

Auslegung und Konstruktion einer optisch zugänglichen Versprühkammer mit Durchführung von Cold-Flow-Injektor-Versuchen bei verschiedenen Gegendrücken

Bachelorarbeit von

Jonas Straub

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Jennifer Niessner

Philipp Teuffel, M. Sc.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

Institut für Raumfahrtantriebe

Hochschule Heilbronn

März 2023

Inhalt

Eigenständigkeitserklärung.....	V
Nomenklatur	VI
Kurzfassung.....	VIII
1 Motivation	9
2 Stand der Technik	12
2.1 Grundlagen eines Satellittriebwerks	12
2.2 Flüssige Treibstoffe.....	14
2.3 Funktionsweise eines Injektors.....	15
2.3.1 Drall-Einspritzung	15
2.3.2 Strahl-Einspritzung.....	16
2.3.3 Pintle-Einspritzung	17
2.4 Grundlegende Kenn- und Betriebsdaten eines Satellittriebwerks	18
2.5 Grundlagen Versprühung und Injektoren	19
2.6 Verhalten von Sprays bei Umgebungsdruck	22
2.7 Optisch zugängliche Versprühkammern aus der Literatur.....	25
3 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	27
3.1 Auslegung, Konstruktion und Fertigung einer Versprühkammer.....	27
3.2 Untersuchung des Sprayverhaltens unter Einfluss von Gegendruck.....	27
4 Projektplanung.....	28
4.1 Phase 1 – Einarbeitung und Recherche.....	28
4.2 Phase 2 – Entwicklung von Konzepten und Vorauslegung	28
4.3 Phase 3 – Auslegung, Konstruktion und Bestellung.....	29
4.4 Phase 4 – Versuchsvorbereitung und Fertigung.....	29
4.5 Phase 5 – Versuchskampagne	29
4.6 Phase 6 – Dokumentation und Projektabschluss	30
4.7 Qualitätskontrolle und Statusupdates	30
5 Entwicklung der Versprühkammer	31
5.1 Einsatzzweck.....	31
5.2 Entwicklungsanforderungen	32
5.2.1 Bauraum und Formgebung.....	32
5.2.2 Physikalische Angaben	33
5.2.3 Versorgung.....	33
5.2.4 Messtechnik und Sensorik.....	33
5.2.5 Handling.....	34

5.2.6	Sicherheitseinrichtungen.....	34
5.2.7	Sonstiges.....	34
5.3	Konzeptfindung - Morphologischer Kasten.....	34
5.3.1	Versprühkammer-Konzept 1	36
5.3.2	Versprühkammer-Konzept 2	37
5.3.3	Versprühkammer-Konzept 3	38
5.4	Dominanz- und Bewertungsmatrix.....	39
5.5	Auslegung und Konstruktion	40
5.5.1	Kammervolumen und Abmessungen.....	41
5.5.2	Werkstoffauswahl und Werkstoffangaben.....	43
5.5.3	Mantelrohr	44
5.5.4	Boden	46
5.5.5	Deckel.....	48
5.5.6	Optische Zugänge.....	53
5.5.7	Fußkonstruktion	57
5.5.8	Sicherheitseinrichtungen.....	57
5.6	Kosten, Lieferzeit und Abstimmung mit Lieferanten.....	57
6	Integration in den Prüfstand	60
6.1	Ausgangssituation	60
6.2	Umbauarbeiten und Installation	63
6.3	Messtechnik	65
6.3.1	Sensorik.....	65
6.3.2	Shadowgraph-Aufbau.....	67
7	Injektorauswahl.....	68
7.1	Auslegung eines Drall-Injektors	68
7.1.1	Verfahren 1.....	70
7.1.2	Verfahren 2.....	71
7.2	Injektor-Konstruktion.....	72
7.3	Injektor-Fertigung und Charakterisierung	72
7.4	Konstruktive Überarbeitung des Injektordesigns.....	74
8	Sprühversuche bei Gegendruck.....	77
8.1	Vorbereitungen und Ablauf.....	77
8.2	Auswerteverfahren	78
8.3	Validierung der Versprühkammer	82
8.4	Versuchsauswertung.....	84
8.4.1	Düsenaustrittskoeffizient	84
8.4.2	Sprühwinkel	86

8.4.3	Abbruchlänge.....	89
9	Reflektion der Versuchsergebnisse	90
10	Ausblick.....	93
11	Reflektion des Projektverlaufs.....	94
11.1	Phase 1	94
11.2	Phase 2	94
11.3	Phase 3	94
11.4	Phase 4	94
11.5	Phase 5	95
11.6	Phase 6	95
	Literaturverzeichnis	96
	Abbildungsverzeichnis	99
	Anhang.....	101

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich,

Jonas Straub,

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig mit Unterstützung des Betreuers angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die Arbeit oder wesentliche Bestandteile davon sind weder an dieser noch an einer anderen Bildungseinrichtung bereits zur Erlangung eines Abschlusses eingereicht worden.

Ich erkläre weiterhin, bei der Erstellung der Arbeit die einschlägigen Bestimmungen zum Urheberschutz fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen etc.) enthält, habe ich diese Beiträge als solche gekennzeichnet (Zitat, Quellenangabe) und eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt. Mir ist bekannt, dass ich im Falle einer schuldhaften Verletzung dieser Pflichten die daraus entstehenden Konsequenzen zu tragen habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Nomenklatur

Lateinische Symbole

A	Fläche
A_t	Düsenhalsfläche
a	Charakteristische Länge
A_s	Spannungsquerschnitt Schraube
A	Geometrisch charakteristischer Injektorparameter
C_s	Düsenaustrittskoeffizient
C	Injektoröffnungskoeffizient
D_{32}	Sauter-Mean-Durchmesser
D_i	Innendurchmesser
D_a	Außendurchmesser
d	Schraubengewindedurchmesser
d_2	Flankendurchmesser Gewinde
d_3	Kerndurchmesser Bolzengewinde
d_K	Wirksamer Reibungsdurchmesser
D	Ungeklemmter/freier Durchmesser der Fensterscheibe
e	Wandstärke
F	Kraft
f	Zulässige Spannung
$F_{a,B}$	Biegefestigkeit Borosilikatglas
g	Erdbeschleunigung
h_1	Zylindrische Bordhöhe
h_2	Wölbungshöhe
I_s	Spezifischer Impuls
I_t	Gesamtimpuls
K_{SMD}	Konstante zur Bestimmung von D_{32}
K	Konstante der Klemmungart
L_{min}	Mindestwandstärke
L	Gewählte Wandstärke Fensterscheibe
l_{in}	Eintrittskanallänge
l_n	Austrittsdüsenlänge
l_s	Drallkammerlänge
\dot{m}	Massenstrom
m	Masse
$\dot{m}_{Oxidator}$	Oxidatormassenstrom
$\dot{m}_{Treibstoff}$	Brennstoffmassenstrom
M_A	Anzugsmoment
μ_K	Reibungszahl an der Kopfaufgabe
n	Anzahl
Oh	Ohne-Sorge-Zahl
p	Druck
P	Betriebsdruck
Δp	Druckverlust
$R_{p0,2}$	Dehngrenze 0,2%

$R_{p1,0}$	Dehngrenze 1,0%
r_1	Wölbungsradius der Kalotte
r_2	Eckradius der Krempe
r_m	Flüssigkeitsdrallradius
\bar{r}_m	Spezifischer Flüssigkeitsdrallradius
R_1	Außenradius Flachdichtung
R_2	Innenradius Flachdichtung
R_n	Düsenradius
R_{in}	Axiale Position des Eintrittskanalradius
r_{in}	Eintrittskanalradius
R_s	Drallkammerradius
Re	Reynoldszahl
ROF	Mischungsverhältnis Oxidator zu Brennstoff
S_f	Sicherheitsfaktor
s_G	Gewindesteigung
T	Temperatur
t	Zeit
U	Strömungsgeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit
V	Volumen
We	Weberzahl
z	Schweißnahtfaktor

Griechische Symbole

β	Berechnungsbeiwert
β_G	Flankenwinkel metrisches Gewinde
ϵ	Expansionsverhältnis
κ	Isentropenexponent
η	Dynamische Viskosität
ρ	Dichte
ρ_G	Gewindereibungswinkel
σ	Spannungen (mechanisch)
σ_s	Oberflächenspannung
φ	Sprühwinkel
φ_G	Gewindesteigungswinkel

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich im Wesentlichen mit der Umsetzung einer optisch zugänglichen Versprühkammer und Untersuchung des Sprayverhaltens von Drall-Injektoren bei verschiedenen Umgebungsdrücken. Damit sollen neue Testmöglichkeiten zur Untersuchung des Sprayverhaltens von Injektoren und Treibstoffen in der Abteilung Satelliten- und Orbitalantriebe des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt geschaffen werden. Zur Umsetzung der Versprühkammer wurden im ersten, konstruktiven Teil nach ausführlicher Literaturzusammenstellung zu Beginn drei verschiedene Konzepte erarbeitet. Nach Vorversuchen und Definition der Anforderungen wurde das Konzept mit dem höchsten technischen Erfüllungsgrad ausgewählt. Die Auslegung und Konstruktion der Versprühkammer erfolgte nach Berechnungsvorgaben der DIN EN 13445 unter Einbezug verschiedener Randbedingungen wie Abmessungen, Messtechnik und Versorgung zur Integration in die bestehende Infrastruktur des Cold-Flow-Injektoren-Prüfstands. Für erste Injektorversuche bei Umgebungsdruck in der Versprühkammer wurde ein Drall-Injektor mit anwendungstypischem Betriebspunkt für Satellittriebwerke entworfen. Durch iterative Entwicklungsschritte entstand dabei ein Drall-Injektor mit zusätzlichem optischen Zugang zur Untersuchung des Strömungsverhalten in der Drallkammer. Die Arbeit umfasste zusätzlich den Umbau des vorhandenen Prüfstands mit Inbetriebnahme der Versprühkammer.

