitliche Abhängigkeit des Sprühkegelwinkels φ für einen Versuch

5.5 Analyse des Sprays

Die Tröpfchengrößenverteilung des generierten Sprays wurde mit einem Streulichtmessverfahren (Malvern Spraytec³) gemessen. Das Messgerät wurde mit einem vertikalen Abstand von 1,0 m von der Düse so positioniert, dass ein Kreissegment des Sprühkegels vermessen werden konnte (s. Abb. 5.16).

Das Spraytec wurde mit einem optischen Tubus mit einer Brennweite von 450 mm ausgestattet, damit lassen sich Tröpfchengrößen von 2.25 bis 1000 μm detektieren, die Messrate wurde auf 200 Hz eingestellt. In Abb. 5.17 ist exemplarisch eine Tröpfchengrößenverteilung dargestellt. Aufgetragen sind hier die Normdurchmesser DV10, DV50 und DV90. Zusätzlich ist die Transmission des Laserstrahls des Messgeräts angegeben. Ist die Transmission zu gering (unter 10-20%), so ist die Messung der Tröpfchendurchmesser nicht zuverlässig. Zu Beginn des Versuchs mit hohem Druck werden sehr kleine Tröpfchen generiert, die im Laufe des Versuchs größer werden, dies korreliert mit dem starken Druckabfall im gezeigten Heißgasversuch.

Die Auswertung der Messungen der Tröpfchengrößenverteilung ergibt neben den Normdurchmessern auch den Sauterdurchmesser d_{32} , der das Verhältnis des

³ Herstellerhomepage: <http://www.malvern.co.uk>

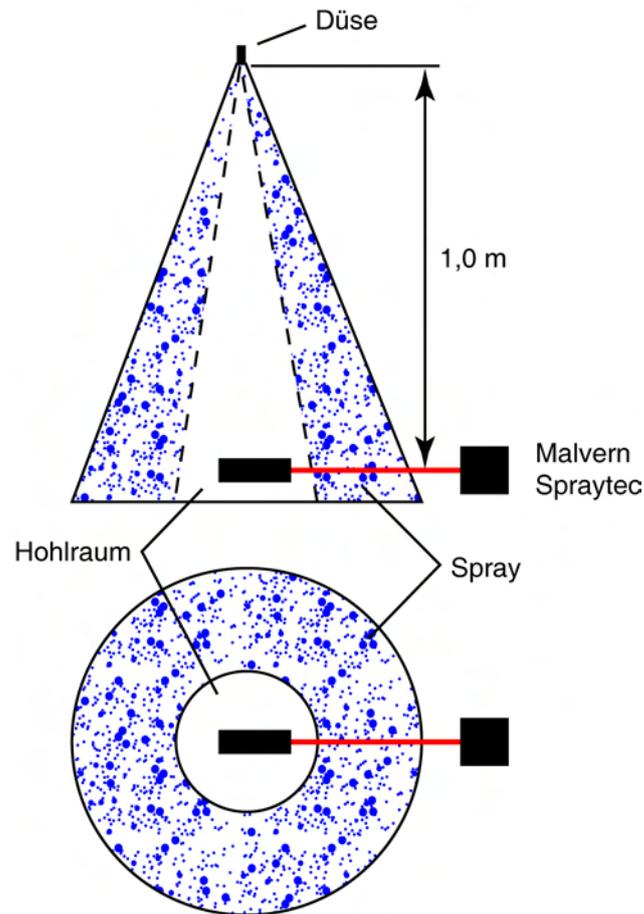


Abbildung 5.16: Versuchsaufbau für die Analyse des Tröpfchenspektrums mit dem Malvern Spraytec

Volumens zur Oberfläche des gesamten Tröpfchenkollektivs wiedergibt. Der Sauterdurchmesser ist definiert als

$$d_{32} = \frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum_i N_i d_i^2} . \quad (5.1)$$

Er ist stellvertretend für das gesamte Tröpfchenkollektiv, da er das gleiche Volumen zu Oberflächeverhältnis hat, und eignet sich besonders zur Charakterisierung verdampfender Sprays. In Abb. 5.18 sind die gemittelte volumenbezogene Tröpfchengrößenhäufigkeit und das gemittelte kumulative Volumen des Beispiels in Abb. 5.17 dargestellt.

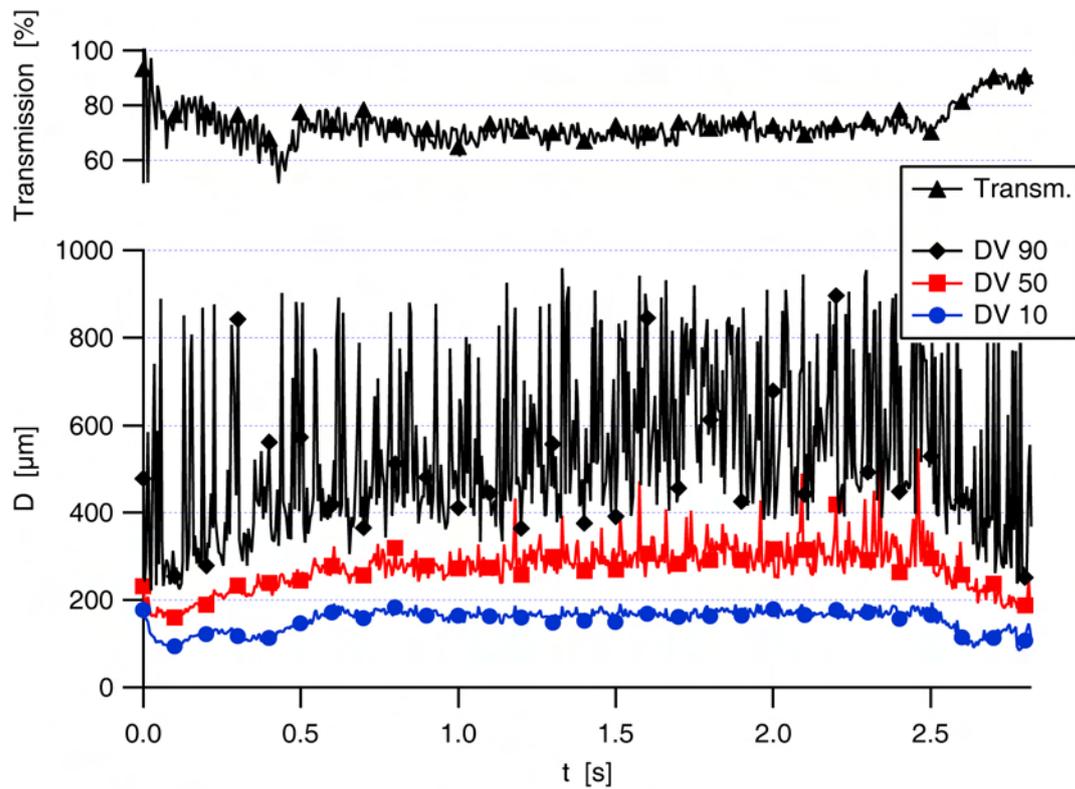


Abbildung 5.17: Tröpfchengrößenverteilung während eines Versuchs für einen Heißgasversuch mit BS1

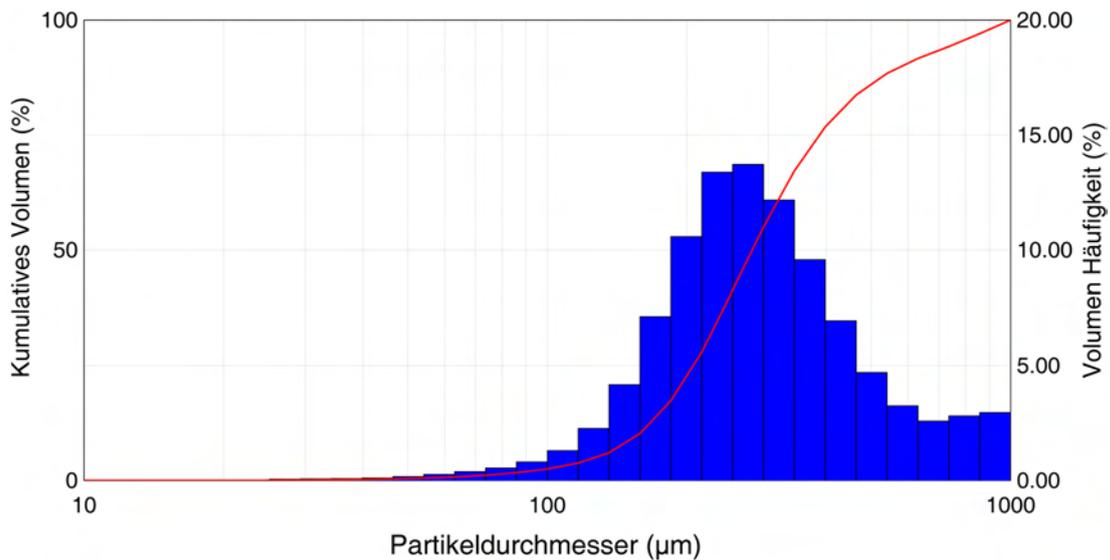


Abbildung 5.18: Durchschnittliche volumenbezogene Tröpfchengrößenverteilung und kumulatives Volumen für einen Heißgasversuch mit BS1

5.6 Gittersensor

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren und Algorithmen zur digitalen Bildanalyse haben den Nachteil, dass sie nur einen Teil der Messstrecke optisch abbilden und die gesamte Bildtiefe erfassen. Aus diesen Gründen wurde ein Sensor entwickelt [Fab03], der Gasgehalte orts aufgelöst messen kann. Das Messprinzip basiert auf der Messung der lokalen Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden, durch eine elektronische Schaltung kann eine Matrix gekreuzter leitfähiger Drähte (Drahtgitter) ausgelesen und in Gasgehalte umgerechnet werden [PZB98b] [PZB98a] [PZB98c].

Dieses Verfahren wurde ursprünglich vom Forschungszentrum Rossendorf⁴ entwickelt und über die Firma Teletronic Rossendorf GmbH⁵ zur Marktreife geführt. Gittersensoren wurden bisher hauptsächlich zur Messung des Gasgehalts in Rohren senkrecht zur Strömungsrichtung eingesetzt.

Im Gegensatz hierzu wurde ein Sensor entwickelt, der nicht senkrecht zur Strömungsrichtung, sondern in der Mittelachse in Strömungsrichtung eingesetzt wird. Er erlaubt erstmals Gasgehaltsmessungen im gesamten Löschmittelbehälter in einem Längsschnitt durch die Mittelachse [Fab03].

Analog zu dem Verfahren in Kap. 5.3 werden die Ergebnisse der Gasgehaltsmessungen in einen 3D-Stack eingelesen und ein Schnittbild in der t-y-Ebene erzeugt (s. Abb. 5.19). Dieses wird binärisiert, der Schwellwert liegt bei einem Gasgehalt von $\epsilon = 5\%$. Die Phasengrenze wird aus dem Binärbild mithilfe eines Kantendetektions-Algorithmus ermittelt. Der zeitliche Verlauf der Phasengrenzfläche wird linear approximiert, es wird nach Festlegung des Nullpunkts der Phasengrenzfläche nur die Steigung der Ausgleichsgeraden variiert. Aus der Steigung wird die Sinkgeschwindigkeit der Phasengrenzfläche und der Volumenstrom Q berechnet. Ein Beispiel ist in Abb. 5.20 dargestellt. Zum Vergleich wurde der Phasengrenzflächenverlauf auf Basis der Videodaten (s. Kap. 5.3) ermittelt. Die Ergebnisse des Volumenstroms stimmen sehr gut überein und differieren um nicht mehr als 2,5 %.

Mit Hilfe dieses Verfahrens konnten somit die Ergebnisse der Schnitttechnik

⁴ Homepage: <http://www.fz-rossendorf.de>

⁵ Homepage: <http://www.tz-rotech.de/teletronic/deu/index.htm>

der digitalen Bildfolgeanalyse aus Kap. 5.3 verifiziert werden. Weitere Ergebnisse des Vergleichs zwischen diesen beiden Messtechniken finden sich in Anhang D.

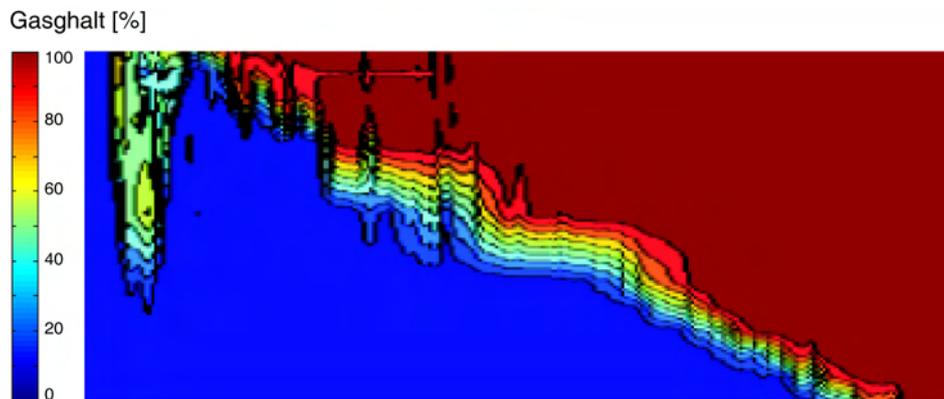


Abbildung 5.19: t-y-Schnittbild der Gasgehaltsmessungen

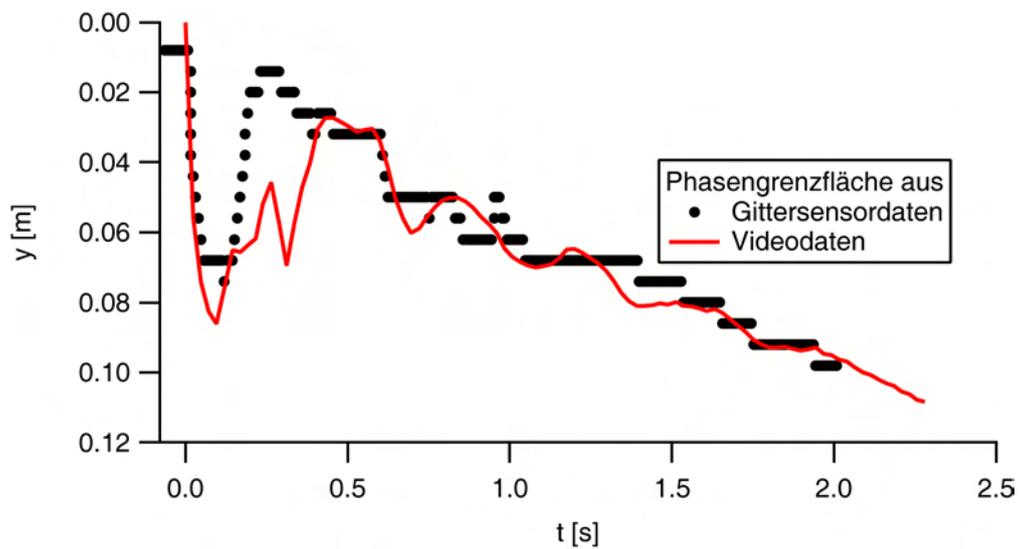


Abbildung 5.20: Bestimmung des Phasengrenzflächenverlaufs mit dem Gittersensor und aus Videodaten

6 Versuchsergebnisse WSL

Durch den modularen Aufbau der Versuchsanlage (s. Kap. 4.2) ist es möglich, Versuche durchzuführen, die einem Wasserschocklöscher (WSL) modellieren (s. Kap. 2.4.4). Da die Auslegung des humanverträglichen Feuerlöschsystems auf dem WSL basiert (s. Kap. 3), können so Vergleichsdaten beschafft werden. Ein Teil dieser Ergebnisse wird nachfolgend präsentiert.

6.1 Versuchsbeschreibung

Für die Versuche mit dem Wasserschocklöscher wird die Düsenöffnung des BUL durch einen Stahlring ersetzt, die Austrittsöffnung des WSL ist somit identisch mit der Querschnittsfläche des Löschmittelbehälters. Der Löschmittelbehälter wird mit einer unteren Berstmembran entsprechender Größe versiegelt, dann mit dem Wasser gefüllt und mit einer oberen Berstscheibe verschlossen. Die untere und die obere Berstmembran haben dieselben Abmessungen.

Die Versuche zum WSL laufen sehr schnell ab, die Versuchsdauer beträgt nur 10 bis 20 ms. Die Geschwindigkeit der Hochgeschwindigkeitskamera wurde auf 4500 Bilder/s eingestellt, die schnellste Aufnahmefrequenz bei voller Auflösung. Bei den Kaltgasversuchen kam der kurze Gasgenerator zum Einsatz, bei den Heißgasversuchen der lange Gasgenerator. Das Löschmittelvolumen lag bei 1,5 l.

6.2 Versuchsablauf

In Abb. 6.1 ist exemplarisch ein Versuchsablauf in Einzelbildern dargestellt. Der Abstand zwischen den Bildern beträgt 2,2 ms bzw. 10 Bilder.

Der Versuchsablauf kann in allen Fällen nach folgendem Schema beschrieben werden:

Nachdem der Druck im Gasgenerator den Berstdruck erreicht, reißen die obere und die untere Berstmembran nahezu zeitgleich, wenn beide Berstscheiben identisch sind. Der Wasserblock mit angereichertem Gas wird aus dem Löschmittelbehälter beschleunigt und ausgetrieben, er bewegt sich hauptsächlich in vertikaler Richtung (s. Abb. 6.1: 2,2 bis 4,4 ms). Das expandierende Gas im Wasser zerstäubt den Wasserblock effektiv, die Ausbreitung hat fast kugelförmigen Charakter (s. Abb. 6.1: 6,6 bis 11,1 ms).

Die Tröpfchen zerfallen weiter aufgrund der Luftreibung, das nachströmende Gemisch aus Restgas und Wassertröpfchen verlässt den Löschmittelbehälter (s. Abb. 6.1: 15,5 ms)

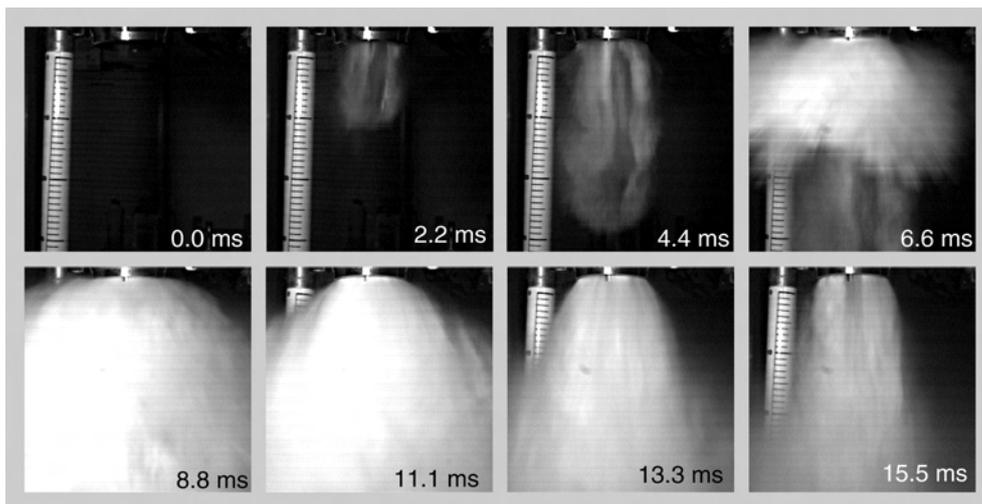


Abbildung 6.1: Versuchsablauf eines WSL-Versuchs

6.3 Versuche mit unterschiedlichen Berstdrücken

In Abb. 6.2 ist eine Übersicht der Anfangsphase des Versuchsablaufs für verschiedene Berstdrücke dargestellt. Es zeigt sich, dass die Versuche mit niedrigen Berstdrücken eine geringere räumliche Ausbreitung des Sprays in horizontaler Richtung aufweisen.

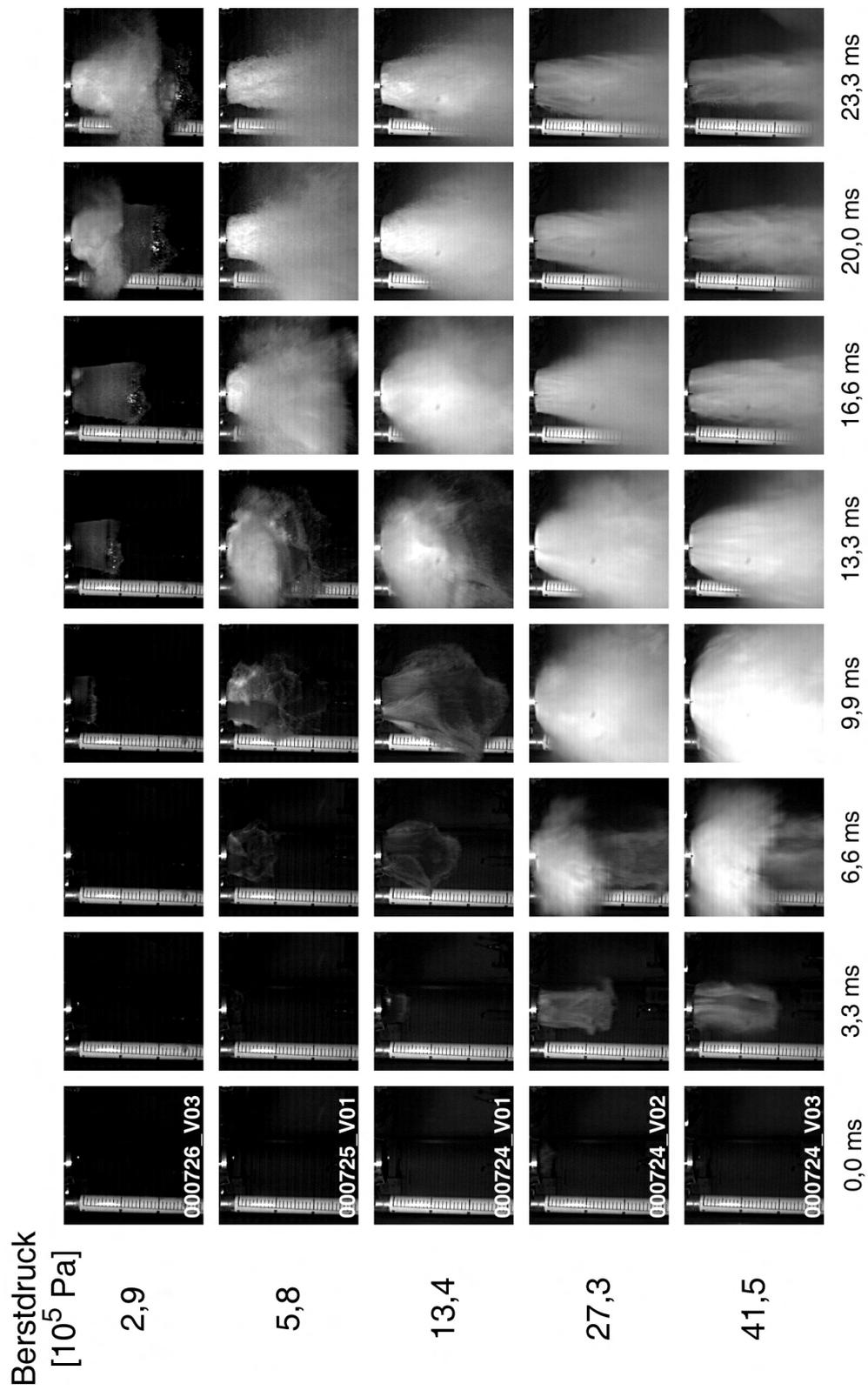


Abbildung 6.2: Übersicht des Versuchsablaufs der WSL-Versuche mit Kaltgas und verschiedenen Berstdrücken

In Abb. 6.3 ist der Sprühwinkel der Tröpfchenwolke in Abhängigkeit des Berstdrucks gezeigt. Eine gute räumliche Expansion wird nur bei sehr hohen Berstdrücken erreicht.