Im zweiten, experimentellen Teil wurden Versuche mit dem Drall-Injektor bei verschiedenen Umgebungsdrücken durchgeführt. Hierbei konnten erste Unterschiede zwischen freier Versprühung bei atmosphärischen Bedingungen und Versprühung in der Kammer festgestellt werden. Weiterhin wurden Versuche bei Umgebungsdrücken von 1 bis 22 bar durchgeführt. Mit steigendem Kammerdruck konnten kürzere Abbruchlängen gemessen werden. Die Sprühform änderte sich dabei von einem Hohlkegel zu einer Glocke. Die Sprühbreite nahm infolgedessen ab. Insgesamt wurde das Spray feiner und dichter. Eine eindeutige Aussage zur Veränderung des Sprühwinkels bei Umgebungsdruck konnte nicht getroffen werden. Festgestellt wurden unterschiedliche Winkel innerhalb eines Sprays mit unterschiedlichem Verhalten bei zunehmendem Druck

1 Motivation

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) betreibt Forschung und Entwicklung als Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland. Untersucht werden unterschiedlichste Themen in den Bereichen Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr sowie Sicherheit und Digitalisierung. Im Auftrag der Bundesregierung ist die deutsche Raumfahrtagentur im DLR für die Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig [1].

Am Institut für Raumfahrtantriebe (Standort Lampoldshausen) werden vorwiegend chemische Raketenantriebe und deren Subsysteme entwickelt und auf Prüfständen untersucht und getestet. Zusätzlich wird an fortschrittlichen Technologien für Raumfahrtantriebe der Zukunft geforscht. Zu den Forschungsgebieten zählen unter anderem die Einspritzung, Mischungsvorgänge und Verbrennung verschiedener Treibstoffkomponenten, das Expansionsverhalten in der Düse sowie thermische Belastungen und Kühlungsverfahren von Triebwerksstrukturen. Untersucht werden verschiedenste Triebwerksgrößen, von Steuerdüsen für Satellitensysteme bis hin zu Stufentriebwerken der Ariane Trägerrakete [2].

Grundsätzlich lassen sich Raketenantriebe in mehrere Varianten kategorisieren, beispielsweise in Bezug auf dessen Einsatzgebiet (Booster-Triebwerk, Oberstufentriebwerk, Lageregelung, etc.), die Art des angetriebenen Trägers (Flugzeug, Raketenwaffen, Raumfahrtanwendungen, etc.) oder die Art des verwendeten Treibstoffs (chemisch, nuklear, solar). Relevant für diese Arbeit sind die die Triebwerkssysteme basierend auf chemischen Treibstoffen. Weiter können chemische Treibstoffe abhängig vom vorliegenden Aggregatzustand primär in die folgenden Klassen unterteilt werden: Gastreibstoffsysteme, Flüssigtreibstoffsysteme, Feststoffsysteme und Hybridsysteme.

In der Abteilung Satelliten- und Orbitalantriebe (SOA) werden neuartige und fortschrittliche Treibstoffe sowie die dazugehörigen Komponenten wie Brennkammern, Injektoren, Düsen oder Kühlmethoden untersucht. Um die Raumfahrt speziell für Anwendungen wie Satelliten oder Landefähren nachhaltiger und sicherer zu gestalten, sollen neue Treibstoffe mit größerer Vielfalt entwickelt werden [3]. Nachhaltiger bedeutet in diesem Themenfeld vor allen Dingen eine geringere Toxizität, eine höhere Gesundheitsverträglichkeit für den Menschen und einfachere Handhabung im Umgang mit dem Treibstoff [4]. Weitere Anforderungen sind unter anderem geringere Herstellungs- und Verarbeitungskosten, erhöhte Leistungsdichte oder geringere Systemkomplexität. Um diese spezifischen Ansprüche zu erreichen, müssen herkömmliche Treibstoffe neu überdacht werden. In der Abteilung SOA werden dazu primär gasförmige, flüssige gelförmige oder hybride Treibstoffsysteme untersucht. Zum Einsatz kommen dabei Triebwerkssysteme basierend auf Brennstoffen wie ionischen Liquiden oder verbesserten Kohlenwasserstoffen kombiniert mit neuartigen Oxidatoren im Einstoff- oder Zweistoffsystem [3]. Die hervorgelegte Arbeit ist im Bereich der flüssigen Treibstoffe entstanden.

Flüssige Treibstoffkombinationen werden meist mithilfe eines Bedrückungsgases unter Druck gesetzt und in die Brennkammer eingespritzt. Eine weitere Variante ist die Förderung durch zusätzliche Turbopumpen. Vor allem bei Anwendungen mit geringen Massenströmen beziehungsweise geringem Schub, wie beispielsweise der Lageregelung eines Satelliten, kommen gasbedrückte Systeme zum Einsatz [5].

Mit neuartigen Treibstoffen kommen auch neue Herausforderungen an die Triebwerkshardware. So unterscheiden sich die Fluide in ihren rheologischen Eigenschaften und Verbrennungseigenschaften sowie der Kompatibilität mit diversen Werkstoffen im Vergleich zu bisher eingesetzten Varianten. Herkömmliche Triebwerksteilsysteme können nicht zwangsläufig für die neuen Treibstoffe übernommen werden. Komponenten wie Injektoren, Kühlung oder Ventile müssen auf die neuen Spezifikationen angepasst werden [6]. Diese Arbeit trägt zur Forschung an flüssig-flüssig Injektoren und deren Einspritzverhalten bei.

Die grundlegende Aufgabe eines Injektors ist die Treibstoffaufbereitung zur Verbrennung. Dazu zählt das Einbringen des Treibstoffs in die Brennkammer, die Zerstäubung der Flüssigkeit in Tröpfchen und die Mischung von Brennstoff und Oxidator im gewünschten Verhältnis. Ziel ist es, ein homogenes Mischungsverhältnis und gleichmäßige Verteilung der Fluide im Bereich der Injektionszone der Brennkammer zu erhalten [5]. Aufgrund dieser Faktoren trägt der Injektor maßgeblich zur Qualität der Verbrennung bei. Das Sprühverhalten eines Injektors ist wiederum von mehreren Faktoren, wie die Art des Injektors, des Betriebspunktes oder den Fertigungstoleranzen, abhängig.

Während Heißgasversuchen in der Brennkammer ist es schwierig, Messungen am Sprühbild eines Injektors vorzunehmen und Aussagen über die Funktion und Qualität des Injektors zu treffen. Die Brennkammern sind zumeist nicht für optische Messgeräte zugänglich und selbst bei optisch zugänglichen Brennkammern ist aufgrund der Flammenemission das Spray nicht direkt zugänglich. Dafür werden sogenannte Cold-Flow-Tests durchgeführt. Das Cold-Flow-Verfahren beschreibt allgemein kalte Testabläufe und Durchströmungen von Raketentriebwerken oder Injektoren ohne, dass eine Heißgasreaktion stattfindet. Dies kann durch Verzicht einer Zündquelle oder Nutzung nicht-reaktiver Fluide, sogenannter Simulationsfluide, erreicht werden. Wichtig dabei ist, dass die Simulationsfluide vergleichbare rheologischen Eigenschaften wie tatsächlichen Brennstoffe und Oxidatoren aufweisen. Mit Cold-Flow-Injektor-Versuchen werden das Strömungsverhalten, Drücke oder Massenströme von Oxidator oder Brennstoff analysiert. Mittels Cold-Flow-Tests können einzelne Iterationsstufen von Injektoren in kurzer Zeit getestet und validiert werden. Cold-Flow-Injektor-Tests sind zudem kostengünstiger und mit weniger Vorbereitungszeit umsetzbar als Heißgastests.

Ziel eines Cold-Flow-Injektor-Tests ist die Untersuchung von Strömungs- und Versprühverhalten des Injektors. Dabei werden unterschiedliche Betriebspunkte abgefahren und die Sprayeigenschaften wie Sprayform, Sprayregime, Sprühwinkel, Abbruchlänge oder Tropfengröße gemessen und charakterisiert.

In der Abteilung SOA wurden diese Versuche in der Vergangenheit unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt. Demnach liegt der Umgebungsdruck bei 1 bar absolut. Die Umgebungstemperatur ist abhängig von der Außentemperatur und somit von der Jahreszeit.

Die tatsächlich vorherrschenden Umgebungsbedingungen in einer Brennkammer sind demnach weit entfernt von atmosphärischen Sprühversuchen. Während dem Heißgasbetrieb eines Triebwerks erfährt das Spray unterschiedliche Umgebungsdrücke. In einem Satellitentriebwerk herrscht vor dem Einspritzen oder Reaktion der Treibstoffe ein Vakuum in der Brennkammer. Nachdem sich ein Betriebspunkt eingestellt hat, liegt der Umgebungsdruck für das Spray über 1 bar absolut. Die Umgebungstemperaturen für das Spray können Werte bis zu 4100 °C annehmen. Auch die Eigenschaften des Umgebungsgases in der Brennkammer sind aufgrund der Verbrennungsgase gänzlich verschieden gegenüber der Umgebungsluft bei atmosphärischen Tests.

Die Einflüsse von Umgebungsdruck, -temperatur oder -gas auf das Spray sind groß. Abhängig von beispielsweise Umgebungsdruck können sich Sprühwinkel, Abbruchlänge, Tropfengröße oder

Sprayform ändern. Um die Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf das Spray in einer Brennkammer genauer untersuchen zu können, soll eine optisch zugängliche Versprühkammer entwickelt werden. Mit dieser Versprühkammer sollen die Auswirkungen von Umgebungsdrücken, -temperaturen oder -gasen auf die Sprühcharakteristiken eines Injektors hervorgebracht werden. Das langfristige Ziel ist, Erkenntnisse aus Cold-Flow-Tests und Heiß-Gas-Tests zu vereinen und damit tiefere Rückschlüsse auf die Brennkammerprozesse ziehen zu können.

2 Stand der Technik

Das Entwicklungsfeld der Raketen- und Satellittriebwerke ist vielschichtig. Allgemein betrachtet lässt sich dieses in eine Vielzahl einzelner Teilsysteme untergliedern. Aspekte wie beispielsweise geometrische Dimensionierung, Treibstoff und Kühlung müssen exakt aufeinander abgestimmt werden. Ausschlaggebend sind der angepeilte Betriebspunkt und Einsatzzweck.

Raketentriebwerke von Trägerraketen haben die Aufgabe eine Nutzlast von der Erde ins All zu transportieren. Dafür werden Systeme mit hohem Schub benötigt. Satellittriebwerke haben im Gegensatz dazu andere Aufgaben. Eingesetzt werden kleine Schubdüsen, sogenannte Thruster, die für Korrekturen in der Umlaufbahn, zur Lageregelung oder für Ausweichmanöver genutzt werden. Zu den Aufgaben zählen translatorische und rotatorische Korrekturen sowie Geschwindigkeits- und Bahnkorrekturen. Besonders typisch für kleine Schubdüsen sind mehrere Zündungen im gepulsten Betrieb mit kurzer Brenndauer. Die Pulsfrequenz liegt oftmals bei 150 bis 500 Pulsen pro Minute mit Brenndauern unter 1 s. Zusätzlich werden auch längere Brenndauern bei beispielsweise Ausweichmanövern benötigt. Dabei werden Schübe von typischer Weise 0,5 N bis 400 N erreicht. Eingesetzt werden teilweise auch Triebwerke mit höherer Schubkraft. Neben sogenannten Heißgasschubdüsen (hoch performante Zweistoffsysteme mit Verbrennungstemperaturen T über 2600 K und spezifischen Impuls I_S von 230 s bis 325 s) gibt es zusätzlich sogenannte Warmgas- ($T = 500$ bis 1600 K, $I_S = 180$ bis 245 s) und Kaltgasschubdüsen ($T = 200$ bis 320 K, $I_{SP} = 40$ bis 120 s). Im Folgenden soll es speziell um Zweistoff-Satellitenantriebe mit flüssigen Treibstoffen gehen.

2.1 Grundlagen eines Satellittriebwerks

Das Funktionsprinzip eines Raketen- oder Satellittriebwerks basiert auf thermodynamischer Expansion des Verbrennungsgases zur Erzeugung von Schub mithilfe einer Brennkammer und nachfolgender Überschalldüse. Dabei wird die im Treibstoff gespeicherte chemische Energie in kinetische Energie gewandelt. Der Treibstoff, bestehend aus Oxidator und Brennstoff, wird in einer Brennkammer unter hohem resultierendem Druck bei typischen Temperaturen von 2500°C bis 4100°C verbrannt [5]. Die Düsenaustrittsgeschwindigkeiten liegen typischerweise zwischen 1800 m/s und 4300 m/s. Der Gesamtimpuls nach [5]

$$I_t = \int_0^t F dt \quad (2.1)$$

eines Triebwerks ergibt sich nach [5] aus der Schubkraft F (die Kraft kann über die Zeit variieren) integriert über die Anwendungszeit t . Für konstanten Schub mit vernachlässigbaren Start- und Stopptransienten ergibt sich ist der Gesamtimpuls nach [5]

$$I_t = Ft. \quad (2.2)$$

Der Gesamtimpuls I_t ist im Wesentlichen proportional zur Gesamtenergie, die durch den Treibstoff im Triebwerk freigesetzt wird. Der spezifische Impuls nach [5]

$$I_S = \frac{\int_0^t F dt}{g_0 \int_0^t \dot{m} dt} \quad (2.3)$$

unter Einbezug des Treibstoffmassenstroms und der Erdbeschleunigung entspricht dem Schub pro Gewichtseinheit des Treibstoffmassendurchsatzes. Mit diesem Wert lassen sich verschiedene Triebwerkssysteme in Bezug auf dessen Leistungsfähigkeit miteinander vergleichen. Für variierenden Schub in transienten Zuständen, wie der Startphase und dem Schubaufbau oder der

Abschaltung eines Triebwerks, kann die oben genannte Formel genutzt werden. Alternativ können gemittelte Werte für die Schubkraft und den Treibstoffmassenstrom zur Berechnung des spezifischen Impulses nach [5]

$$I_S = \frac{I_t}{g_0 m_p} = \frac{F}{g_0 \dot{m}} \quad (2.4)$$

angenommen werden. m_p entspricht der effektiv ausgestoßenen Treibstoffmasse. Die Schubkraft nach [5]

$$F = \frac{d(mv_2)}{dt} = \dot{m}v_2 \quad (2.5)$$

unter Annahme von konstanter, einheitlicher und axialer Austrittsgeschwindigkeit v_2 des ausströmenden Gases aus der Düse und konstantem Massenstrom, ist eine Reaktionskraft, hervorgerufen durch ein Triebwerkssystem, infolge von ausströmenden Gasen bei hohen Austrittsgeschwindigkeiten. Neben dem Impulsanteil in Gleichung 2.5 muss auch der Druckanteil für die Berechnung berücksichtigt werden. Aufgabe der Düsenweiterung ist die Expansion der der Verbrennungsprodukte auf Umgebungsdruck. Herrscht am Düsenaustritt ein anderer Druck p_2 als der Umgebungsdruck p_3 , hat das Auswirkungen auf den Schub. Die Schubkraft nach [5]

$$F = \dot{m}v_2 + (p_2 - p_3)A_2 \quad (2.6)$$

wird dann abweichend von Gleichung 2.5 berechnet. In Abbildung 1 ist eine schematische Abbildung von Brennkammer mit Düse und den zugehörigen Druck- und Geschwindigkeitsbereichen dargestellt.

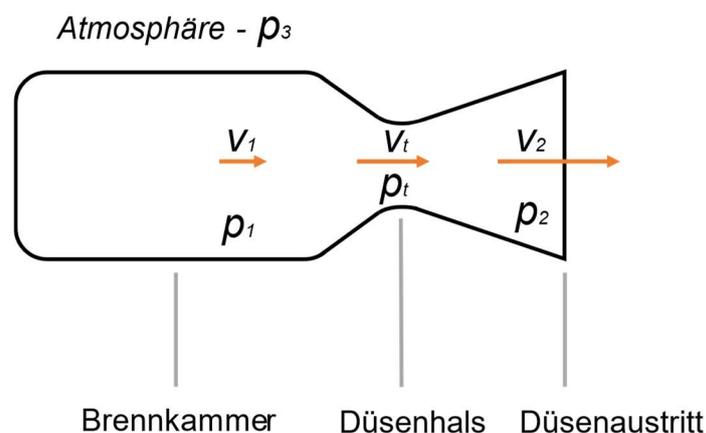


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Brennkammer mit Düse nach [5]

In Abbildung 2 ist ein typischer Aufbau eines Satellitenantriebs schematisch dargestellt. Zu sehen ist ein Zweistoffsystem mit getrennten Tanks für Oxidator und Brennstoff. Diese werden über ein Bedrückungsgas unter Druck gesetzt und in die Brennkammer eingespritzt. Dabei wird der Druck über ein Regelventil eingestellt. Aufgrund der geringen Massenströme und Brennkammerdrücke werden keine zusätzlichen Pumpen benötigt. Um transiente Betriebszustände beim Start und Abschalten des Triebwerks kurz und den Impuls möglichst konstant zu halten, sind die Ventile nahe am Injektor platziert. Das Leitungsvolumen zwischen Kontrollventil und Brennkammer wird damit minimal. Der Treibstoff wird anschließend über den Injektor in die Brennkammer initiiert. Die Verbrennungsgase treten schließlich am Ende der Düse aus.