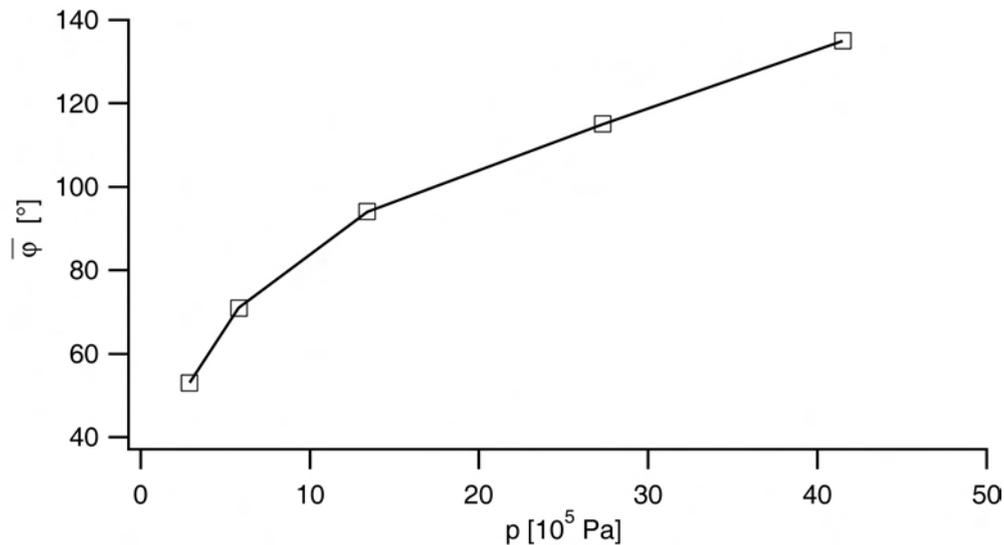


Abbildung 6.3: Sprühwinkel der Tröpfchenwolke in Abhängigkeit vom Berstdruck

Die Analyse der vertikalen Ausbreitung der Tröpfchenwolke ist in Abb. 6.4 zu sehen. Die vertikale Geschwindigkeit der Sprayausbreitung kann durch eine einfach exponentielle Abhängigkeit der Geschwindigkeit vom Berstdruck gut genähert werden:

$$\bar{v} = 26,1 - 22,8 \cdot e^{-0,032 \cdot p_{Berst}} . \quad (6.1)$$

6.4 Schalldruckmessungen

Die Messungen des Schalldrucks wurden mit den Blendeneinsätzen 0 bis 3 und Heißgas-Versuchen mit hohem Berstdruck (3,2 MPa) durchgeführt. Neben der Messung des Schalldrucks wurden Hochgeschwindigkeits-Videos (s. Abb. 6.6) aufgezeichnet. Die Analyse der Schallmessungen zeigt, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Blenden sehr groß sind (s. Abb. 6.5): sie reichen von 100 bis 1000 Pa. Dies entspricht einem Schallpegel von 134 bzw. 154 dB (s. Anhang C).

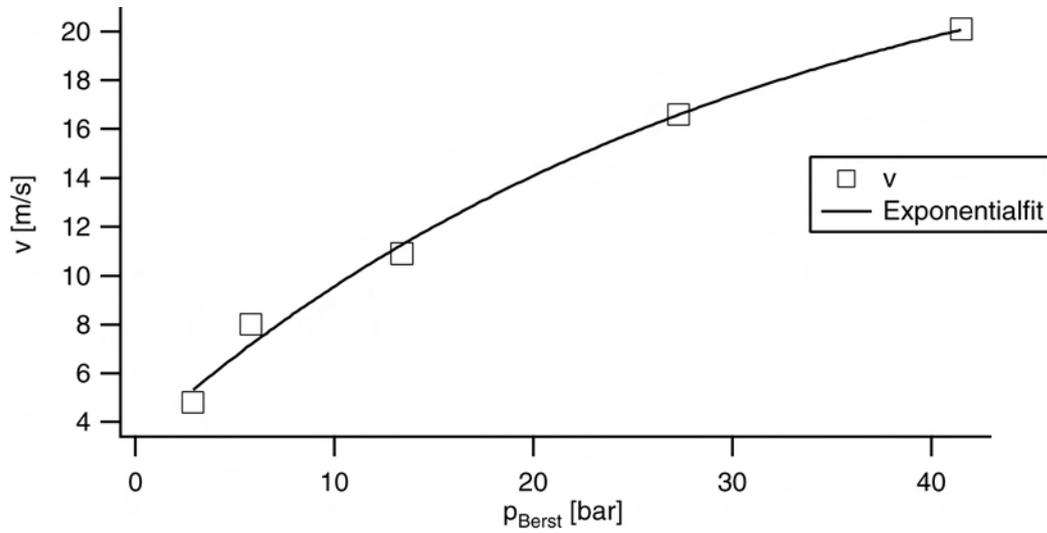


Abbildung 6.4: Abhängigkeit der vertikalen Geschwindigkeit der Tröpfchenwolke vom Berstdruck

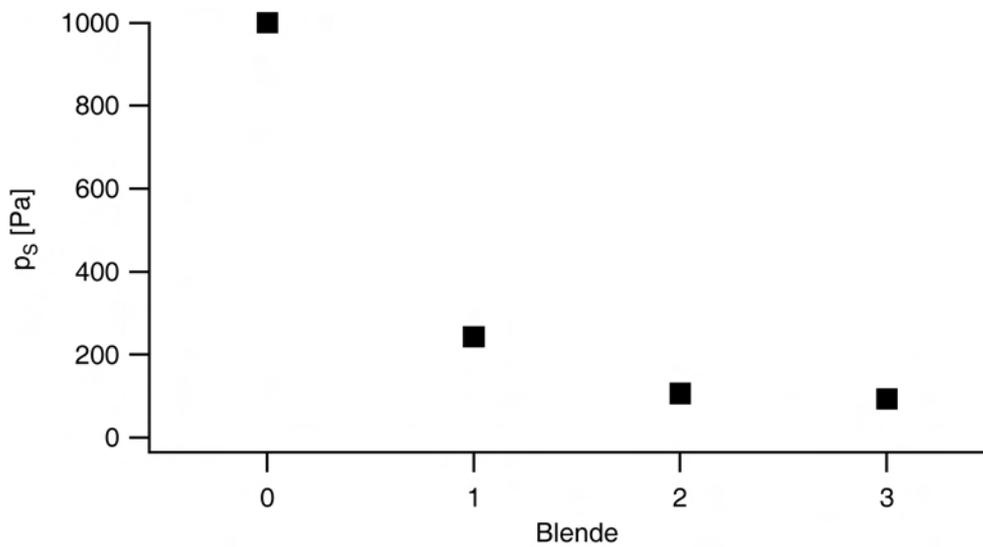


Abbildung 6.5: Abhängigkeit des Schalldrucks von den Blenden 0 bis 3

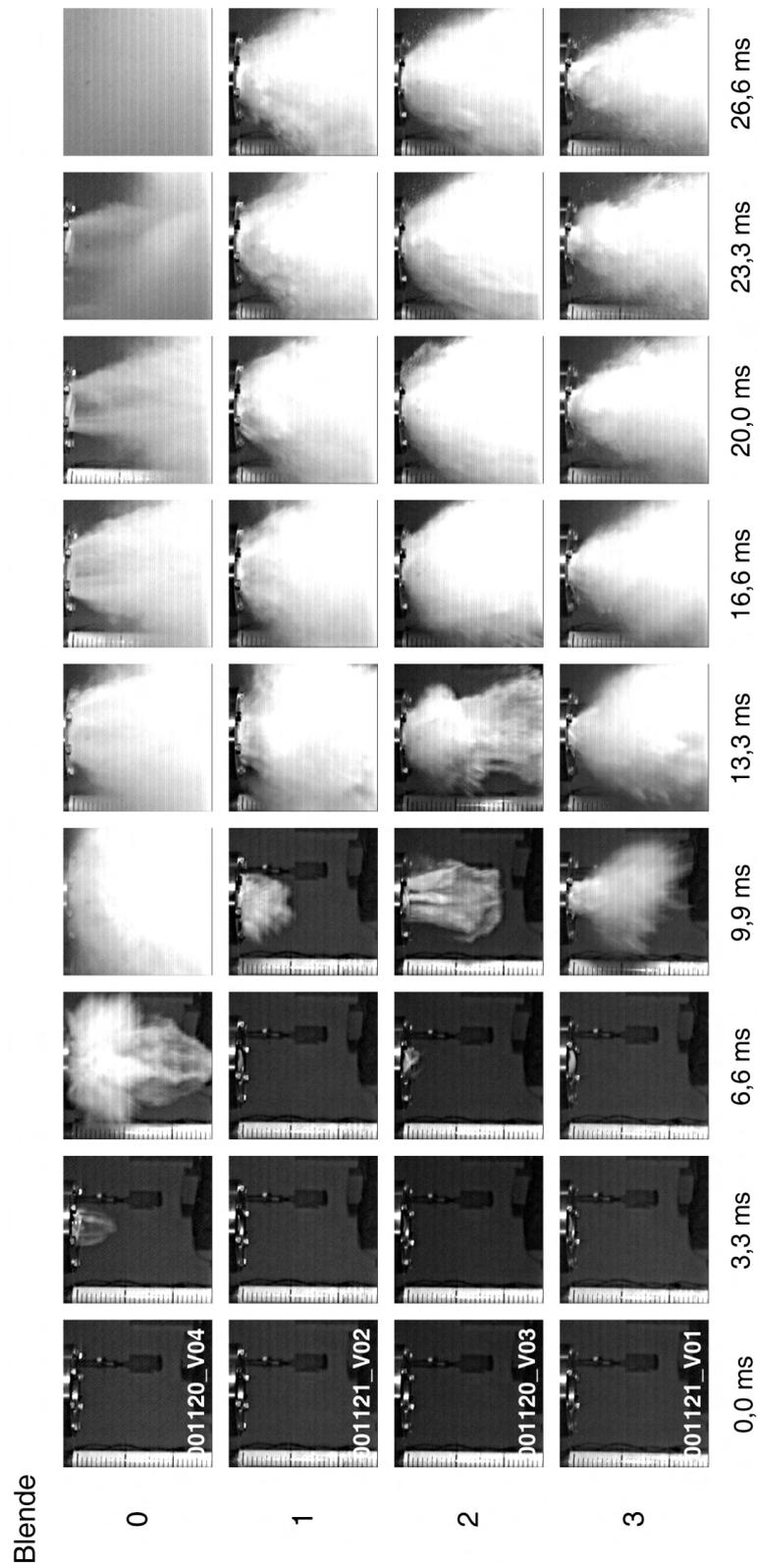


Abbildung 6.6: Versuchsablauf mit den Blendeneinsätzen 0 bis 3 bei einem Berstdruck von 3,2 MPa

Die Analyse der Hochgeschwindigkeitsvideos zeigt, dass der Einsatz einer Blende einen sehr großen Einfluss auf die räumliche Ausbreitung der Tröpfchenwolke hat: sie wird kleiner (s. Abb. 6.7) und die Spraydauer verlängert sich z.T. erheblich. Durch den Einsatz von Blenden wird der Schalldruck in erheblichem Maße gesenkt (s. Abb. 6.5).

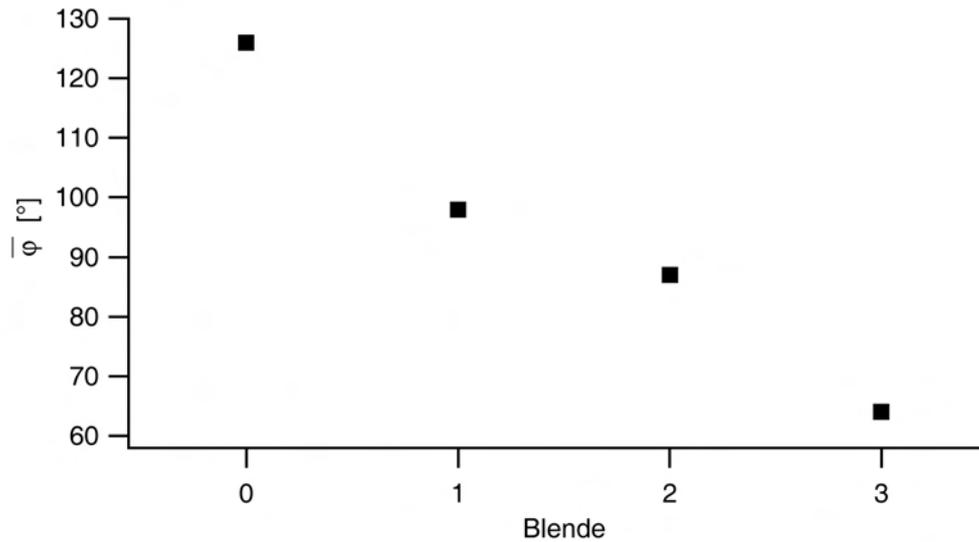


Abbildung 6.7: Sprühwinkel der Tröpfchenwolke für die Blendeneinsätze 0 bis 3

6.5 Zusammenfassung der WSL-Versuche

In den Versuchen zum WSL hat sich herausgestellt, dass die folgenden Parameter einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten haben:

Berstdruck

Der Berstdruck ist ein ganz wesentlicher Parameter des WSL. Generell hat sich gezeigt, dass die räumliche Ausbreitung und die Zerstäubung mit zunehmendem Berstdruck besser wird, gleichzeitig nimmt aber auch der Schalldruck zu.

Berstscheibensystem

Die Berstscheibe hat in erster Linie über die Folienstärke Einfluss auf den Berstdruck. Daneben hat sich aber gezeigt, dass unterschiedliche Folienstärken für die BS1 und BS2 durchaus das Gesamtsystem WSL beeinflussen und optimieren können.

Blenden

Die Blendeneinsätze können speziell beim WSL den Schalldruck signifikant reduzieren. Eine geeignete Blende ermöglicht daneben die gezielte Beeinflussung der Innenströmung für eine Optimierung der räumlichen Ausbreitung und der vertikalen Geschwindigkeit der Tröpfchenwolke.

Interessant wäre auch eine Analyse des Sprays zur Quantifizierung der Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Sprayqualität. Diesbezüglich müsste eine geeignete Messtechnik identifiziert werden, die an den sehr schnellen Versuchsablauf adaptiert werden kann. Versuche mit dem Spraytec von Malvern (s. Kap. 5.5) wurden zwar durchgeführt, haben aber leider keine verwertbaren Ergebnisse gebracht: das Spray ist selbst in einer Entfernung von 1 m vom WSL-Auslass optisch zu dicht für das Messgerät, die Transmission des Lasers fällt auf 0 %.

7 Versuchsergebnisse BUL

Wasser ist ein weitgehend umweltfreundliches Löschmittel. Es hat eine sehr hohe Verdampfungsenthalpie und dadurch ein hohes Wärmebindungsvermögen (s. Kap. 2.3.1). Für einen effizienten Einsatz als Löschmittel ist es notwendig, das Wasser fein zu zerstäuben. Dies führte zur Entwicklung von verschiedenen Technologien zur Brandbekämpfung, die auf der Wassernebel-Technologie beruhen (s. Kap. 2.4).

Kleine Anfangsdurchmesser bewirken eine schnelle Verdampfung, dem Brand wird die Wärme schneller entzogen. Kleine Tröpfchendurchmesser bedeuten aufgrund des geringeren Masse-zu-Oberfläche-Verhältnis und der Luftreibung eine geringere Fluggeschwindigkeit. Dies verlängert zwar die Verweilzeit in der Flammenzone, das fein zerstäubte Tröpfchenspray weist aber ein schlechteres Flugverhalten auf. Dieses wird stark beeinflusst durch das Tröpfchenkollektiv (Tröpfchengrößenverteilung, räumliche Ausbreitung, Geschwindigkeit und Massenstrom).

Im Rahmen dieser Arbeit sind die fluiddynamischen Eigenschaften des konzipierten Brandunterdrückungslöschers untersucht worden. Die Ergebnisse geben Einblick in die Zusammenhänge und Abhängigkeit einzelner Parameter der Versuchsanlage. Basierend auf diesen Ergebnissen und in Vergleich mit den Versuchsergebnissen zum Wasserschocklöcher (s. Kap. 6) kann ein effizientes Feuerlöschsystem entwickelt werden, das einen hohen Reifegrad in der Entwicklung aufweist.

Die Untersuchungen werden dabei im experimentellen Teil dieses Kapitels unterteilt in die Analyse der Innen- und Aussenströmung und eine Energieanalyse. Anhand der Änderungen einzelner Betriebsparameter werden ihre Eigenschaften und Auswirkungen auf das Verhalten des Gesamtsystems ersichtlich. Im Anschluss an die Darstellung der Ergebnisse wird versucht, in Bezug auf die Human-

verträglichkeit der Versuchsanlage eine Aussage zu treffen. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und bewertet.

7.1 Versuchsbeschreibung und -ablauf

Die Versuchsanlage wird mit einer Düsenöffnung versehen und für die BUL-Versuche vorbereitet. Die Verschraubung vor der Düse wird geöffnet und eine Berstmembran (BS2) wird eingesetzt. Anschließend wird der Löschmittelbehälter mit 1,0 l Wasser gefüllt, die Berstscheibe BS1 eingesetzt und mittels der hydraulischen Flanschspanneinrichtung verschlossen.

Im Gasgenerator werden die entsprechenden Partialdrücke von Luft und Wasserstoff eingestellt und gezündet. Dadurch baut sich sehr schnell ein sehr hoher Druck mit einer hohen Temperatur auf. Die Berstscheibe 1 reißt und gibt nahezu den gesamten Querschnitt frei. Das Gas durchströmt den Blendeneinsatz und prallt anschließend auf die Wasseroberfläche im Löschmittelbehälter. Dabei werden Gas und Wasser, je nach Versuchsbedingungen, miteinander vermischt. Während dieser Phase wird die Berstscheibe 2 durch den Überdruck zerstört und das Wasser fängt an, durch die Düse zu strömen und wird als feines Spray im Raum verteilt. Ist der größte Teil des Wassers aus dem Löschmittelbehälter ausgetrieben worden, so entweicht das Restgas mit kleinen Beimengungen an Wasser aus dem Druckbehälter. Ein typischer BUL-Versuch dauert etwa 5-8 Sekunden, die eigentliche Sprühdauer beträgt dabei 1,5 bis 4 Sekunden.

7.2 Volumenänderungsarbeit

Zur Charakterisierung des BUL hat sich die Volumenänderungsarbeit W_V als universelle Bezugsgröße bewährt. Sie ist definiert als

$$dW_V = -p dV . \quad (7.1)$$

Versuche mit unterschiedlichen Versuchsparametern wie Kalt- und Heißgas, Berstdruck, Blendeneinsätze, mit und ohne Berstscheibe 1 u.a. lassen sich durch die Volumenänderungsarbeit beschreiben und über diesen Parameter mit anderen Versuchen vergleichen.

Die Änderung des Volumens kann auf eine Längenänderung (Höhe der Phasengrenzfläche im Löschmittelbehälter) zurückgeführt werden. Die Phasengrenzfläche sinkt mit konstanter Geschwindigkeit $u = \bar{u}$ im Laufe des Versuchs ab, somit ergibt sich:

$$dV = A dl = A \bar{u} dt . \quad (7.2)$$

Für die Volumenänderungsarbeit ergibt sich:

$$dW_V = -A \bar{u} p dt . \quad (7.3)$$

In den BUL-Versuchen hat sich gezeigt, dass die Phasengrenzfläche mit konstanter Geschwindigkeit absinkt. Dadurch kann die Volumenänderungsarbeit durch Integration berechnet und auf den Volumenstrom und den zeitlichen Druckverlauf zurückgeführt werden:

$$W_V = -A \bar{u} \int_1^2 p(t) dt = -\bar{V} \int_1^2 p(t) dt . \quad (7.4)$$

Dabei bezeichnet der Zustand 1 den Beginn des Sprühvorgangs und der Zustand 2 dessen Ende. Der konstante mittlere Volumenstrom \bar{V} wird aus den Videodaten bestimmt, der Druckverlauf $p(t)$ ergibt sich aus den entsprechenden Druckmessungen.

7.3 Innenströmung

Die Abläufe und Vorgänge der fluid- und thermodynamischen Wechselwirkung des Treibgases mit dem Löschmittel im Löschmittelbehälter werden als Innenströmung bezeichnet. Zentrale Fragestellungen zur Innenströmung sind: Was passiert, wenn das Treibgas unter hohem Druck und hoher Temperatur expandiert und auf das Löschmittel trifft? Bleiben die Phasen getrennt oder mischen sie sich (und/oder entmischen sie sich später eventuell wieder)? Welche Parameter beeinflussen den Volumenstrom durch die Düse?

In den folgenden Teilabschnitten werden die Phasemischung und der Volumenstrom des Wassers im Löschmittelbehälter detailliert betrachtet, um die oben angeführten Fragen zur Innenströmung zu beantworten.

7.3.1 Phasenmischung

Die Strömung in der Düse kann nicht direkt beobachtet werden. Es stellt sich aber die Frage, ob die Düse von einem zweiphasigen Gas-Wasser-Gemisch durchströmt wird. Das Wasser wird zwar meist kolbenförmig ausgetrieben, aber je nach Versuchsbedingungen werden die beiden Phasen stark miteinander verwirbelt und es sind deutlich Gasblasen zu sehen. Dies ist besonders bei hohen Berstdrücken zu beobachten (s. Abb. 7.1).