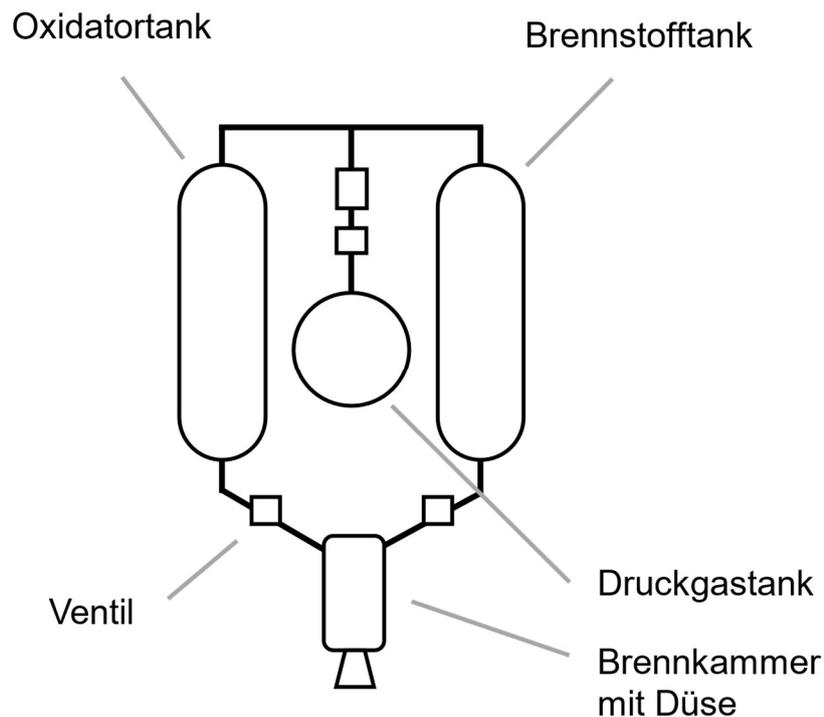


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Satellittriebwerksystems nach [5]

2.2 Flüssige Treibstoffe

Unter Treibstoffen für Raketentriebwerke versteht man allgemein Substanzen, welche unter chemischer Reaktion und thermodynamischer Zustandsänderung zur Erzeugung von Schub genutzt werden. Bei flüssigen Treibstoffen unterscheidet man zwischen Oxidator, Brennstoff, Oxidator-Brennstoff-Verbundstoffen oder vergelten Substanzen der genannten Komponenten. Das Reaktionsprinzip gibt die Bezeichnung der Treibstoffgattung vor. Einstoff-Systeme (engl. monopropellants) kombinieren Oxidator und Brennstoff in einem Fluid und sind als einzelnes Fluid reaktionsfähig. Einstoff-Systeme sind stabil bei Umgebungsbedingungen, zersetzen sich aber und erzeugen heiße Verbrennungsgase unter dem Einfluss von Wärme oder Katalysatoren. Ein Beispiel hierfür ist Hydrazine. Zweistoff-Systeme (engl. bipropellants) bestehen aus zwei separat gelagerten Treibstoffkomponenten. Zur Reaktion werden beide Komponenten im gewünschten Mischungsverhältnis in der Brennkammer gemischt. Hypergole Zweistoffsysteme entzünden sich spontan bei Kontakt zwischen Brennstoff und Oxidator. Im Gegensatz dazu benötigen nicht-hypergole Treibstoffe zusätzliche Aktivierungs- oder Zündenergie, um die Verbrennungsreaktion hervorzurufen. Zu nennen sind außerdem die kryogenen Treibstoffe. Hierunter fallen Gase wie Sauerstoff oder Wasserstoff, welche nach starker Abkühlung flüssig gelagert werden können.

Für Satellittriebwerke sind vor allem die sogenannten lagerfähigen Treibstoffe von Bedeutung. Kennzeichnend ist eine schnelle Einsatzfähigkeit auch nach langem Lagerzeitraum. Diese sind bei Umgebungsbedingungen auf der Erde flüssig und können in vollständig verschlossenen Tanks über lange Zeiträume hinweg gelagert werden. Raum-lagerfähige Treibstoffe sind bei Umgebungsbedingungen im All flüssig. Dessen Lagerfähigkeit ist abhängig vom jeweiligen Tankdesign, der Temperatur, sowie dem Tankdruck [5]. Spezielle Anforderungen an die Lagerung, wie beispielsweise aufwendige kryogene Lagerung, sind bei den sogenannten lagerfähigen Treibstoffen nicht notwendig. Das Mischungsverhältnis von Oxidator zu Brennstoff

$$ROF = \frac{\dot{m}_{\text{Oxidator}}}{\dot{m}_{\text{Brennstoff}}} \quad (2.7)$$

nach [5] wird aus dem Verhältnis der beiden Massenströme berechnet.

2.3 Funktionsweise eines Injektors

Eine wesentliche Teilkomponente eines Raketen- oder Satellittriebwerks bildet der Injektor. Dessen grundlegende Aufgaben umfassen die Einbringung der Treibstoffkomponenten in die Brennkammer, die Zerstäubung der Flüssigkeit und die Mischung von Treibstoff und Oxidator im gewünschten Verhältnis. Ziel ist es, ein homogenes Mischungsverhältnis und eine gleichmäßige Verteilung im Injektionsbereich der Brennkammer zu erhalten [5]. Aufgrund dieser Faktoren trägt der Injektor maßgeblich zur Qualität der Verbrennung bei. Eine weitere wesentliche Funktion des Injektors ist die Reduktion von Schwingungen im Antriebssystem. Brennkammer und Fördersystem neigen einzeln und in Kombination zu Schwingungen. Der Injektor hat in diesem Zusammenhang zwei Aufgaben: Die dynamische Entkopplung von Schwingungen aus dem Fördersystem in den Brennraum, als auch die dynamische Entkopplung von Verbrennungsinstabilitäten und akustischen Eigenfrequenzen der Brennkammer in die Fluidzuleitungen und Tanks.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss der Auslegung von Injektoren große Bedeutung geschenkt werden. Der Druckverlust über den Injektor muss groß genug sein, um eine gute und schnelle Treibstoffaufbereitung zu ermöglichen. Des Weiteren müssen Druckstöße durch die Verbrennung vom Fördersystem mit ausreichend Sicherheit ferngehalten werden, um beispielsweise Rückschläge in das Fluidsystem zu vermeiden. Auf der anderen Seite kann der Druckverlust über den Injektor nicht beliebig hoch gesetzt werden, da dadurch die Druckniveaus und dadurch die Anforderungen an die Komponenten des Fluidsystems steigen. Darunter fällt vor allem die erhöhte Belastbarkeit der Bauteile bei höheren Druckniveaus, wodurch die Komponenten schwerer werden. Typische Anhaltswerte aus der Literatur bezüglich der Druckverluste, welche bei den Injektoren angepeilt werden sollten, liegen im Bereich von 25% bis 50% des Brennkammerdrucks [7]. Mittels dem Düsenaustrittskoeffizient eines Injektors nach [5]

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A\sqrt{2\rho\Delta p}} = \frac{\dot{m}_{\text{experimentell}}}{\dot{m}_{\text{theoretisch}}} \quad (2.8)$$

Kann die Strömung durch einen Injektor verdeutlicht werden. Dabei bildet das Verhältnis von real gemessenem zu theoretischem Massenstrom den dimensionslosen Korrekturwert C_d . Massenstrom und Druckverlust nehmen Einfluss auf den Düsenaustrittskoeffizienten. Hohe C_d -Werte deuten auf strömungsgünstigere Verhältnisse hin.

Grundsätzlich lassen sich Injektoren für Raketenanwendungen abhängig vom Einspritzprinzip in drei Kategorien unterteilen:

1. Drall-Einspritzung
2. Strahl-Einspritzung
3. Pintle-Einspritzung

2.3.1 Drall-Einspritzung

Der Drall-Injektor beschreibt das Injektionsverfahren, bei dem die Treibstoffkomponenten mit einem ausgeprägten Tangentialanteil in die Drallkammer eingespritzt werden. Durch die Drallkammer werden die Fluide in Rotation versetzt und treten am Ende der Drallkammer mit einer radialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponente aus. Dabei bildet sich ein

Flüssigkeitsfilm in Form eines Hohlkegels, der anschließend in kleine Tröpfchen zerfällt. Für Zweistoffsysteme sind die Drallkammern von Oxidator und Brennstoff meist koaxial zueinander angeordnet. Diese Konfiguration ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die blau-gestrichelten Linien entsprechen dabei dem Sprühwinkel der beiden Fluide. Drall-Injektoren werden zusätzlich in zwei Kategorien eingeteilt: Open-End und Closed-End. Open-End-Drall-Injektoren weisen für Drallkammer und Düse denselben Durchmesser auf. Beim Closed-End-Drall-Injektor ist der Düsenradius kleiner als der Drallkammerradius. Teilweise werden auch konstruktiv voneinander getrennte Drall-Injektoren für Oxidator und Brennstoff eingesetzt. Bei Einstoff-Systemen können beispielweise einzelne Drall-Injektoren zum Einsatz kommen. Geeignet ist das Prinzip aufgrund geometrischer Bedingungen besonders für geringe Massenströme [7]. Mit steigenden Massenströmen steigt die Größe und das Gewicht des Injektors stark an [8]. Treibstoffaufbereitung und Verbrennung nehmen einen verhältnismäßig großen Raum ein. Daher eignen sich Drall-Injektoren besonders als Einzel-Element-System, das heißt für kleine Triebwerke mit einem Injektor-Element. Eine induzierte Rezirkulationszone im Zentrum des Sprays erlaubt es die Brennkammern kurz zu halten. Beim Einsatz zweier koaxial angeordneter Drall-Injektoren bildet sich ein Doppelhohlkegel des Sprays aus [7].

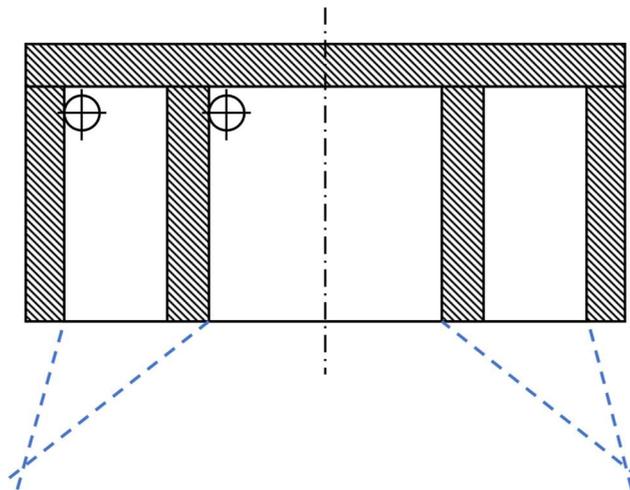


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Koaxial-Drall-Injektors (Typ Open-End) nach [5]

2.3.2 Strahl-Einspritzung

Beim Strahlinjektor wird der Treibstoff zunächst als Flüssigkeitsstrahl durch Bohrungen in die Brennkammer initiiert. Strahlinjektoren lassen sich in aufeinanderprallende und parallele Strahleneinspritzung unterteilen.

Beim Prallinjektor erfolgt die Treibstoffaufbereitung durch Gegeneinanderspritzen zweier oder mehrerer Flüssigkeitsstrahlen unter einem definierten Winkel. In Abbildung 4 ist ein schematischer Aufbau eines 2-auf-1 Prallinjektors dargestellt. Möglich sind sogenannte like-on-like-Prallinjektoren. Für diesen Fall treffen Strahlen derselben Treibstoffkomponente, Oxidator und Oxidator oder Brennstoff und Brennstoff, aufeinander. Bei sogenannten Unlike-Prallinjektoren werden Strahlen beider Treibstoffkomponenten gegeneinander gespritzt. Durch Variation von Anzahl und geometrischer Anordnung der Einspritzbohrungen ergibt sich eine große Zahl an Kombinationsmöglichkeiten. Je nach Konfiguration ergeben sich unterschiedliche Sprayformen (Vollkegel, ‚zweidimensionaler‘ Flüssigkeitsfilm).

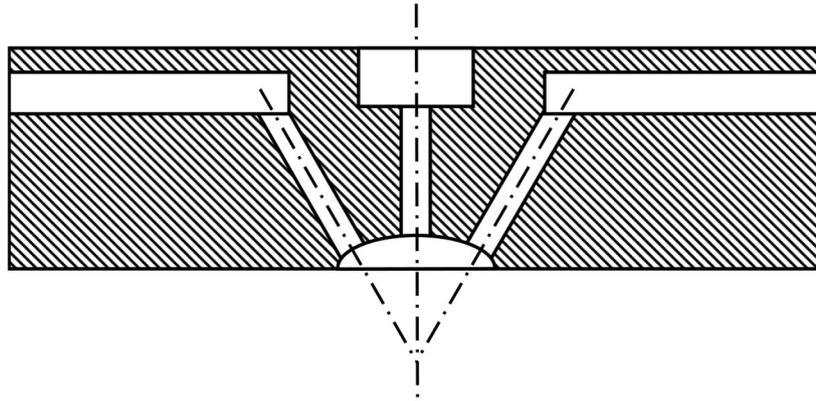


Abbildung 4: schematische Darstellung eines 2-auf-1 Prall-Injektors nach [5]

Prallinjektoren weisen beim Aufeinandertreffen der Strahlen eine unerwünschte Rückströmung des Treibstoffs zur Injektorplatte auf. Das führt zu höherer thermischer Belastung der Injektorplatte. Die Rückströmung kann Ursache für erhebliche Verbrennungsinstabilitäten sein. Grundlegend für eine einwandfreie Funktion eines Prallinjektors ist ein präzises Aufeinandertreffen der Strahlen. Das erfordert äußerst enge Fertigungstoleranzen der Einspritzbohrungen. Die Bohrungsdurchmesser liegen oftmals im Bereich von 1 mm und darunter. Wesentlicher Vorteil von Prallinjektoren ist der vergleichsweise einfache Aufbau [7].

Bei der Parallel-Einspritzung werden die Treibstoffstrahlen axial zur Brennkammer eingebracht. Mischung und Aufbereitung erfolgen durch Turbulenz in der Brennkammer. Oxidator und Brennstoff treten dabei als einzelne Strahlen aus dem Injektor aus. Koaxial-Strahl-Injektoren sind eine Variante der Parallel-Einspritzung und zeichnen sich durch die beiden koaxial zueinander ausgerichteten Injektorelemente aus. Die beiden Treibstoffkomponenten werden dabei in direkten Kontakt miteinander gebracht. Differenzgeschwindigkeiten beider Komponenten rufen Scherkräfte hervor, unter denen die Gemischaufbereitung stattfindet. Für einen ausgewogenen Gesamtentwurf sollten beide Treibstoffkomponenten etwa den gleichen Einspritzdruckverlust aufweisen. Aus diesem Grund eignet sich die Koaxial-Strahl-Einspritzung besonders für Kombinationen mit großen Dichteunterschied. Erzielte Verbrennungswirkungsgrade liegen bei 99% und darüber. Besonders geeignet sind Koaxial-Strahl-Injektoren für Multielement-Systeme. Die Anzahl an Einspritzelementen lässt sich für verschiedene Triebwerksgrößen skalieren [7].

2.3.3 Pintle-Einspritzung

Ein Pintle-Injektor bildet ähnlich wie ein Drall-Injektor einen hohlen konischen Flüssigkeitsfilm aus. Charakteristisch für diese Art von Injektoren ist der Pintle-Zapfen in der Mitte des Injektors. Der schematische Aufbau eines Pintle-Injektors ist in Abbildung 5 zu sehen. Die blau-gestrichelten Linien demonstrieren dabei das Aufeinandertreffen der beiden Flüssigkeitsfilme. Ein Fluid strömt dem Pintle-Zapfen entlang zur Spitze und wird am Spitzeneende in radialer Strömungsrichtung umgelenkt. Das zweite Fluid strömt außen am Pintle-Zapfen in einem Ringspalt zur Spitze. Mischung und Aufbereitung des Treibstoffs erfolgen beim Aufeinandertreffen beider Fluide an der Pintle-Spitze. Aufgrund der Bauform von Pintle-Injektoren eignen sich diese auch für drosselbare Anwendungen. Mit einem axial beweglichen Pintle-Zapfen können die durchströmten Querschnittsflächen variiert werden. Damit können die Einspritzbedingungen unterschiedlich eingestellt werden. So ist es möglich, den Massenstrom eines Injektors über einen weiten Bereich zu variieren und dennoch günstige Einspritzbedingungen für ein geeignetes Sprühbild zu erhalten [5].

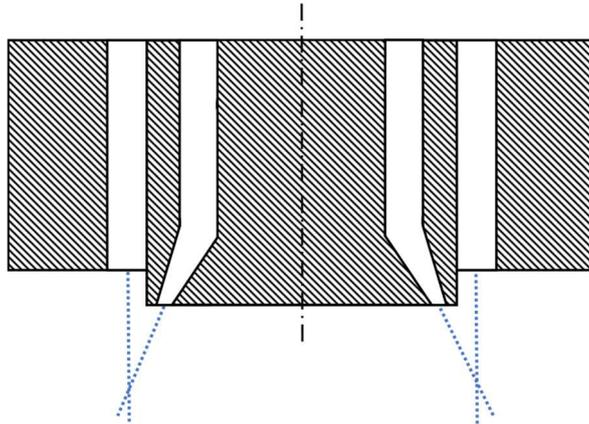


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Pintle-Injektors nach [9]

2.4 Grundlegende Kenn- und Betriebsdaten eines Satellittriebwerks

Abhängig vom gewünschten Einsatzzweck, der gewählten Schubklasse und dem verwendeten Treibstoff gibt es eine Vielzahl typischer Betriebsgrößen für Satellittriebwerke. Um später die Anforderungen an die Versprühkammer ableiten zu können, soll ein typisches Satellittriebwerk als Grundlage verwendet werden. Die Grundlage für diese Arbeit ist ein 40 N Triebwerk, welches in der Abteilung SOA entwickelt wurde. Das 40 N Triebwerk nutzt den DLR-patentierten Treibstoff HIP_11. HIP_11 ist eine Treibstoffkombination aus einem ionischen Liquid als Brennstoff und hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid als Oxidator. Dieses Zweistoffsystem bildet eine hypergole Treibstoffkombination [4].