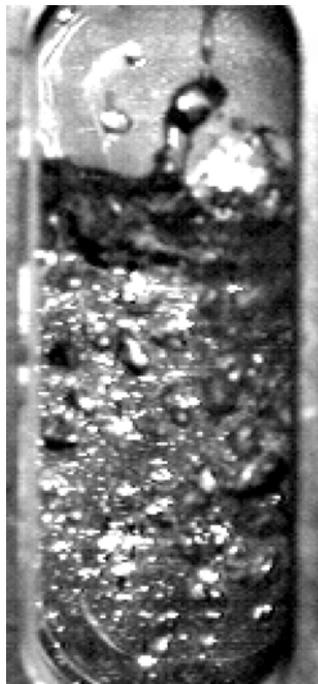


Abbildung 7.1: Gasblasen in der Wasserphase

Betrachtet man den Übergang vom Löschmittelbehälter zu der Düsenzuleitung sieht man aber in einigen Fällen, dass hier Gasbläschen entgegen der Strömungsrichtung aufsteigen, d.h. die Auftriebskraft F_A der Gasbläschen ist größer als die Kraft F_W , die durch die Strömung auf das Gasbläschen ausgeübt wird. Betrachtet man den Grenzfall, dass der Betrag der Auftriebskraft gleich dem Strömungswiderstand ist:

$$F_A = F_W , \quad (7.5)$$

so ergibt sich mit der Auftriebskraft

$$F_A = V \varrho_L g \quad (7.6)$$

und der Kraft auf die Gasblase durch die Wasserströmung mit der Geschwindigkeit v_l :

$$F_W = \frac{1}{2} c_w A \varrho_L v_l^2 \quad (7.7)$$

für eine kugelförmige Gasblase mit dem Volumen

$$V = \frac{\pi}{6} D^3 \quad (7.8)$$

und der Querschnittsfläche

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (7.9)$$

der Durchmesser der Gasblase, bei dem Auftriebs- und Widerstandskraft betragsmäßig gleich groß sind:

$$D = \frac{3}{4} \frac{c_w v_l^2}{g} . \quad (7.10)$$

Der Widerstandsbeiwert c_w einer Gasblase entspricht nach [ES97] dem einer nicht deformierbaren Kugel mit einer starren Oberfläche, wenn der Blasendurchmesser weniger als 3 mm beträgt. In Abb. 7.2 ist die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Blasendurchmessers nach Gl. 7.10 für einen Widerstandsbeiwert $c_w = 0,44$ dargestellt. Die Geschwindigkeit der Phasengrenzfläche beträgt in den durchgeführten Versuchen maximal $0,1 \text{ m/s}$, daraus ergibt sich, dass der maximale Blasendurchmesser der mit der Strömung mitgerissenen Bläschen ca. $340 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Größere Bläschen steigen im Löschmittelbehälter auf, die beiden Phasen entmischen sich wieder. Dies wurde auch auf den Videoaufnahmen beobachtet. Die Auflösungsgrenze der Bläschen lag bei dem verwendeten Versuchsaufbau bei einem Bläschendurchmesser von 1 mm , kleinere Bläschen wurden nicht erfasst.

Zur Klärung der Frage, ob die Düse ein- oder zweiphasig durchströmt wird, wird zunächst davon ausgegangen, dass die Strömung einphasig und inkompressibel ist: Die Dichte des Fluids ist konstant die Dichte von Wasser. Es wird die minimale Querschnittsfläche der Strömung berechnet. Sollte die Dichte des Fluids durch einen nennenswerten Gasgehalt für die durchgeführten Versuche unterschiedlich

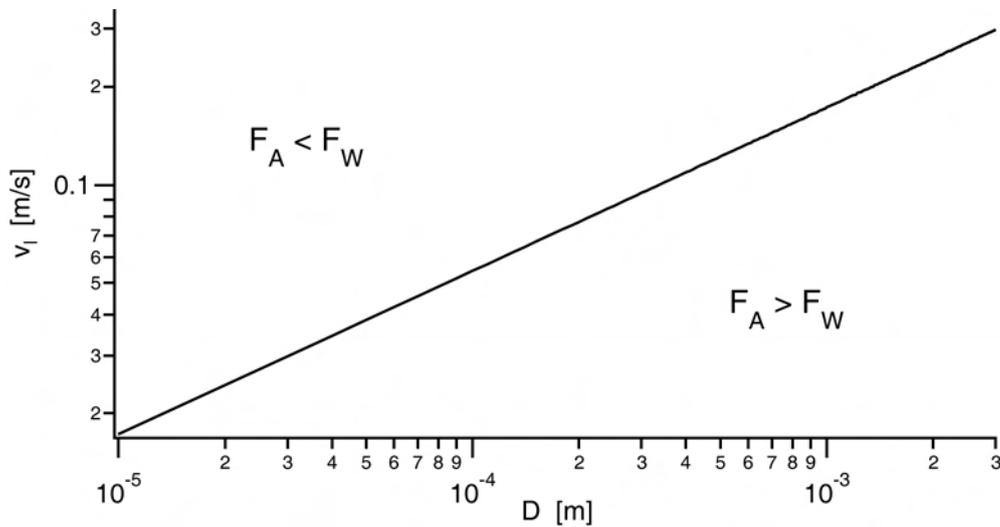


Abbildung 7.2: Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Blasendurchmesser nach Gl. 7.10

sein, so sind große Abweichungen der Querschnittsfläche der einzelnen Versuche zu erwarten (s. Kap. 2.5.4).

Allgemein lautet die Impulsbilanz für eine reibungsfreie Strömung:

$$\int_1^2 \frac{1}{\varrho} dp + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = 0 . \quad (7.11)$$

Handelt es sich um ein inkompressibles Medium mit einer konstanten Dichte ϱ , so ergibt sich die Bernoulli-Gleichung:

$$\frac{p_2}{\varrho} - \frac{p_1}{\varrho} + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = 0 . \quad (7.12)$$

Übertragen auf die Versuchsanlage bezieht sich der Zustand 1 auf den Löschmittelbehälter, der Zustand 2 beschreibt den Austritt an der Düsenöffnung. D.h. p_1 ist der (gemittelte) Innendruck während der Sprühdauer, p_2 ist der Umgebungsdruck. Die Sinkgeschwindigkeit c_1 im Löschmittelbehälter kann gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit in der Düse vernachlässigt werden.

Die Druckdifferenz kann dann als Relativdruck Δp (Überdruck gegenüber der Umgebung) beschrieben werden:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{\bar{p}_1}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} . \quad (7.13)$$

Damit ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeit c_2 :

$$c_2 = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} . \quad (7.14)$$

Der mittlere Volumenstrom \bar{V} wird aus den Videodaten ermittelt (s. Kap. 5.3). Mit der Strömungsgeschwindigkeit lässt sich die minimale durchströmte Querschnittsfläche der Düse berechnen:

$$\bar{V} = \frac{dV_W}{dt} = A_{min} c_2 . \quad (7.15)$$

Die Querschnittsfläche A_{min} bezeichnet den kleinsten durchströmten Querschnitt der Düse, c_2 ist die Geschwindigkeit an dieser Stelle. Aus den Gleichungen 7.14 und 7.15 kann A_{min} für alle Versuche berechnet werden:

$$A_{min} = \frac{\bar{V}}{\sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}} . \quad (7.16)$$

Die Ergebnisse sind in der Abb. 7.3 für alle durchgeführten Versuche mit dieser Düse dargestellt, also auch Versuche mit verschiedenen Blendeneinsätzen.

Es ergibt sich eine mittlere minimale Querschnittsfläche von $8,6 \text{ mm}^2$. Es zeigt sich somit, dass sich im Rahmen der Messgenauigkeit für alle Versuche die gleiche minimale Querschnittsfläche ergibt.

Damit konnte gezeigt werden, dass die Strömung im engsten Querschnitt in der Düse einphasig betrachtet werden kann. Wäre dies nicht möglich, so würde die Strömungsgeschwindigkeit c_2 selbst bei kleinen Gasgehalten aufgrund der geringeren Dichte und der deutlich verringerten Schallgeschwindigkeit erheblich vom einphasigen Fall abweichen (s. Kap. 2.5.3).

Zur Verifizierung dieses Zusammenhangs ist ein Sonderfall in Abb. 7.3 eingefügt worden: Es wurden zwei Versuche mit $0,5 \text{ l}$ statt $1,0 \text{ l}$ Wasservolumen durchgeführt. Die beiden Versuche wurden bei unterschiedlichen Berstdrücken ($1,3$ und $3,9 \text{ MPa}$) durchgeführt. Durch das geringe Wasservolumen werden die

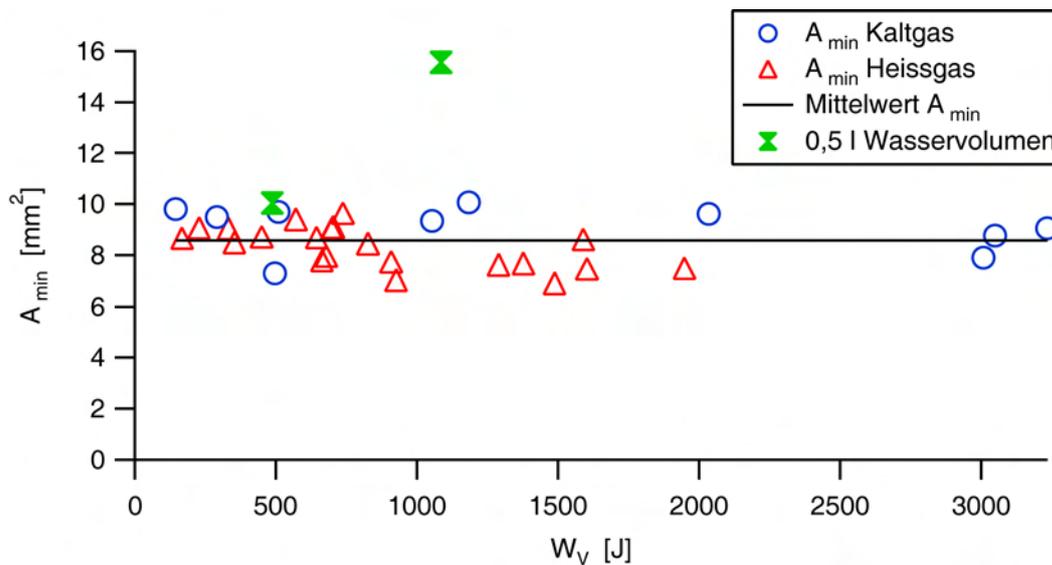


Abbildung 7.3: Minimale Querschnittsfläche in Abhängigkeit des zeitlich gemittelten Drucks

Gas- und die Wasserphase sehr stark vermischt. Im Fall des hohen Berstdrucks kommt es zu Beginn des Versuchs zu einem Gasdurchbruch, bei dem ein zweiphasiges Gemisch mit einem sehr hohen Gasanteil über einen längeren Zeitraum durch die Düse gepresst wird. Dadurch ergibt sich eine deutlich größere minimale Querschnittsfläche. In diesem Fall kann die Strömung also nicht als inkompressibel betrachtet werden. Der Versuch mit 0,5 l Wasservolumen bei einem Berstdruck von 1,3 MPa weist nicht diese starke Vermischung von Gas- und Wasserphase auf, das Wasser strömt einphasig aus. Der minimale Austrittsquerschnitt entspricht den Versuchen mit 1,0 l Wasservolumen.

In Abb. 7.4 ist die maximale Eindringtiefe des ersten Gasstroms in den mit Wasser gefüllten Löschmittelbehälter in Abhängigkeit der verwendeten Blenden dargestellt. Der Bereich der Eindringtiefe, bei dem es zu einem Durchbruch des Gasstroms durch das Wasser kommen kann, ist grau unterlegt. Es kommt in einigen Fällen zu einem Gasdurchbruch, v.a. bei den Versuchen mit 0,5 l Wasservolumen und bei den Versuchen mit der Blende 1. Die genaue Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Phasengrenzfläche zeigt aber, dass bis auf einen Fall der Gasdurchbruch nur von sehr kurzer Dauer ist (s. Abb. 7.5).

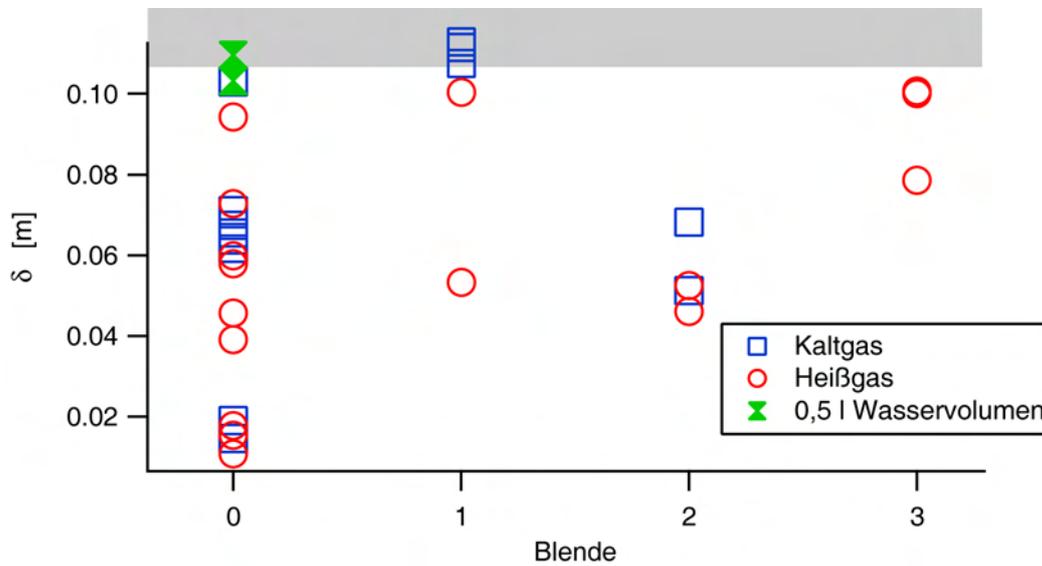


Abbildung 7.4: Eindringtiefe des ersten Gasstroms in den Löschmittelbehälter. Im grau unterlegten Bereich ist ein Gasdurchbruch möglich

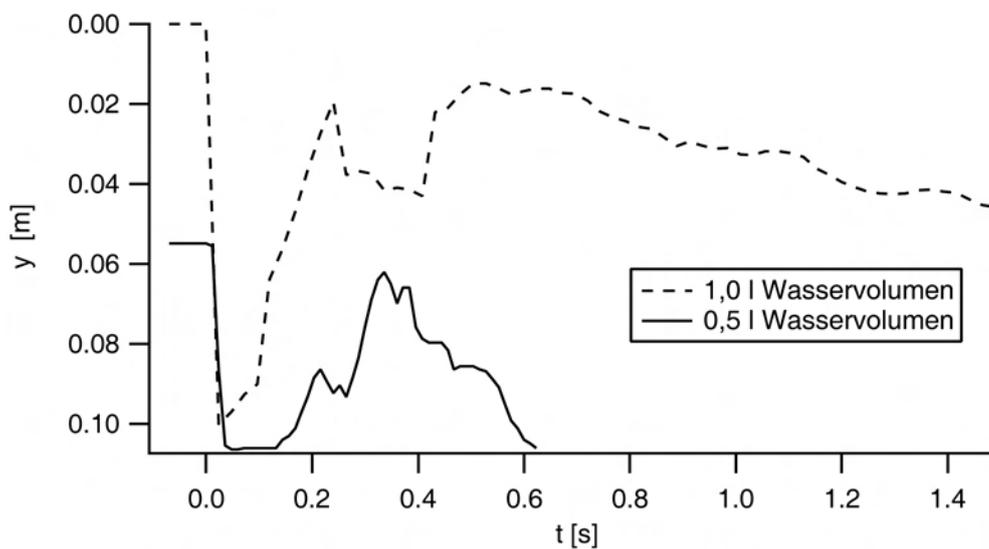


Abbildung 7.5: Zeitlicher Verlauf der Phasengrenzfläche von zwei Heißgas-Versuchen mit einem Wasservolumen von 1,0 und 0,5 l

7.3.2 Volumenstrom, K -Wert der Düse

Für den vorangegangenen Abschnitt wurde, wie in Kap. 5.3 beschrieben, der mittlere Volumenstrom bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7.6 dargestellt. Mit Hilfe der Gl. 4.1 wurde der K -Wert der Düse experimentell ermittelt, er beträgt:

$$K = 7,25 \pm 0,20 \quad (7.17)$$

und liegt damit etwas über den Herstellerangaben mit einem K -Wert von 7. Dabei unterscheiden sich Kalt- und Heißgasversuche etwas voneinander: der mittlere Volumenstrom für die Kaltgas-Versuche liegt etwas oberhalb des Volumenstroms der Heißgasversuche.

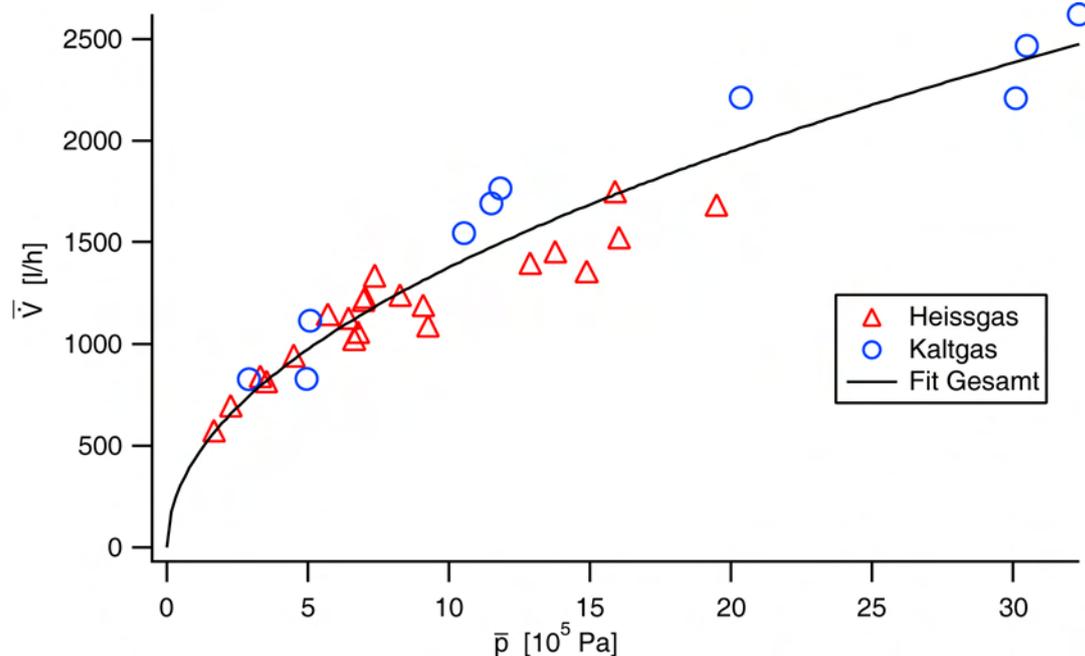


Abbildung 7.6: Experimentelle Bestimmung des K -Werts nach Gl. 4.1 für die verwendete Düse bei Kalt- und Heißgasversuchen

Der Unterschied zwischen Kalt- und Heißgasversuchen begründet sich in der Mittelwertberechnung des mittleren Drucks. Dieser berechnet sich aus der Diffe-

renz des Drucks zu Spraybeginn p_0 und bei Sprayende p_x :

$$\bar{p} = p_0 - p_x . \quad (7.18)$$

Bei den Heißgasversuchen verringert sich der Druck nicht nur durch das Ausströmen des Löschmittels, sondern zusätzlich durch die Abkühlung des Heißgases. Dies führt bei den Heißgasversuchen zu einem etwas größeren Druckabfall bis zum Sprühende des Versuchs, d.h. der mittlere Druck wird etwas größer. Dies entspricht in dem Diagramm in Abb. 7.6 einer Verschiebung der Volumenstromwerte der Heißgasversuche nach rechts zu höheren mittleren Drücken.

7.4 Außenströmung

Unter dem Begriff der Außenströmung werden die fluid- und thermodynamischen Vorgänge und Wechselwirkungen des generierten Sprays mit der Umgebung zusammengefasst. Hier erfolgen die Zerstäubung des Wassers, der sekundäre Tropfenzerfall und die Verdunstung der Tröpfchen. Die Ausbreitung des Sprays und Wechselwirkungen innerhalb der Tröpfchenwolke werden entscheidend von der Umgebung beeinflusst. In den folgenden Abschnitten werden die Abhängigkeit des Sprühkegelwinkels und der Tröpfchengrößenverteilung von der Volumenänderungsarbeit des generierten Sprays dargestellt.

Im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen wurden diese zur Analyse der Außenströmung durchgeführten Experimente mit dem Löschmittelbehälter ohne Fenster (s. Kap. 4.1) durchgeführt. Dies ermöglichte höhere Berstdrücke und ein größeres Wasservolumen von 1,5 l gegenüber 1,0 l. Aus diesem Grund sind die Volumenänderungsarbeiten größer als in den vorangegangenen Fällen.

7.4.1 Sprühkegelwinkel

Analysen von Sprayvideos zeigen, dass sich der Sprühwinkel im zeitlichen Verlauf kaum ändert, obwohl sich die Betriebsparameter wie Druck und Temperatur z.T. stark ändern. Der Sprühkegelwinkel wurde mit einem Algorithmus automatisch analysiert (s. Kap. 5.4). In Abb. 7.7 sind Sprühwinkel- und Druckverlauf eines Kaltgasversuchs abgebildet. Kurz nach Beginn des Sprayvorgangs vergrößert sich

der Sprühkegelwinkel, anschließend bleibt er, trotz einer deutlichen Abnahme des Behälterinnendrucks, während eines Versuchs nahezu konstant.

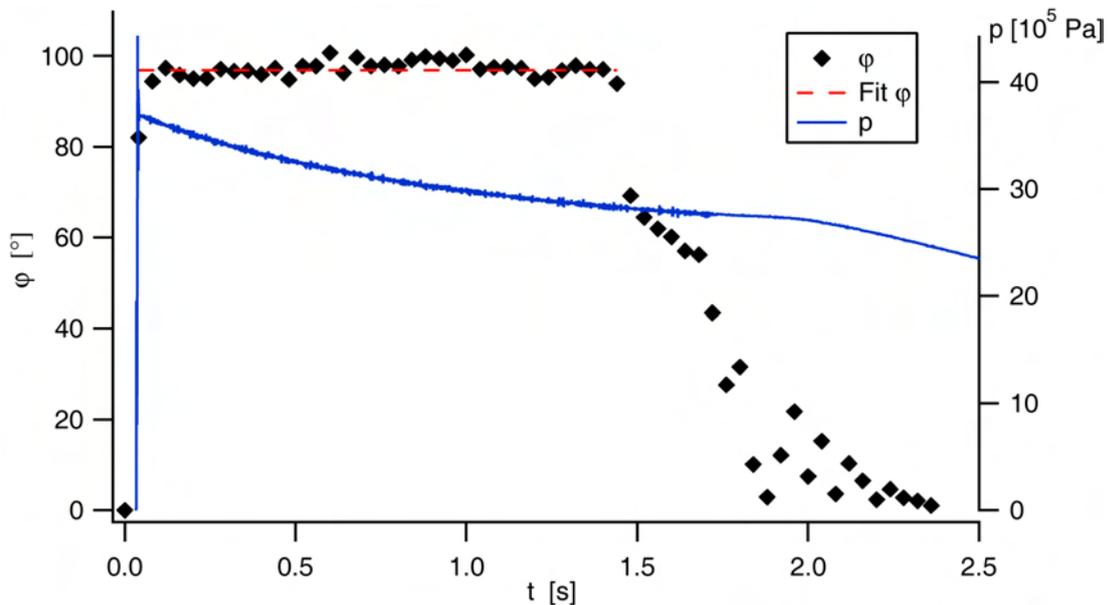


Abbildung 7.7: Zeitlicher Verlauf von Druck und Sprühwinkel

Betrachtet man aber die mittleren Sprühkegelwinkel für verschiedene Versuche, so zeigt sich eine deutliche lineare Abnahme des mittleren Sprühkegelwinkels für eine zunehmende Volumenänderungsarbeit. Der mittlere Sprühkegelwinkel $\bar{\varphi}$ ist in Abb. 7.8 für Heiß- und Kaltgasversuche in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit dargestellt.