Negri und Lauck [4] nennen zur Auslegung typische Betriebsdaten eines Satellittriebwerks. Das Triebwerk wird für einen Brennkammerdruck von 10 bar ausgelegt. Die Schubdüse wurde für einen Betrieb im Vakuum ausgelegt. Bei einem ROF von ungefähr 3,9 wird der höchste theoretische spezifische Impuls von 313 s erreicht.

Eingesetzt wurde ein 2-auf - Prallinjektor mit einem gemessenen Düsenaustrittskoeffizienten C_d von 0,8 und einem Strahlenwinkel von 60° der beiden Oxidatorstrahlen. Die Austrittsdurchmesser der Bohrungen wurden mit einem Durchmesser von 0,3 mm für die Brennstoffbohrung und 0,4 mm für die Oxidatorbohrungen auf einen Druckverlust von 8 bar ausgelegt. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Triebwerksdaten aus [4] zusammengestellt.

Treibstoff- und Injektordaten		
	Brennstoff	Oxidator
Treibstoff	EMIM SCN + Cu SCN (5%)	Wasserstoffperoxid (HTP, 97%)
Treibstoff Dichte (25°C)	1110 kg/m ³	1430 kg/m ³
Druckverlust Injektor	8 bar	8 bar
Durchmesser	1 x 0,3 mm	2 x 0,4 mm
Massenströme	2,40 g/s	9,63 g/s

Tabelle 1: Übersicht der Auslegungsdaten aus [4]

In Tabelle 2 ist eine Zusammenfassung der Testergebnisse aus [4] zu sehen.

Versuchsdaten	
Brennkammerdruck	4,33 bar bis 9,53 bar
Druckverlust Injektor - Brennstoff	1,38 bar bis 5,79 bar
Druckverlust Injektor - Oxidator	3,21 bar bis 6,24 bar
Massenstrom gesamt	7 bis 13 g/s
Mischungsverhältnis (ROF)	3 bis 7

Tabelle 2: Übersicht der Versuchsdaten aus [4]

2.5 Grundlagen Versprühung und Injektoren

Wichtige Kennzahlen im Zusammenhang mit Tropfenbildung und Zerstäubung sind die Reynoldszahl nach [10]

$$Re = \frac{\rho U a}{\eta} \quad (2.9)$$

und Weberzahl nach [10]

$$We = \frac{\rho U^2 a}{\sigma_s}. \quad (2.10)$$

Die Reynoldszahl beschreibt das Verhältnis zwischen Trägheits- und viskosen Kräften, was letztlich dem Turbulenzgrad einer Strömung entspricht. Die Weberzahl beschreibt das Verhältnis zwischen Trägheits- und Oberflächenspannungskräften und kann unter anderem zum Charakterisieren des Tropfenzerfalls frei fliegender Tropfen herangezogen werden. Kombiniert man beide Kennzahlen erhält man die Ohnesorgezahl nach [10]

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{\sqrt{\rho \sigma_s a}} \quad (2.11)$$

wobei die Geschwindigkeit eliminiert wird. Mit Hilfe der Ohnesorgezahlen können Zerstäubungsvorgänge in Re - Oh -Diagrammen beschrieben werden. Aus den dimensionslosen Kennzahlen geht hervor, dass vor allem die rheologischen Eigenschaften Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung bei der Versprühung von Fluiden eine wichtige Rolle spielen. Der repräsentative mittlere Tröpfchendurchmesser nach [7]

$$D_{32} = SMD = \frac{\sum d^3 \Delta n}{\sum d^2 \Delta n} \quad (2.12)$$

auch Sauter-Mean-Durchmesser genannt, ist eine Näherung zur Beschreibung des vorliegenden Tröpfchendurchmessers im Spray. Der Durchmesser wird beschrieben durch das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der gesamten Tröpfchenmenge im Spray. Der Tropfendurchmesser ist stark abhängig von der Einspritzgeschwindigkeit.

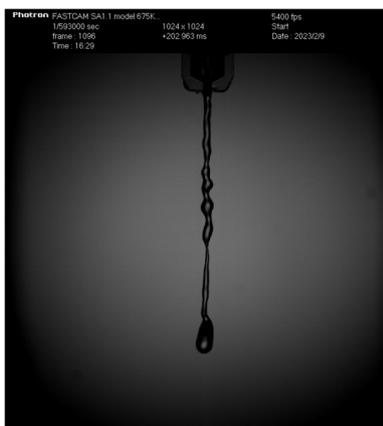
Sogenannte Sprayregime beschreiben abhängig von den Betriebsparameter und Fluideigenschaften verschiedene Erscheinungsformen des Sprays. Ziel ist meist eine vollständige Zerstäubung der Fluide. Bei geringen Druckverlusten entstehen meist nur einzelne Tropfen oder Flüssigkeitsstrahlen. Diese Strahlen können bereits in Tropfen zerfallen. Dieses Aufbrechverhalten in Haupt- und kleinere Satellitentropfen wird als Plateau-Rayleigh-Instabilität bezeichnet [10]. In Abbildung 6 ist das Aufbrechverhalten eines Flüssigkeitsstrahl zu erkennen.

In der Aufnahme ist ein Drall-Injektor im transienten Zustand dargestellt. Zu sehen sind die großen Haupt- und kleineren Satellitentropfen.



Abbildung 6: Plateau-Rayleigh-Instabilität mit Haupt- und Satellitentropfen

Bei moderaten Einspritzbedingungen können bei Drall-Injektoren liquide Schichten entstehen. Aus Abbildung 7 gehen die verschiedenen Sprayegime beispielhaft für einen Drall-Injektor hervor. Der aus der Düse austretende Flüssigkeitsfilm bricht unter Schwingungen in einzelne Ligamente auf. Diese Ligamente zerfallen anschließend in eine Vielzahl kleiner Tropfen. Als Abbruchlänge s wird dabei die Strecke zwischen Düsenöffnung und Abbruchgrenze des Flüssigkeitsfilms bezeichnet. Der Sprühwinkel φ definiert den Winkel zwischen außen am Spray oder Flüssigkeitsfilm angelegten beiden Tangenten.



(a)



(b)



(c)



(d)

(e)

(f)

Abbildung 7: Verschiedene Sprayregime und Instabilitäten eines Drall-Injektors, (a): Strahl, (b): Plateau-Rayleigh-Instabilität, Rayleigh-Taylor-Instabilität, (c): Aufbau eines Flüssigkeitsfilms, (d): Zwiebel-Regime, (e): Tulpen-Regime, (f): ausgebildeter Sprühkegel mit Flüssigkeitsfilm, Kelvin-Helmholtz-Instabilität

In einem zweidimensionalen Flüssigkeitsfilm wird die Instabilität hauptsächlich hervorgerufen durch aerodynamische Interaktion zwischen Flüssigkeit und umgebenden Gas. Bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten der beiden Fluide bilden sich longitudinale Wellen aus, welche weiterhin in sogenannte Ligamente aufbrechen und anschließend in einzelne Tropfen zerfallen [11]. Im Gegensatz zu zylindrischen Flüssigkeitsstrahlen neigen vorliegende Oberflächenkräfte dazu, eine ebene Fläche zu stabilisieren. Die Schwingungen des Flüssigkeitsfilms werden in zwei Typen unterteilt. Unterschieden wird zwischen symmetrischen und antisymmetrischen Schwingungen. Beim symmetrischen Typ bleibt die Mittelebene des Flüssigkeitsfilms in Ruhe und ohne Auslenkung, die Schwingungen bewegen sich symmetrisch von der Mittelebene nach außen und zurück. Beim antisymmetrischen Typ schwingt der Flüssigkeitsfilm in Form einer Sinuswelle [10]. Hervorgerufen wird die Wellenbildung zunächst durch beispielsweise eine Ablenkung beziehungsweise Störung von außen. Am Wellenberg kommt es zur Ausbildung eines Druckgradienten. Ein lokaler statischer Unterdruck infolge der höheren Strömungsgeschwindigkeit nach Bernoulli lässt die Amplitude dabei in Richtung der schneller strömenden Phase anwachsen. Dies ist in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Instabilitäten in Wellenform, die durch aerodynamische Kräfte auf einen Flüssigkeitsfilm hervorgerufen werden, nennt man Kelvin-Helmholtz-Instabilität [10].

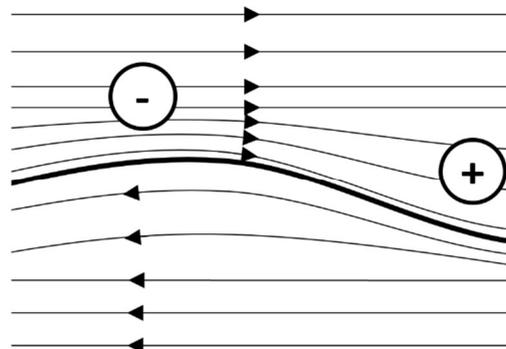


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Kelvin-Helmholtz-Instabilität hervorgerufen durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten nach [10]

Die Rayleigh-Taylor-Instabilität beschreibt eine hydrodynamische Instabilität an den Grenzflächen zweier Fluide mit verschiedener Dichte. Diese Strömungsinstabilitäten bilden sich bei Beschleunigung eines Fluids in Richtung des anderen Fluids aus. Hervorgerufen werden turbulente chaotische Bewegungen. In Abbildung 9 ist dieses Phänomen exemplarisch dargestellt. Das Fluid 1 mit höherer Dichte befindet sich oberhalb von Fluid 2. Beide sind der Schwerkraft ausgesetzt. Das System ist instabil. Eine geringfügige Störung des Systems reicht aus, um die Fluide aus ihrer ursprünglichen Lage zu bringen. Aufgrund der Gravitationskraft wird Fluid 1 mit höherer Dichte in Richtung von Fluid 2 mit geringerer Dichte beschleunigt.

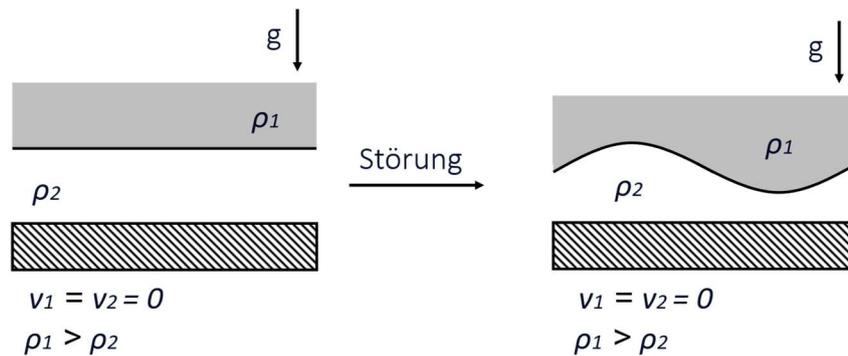


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Rayleigh-Taylor-Instabilität nach [10]

2.6 Verhalten von Sprays bei Umgebungsdruck

Der Versuchsteil dieser Bachelorthesis befasst sich mit den Effekten und Auswirkungen unterschiedlicher Gegendrücke auf die strömungstechnischen Eigenschaften eines Injektors. Untersucht werden vor allen Dingen charakteristische Eigenschaften wie Sprühwinkel, Abbruchlänge und Tropfengröße. Auch die Form des Sprays soll charakterisiert werden. Zu Versprühung bei Gegendruck wurden in der Vergangenheit bereits unterschiedliche Paper oder wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht.

Strakey und Talley [12] untersuchten im Jahr 2000 die Effekte von Gegendruck auf das Sprühbild eines Prallinjektors mit zwei identischen Bohrungen, zwei Strahlen desselben Mediums und einem Strahlwinkel von 60° . Variiert wurden Massenströme zwischen 6 und 56 g/s bei Gegendrücken zwischen 1 und 104 bar absolut. Die Tanks wurden mit Stickstoff bei Umgebungstemperatur bedrückt. Als Prüfmedium kam Wasser zum Einsatz. Die Messungen wurden bei Injektionsgeschwindigkeiten von 5 bis 50 m/s und daraus resultierenden Reynoldsbeziehungsweise Weberzahlen von 6000 bis 60 000 beziehungsweise 0,47 bis 4800 vorgenommen. Bei geringen Austrittsgeschwindigkeiten aus dem Injektor von 5 m/s waren die Tropfen zumeist nicht kugelförmig. Angegeben werden Größen von $5000 \mu\text{m}$ für geringe Kammerdrücke. Bei hohen Geschwindigkeiten konnten Tropfengrößen von $60 \mu\text{m}$ gemessen werden. Grundsätzlich konnten geringfügige Zusammenhänge zwischen steigenden Kammerdrücken und sinkenden Tropfengrößen bis 30 bar festgestellt werden. Für höhere Drücke wurden signifikant sinkende Tropfengrößen beobachtet. Aus den Versuchen geht eine, sowohl für höhere Austrittsgeschwindigkeiten, als auch höhere Gegendrücke, sinkende Abbruchlänge des Sprays hervor. Ausnahme bildet ein Bereich von 5 bis 10 m/s bei Umgebungsdruck von 1 bar. Hier wird eine steigende Abbruchlänge für steigende Austrittsgeschwindigkeiten beschrieben. Der Sprühwinkel nahm mit zunehmendem Gegendruck ab.

2017 veröffentlichten die beiden Wissenschaftler Hanna und Zoughaib [13] ihre Ergebnisse zu Sprühversuchen mit hochviskosen Fluiden. Untersucht wurde ein Drall-Injektor bei variierendem Gegendruck. Als Injektionsfluid wurde Öl mit einer Viskosität, abhängig von der Temperatur, zwischen 55,9 und 134,9 mm²/s eingesetzt. Die Druckkammer wurde mit CO₂ bedrückt. CO₂ weist eine im Vergleich zu Stickstoff höhere Dichte auf. Bei gleichem Druck können so höhere Dichten im Umgebungsmedium erreicht werden. Variiert wurden der Injektionsdruck bis 40 bar, Kammerdruck mit 1 bis 10 bar, sowie die Öltemperatur. Dabei wurden Massenströme von 0,2 bis 1 g/s erreicht. Der Messpunkt zur Tropfengrößenermittlung lag 10 cm unterhalb des Injektoraustritts. Gemessen werden konnten Tropfengrößen D_{32} zwischen 25 µm und 40 µm. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen steigendem Injektionsdruck und sinkender Tropfengröße festgestellt werden. Auch zunehmende Öltemperaturen führten zu feinerer Zerstäubung infolge der sinkenden Viskosität. Da für die aufgeführten Messergebnisse mehrere Parameter gleichzeitig variiert wurden, geht keine Aussage zur Relation zwischen Kammerdruck und Tropfengröße aus der Veröffentlichung hervor.

Chen et al. [14] veröffentlichten 2017 ebenfalls Ergebnisse zu Untersuchungen eines Open-End Drall-Injektors bei unterschiedlichen Gegendrücken. Eingesetzt wurde Wasser als Injektionsmedium, sowie Luft als Bedrückungsgas. Die Massenströme lagen bei 42 bis 416 g/s. Der Kammerdruck wurde in einem Bereich von 1 bis 21 bar absolut variiert. Wie in den zuvor genannten Veröffentlichungen konnten mit zunehmendem Kammerdruck sinkende Sprühwinkel, als auch sinkende Abbruchlängen beobachtet werden. Dies führte zu einem deutlichen Anstieg der Tröpfchenzahl im Versprühbereich. Die Form des Sprays änderte sich von einem Hohlkegel bei Umgebungsdruck zunehmend hin zu einer glockenähnlichen Form mit steigendem Gegendruck. Kleinere Sprühwinkel bei höherem Gegendruck werden in der Veröffentlichung mit Druckdifferenzen zwischen Innen- und Außenbereich des Sprühkegels begründet. Beschrieben wird eine Rezirkulationszone innerhalb des Hohlkegels, in dem Gas zunächst auf die Innenseite des Kegels strömt und anschließend entlang des Flüssigkeitsfilms wieder nach außen tritt. Mit steigendem Gegendruck in der Kammer sinkt die Größe und der Druck der Rezirkulationszone. In den Abbildung 10 sind die Rezirkulationszonen für steigenden Umgebungsdruck zu erkennen. In blau dargestellt ist ein Schnitt durch den Sprühkegel. Die grauen Pfeile zeigen die Strömung im Inneren. Die Form des Flüssigkeitsfilms wird aufgrund des sinkenden Drucks nach innen gezogen. Die Form ändert sich vom Hohlkegel zur Glocke.

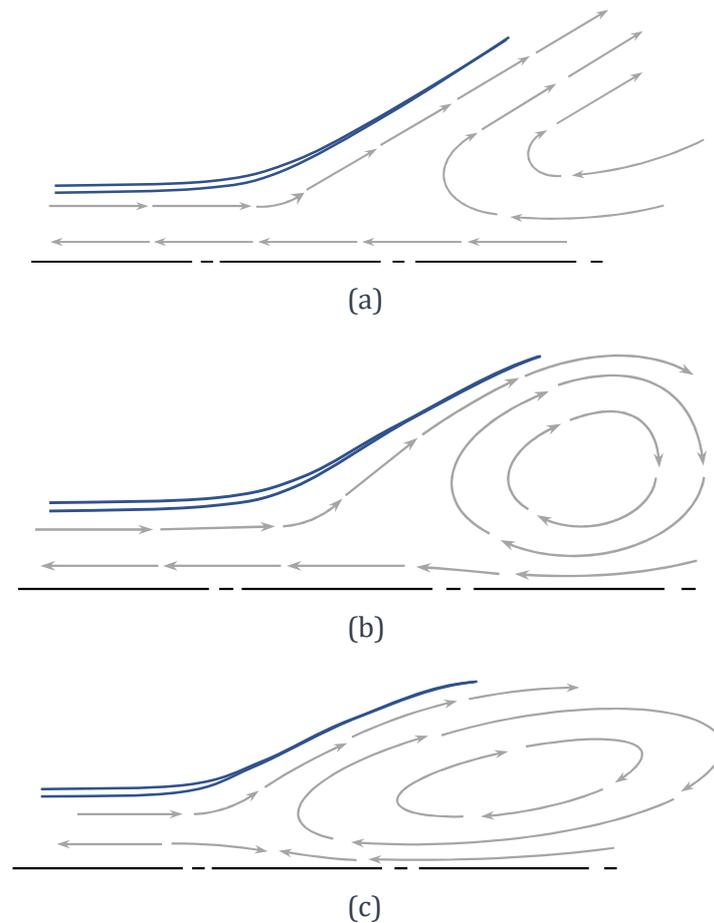


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Stromlinien im Inneren eines Sprühkegels und dessen Formveränderung bei steigendem Umgebungsdruck nach [15], (a): Atmosphärischer Druck/Referenzdruck, (b): Mittlerer umgebungsdruck, (c): Hoher Umgebungsdruck