Generell nehmen die mittleren Sprühkegelwinkel für zunehmende Volumenänderungsarbeiten ab, d.h. das Spray verengt sich. Dafür können das Entrainment und die Tröpfchengrößenverteilung verantwortlich gemacht werden.

Das Spray induziert durch den Ausströmvorgang eine Luftströmung, das Entrainment [Rot04]. Das umgebende Gas wird durch das Spray mitgerissen, im Hohlkegel entsteht ein Unterdruckgebiet. Nach [Rot01] bilden sich ein innerer und ein stärkerer äußerer (toroidaler) Luftwirbel aus. Diese Luftwirbel sorgen für eine verbesserte Verdunstung des Sprays und verringern den Sprühkegelwinkel. In [Rot01] wurde die Auswirkung des Sprays auf die Umgebung und die induzierte Luftströmung mithilfe der Zweiphasen-PIV-Methode untersucht, ein Beispiel der

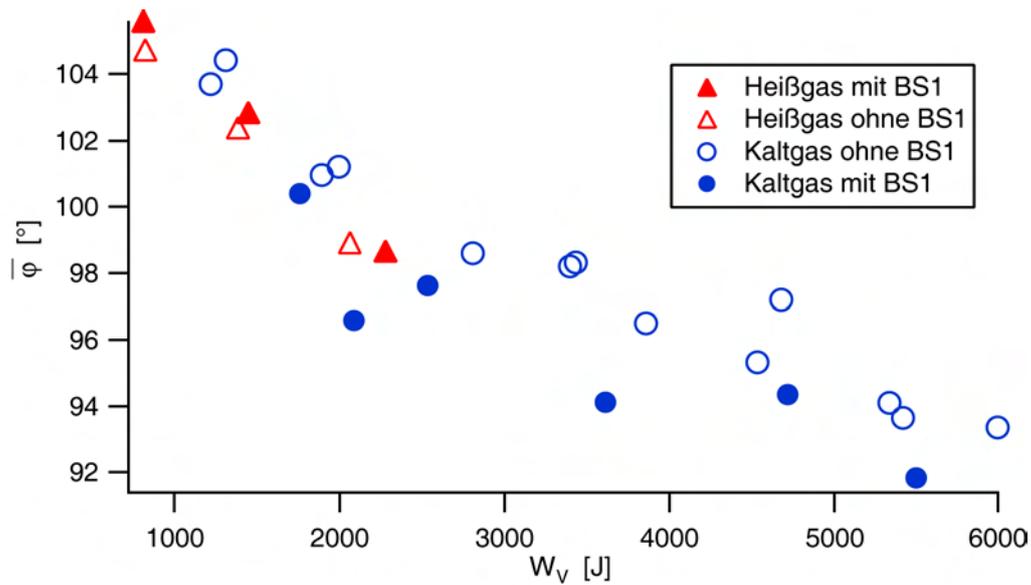


Abbildung 7.8: Mittlerer Sprühkegelwinkel $\bar{\varphi}$ in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit W_V

Spray- und der Luftströmung ist in Abb. 7.9 dargestellt.

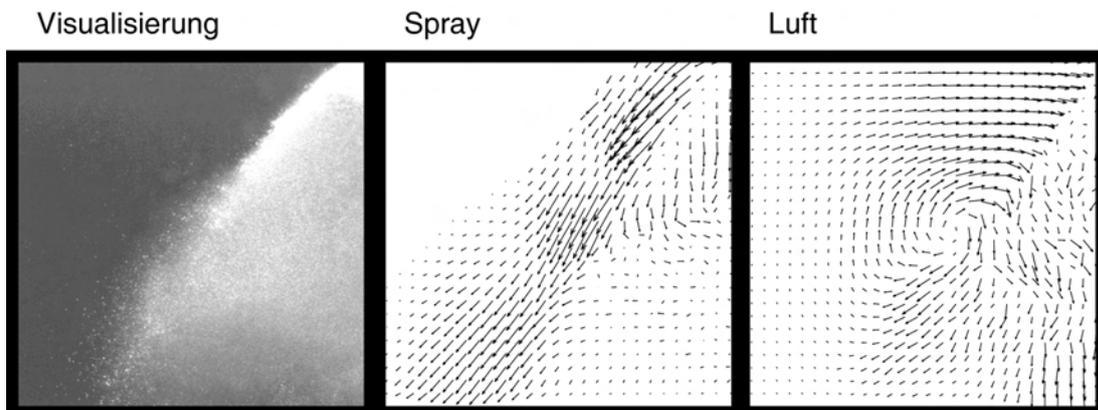


Abbildung 7.9: Zweiphasen-PIV (Spray- und Luftströmung) eines Hohlkegelsprays (aus: [Rot01])

In Bezug auf die Ergebnisse des Sprühkegelwinkels bedeutet dies: Die Sprühkegelwinkel stabilisieren sich zu Beginn des Sprayvorgangs, da sich die Luftströmung erst ausbilden muss (s. Abb. 7.7). Nach etwa 100 ms ist ein quasistationärer Zustand erreicht, der Sprühkegelwinkel ändert sich erst wieder gegen Ende des

Sprayvorgangs, wenn das Wasser fast vollständig aus dem Löschmittelbehälter ausgetrieben worden ist.

Die mittlere Tröpfchengrößenverteilung wird in Kap. 7.4.2 ausführlich erläutert. Der mittlere Sauterdurchmesser d_{32} nimmt mit zunehmender Volumenänderungsarbeit ab. In Abb. 7.10 ist der Sprühkegelwinkel in Abhängigkeit des mittleren Sauterdurchmessers dargestellt.

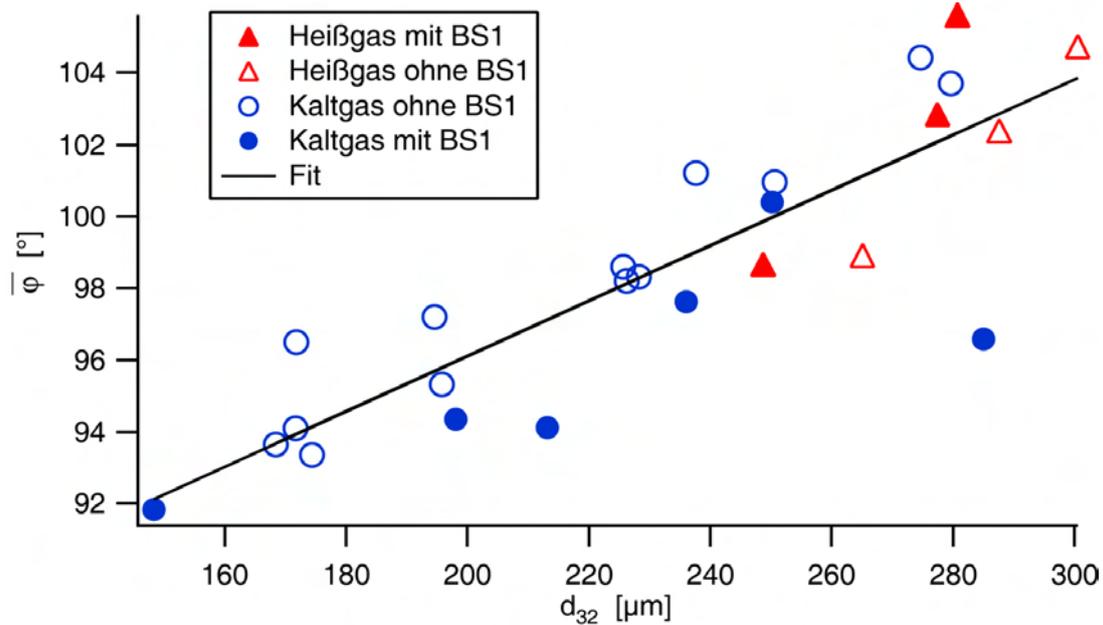


Abbildung 7.10: Mittlerer Sprühkegelwinkel $\bar{\varphi}$ in Abhängigkeit des Sauterdurchmessers d_{32}

Ein höherer Volumenstrom hat somit eine höhere Sprayaustrittsgeschwindigkeit und ein feineres Spray zur Folge. Die toroidalen Luftwirbel und der Unterdruck im Hohlkegel werden verstärkt, gleichzeitig wirken sie auf kleinere und leichtere Tröpfchen, so dass sich der Sprühkegelwinkel verkleinert. Dies führt zu der beobachteten Abnahme des Sprühkegelwinkels bei Zunahme der Volumenänderungsarbeit.

7.4.2 Tröpfchengrößenverteilung

In Abb. 5.17 ist die Messung der Tröpfchengrößenverteilung eines Versuchs in Abhängigkeit der Versuchsdauer dargestellt. Neben den charakteristischen Norm-

durchmessern wurde dabei auch der mittlere Sauterdurchmesser d_{32} des Sprays ermittelt. Mit Hilfe des Sauterdurchmessers kann die Zerstäubungsenergie berechnet werden (s. Kap. 7.5).

Der Sauterdurchmesser wurde nach dem in Kap. 5.5 vorgestellten Verfahren bestimmt. In Abb. 7.11 ist der Sauterdurchmesser des gesamten Tröpfchenkollektivs der einzelnen Heiß- und Kaltgasversuche in Abhängigkeit von der Volumenänderungsarbeit dargestellt.

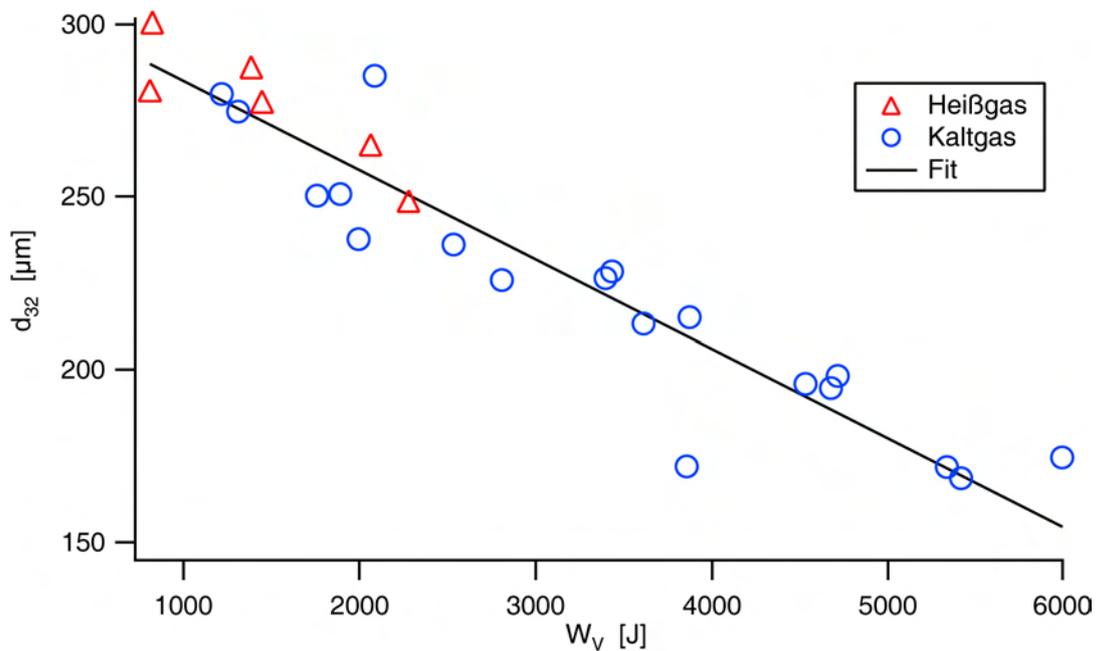


Abbildung 7.11: Sauterdurchmesser in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit

Es zeigt sich, dass der Sauterdurchmesser linear mit Zunahme der Volumenänderungsarbeit abnimmt. Einer Zunahme der Volumenänderungsarbeit um beispielsweise 1000 J entspricht eine Abnahme des Sauterdurchmessers um 26 μm .

In Abb. 7.12 sind die Nenndurchmesser DV10, DV50 und DV90 für alle Versuche dargestellt. Auch hier ist eine lineare Abhängigkeit jedes dieser Durchmesser von der Volumenänderungsarbeit sehr gut zu sehen.

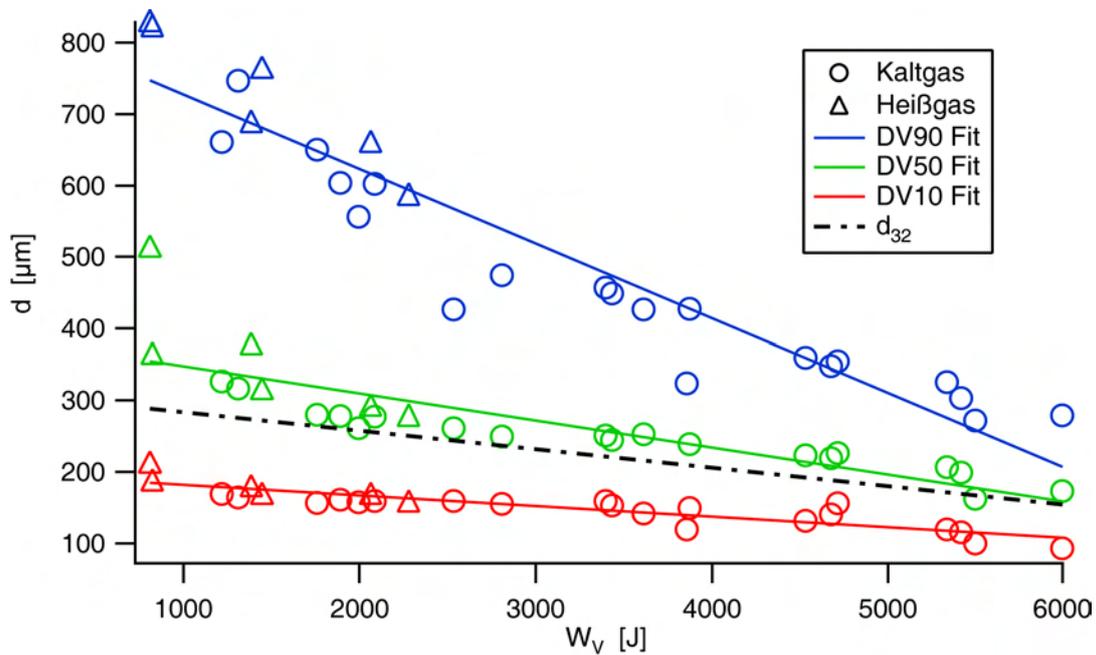


Abbildung 7.12: Verschiedene Nenndurchmesser in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit

Die Homogenität eines Sprays wird über die relative Verteilungsbreite

$$\frac{DV90 - DV10}{DV50} \quad (7.19)$$

bestimmt, sie ist in Abb. 7.13 in Abhängigkeit von der Volumenänderungsarbeit dargestellt. Mit einer höheren Volumenänderungsarbeit nimmt die Verteilungsbreite deutlich ab, das Spray wird homogener.

7.5 Energetische Betrachtung der Zerstäubung

In diesem Abschnitt werden die relevanten Energieterme des Heißgassystems bilanziert. Diese sind die Volumenänderungsarbeit und die Zerstäubungsenergie. Die Volumenänderungsarbeit wurde bereits in Abschnitt 7.2 ausführlich behandelt, auf die Zerstäubungsenergie wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

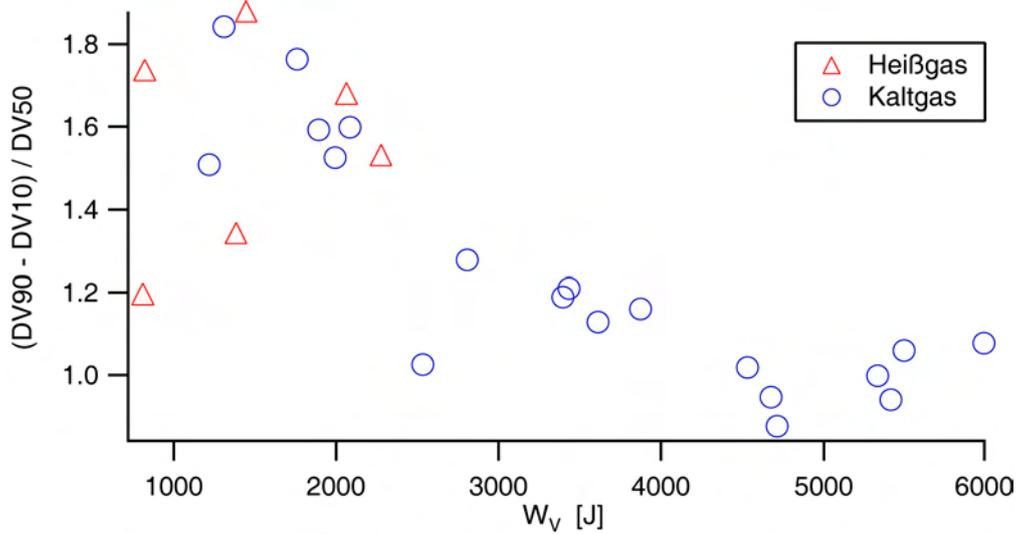


Abbildung 7.13: Relative Verteilungsbreite in Abhängigkeit von der Volumenänderungsarbeit

Die minimale Energie E_{min} , die zum Zerstäuben aufgewendet werden muss, ist direkt proportional zur Oberflächenspannung σ und der Vergrößerung der Phasengrenzfläche ΔA :

$$E_{min} \sim \sigma \Delta A . \quad (7.20)$$

Die Ausgangsoberfläche kann gegenüber der Oberfläche A_{TK} eines Tröpfchenkollektivs vernachlässigt werden:

$$\Delta A \approx A_{TK} . \quad (7.21)$$

Sind die Tröpfchen kugelförmig, so gilt mit Gl. 5.1:

$$d_{32} = \frac{d_{32}^3}{d_{32}^2} = \frac{6 \frac{\pi}{6} d_{32}^3}{\pi d_{32}^2} = 6 \frac{V_{Tropfen}}{A_{Tropfen}} . \quad (7.22)$$

Für die Oberfläche eines Tropfens ergibt sich somit

$$A_{Tropfen} = 6 \frac{V_{Tropfen}}{d_{32}} . \quad (7.23)$$

Die gesamte Oberfläche des Tröpfchenkollektivs ist

$$A_{TK} = N A_{Tropfen} = N 6 \frac{V_{Tropfen}}{d_{32}} = 6 \frac{V}{d_{32}} . \quad (7.24)$$

d.h. die erzeugte gesamte Oberfläche lässt sich durch das Ausgangsvolumen und den Sauterdurchmesser berechnen. Aus dieser ergibt sich die zur Zerstäubung minimal aufzuwendende Energie (Gl. 7.20):

$$E_{min} = \sigma 6 \frac{V}{d_{32}} . \quad (7.25)$$

In Abb. 7.14 ist die Zerstäubungsenergie für die einzelnen Kalt- und Heißgasversuche aufgeschlüsselt. Es ergibt sich im Rahmen der Versuche eine lineare Abhängigkeit von Volumenänderungsarbeit und Zerstäubungsenergie. Dies ist nicht verwunderlich, da sich die Zerstäubungsenergie E_{min} aus dem Sauterdurchmesser d_{32} berechnet (s. Gl. 7.25), der eine lineare Abhängigkeit von der Volumenänderungsarbeit besitzt (s. Abb. 7.11).

Betrachtet man die Zerstäubungsenergie und die Volumenänderungsarbeit der Heißgasversuche, so kann man diese auf die eingesetzte Stoffmenge an Wasserstoff beziehen. Dies ist in Abb. 7.15 dargestellt. Der Wirkungsgrad für die Zerstäubungsenergie liegt, bezogen auf die Volumenänderungsarbeit, bei etwa 0,1%. Dies entspricht einem typischen Wirkungsgrad für diesen Düsentyp.

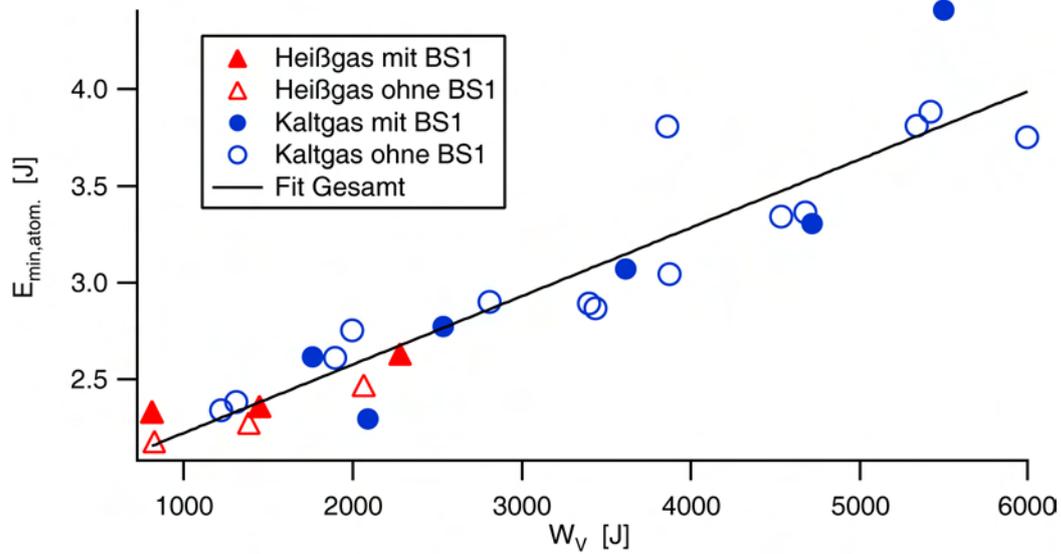


Abbildung 7.14: Zerkleinerungsenergie E_{\min} in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit W_V für Kalt- und Heißgasversuche

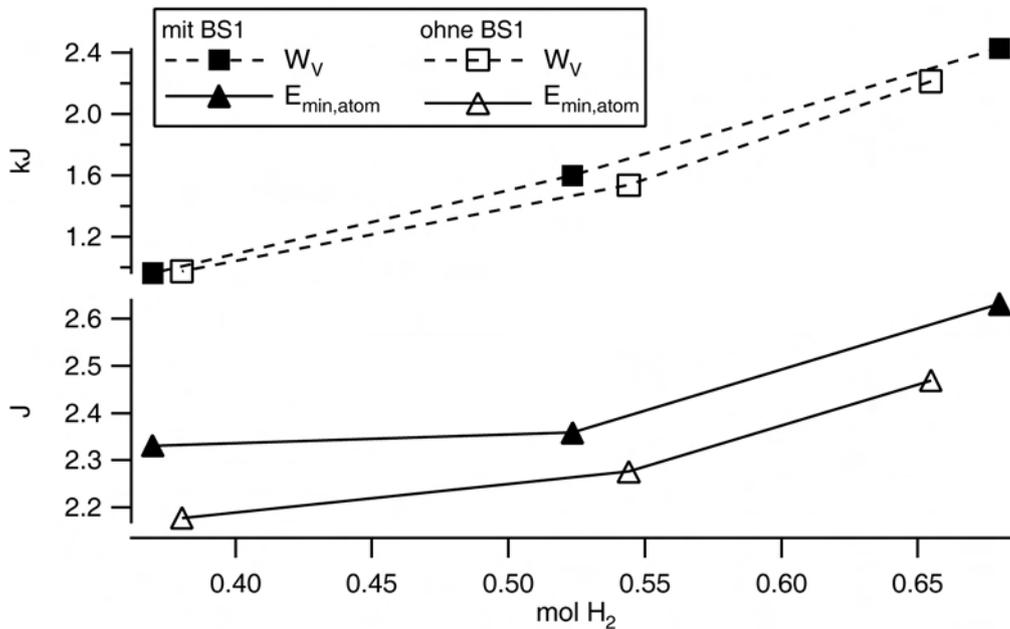


Abbildung 7.15: Energiebilanz

7.6 Kriterium Humanverträglichkeit

Abschließend sollte die Humanverträglichkeit des BUL geprüft werden. Humanverträglichkeitskriterien in Bezug auf den BUL sind:

- Schalldruck
- Temperaturen des ausströmenden Wassers und des nachströmenden Gases
- mechanische Belastungsgrenzen: beschleunigte Fragmente, Impuls des Wassers

7.6.1 Schalldruck

Der Schalldruck ist das Hauptkriterium der Humanverträglichkeit. Schalldruckmessungen an dem WSL-Aufbau haben Impuls-Schalldrücke bis zu 1000 Pa ergeben. Dies entspricht einem Schallpegel von 154 dB. Die Begriffe Schalldruck und Schallpegel werden im Anhang (s. Kap. C) kurz erläutert.

Eine Orientierung für humanverträglichen Schalldruck oder -pegel liefert der Arbeitsschutz: ab 85 dB(A) spricht man von einem *Beurteilungspegel* (s. Tabelle 7.1), hier muss vom Arbeitgeber ein Gehörschutz zur Verfügung gestellt werden, ab 90 dB(A) muss dieser auch vom Arbeitnehmer benutzt werden. Ständige Schallpegel von über 85 dB überlasten das Innenohr und führen durch Sauerstoffmangel zur Zerstörung der Haarzellen.

Nicht nur chronische Lärmeinwirkung führt zu Schäden des Gehörs. Auch kurze Schallereignisse von über 130 dB(A) (z.B. ein Düsenflugzeug) können zu einem akuten akustischen Trauma führen. Dabei kommt es direkt zur mechanischen Schädigung der Haarzellen. Der Schweregrad der Läsion ist abhängig von Schallpegel und Frequenz, je größer der Schallpegel, desto geringer ist die Chance auf Heilung. Zerstörte Haarzellen können nicht regeneriert werden.

Für Einwirkzeiten von weniger als 8 Stunden sind keine Gehörschäden zu erwarten, wenn die in Tab. 7.1 aufgelisteten Bedingungen erfüllt sind [VBG97] [HVB01]. Dabei darf ein Maximalpegel von 140 dB zu keiner Zeit erreicht werden.

max. Schallpegel [dB(A)]	Wirkzeit [min]
88	240
91	120
94	60
97	30
100	15
105	4,8

Tabelle 7.1: Wirkzeit und maximaler Schallpegel für einen Beurteilungspegel von 85 dB(A)

Zur Beurteilung der Humanverträglichkeit des BUL wurden Schalldruckmessungen am Versuchsaufbau durchgeführt. Dabei wurden Kalt- und Heißgasversuche durchgeführt. Die Kaltgasversuche wurden bei unterschiedlichen Berstdrücken mit der Blende 0 durchgeführt, bei den Heißgasversuchen wurden die verschiedenen Blenden verwendet. Die Ergebnisse des maximalen Schalldrucks $p_{S,max}$ der Messungen sind in Abb. 7.17 dargestellt. Zunächst soll aber der Verlauf des Schalldrucks anhand von zwei Beispielen näher erläutert werden. In Abb. 7.16 sind zwei Heißgasmessungen hoher Volumenänderungsarbeit mit Blende 0 und Blende 3 gegenübergestellt. Der Verlauf des Schalldrucks lässt sich generell in zwei Phasen einteilen: die erste Phase ist die eigentliche Spray-, die zweite die Nachlaufphase.

In der Sprayphase wird das Wasserstoff-Luft-Gemisch gezündet, die Berstscheiben werden zerstört, das Wasser wird durch die Düse gepresst und fein im Raum zerstäubt. Dabei entsteht der Schall direkt durch den instationären thermodynamischen und strömungsmechanischen Vorgang der Druck- und Heißgaserzeugung. Durch den Zerstäubungsvorgang des Wassers in das Umgebungsmedium wird Schall direkt abgestrahlt.

Ist das Wasser weitgehend aus dem Löschmittelbehälter getrieben, beginnt die Nachlaufphase. In dieser entweicht das z.T. noch unter hohem Druck stehende Restgas mit geringen Wasserresten über die Düse. Dieser Vorgang der Expansion

des Restgases dominiert die Schallerzeugung in der Nachlaufphase

Betrachtet man den Maximalwert des Schalldrucks, so zeigt sich ein Unterschied zwischen Kalt- und Heißgasversuchen: bei den Heißgasversuchen liegt der maximale Schalldruck in der Sprayphase, bei den Kaltgasversuchen dagegen in der Nachlaufphase (s. Anhang C.1). Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Gasdruck zum Ende der Sprayphase bei Heißgasversuchen aufgrund der Abkühlung durch die Versuchsanlage stärker absinkt, als bei den Kaltgasversuchen. Das heiße Restgas entweicht unter geringerem Druck. Hauptverantwortlich für die hohe Schalldruckspitze ist allerdings die Zündung des Gasgemisches, dabei wird die Anlage schlagartig mit hohen Drücken belastet. Dieser mechanische Belastungsvorgang der Versuchsanlage verursacht den hohen maximalen Schalldruck zu Beginn der Sprayphase.

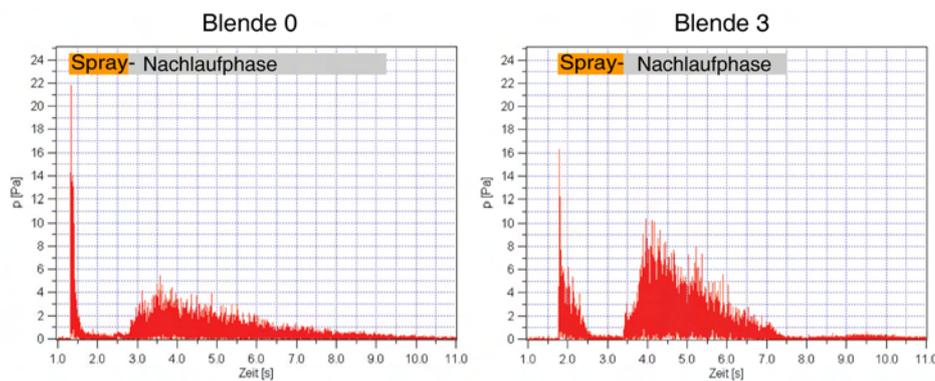


Abbildung 7.16: Schalldruckverlauf eines Heißgasversuchs mit Blende 0 und 3

Die maximalen Schalldrücke in der Sprayphase sind in Abb. 7.17 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass mit höheren Volumenänderungsarbeiten der Schalldruck innerhalb einer Versuchsreihe stark ansteigt. Für die Heißgasversuche zeigt sich, dass der maximale Schalldruck signifikant durch den Einsatz von Blenden in den Gasstrom gesenkt werden kann.

Durch die Blendeneinsätze wird der Gasmassenstrom aus dem Gasgenerator in den Löschmittelbehälter verringert. Dadurch läuft die Anfangsphase des Spraybeginns etwas langsamer ab und die direkte Schallabstrahlung durch die instationäre Fluidbewegung in die Umgebungsluft wird vermindert. Allerdings vergrößert sich

dadurch die Halbwertsbreite des Schallpeaks, d.h. die Schallabstrahlung wird zeitlich verlängert. Durch diese Maßnahme kann aber der für die Humanverträglichkeit entscheidende maximale Schalldruck deutlich reduziert werden.

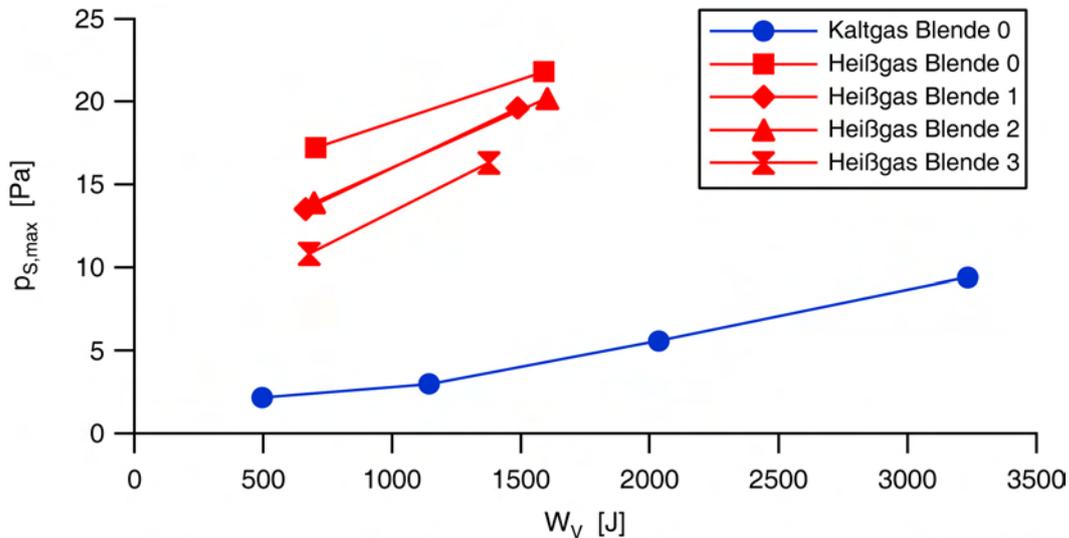


Abbildung 7.17: Maximaler Schalldruck der Sprayphase für verschiedene Blendeneinsätze bei Kalt- und Heißgas

7.6.2 Temperatur

Die Temperatur des ausströmenden Wassers und des nachströmenden Gases können für den Menschen kritische Werte erreichen. Eine feste Definition für maximale Temperaturen kann aber nicht so einfach gegeben werden: die Verbrennungstemperatur der Haut hängt im Wesentlichen davon ab, ob sie durch Kleidung geschützt ist oder wie die Hitze auf sie einwirkt (Strahlung oder heißer Luftstrom). Laut [HVB01] wurden bisher keine Grenzwerte für Temperaturen heißer Oberflächen und Gase zum Schutz vor Verbrennungen in rechtsverbindlichen Vorschriften festgelegt.

In den BUL-Versuchen hat sich herausgestellt, dass die Temperaturen des Tröpfchensprays und des nachströmenden Gases unkritisch sind. Sie übersteigen Temperaturen von 40°C nicht. Dies konnte durch einfache Messungen und Selbstversuche überprüft werden.

Durch die Entspannung des heißen Gases kühlt sich dieses stark ab. Unterstützt wird dies durch die Verdunstung bzw. Verdampfung des mit entweichenden Restwassers.

7.6.3 Mechanische Belastungsgrenzen

Die physikalischen Belastungen, die durch den BUL auf eine Person ausgeübt werden können, sind aufgrund seines Prinzips (fragmentationsfreie Berstmembranen, Spraygeneration über eine Düse) als unkritisch zu betrachten.

Ein Druckanstieg durch Verdampfung des Wassers in einem geschlossenen Raum ist vergleichbar mit den handelsüblichen Feuerlöschsystemen (z.B. Sprinkleranlage) und stellt keine kritische Belastung dar.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ein Konzept eines humanverträglichen Brandunterdrückungslöschers entwickelt, eine modulare Versuchsanlage konstruiert und die thermo- und fluiddynamischen Eigenschaften des Systems untersucht.

Die Analyse der Interaktion des schlagartig expandierenden Gases mit dem Löschmittel und die Auswirkungen einzelner Parameter auf das Gesamtsystem wurden mit selbst entwickelten bildanalysierenden Verfahren durchgeführt. Mit Hilfe der digitalen Bildfolgenanalyse konnten wichtige Größen wie die mittlere Geschwindigkeit der Phasengrenzfläche und der Volumenstrom ermittelt werden. Mit einem neu entwickelten Gittersensor konnte der Gasgehalt im Schnitt längs der Mittelachse aufgezeichnet werden. Die Ergebnisse korrelieren hier sehr gut mit der Analyse der Videodaten. Die Sprühkegel-Analyse und die Vermessung des Tröpfchenspektrums erlauben die Charakterisierung des Sprays.

Die Volumenänderungsarbeit wurde als universelle Bezugsgröße für das System ermittelt. Bauliche Veränderungen der Versuchsanlage (z.B. durch ein größeres Volumen des Gasgenerators oder durch andere Blendeneinsätze) können über die Volumenänderungsarbeit einfach erfasst werden und brauchen nur in Ausnahmefällen gesondert behandelt zu werden.

Durch die Blendeneinsätze werden die Gas- und Wasserphase zu Beginn des Versuchs z.T. stark durchmischt. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Strömung des Wassers durch die Düse einphasig betrachtet werden kann.

Die Analyse des erzeugten Sprays zeigt keine Abhängigkeit des Sprühkegelwinkels vom Behälterinnendruck, der Sprühkegelwinkel verengt sich für eine größere Volumenänderungsarbeit aufgrund des Entrainments und der feiner zerstäubten Wassertröpfchen. Das Tröpfchenspektrum weist eine lineare Abnahme des Sauterdurchmessers in Abhängigkeit von der Volumenänderungsarbeit auf, die Verteilungsbreite nimmt ebenfalls ab, das Tröpfchenspektrum wird homogener. Über

den gemessenen Sauterdurchmesser des Sprays wurde die Zerstäubungsenergie berechnet. Sie nimmt linear mit der Volumenänderungsarbeit zu.

Der Schalldruck ist das entscheidende Kriterium für die Humanverträglichkeit. Im Vergleich zu den Ergebnissen des WSL kann beim BUL der Schalldruck durch verschiedene Blendeneinsätze reduziert werden. Im Gegensatz zum WSL führt bei den BUL-Versuchen der Einfluss der Blende nicht zu einer Verschlechterung der Sprayausbreitung und Sprayqualität.

Im Verlauf der Versuche mit dem BUL haben sich folgende Auslegungsparameter herauskristallisiert:

Berstscheibensystem

Über die Verwendung unterschiedlicher Folienstärken kann ein genau definierter Berstdruck präzise eingestellt werden. Durch Einbau der Berstscheibe 1 wird der Druckgradient beim Aufreißen der Berstscheibe deutlich erhöht. Dies hat einen deutlichen Einfluss auf die räumliche Ausbreitung des Sprays und auf das Entrainment.

Blendeneinsätze

Die Blendeneinsätze verringern den Gasmassenstrom in den Löschmittelbehälter, der Sprayvorgang wird verlängert. Dies reduziert den Schalldruck signifikant, ohne Einfluss auf die Sprayerzeugung zu zeigen.

Düsen

Die Düse bestimmt durch ihren Aufbau und ihre Auslegung entscheidend Tröpfchenspektrum, Druckverlust und Massenstrom. Die Auswahl der *idealen* Düse muss unter Berücksichtigung der Betriebsparameter der Anlage, des Einsatzorts und des Feuerlöschszenarios getroffen werden.

Für eine weitere Optimierung des BUL ist eine genauere Kenntnis der Interaktion von Flamme und Wassertröpfchen unerlässlich. Inzwischen gibt es erste Untersuchungen, die experimentell nachweisen, dass die Effektivität des Löschens mit

abnehmendem Tröpfchendurchmesser zunimmt. Dies bestätigen experimentelle Untersuchungen der Flammengeschwindigkeit in einem Wasserdampfnebel [AMRM99] [AMRM00]. Dabei spielt auch die Konzentration des Wasserdampfnebels eine große Rolle, da geringe Konzentrationen die Flammengeschwindigkeit offenbar sogar erhöhen können [MAMR⁺01].

Literaturverzeichnis

- [AB96] ATTOU, A ; BOLLE, L.: A global model for two-phase two component bubbly flows through orifices and abrupt contractions. In: *1996 Fluids Engineering Division Conference*, ASME, 1996
- [AL81] ALAMGIR, M. ; LIENHARD, J.H.: Correlation of Pressure Undershoot during Hot-Water Depressurization. In: *Journal of Heat Transfer* 103 (1981), S. 52–55
- [AMRM99] ABBUD-MADRID, A. ; RIEDEL, E.P. ; MCKINNON, J.T.: A Study of Flame Propagation on Water-Mist Laden Gas Mixtures in Microgravity. In: *Microgravity Combustion Workshop*, 1999
- [AMRM00] ABBUD-MADRID, A. ; RIEDEL, E.P. ; MCKINNON, J.T.: The Influence of Water Mists on Premixed Flame Propagation in Microgravity. In: *First International Symposium on Microgravity Research and Applications in Physical Sciences and Biotechnology, Sorrento, Italy*, 2000
- [Ard98] ARDEY, N.: *Struktur und Beschleunigung turbulenter Wasserstoff-Luft-Flammen in Räumen mit Hindernissen*, TU München, Dissertation, 1998
- [Bäß01] BÄSSLER, S.: *Konzeption einer Versuchseinrichtung für die Untersuchung der NO-Produktion teilverdampfter Tropfenschwärme*, TU München, Diplomarbeit, 2001

- [BB94] BUKOWSKI, R.W. ; BABRAUSKAS, V.: Developing Rational, Performance-based Fire Safety Requirements in Model Building Codes. In: *Fire and Materials* 18 (1994), S. 173–191
- [BELA68] BOROVYKH, A.E. ; ESIN, V.I. ; LEVIN, A.M. ; ANDREICHENKO, V.N.: Discharge of a Gas-Saturated Liquid Through a Venturi. In: *Lenin Komsomol Chelyabinsk Polytechnical Institute* 21 (1968), S. 888–891
- [Ble04] BLESSING, M.: *Untersuchung und Charakterisierung von Zerstäubung, Strahlausbreitung und Gemischbildung aktueller Dieseldirekteinspritzsysteme*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2004
- [Bod91] BODE, J.: *Zum Kavitationseinfluß auf den Zerfall von Flüssigkeitsfreistrahlen*, Georg-August-Universität zu Göttingen, Dissertation, 1991
- [Bos96] BOSSARD, J.A.: *Droplet Size Distributions in Sprays: Synthesis and Effects in Combustion*, Arizona State University, Dissertation, 1996
- [Buk95a] BUKOWSKI, R.W.: How to Evaluate Alternate Designs that are Based on Fire Modeling. In: *NFPA Journal* 89 (1995), S. 68–70
- [Buk95b] BUKOWSKI, R.W.: Modeling a Backdraft Incident: the fire at 62 Watts Street. In: *NFPA Journal* 89 (1995), S. 85–89
- [Bus96] BUSSENIUS, S.: *Wissenschaftliche Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes*. Verlag W. Kohlhammer, 1996
- [Bus00] BUSSMANN, M.: *A Three-Dimensional Model of an Impacting Droplet*, University of Toronto, Canada, Dissertation, 2000
- [Cao00] CAO, Y.: *The Image Analysis For Optical Spray Patternation*, Queen's University Kingston, Canada, Dissertation, 2000
- [Chi81] CHISHOLM, D.: Flow of compressible two-phase mixtures through sharp-edged orifices. In: *Journal of Mechanical Engineering Science* 23 (1981), S. 45–48

- [Dah92] DAHL, D.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Flüssigkeitszerstäubung mit Hohlkegeldüsen. In: *Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3 Nr. 302* (1992)
- [Dor94] DORFNER, V.: *Einfluss der Flüssigkeitseigenschaften auf den Zerfall eines Flüssigkeitsfilms und die resultierenden Tropfengrößen*, Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 1994
- [Ede01] EDER, A.: *Brennverhalten schallnaher und überschall-schneller Wasserstoff-Luft Flammen*, TU München, Dissertation, 2001
- [EGI+00] ECKERT, E.R.G. ; GOLDSTEIN, R.J. ; IBELE, W.E. ; SIMON, T.W. ; KUEHN, T.H. ; STRYKOWSKI, P.J. ; TAMMA, K.K. ; BAR-COHEN, A. ; HEBERLEIN, J.V.R. ; DAVIDSON, J.H. ; BISCHOF, J. ; KULACKI, F. ; KORTSHAGEN, U.: Heat transfer: a review of 1996 literature. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000), S. 1273–1371
- [ES97] EIGENBERGER, G. ; SOKOLICHIN, A.: *Modellierung und effiziente numerische Simulation von Gas-Flüssigkeits-Reaktoren mit Blasenströmungen nach dem Euler-Euler-Konzept*. DFG-Zwischenbericht zum Vorhaben Ei 131/10 - 2, 1997
- [Fab03] FABER, B.: *Konstruktion eines Sensors zur ortsaufgelösten Gasgehaltsmessung*, TU München, Diplomarbeit, 2003
- [FAYF82] FUJIKAWA, S. ; AKAMATSU, T. ; YAHARA, J. ; FUJIOKA, H.: Studies of Liquid-Vapour Phase Change by a Shock Tube. In: *Applied Scientific Research* 38 (1982), S. 363–372
- [Fis95] FISCHER, R.: Calculation of the discharge characteristic of an orifice for gas-liquid annular-mist flow. In: *Int. J. Multiphase Flow* 21 (1995), S. 817–835
- [FR00] FROHN, A. ; ROTH, N.: *Dynamics of droplets*. Springer-Verlag, Berlin, 2000

- [FWS02] FLEMING, J. W. ; WILLIAMS, B. A. ; SHEINSON, R. S.: Suppression Effectiveness of Aerosols: the Effect of Size and Flame Type. In: *Proceedings of the 2002 Halon Options Technical Working Conference, NIST SP 984, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 2002*
- [Geb96] GEBHARD, P.: *Zerfall und Verdampfung von Einspritzstrahlen aus lamellenbildenden Düsen*, TU München, Dissertation, 1996
- [GEI⁺01] GOLDSTEIN, R.J. ; ECKERT, E.R.G. ; IBELE, W.E. ; PATANKAR, S.V. ; SIMON, T.W. ; KUEHN, T.H. ; STRYKOWSKI, P.J. ; TAMMA, K.K. ; BAR-COHEN, A. ; HEBERLEIN, J.V.R. ; DAVIDSON, J.H. ; BISCHOF, J. ; KULACKI, F.A. ; KORTSHAGEN, U. ; GARRIK, S.: Heat transfer : a review of 1998 literature. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (2001), S. 253–366
- [Gio94] GIOT, M.: Two-Phase Releases. 7, number 2 (1994), S. 77–93
- [Grü99] GRÜNWARD, J.: *Konzeption, Auslegung und Konstruktion eines Druckbehälters mit Schaugläsern*, TU München, Semesterarbeit, 1999
- [Grü02] GRÜNWARD, J.: *Charakterisierung eines spraygenerierenden Prozesses*, TU München, Diplomarbeit, 2002
- [Hal94] HALLMANN, M.: *Numerische Beschreibung der Gemischbildung in Verbrennungskraftmaschinen*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1994
- [Hei87] HEISS, A.: *Numerische und experimentelle Untersuchungen der laminaren und turbulenten Konvektion in einem geschlossenen Behälter*, TU München, Dissertation, 1987
- [HH79] HASTINGS, D.L. ; HODGSON, J.P.: The Formation of an Aqueous Fog in a Shock Tube. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 12 (1979), S. 2111–2122

- [HVB01] HVBG: *BIA-Report 4/2001, Grenzwerteliste 2000*. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, 2001
- [JAYH00] JIN, Z. ; ASAKO, Y. ; YAMAGUCHI, Y. ; HARADA, M.: Fire REsistance Test for Fire Protection Materials with High Water Content. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 43 (2000), S. 4395–4404
- [Jor99] JORDAN, M.: *Zündung und Verbrennung in vorgemischten turbulenten Freistrahlen*, TU München, Dissertation, 1999
- [KCM92] KURSCHAT, T. ; CHAVES, H. ; MEIER, G.E.A.: Complete adiabatic Evaporation of Highly Superheated Liquid Jets. In: *J. Fluid Mech.* 236 (1992), S. 43–59
- [KK94] KECKE, J. ; KLEINSCHMIDT, P.: *Industrie-Rohrleitungsarmaturen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [KMt86] KITAMURA, Y. ; MORIMITSU, H. ; TAKAHASHI, T.: Critical Superheat for Flashing of Superheated Liquid Jets. In: *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 25 (1986), S. 206–211
- [Kne93] KNEER, R.: *Grundlegende Untersuchungen zur Sprühstrahlausbreitung in hochbelasteten Brennräumen: Tropfenverdunstung und Sprühstrahlcharakterisierung*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1993
- [Lab80] LABOWSKY, M.: Calculation of the burning rates and interacting fuel droplets. In: *Combustion Science and Technology* 22 (1980), S. 217–226
- [LAT78] LIENHARD, J.H. ; ALAMGIR, Md. ; TRELA, M.: Early Response of Hot Water to Sudden Release from High Pressure. In: *Journal of Heat Transfer* 100 (1978), S. 473–477
- [Led92] LEDER, A.: *Abgelöste Strömungen*. Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1992

- [Lef89] LEFEBVRE, A.H.: *Atomization and Sprays*. Hemisphere Publishing Corporation, 1989
- [Lex04] LEX, T.: *Gas-Flüssigkeitsströmung durch einen Kugelhahn*, TU München, Dissertation, 2004
- [MAMR⁺01] MCKINNON, J. T. ; ABBUD-MADRID, A. ; RIEDEL, E. P. ; GÖKOGLU, S. ; YANG, W. ; KEE, R. J.: The Water-Mist Fire Suppression Experiment: Project Objectives and Hardware Development for the STS-107 Mission. In: *Sixth International Microgravity Combustion Workshop*, Nasa, 2001
- [May82] MAYINGER, F.: *Strömungen und Wärmeübergang in Gas-Flüssigkeits-Gemischen*. Springer-Verlag, Wien, 1982
- [MF01] MAYINGER, F. ; FELDMANN, O.: *Optical Measurements. Techniques and Applications*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2001
- [Mit95] MITLER, H.E.: On the Heights of Wall-Fire Flames. In: *International Conference on Fire Research and Engineering*, 1995
- [ML99] MITRA, S. ; LI, X.: A predictive Model For Droplet Size Distribution In Sprays. In: *Atomization and Sprays* 9 (1999), S. 29–50
- [NRDR91] NGUYEN, Q.-V. ; RANGEL, R. H. ; DUNN-RANKIN, D.: Measurement and Prediction of Trajectories and Collision of Droplets. In: *International Journal of Multiphase Flow* 17, No. 2 (1991), S. 159–177
- [O'B00] O'BREIN, N.D.: *Development and Evaluation of a Liquid Jet Atomization*, The University of Tennessee, Knoxville, Dissertation, 2000
- [Ofn01] OFNER, B.: *Dieselmotorische Kraftstoffzerstäubung und Gemischbildung mit Common-Rail Einspritzsystemen*, TU München, Dissertation, 2001
- [Per63] PERRY: *Chemical Engineers Handbook*. 4. Auflage. McGraw Hill, 1963

- [POW84] PRANDTL, L. ; OSWATITSCH, K. ; WIEGHARDT, K.: *Führer durch die Strömungslehre*. Verlag Vieweg, Braunschweig, 1984
- [PZB98a] PRASSER, H.-M. ; ZSCHAU, J. ; BÖTTGER, A.: *Anordnung zur Messung der lokalen elektrischen Leitfähigkeit in Fluiden*. Offenlegungsschrift DE 197 04 609 A1, 1998
- [PZB98b] PRASSER, H.-M. ; ZSCHAU, J. ; BÖTTGER, A.: *Gittersensor zur Bestimmung der Leitfähigkeitsverteilung in strömenden Medien sowie Verfahren zur Gewinnung der Messsignale*. Offenlegungsschrift DE 196 49 011 A1, 1998
- [PZB98c] PRASSER, H.-M. ; ZSCHAU, J. ; BÖTTGER, A.: A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 9 (1998), S. 111–119
- [Rae95] RAETZO, T.: *Charakterisierung von Düsen zum Zerstäuben von Flüssigkeiten*, ETH-Zürich, Dissertation, 1995
- [Ran71] RANGER, A.A.: Shock Wave Propagation Through a Two-Phase Medium. In: *Astronautica Acta* 17 (1971), S. 675–683
- [Rem93] REMPE, A.: *Feuerlöschmittel: Eigenschaften, Wirkung, Anwendung*. Kohlhammer, 1993
- [Rot01] ROTTENKOLBER, G.: *Ottomotoren im Kaltstart: Laseroptische Messverfahren zur Charakterisierung des Kraftstofftransports*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2001
- [Rot04] ROTHENWÖHRER, M.: *Einfluss thermodynamisch metastabiler Zustände auf den Zerfall und das Mischverhalten von Flüssigkeitsstrahlen*, TU München, Dissertation, 2004
- [Rum00] RUMIN, Y.: *Numerical Studies of Fire and Sprinkler Induced Air Flows in Atria*, University of Science and Technology of China, China, Dissertation, 2000

- [RWK98] RAFFEL, M. ; WILLERT, C. E. ; KOMPENHANS, J.: *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer-Verlag, 1998
- [San97] SANKAR, S.V.: Planar Fluorescence Imager Characterizes Sprays. In: *Laser Focus World* (1997)
- [Sat02a] SATTELMAYER, T.: *Skriptum zur Vorlesung Thermodynamik II, Teil II: feuchte Luft*. TU München, 2002
- [Sat02b] SATTELMAYER, T.: *Skriptum zur Vorlesung Thermodynamik II, Teil III: Gasdynamik*. TU München, 2002
- [Sch01] SCHMALZING, C.-O.: *Theoretische und experimentelle Untersuchung zum Strahlausbreitungs- und Verdampfungsverhalten aktueller Diesel-Einspritzsysteme*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2001
- [SFAA99] SHANNAK, B. ; FRIEDEL, L. ; ALHUSEIN, M. ; AZZI, A.: Experimental investigation of contraction in single- and two-phase flow through sharp-edged short orifice. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 64 (1999), S. 291–295
- [SK65] SOVRAN, G. ; KLOMP, E.: Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-Section. In: *Proceedings of the symposium on the fluid mechanics of internal flow* (1965)
- [SM92] STEPHAN, K. ; MAYINGER, F.: *Thermodynamik 1 Einstoffsysteme*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1992
- [Str93] STRUBE, G.: *Struktur und Brenngeschwindigkeit turbulenter, vorgemischter Wasserstoff-Flammen*, TU München, Dissertation, 1993
- [Str99] STROHMEIER, K.: *Skriptum zur Übung Apparate- und Anlagenbau, Übung 1*. TU München, 1999
- [Ton96] TONG, K.: *Dampfgehalt und Druckverlust in Rohren bei Druckentlastung*, TU München, Dissertation, 1996

- [Tur00] TURNS, S.: *An Introduction to Combustion*. McGraw-Hill, 2000
- [VBG97] VERWALTUNGS-BERUFS-GENOSSENSCHAFT, VBG: *BG-Vorschrift Lärm*. Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, 1997
- [VC68] VARMA, T.D. ; CHORPRA, N.K.: Note on Two-Phase Flow Through a Nozzle. (1968)
- [VDI94] VDI: *VDI-Wärmeatlas*. 7. erweiterte Auflage. Düsseldorf : VDI Verlag, 1994
- [Wal69] WALLIS, G.B.: *One-Dimensional-Two-Phase-Flow*. Mc-Graw-Hill Book Company, 1969
- [Wal80] WALZEL, P.: Turbulenter Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen aus der Sicht der Ähnlichkeitstheorie. In: *Chemie-Ingenieur-Technik* 52 (1980), Nr. 12, S. 525–526
- [Wal90] WALZEL, P.: Zerstäuben von Flüssigkeiten. In: *Chemie-Ingenieur-Technik* 62 (1990), Nr. 12, S. 983–994
- [Wan01] WANGCUN, J.: *Study of Spray Cooling by Advanced Optical Diagnostics*, The Hong Kong University of Science and Technology, Dissertation, 2001
- [Weg75] WEGENER, P.P.: Nonequilibrium Flow with Condensation. In: *Acta Mechanica* 21 (1975), S. 65–91
- [WMD96] WARNATZ, J. ; MAAS, U. ; DIBBLE, R.W.: *Combustion, second edition*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1996
- [XP00] XU, C. ; PRINCE, L.: Gradient Vector Flow Deformable Models. In: *Handbook of Medical Imaging* (2000)
- [Xu00] XU, Q.: *Fundamental Mechanisms of Microstructural Evolution during Spray Forming*, University of California, Irvine, Dissertation, 2000

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau eines explosionsunterdrückenden Wasserschocklöschers aus einem Feststoff-Gasgenerator, einem Puffervolumen, zwei Berstmembranen und dem Löschmittel	2
1.2	Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen eines WSL nach der Zündung des Gasgenerators	2
2.1	Zündenergien in Abhängigkeit von verschiedenen Brennstoffen	6
2.2	Darstellung der oberen (o.Z.) und unteren Zündgrenze (u.Z.) eines Methan-Sauerstoff-Stickstoff-Gemisches	8
2.3	Prinzip einer Hohlkegeldralldüse	25
2.4	Filmzerfallsmodell nach Fraser [Lef89]	26
2.5	Tropfenzerfall durch Wechselwirkung mit der Umgebungsluft (aus: [Lef89])	28
2.6	Erzielbare Tropfendurchmesser D_{Tr} in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit $w_{rel,crit}$ zum Gas an der Austrittsöffnung zur Umgebung bei nicht schlagartiger Beschleunigung nach Gl. 2.16	29
2.7	Abhängigkeit der Gesamtoberfläche vom Tröpfchendurchmesser eines homogenen Sprays bei einem Gesamtvolumen von $10^{-3} m^3$	31
2.8	Zeitlicher Verlauf des quadratischen Tröpfchendurchmessers von Wasser (aus: [Tur00])	32
2.9	Doppelt logarithmisch aufgetragene Verdampfungszeit von Wassertropfen unterschiedlicher Ausgangsgröße bei verschiedenen Umgebungstemperaturen unter Vernachlässigung der Aufheizzeit	33

2.10	Ausströmgeschwindigkeit c_e und Ausflussfunktion Ψ von Luft ($\kappa = 1,4$) beim Ausströmen durch eine konvergente Düse in Abhängigkeit vom Druckverhältnis p_e/p_0	36
2.11	Strömungsformen im horizontalen Rohr (nach: [May82])	37
2.12	Schallgeschwindigkeit eines Luftblasen-Wassergemisches	38
2.13	Stufendüse mit Strömungseinschnürung (<i>Vena Contracta</i>)	40
2.14	Kontraktionskoeffizient einer 2-Phasen-Strömung bei niedrigen und hohen Luftmassenströmen	41
3.1	Aufbau eines explosionsunterdrückenden Wasserschocklöschers aus einem Feststoff-Gasgenerator, Puffervolumen, zwei Berstmembranen und dem Löschmittel	42
3.2	Konzept eines humanverträglichen Brandunterdrückungslöschers	44
4.1	Modulare Versuchseinrichtung. Durch Kombination von z.B. Heißgas-Generator, Blende, Löschmittelbehälter mit Fenster und einem WSL-Kopf lässt sich ein WSL-Versuch aufbauen, durch einfachen Austausch des Kopfes gegen eine Einzeldüse entsteht ein BUL-Aufbau	46
4.2	BUL-Versuchsaufbau im Schnitt von der Düsenaufnahme mit den beiden Berstscheiben	48
4.3	Die verwendeten Blendeneinsätze zur Modellierung und Begrenzung der Gasströmung	49
4.4	Die Versuchsanlage des BUL in der Seitenansicht incl. der Gaszuführungen und der Druck- und Temperatursensoren	52
4.5	Schematische Darstellung der BUL-Anlage mit ihren Gasanschlüssen und den Sensoren für Druck- und Temperaturmessung (P1 bis P4 bzw. T1 bis T7)	53
5.1	Druckverlauf eines BUL-Versuchs	59
5.2	Temperaturverlauf eines BUL-Versuchs. Die Einblendung vergrößert den zeitlichen Temperaturverlauf für die Sensoren im Löschmittelbehälter	60

5.3	Einzelbild einer Hochgeschwindigkeits-Aufnahme. Die senkrechte und waagrechte rote Linie markiert die in Kap. 5.3 beschriebenen Schnittebenen	61
5.4	Einzelbilder aus einem Hochgeschwindigkeitsfilm	62
5.5	Bilder eines Hochgeschwindigkeits-Videos	63
5.6	Hochgeschwindigkeits-Video-Stack in einer 3D-Matrix.	64
5.7	t-x-Schnitt der Außenströmung	64
5.8	t-y-Schnitt der Innenströmung	65
5.9	Digitalisierung des zeitlichen Verlaufs der Phasengrenzfläche und Berechnung von mittlerer Geschwindigkeit und mittlerem Volumenstrom	66
5.10	Video-Stack des Sprühkegels	66
5.11	Einzelne Bearbeitungsschritte zur Bestimmung des Sprühkegels: 1) Hintergrundbild, 2) Aufnahme des Sprühkegels, 3) Subtraktion des Hintergrundbilds und Binärisierung, 4) Bildverbesserung mit morphologischen nichtlinearen Filtern, 5) Detektion des Sprühkegels, 6) Überlagerung der detektierten Spraygrenzen mit dem Sprühkegel	67
5.12	Sprühkegelwinkel	68
5.13	Analyse der Sprühkegelbegrenzung (s. Abb. 5.11.5)	68
5.14	Automatische Detektion des Spraywinkels aus Abb. 5.13	69
5.15	Zeitliche Abhängigkeit des Sprühkegelwinkels φ für einen Versuch	70
5.16	Versuchsaufbau für die Analyse des Tröpfchenspektrums mit dem Malvern Spraytec	71
5.17	Tröpfchengrößenverteilung während eines Versuchs für einen Heißgasversuch mit BS1	72
5.18	Durchschnittliche volumenbezogene Tröpfchengrößenverteilung und kumulatives Volumen für einen Heißgasversuch mit BS1	72
5.19	t-y-Schnittbild der Gasgehaltsmessungen	74
5.20	Bestimmung des Phasengrenzflächenverlaufs mit dem Gittersensor und aus Videodaten	74
6.1	Versuchsablauf eines WSL-Versuchs	76

6.2	Übersicht des Versuchsablaufs der WSL-Versuche mit Kaltgas und verschiedenen Berstdrücken	77
6.3	Sprühwinkel der Tröpfchenwolke in Abhängigkeit vom Berstdruck	78
6.4	Abhängigkeit der vertikalen Geschwindigkeit der Tröpfchenwolke vom Berstdruck	79
6.5	Abhängigkeit des Schalldrucks von den Blenden 0 bis 3	79
6.6	Versuchsablauf mit den Blendeneinsätzen 0 bis 3 bei einem Berstdruck von 3,2 MPa	80
6.7	Sprühwinkel der Tröpfchenwolke für die Blendeneinsätze 0 bis 3 .	81
7.1	Gasblasen in der Wasserphase	86
7.2	Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Blasendurchmesser nach Gl. 7.10	88
7.3	Minimale Querschnittsfläche in Abhängigkeit des zeitlich gemittelten Drucks	90
7.4	Eindringtiefe des ersten Gasstroms in den Löschmittelbehälter. Im grau unterlegten Bereich ist ein Gasdurchbruch möglich	91
7.5	Zeitlicher Verlauf der Phasengrenzfläche von zwei Heißgas-Versuchen mit einem Wasservolumen von 1,0 und 0,5 l	91
7.6	Experimentelle Bestimmung des K-Werts nach Gl. 4.1 für die verwendete Düse bei Kalt- und Heißgasversuchen	92
7.7	Zeitlicher Verlauf von Druck und Sprühwinkel	94
7.8	Mittlerer Sprühkegelwinkel $\bar{\varphi}$ in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit W_V	95
7.9	Zweiphasen-PIV (Spray- und Luftströmung) eines Hohlkegelsprays (aus: [Rot01])	95
7.10	Mittlerer Sprühkegelwinkel $\bar{\varphi}$ in Abhängigkeit des Sauterdurchmessers d_{32}	96
7.11	Sauterdurchmesser in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit .	97
7.12	Verschiedene Nenndurchmesser in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit	98
7.13	Relative Verteilungsbreite in Abhängigkeit von der Volumenänderungsarbeit	99

7.14	Zerkleinerungsenergie E_{min} in Abhängigkeit der Volumenänderungsarbeit W_V für Kalt- und Heißgasversuche	101
7.15	Energiebilanz	101
7.16	Schalldruckverlauf eines Heißgasversuchs mit Blende 0 und 3	104
7.17	Maximaler Schalldruck der Sprayphase für verschiedene Blendeneinsätze bei Kalt- und Heißgas	105
A.1	Fotografie einer oberen Berstscheibe nach einem Heißgasversuch	126
A.2	Berstdruck der oberen Berstmembran in Abhängigkeit der Membrandicke	129
C.3	Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs und Bewertungsfilter in der Schallmesstechnik (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:-Akustik_Bewertungsfilter.jpg)	135
C.4	Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Kaltgas	136
C.5	Ergebnis der Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Heißgas bei einem Berstdruck von ca. 1,8 MPa	137
C.6	Ergebnis der Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Heißgas bei einem Berstdruck von ca. 3,8 MPa	138
C.7	Ergebnis der Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Heißgas mit dem Blendeneinsatz 3 (1x10 mm)	139
C.8	Ergebnis der Schalldruckmessungen von WSL-Versuchen bei Einsatz von verschiedenen Blenden	140
C.9	Ergebnis der Schalldruckmessungen von WSL-Versuchen bei Einsatz von verschiedenen Blenden	141
D.10	Kaltgasversuch mit Berstdruck 1,3 MPa	143
D.11	Kaltgasversuch mit Berstdruck 2,6 MPa	143
D.12	Kaltgasversuch mit Berstdruck 3,9 MPa	144
D.13	Heißgasversuch mit Berstdruck 2,5 MPa	145
D.14	Heißgasversuch mit Berstdruck 4,4 MPa	145
D.15	Heißgasversuch mit Berstdruck 2,5 MPa	146
D.16	Heißgasversuch mit Berstdruck 4,4 MPa	146

Tabellenverzeichnis

2.1	Brandklasseneinteilung nach DIN EN 2	7
2.2	Anwendungsarten des Löschmittels Wasser	12
2.3	Unterteilung der Schaumarten	15
2.4	Vor- und Nachteile des MicroDrop-Systems von Total Walther	21
2.5	Vor- und Nachteile der Impulslöschtechnologie von IFEX	22
2.6	Vor- und Nachteile der HI-FOG-Technologie von Marioff	23
2.7	Vor- und Nachteile des Wasserschocklöschers der Bayern-Chemie	23
2.8	Einschnürungskoeffizienten nach [Per63]	40
4.1	Eingesetzte Drucksensoren	54
4.2	Vertikale Positionen der Thermoelemente T1 bis T4 im Löschmittelbehälter	55
4.3	Spezifikationen der eingesetzten Messgeräte zur Bestimmung des Schalldrucks	56
7.1	Wirkzeit und maximaler Schallpegel für einen Beurteilungspegel von 85 dB(A)	103
A.1	Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,1 mm, Liefercharge 1	128
A.2	Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,1 mm, Liefercharge 2	128
A.3	Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,12 mm	129

A.4	Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,35 mm	130
A.5	Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von $2 \times 0,35$ mm	131
A.6	Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von $3 \times 0,35$ mm	132
B.7	Partialdrücke von Luft und Wasserstoff, adiabate Verbrennungs- temperatur und adiabater Druck bei unterschiedlichen Wasser- stoffkonzentrationen	133
B.8	Partialdrücke von Luft und Wasserstoff für unterschiedliche Druck- niveaus	133
C.9	Umrechnungstabelle vom Schalldruck p_S in den Schallpegel L_p . .	134
D.10	Ergebnisse der Auswertung des Volumenstroms mit dem Gitter- sensor (GS) und den High-Speed-Videos	142

Anhang

A Berstscheiben

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit einer zentralen Komponente des Aufbaus, den Berstscheiben oder Berstmembranen. In Abschnitt 4.2.2 wurde darauf bereits eingegangen, in diesem Kapitel wird das Verhalten der Berstscheiben genauer analysiert und dargestellt.



Abbildung A.1: Fotografie einer oberen Berstscheibe nach einem Heißgasversuch

In Abbildung A.1 ist eine Aufnahme einer typischen oberen Berstscheibe nach einem Heißgasversuch dargestellt. Aus den Vorversuchen und den Versuchsreihen ergibt sich folgender Mechanismus:

- Die Berstscheibe dehnt sich unter der Zunahme des Drucks und beult sich aus,
- ab einem bestimmten Druck (=Berstdruck) reißt die Membran am Scheitelpunkt,
- die beiden halbkugelförmigen Hälften klappen zur Seite und werden von dem ausströmenden Gas plastisch verformt und an die Wand gepresst.
- Bei Kaltgasversuchen erstarrt die Membran in dieser Position,
- bei Heißgasversuchen kann die Folie zusammenschmelzen bzw. sogar verbrennen (s. die dicken Tropfen am Rand des Bildes A.1).
- Der Ablauf bei mehrlagigen Berstscheiben ist vergleichbar.

In den folgenden Tabellen sind die Berstdrücke p_{berst} der einzelnen Kaltgas-Experimente in Abhängigkeit der Berstscheibendicke $d_{Membran}$ aufgelistet, jeweils mit dem Mittelwert und der Standardabweichung aller vergleichbaren Messungen. Die Ergebnisse sind in Abbildung A.2 aufgetragen und zeigen einen linearen Verlauf. Dieser lässt sich wie folgt parametrisieren:

$$p_{berst} = a + b \cdot d_{Membran} . \quad (0.1)$$

mit $a = (0.14036 \pm 0.0626)$ MPa und $b = (3.8009 \pm 0.106)$ MPa/mm.

BS1(100 mm)	Berstdruck	Experiment
[mm]	[MPa]	
0,1	0,47	000302.v04
	0,49	000317.v01
	0,49	000324.v01
	0,48	000308.v03
	0,46	000313.v01
	0,50	000313.v02
	0,41	000216.v03
	0,43	000225.v01
	0,48	000302.v02
	0,47	000302.v03
	0,47	000303.v01
	0,50	000428.v04
Mittelwert	0,47	
Abweichung	0,027	

Tabelle A.1: Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,1 mm, Liefercharge 1

BS1(100 mm)	Berstdruck	Experiment
[mm]	[MPa]	
0,1	0,58	000705.v01
	0,55	000720.v03
	0,49	000727.v04
	0,55	010115.v05
	0,58	000725.v01
	0,57	000726.v04
Mittelwert	0,55	
Abweichung	0,034	

Tabelle A.2: Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,1 mm, Liefercharge 2

BS1(100 mm)	Berstdruck	Experiment
[mm]	[MPa]	
0,12	0,63	000327_v01
	0,69	000327_v02
	0,68	000216_v02a
	0,65	000229_v01
	0,65	000229_v02
	0,62	000509_v01
Mittelwert	0,65	
Abweichung	0,027	

Tabelle A.3: Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,12 mm

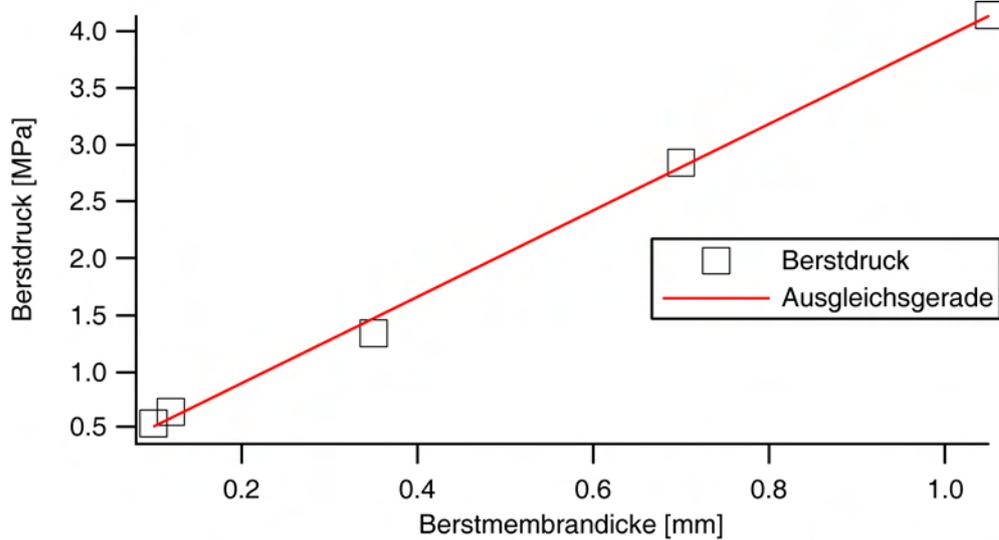


Abbildung A.2: Berstdruck der oberen Berstmembran in Abhängigkeit der Membrandicke

BS1(100 mm)	Berstdruck	Experiment
[mm]	[MPa]	
0,35	1,33	000719_v05
	1,29	000703_v01
	1,35	000704_v02
	1,39	000704_v03
	1,33	000706_v01
	1,32	000718_v01
	1,33	000719_v01
	1,34	000719_v03
	1,37	000719_v04
	1,30	000728_v06
	1,38	000728_v07
	1,33	000721_v04
	1,33	000721_v05
	1,32	000727_v05
	1,29	000728_v02
	1,37	010115_v04
	1,34	000724_v01
	1,45	000726_v05
	1,37	000725_v05
	1,34	000724_v01
1,41	000726_v01	
1,36	000726_v02	
Mittelwert	1,34	
Abweichung	0,038	

Tabelle A.4: Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von 0,35 mm

BS1(100 mm)	Berstdruck	Experiment
[mm]	[MPa]	
0,35 × 2	3,00	000516.v01
	2,73	000516.v02
	2,80	000516.v03
	2,90	000517.v01
	2,90	000518.v01
	2,74	000720.v04
	2,70	010115.v03
	2,73	000724.v02
	2,92	000727.v01
Mittelwert	2,84	
Abweichung	0,116	

Tabelle A.5: Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von $2 \times 0,35$ mm

BS1(100 mm)	Berstdruck	Experiment
[mm]	[MPa]	
0,35 × 3	4,06	000427.v01
	4,30	000427.v02
	4,29	000511.v01
	4,13	000511.v02
	4,52	000512.v01
	4,17	000519.v01
	3,90	000519.v02
	4,09	000704.v04
	4,29	000720.v05
	4,43	000720.v06
	4,13	000721.v03
	3,91	000721.v02
	4,11	000721.v01
	4,00	000728.v01
	4,00	000728.v03
	4,07	001109.v01
	4,00	001121.v03
	4,32	010115.v02
	4,06	010115.v06
	4,15	000727.v04
4,20	000727.v06	
4,03	000727.v03	
Mittelwert	4,14	
Abweichung	0,160	

Tabelle A.6: Berstdrücke der Kaltgasexperimente mit einer Membrandicke von $3 \times 0,35$ mm

B Generierung des Heißgases

Die Generierung des Heißgases erfolgt wie in Abschnitt 4.6 beschrieben. Die Variation der Parameter Maximaldruck p_{max} und Maximaltemperatur T_{max} erfolgt durch das Einstellen verschiedener Partialdrücke von Luft und Wasserstoff.

Die Berechnung der adiabaten Maximaltemperatur $T_{max_{ad}}$ und des adiabaten Maximaldrucks $p_{max_{ad}}$ erfolgte mit Hilfe des Programms Chemkin. Die Ergebnisse der Berechnungen sind für unterschiedliche Wasserstoffkonzentrationen bei nahezu konstanter Gasmasse in der Tabelle B.7 und für unterschiedliche Druckniveaus bei einer Wasserstoffkonzentration von 20% in Tabelle B.8 angegeben.

$T_{max_{ad}}$	$p_{max_{ad}}$	p_{Luft}	p_{H_2}	c_{H_2}
[K]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1098	1,391	0,36	0,040	10,0
1419	1,844	0,36	0,060	14,3
1830	2,470	0,36	0,090	20,0
2173	3,044	0,36	0,120	25,0

Tabelle B.7: Partialdrücke von Luft und Wasserstoff, adiabate Verbrennungstemperatur und adiabater Druck bei unterschiedlichen Wasserstoffkonzentrationen

$T_{max_{ad}}$	$p_{max_{ad}}$	p_{Luft}	p_{H_2}	c_{H_2}
[K]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
1830	2,470	0,36	0,090	20,0
1830	3,294	0,48	0,120	20,0
1830	4,393	0,64	0,160	20,0

Tabelle B.8: Partialdrücke von Luft und Wasserstoff für unterschiedliche Druckniveaus

C Schalldruckmessungen

Der Schalldruck p_S kann mit

$$L_p = 20 \cdot \lg \frac{p_S}{p_0} \text{ dB} \quad (0.2)$$

einfach in den entsprechenden Schallpegel L_p umgerechnet werden. Der Bezugsschalldruck p_0 beträgt $20 \mu\text{Pa}$. In der folgenden Tabelle sind einige Umrechnungspaare angegeben:

p	L_p
[Pa]	[dB]
0,2	80
1	94
10	114
50	128
100	134
200	140
300	144
500	148
1000	154

Tabelle C.9: Umrechnungstabelle vom Schalldruck p_S in den Schallpegel L_p

Die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs ist abhängig von der Frequenz der Schallquelle. Dies wird durch die Messung mit Bewertungsfiltern berücksichtigt, am häufigsten wird der Bewertungsfilter A mit der Einheit $\text{dB}(A)$ verwendet (s. Abb. C.3). Da es nicht möglich war, die Schallmessungen mit einem Bewertungsfilter durchzuführen, wurde in dieser Arbeit auf die Umrechnung der Messergebnisse in den Schallpegel verzichtet, um eine Verwechslung mit dem gebräuchlichen bewerteten Schallpegel zu vermeiden. Die Ergebnisse der Schalldruckmessungen sind in dieser Arbeit in der SI-Einheit Pa für den Druck angegeben.

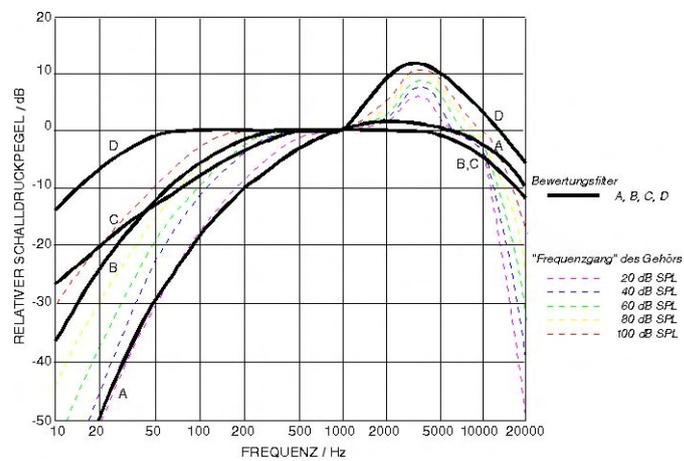


Abbildung C.3: Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs und Bewertungsfilter in der Schallmesstechnik (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Akustik_Bewertungsfilter.jpg)

C.1 Schalldruckmessungen mit dem BUL

In den folgenden Abschnitten sind die Schalldruckverläufe bei ausgewählten BUL-Versuchen wiedergegeben, unterteilt in Kalt- und Heißgas-Versuche.

Kaltgas-Versuche

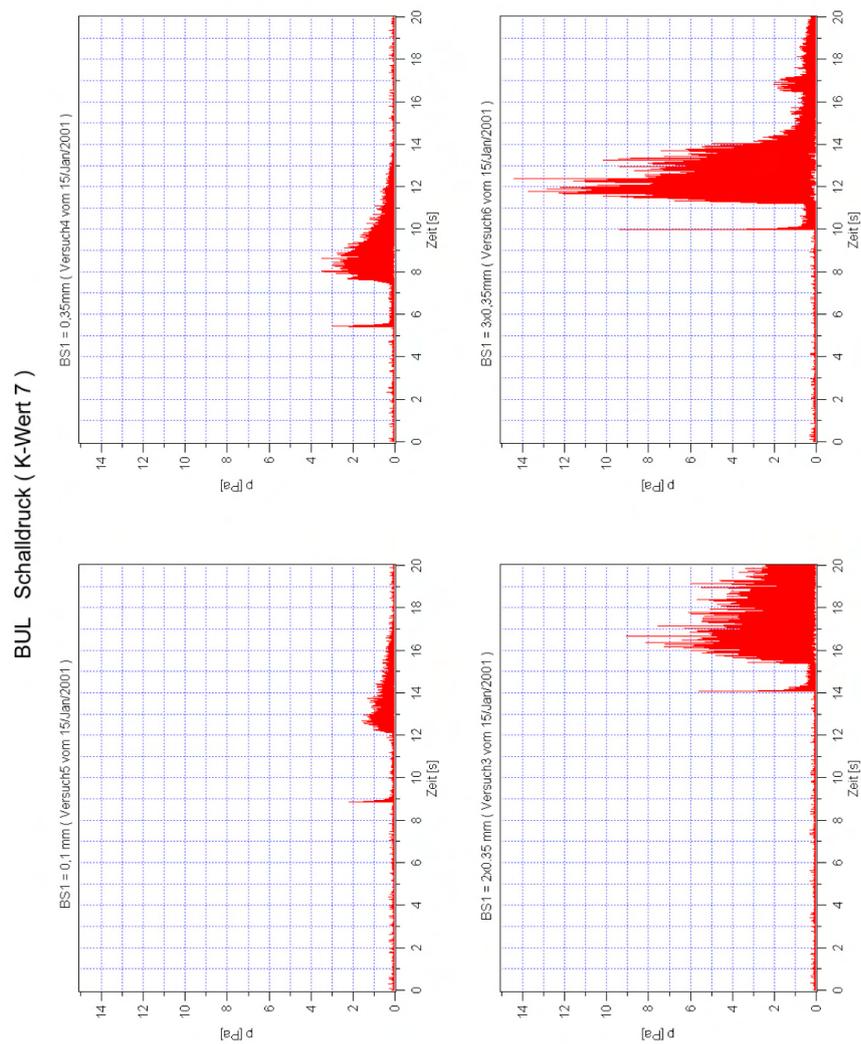


Abbildung C.4: Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Kaltgas

Heißgas-Versuche mit verschiedenen Blendeneinsätzen

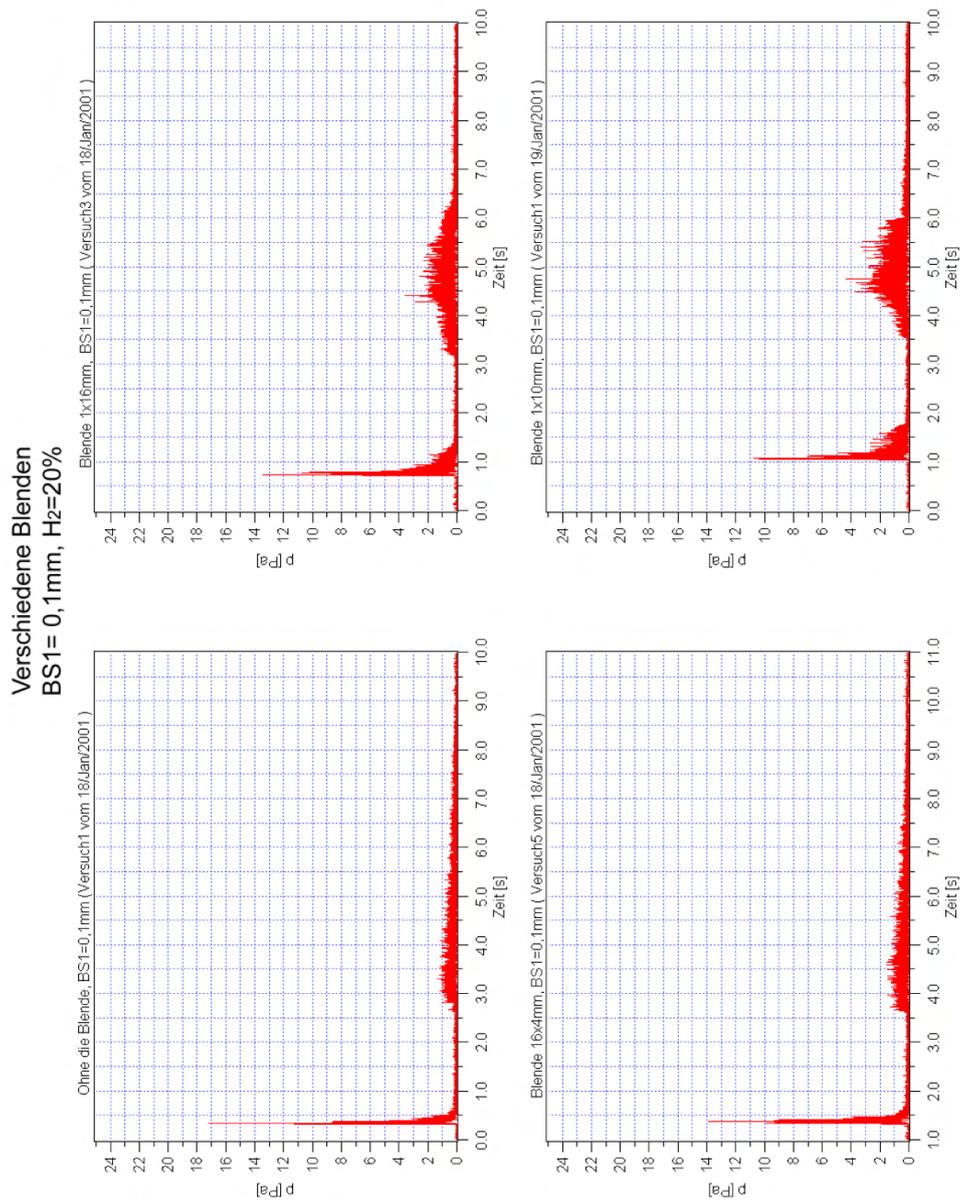


Abbildung C.5: Ergebnis der Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Heißgas bei einem Berstdruck von ca. 1,8 MPa

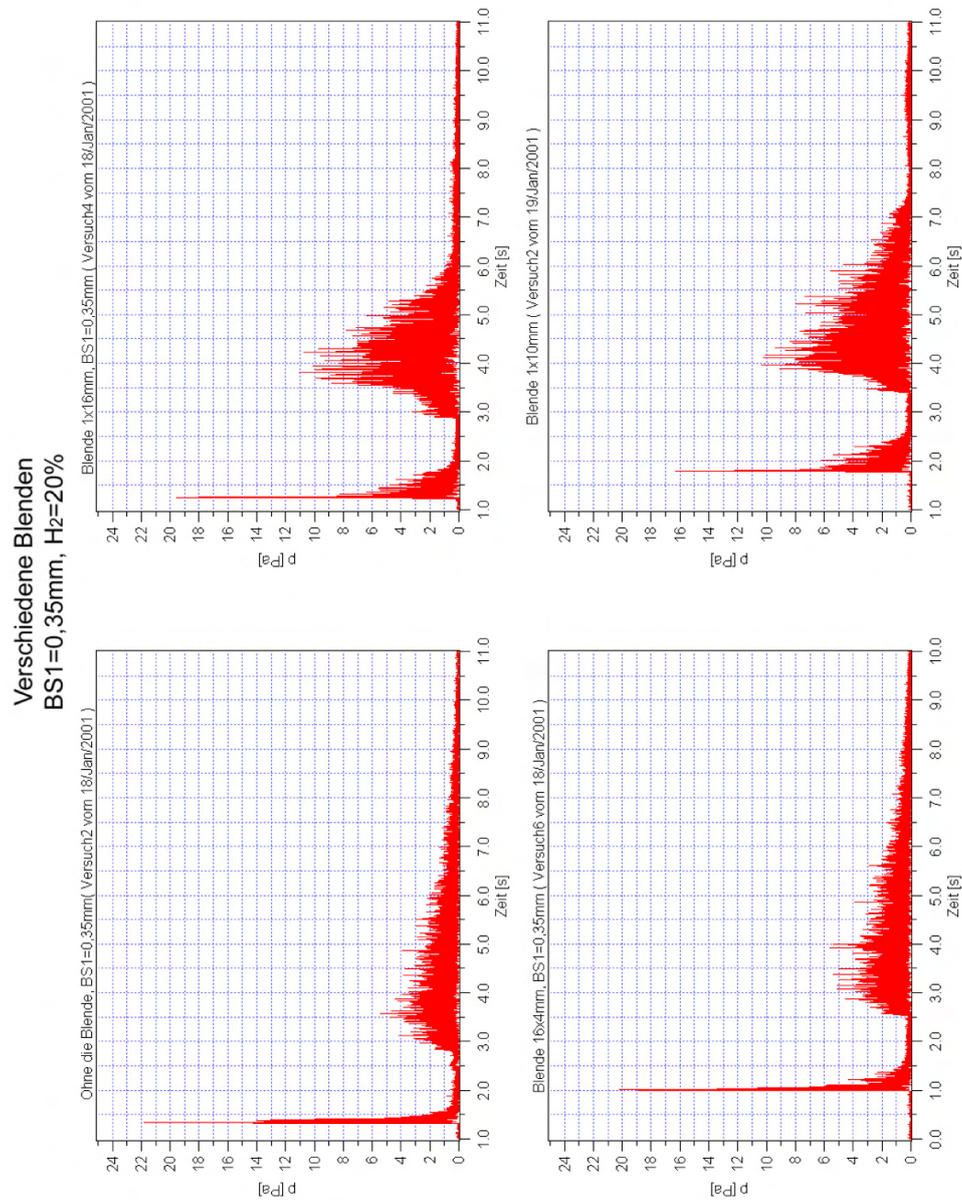


Abbildung C.6: Ergebnis der Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Heißgas bei einem Berstdruck von ca. 3,8 MPa

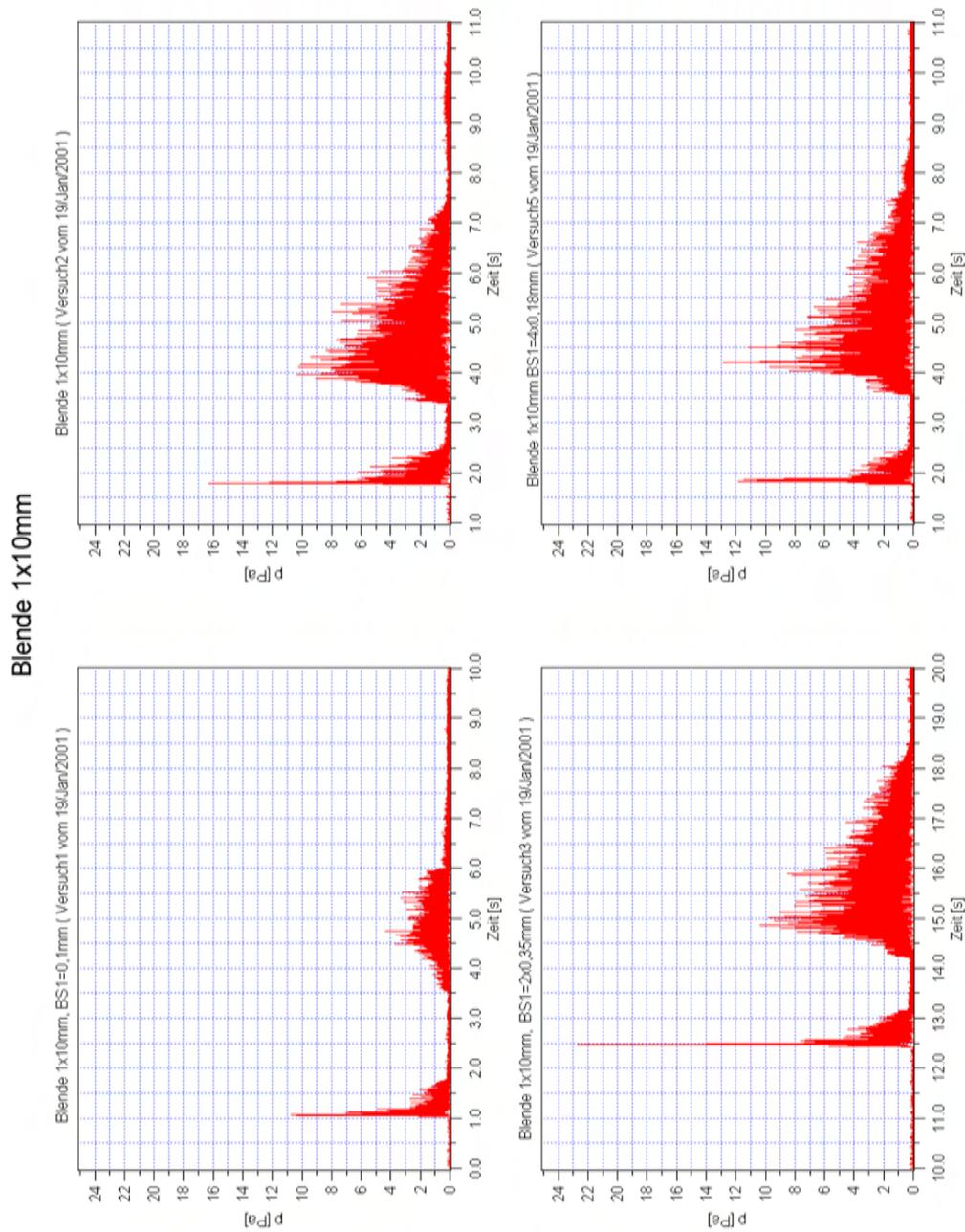


Abbildung C.7: Ergebnis der Schalldruckmessungen von BUL-Versuchen mit Heißgas mit dem Blendeneinsatz 3 (1x10 mm)

C.2 Schalldruckmessungen mit dem WSL

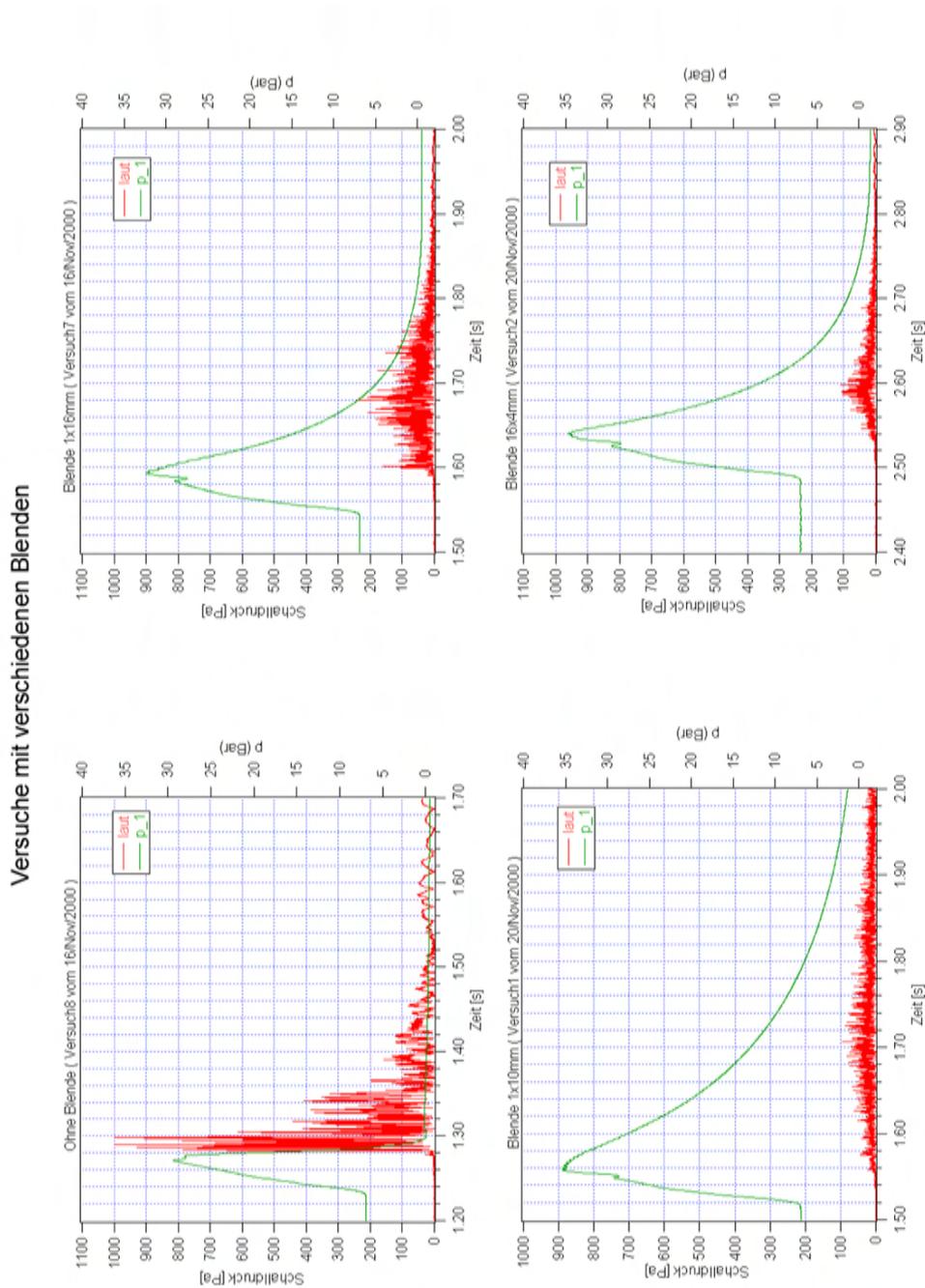


Abbildung C.8: Ergebnis der Schalldruckmessungen von WSL-Versuchen bei Einsatz von verschiedenen Blenden

Verschiedene Temperaturen

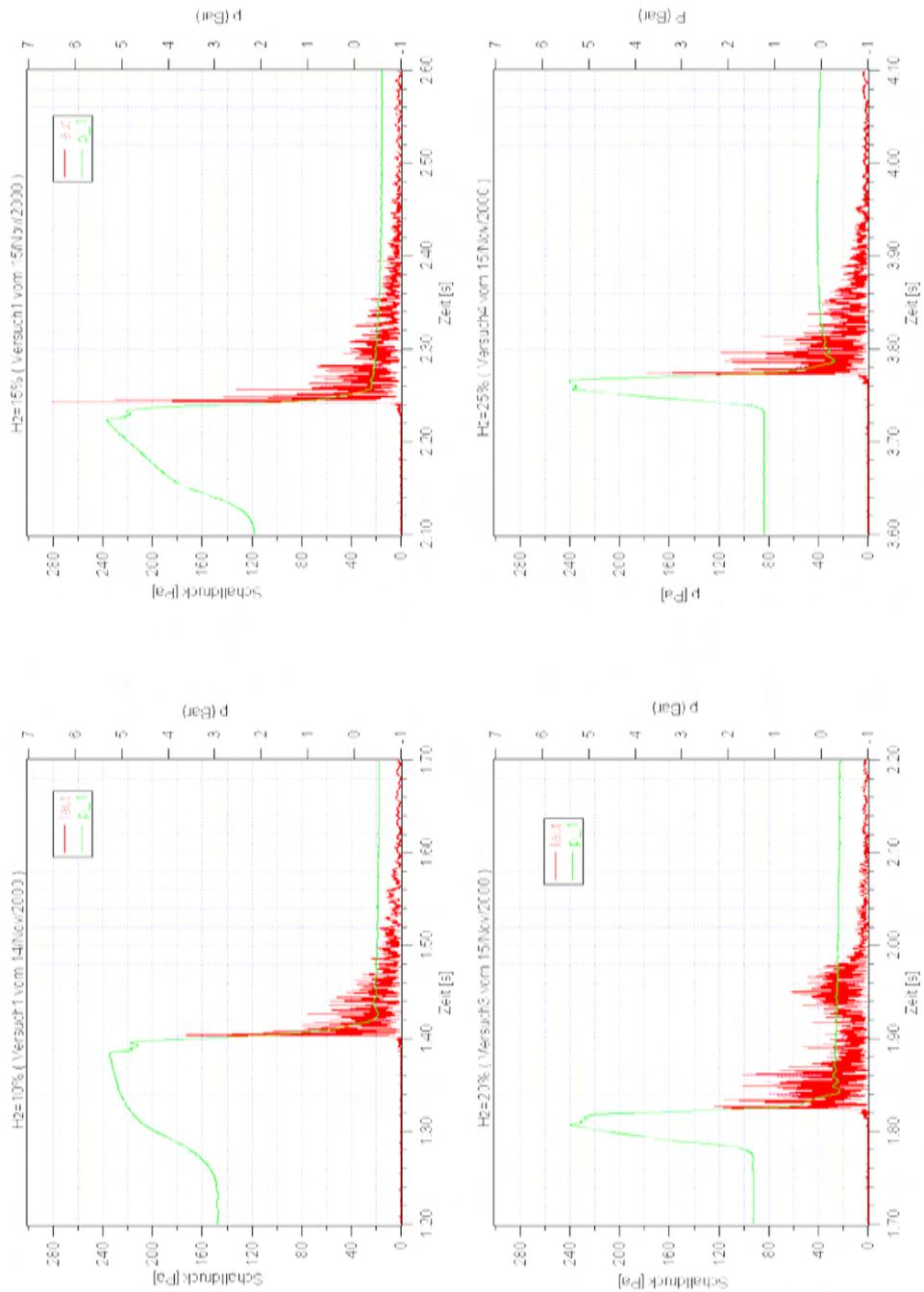


Abbildung C.9: Ergebnis der Schalldruckmessungen von WSL-Versuchen bei Einsatz von verschiedenen Blenden

D Gittersensor-Messungen

An dieser Stelle sollen die Ergebnisse der Gittersensor-Messungen mit den Ergebnissen der digital verarbeiteten Videodaten verglichen werden. Es wurden Messungen mit Kalt- und Heißgas bei unterschiedlichen Berstdrücken durchgeführt. Es zeigt sich immer eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Meßmethoden (s. Tab. D.10), die Abweichung der ausgewerteten Volumenströme beträgt maximal 2,2%.

	Berstdruck	Q_{GS}	Q_{Video}
	[MPa]	[l/h]	[l/h]
Kaltgas	1,3	991	1003
	2,6	1519	1540
	3,9	1782	1768
Heißgas mit BS1	25	920	910
	4,4	1085	1061
Heißgas ohne BS	25	1085	1072
	4,4	1457	1454

Tabelle D.10: Ergebnisse der Auswertung des Volumenstroms mit dem Gittersensor (GS) und den High-Speed-Videos

Der zeitliche Verlauf der Phasengrenzfläche ist in den folgenden Abbildungen jeweils für die Gittersensor- und Videodaten dargestellt (s. Abb. D.10 - D.16).

D.1 Kaltgasversuche

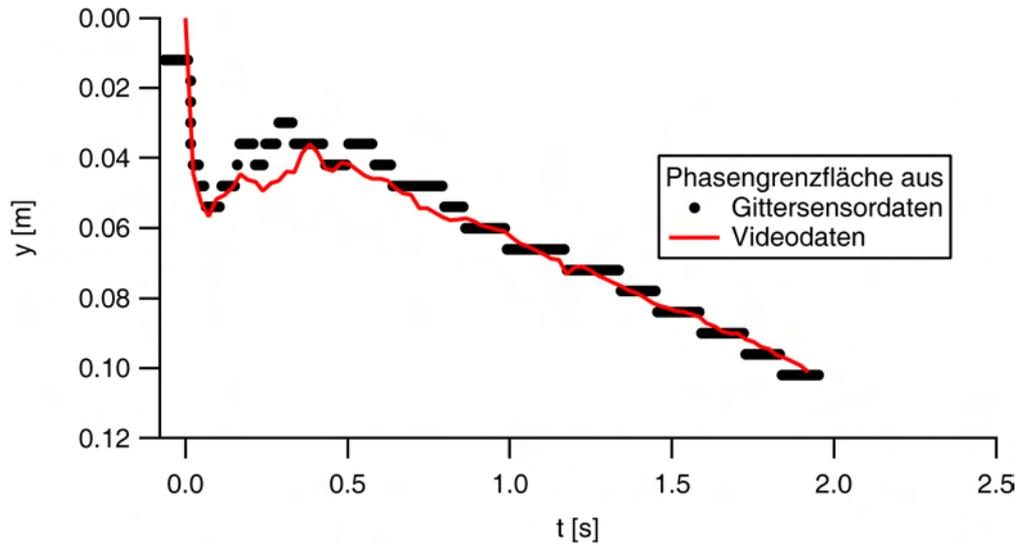


Abbildung D.10: Kaltgasversuch mit Berstdruck 1,3 MPa

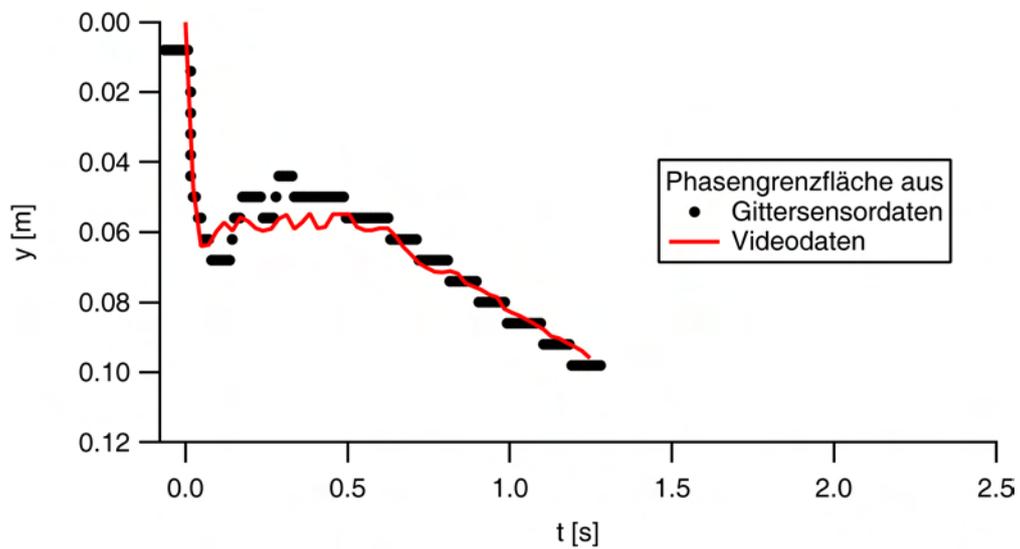


Abbildung D.11: Kaltgasversuch mit Berstdruck 2,6 MPa

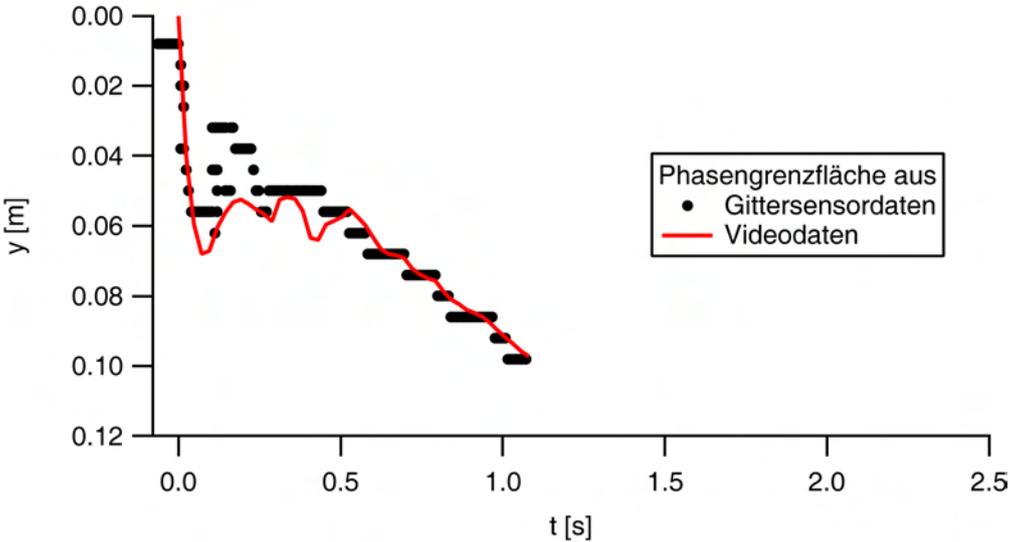


Abbildung D.12: Kaltgasversuch mit Berstdruck 3,9 MPa

D.2 Heißgasversuche mit BS1

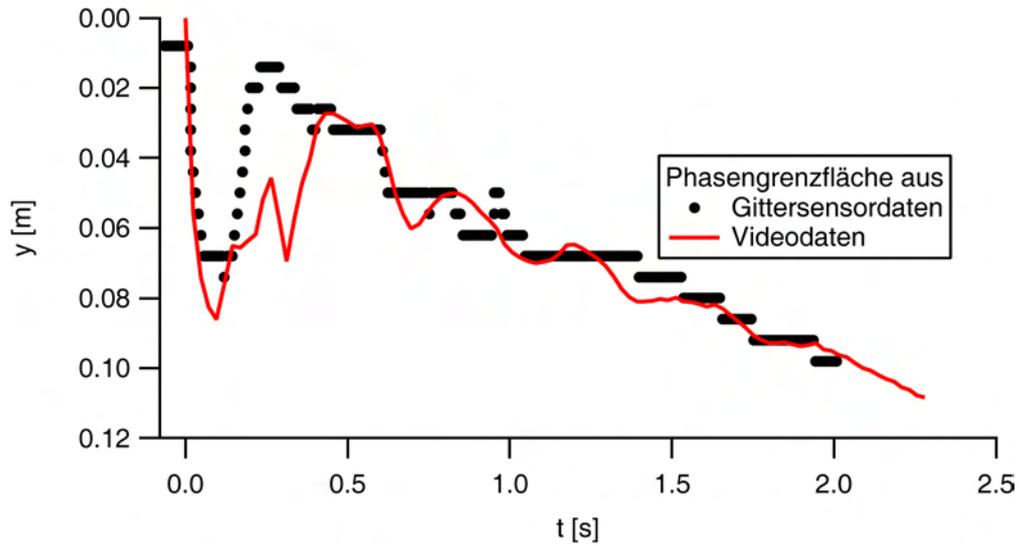


Abbildung D.13: Heißgasversuch mit Berstdruck 2,5 MPa

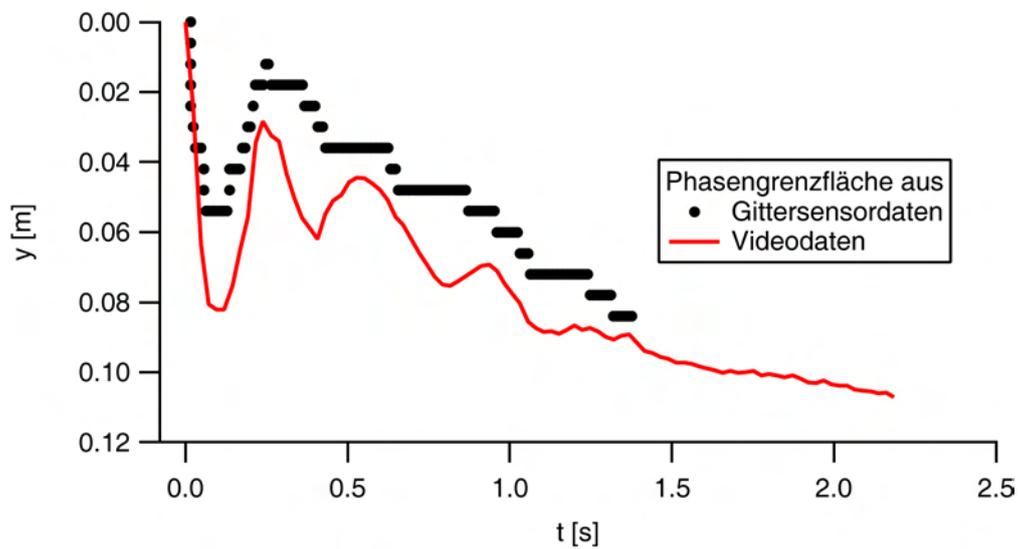


Abbildung D.14: Heißgasversuch mit Berstdruck 4,4 MPa

D.3 Heißgasversuche ohne BS1

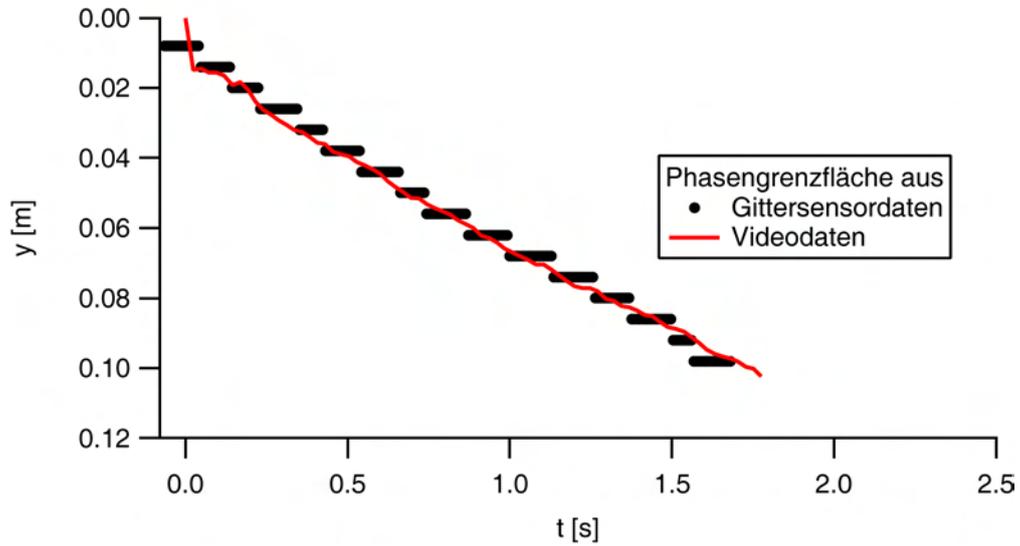


Abbildung D.15: Heißgasversuch mit Berstdruck 2,5 MPa

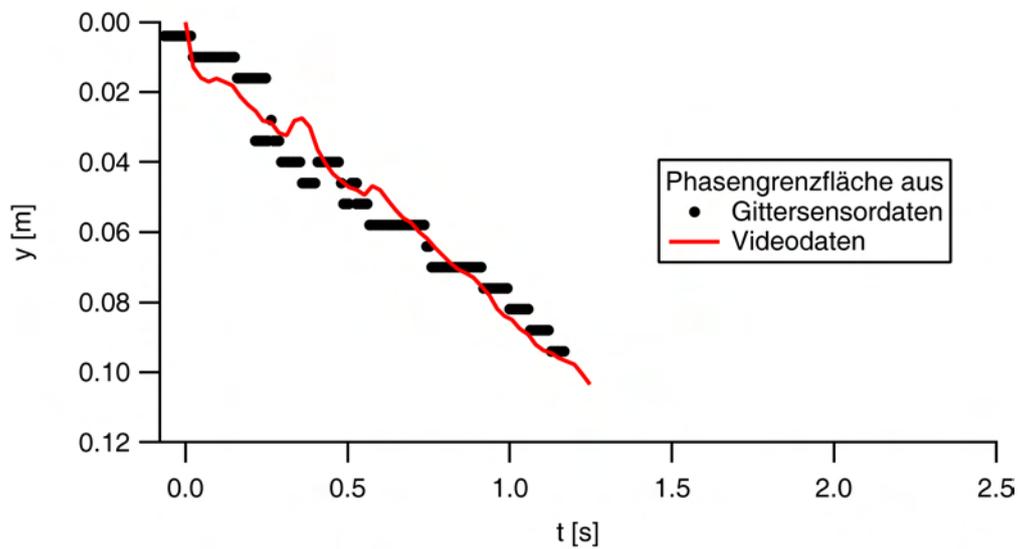


Abbildung D.16: Heißgasversuch mit Berstdruck 4,4 MPa