Eine Abnahme der Abbruchlänge für steigenden Kammerdruck wird auf die damit einhergehende erhöhte Gasdichte zurückgeführt. Ein erhöhter aerodynamischer Widerstand des Flüssigkeitsfilms in erhöhter Gasdichte führt zu einer früheren Atomisierung. Auch ein erhöhter Druckverlust über den Injektor selbst resultiert in einem früheren Tropfenzerfall und kürzerer Abbruchlänge. Mit zunehmendem Druckverlust steigt die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Injektor, was wiederum zu höheren aerodynamischen Kräften führt. Zudem nimmt die Filmdicke der Flüssigkeit infolge der höheren Geschwindigkeit in der Drallkammer des Injektors ab, was eine frühere Tropfenbildung ebenfalls begünstigt.

Chen et al. [14] beschreiben außerdem einen Zusammenhang zwischen Kammerdruck und Düsenaustrittskoeffizient C_d . Besonders für geringe Druckverluste über dem Injektor konnte eine starke Variation festgestellt werden. Mit zunehmendem Gegendruck, bei konstantem Druckverlust, sank der Wert des Koeffizienten. Bei einem Druckverlust von 1 bar konnten bei Kammerdrücken von 1 beziehungsweise 21 bar einer Abweichung von bis zu 22,6% festgestellt werden. Für einen Druckverlust von 7 bar konnte hingegen eine Abweichung von weniger als 1% festgestellt werden.

Sänger [11] untersuchte experimentell den Zerstäubungsvorgang einer außenmischenden Koaxial-Strahl-Düse (Gas und Flüssigkeit) unter Einfluss des Umgebungsdrucks. Zerstäubt wurde Wasser mit einer Viskosität η_l von 1 mPa s, sowie drei hochviskose Wasser-Glycerin Mischungen mit Viskositäten η_l von 100 mPa s bis 400 mPa s. Der Kammerdruck wurde dabei zwischen 1 und

21 bar absolut variiert, Gasaustrittsgeschwindigkeit und Flüssigmassenstrom wurden dabei konstant gehalten. Für Wasser beschreibt Sänger im gesamten Betriebsbereich einen Fadenzerfall. Bei Versprühung der hochviskosen Flüssigkeiten konnte für geringe aerodynamische Kräfte zunächst ein Membranzerfall festgestellt werden, welcher mit steigendem Kammerdruck ebenfalls in den Fadenzerfall überging. Wie auch in der zuvor genannten Literatur konnte mit steigendem Gegendruck für alle Viskositäten eine Abnahme des Sprühwinkels ermittelt werden. Der Einfluss des Gegendrucks verringerte sich jedoch mit steigender Viskosität. Untersucht wurde zudem die Tropfengröße der jeweiligen Fluide. Bei konstantem Gegendruck und konstanter Austrittsgeschwindigkeit konnten für eine steigende Viskosität steigende Tropfengrößen betrachtet werden. Bei zunehmendem Druck innerhalb der Versprühkammer konnten sinkende Tropfengrößen für alle untersuchten Viskositatsbereiche festgestellt werden. Besonders stark ausgeprägt war die Abnahme der Tropfengröße im Bereich zwischen 1 und 7 bar absolut. Mit Wasser wurden bei Gasaustrittsgeschwindigkeiten von 58 m/s und einem Fluidmassenstrom von 3,3 g/s für den Sauter-Durchmesser D_{32} Werte zwischen etwa 275 μm als größter Wert bei Umgebungsdruck und 75 μm als geringster Wert bei 21 bar gemessen. Für die Wasser-Glycerin Mischungen konnten unter gleichen Testbedingungen Werte zwischen 400 μm (1bar, $\eta_l = 100 \text{ mPa s}$) und 150 μm (21 bar, $\eta_l = 100 \text{ mPa s}$) aufgezeichnet werden. Die Durchmesser von Wasser sind in allen Druckbereichen für alle radial abgefahren Positionen (- 50 bis +50 mm) weitgehend konstant, wohingegen die Durchmesser der hochviskosen Mischungen vom Injektoraustritt nach außen hin in allen Druckbereichen stark zunahmen.

2.7 Optisch zugängliche Verspruhkammern aus der Literatur

Die in Kapitel 2.6 genannten Wissenschaftler beschreiben in ihren Veröffentlichungen teilweise konstruktive Details zu den in den Versuchen eingesetzten Verspruhkammern. Strakey und Talley [12] nennen für die Kammer einen Durchmesser von 500 mm, als Werkstoff wird Edelstahl angegeben. Für optische Messungen sind in Summe vier Saphirscheiben integriert, davon drei mit einem Durchmesser von 50 mm und eine mit einem Durchmesser von 120 mm. Die Höhe sowie das Volumen der Kammer sind nicht angegeben. Getestet werden können Einzelinjektoren bis zu einem Gegendruck von 138 bar.

Hanna und Zoughaib [13] machen keine Angaben zu den geometrischen Daten der Kammer. Aus einem Bild des experimentellen Aufbaus kann der Durchmesser der Kammer zumindest abgeschätzt werden (im Vergleich zum abgebildeten Tropfengrößenmessgerät). Dieser bewegt sich im Bereich von 200 mm bis 250 mm. In die Kammer sind drei runde Fenstereinsatze integriert, zwei davon koaxial gegenüberliegend, das Dritte auf gleicher Höhe und rechtwinklig dazu. Die Scheibendurchmesser werden auf etwa 70 mm geschätzt. Als Scheibenwerkstoff wird Borosilikatglas mit einer Lichtdurchlässigkeit von 90% für die Wellenlänge des verwendeten Lasermessgerats angegeben. Die Kammer ist auf dem Foto nicht mit der vollen Höhe abgebildet, der sichtbare Teil lässt auf eine Höhe von über 1000 mm schließen. Der Deckel ist als glatter Flansch ausgeführt. In der Kammer ist jeweils ein Druck- und Temperatursensor verbaut.

Chen et al. [14] nennen für die eingesetzte Versprühkammer einen Innendurchmesser von 500 mm und eine Gesamthöhe von 2000 mm. Der Auslegungsdruck wird mit 50 bar angegeben. Die Kammer ist mit vier gleichgroßen Rundfenstern ausgestattet. Der Sichtdurchmesser beträgt 120 mm. Zusätzlich ist die Kammer mit einem Stickstoffspulsystem an den Scheiben ausgestattet. Dies verbessert die Sicht in die Kammer und verhindert ein Beschlagen oder Absetzen von Tropfen an den Scheiben. Ein Sicherheitsventil an der Kammer begrenzt den maximal möglichen Kammerdruck auf 50 bar.

Sänger [11] beschreibt eine Versprühkammer für die durchgeführten Versuche mit einer Gesamthöhe von 3000 mm und einem Durchmesser von 300 mm. Unterteilt ist die Kammer in

drei miteinander verschraubte Teilsegmente: Zerstäuber kammer, Beruhigungskammer mit Strömungsgleichrichter und Sumpf. Integriert sind drei Fenster. Zwei der Sichtfenster liegen koaxial gegenüber, das Dritte ist mit einem Winkelversatz von 70° angeordnet. Alle optischen Zugänge verfügen über ein Spülluftsystem. Dieses soll eine Tröpfchenansammlung an den Scheiben verhindern. Als Strömungsgleichrichter wird ein Wabengitter (Form: Bienenwabe) mit einer Zellgröße von 6,35 mm verwendet, die Höhe des Wabengitters beträgt 100 mm. Im sogenannten Sumpf unterhalb des Wabengitters ist ein Rührwerk integriert. Dieses verhindert beim Einsatz von Suspensionen Sedimentation am Boden der Kammer.

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen neue Testmöglichkeiten geschaffen werden, mit denen Cold-Flow-Injektor-Tests in simulierten Brennkammerbedingungen durchgeführt werden können. Zusätzlich sollen erste Versuche bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken durchgeführt werden. Die Arbeit wird in zwei Teilbereiche untergliedert.

3.1 Auslegung, Konstruktion und Fertigung einer Versprühkammer

Zur Untersuchung des grundlegenden Sprühverhaltens verschiedener Injektoren und Treibstoffgemischen bei simulierten Brennkammerdrücken soll im ersten, dem konstruktiven Teil, eine optisch zugängliche Versprühkammer ausgelegt, konstruiert und umgesetzt werden. So können im Gegensatz zur atmosphärischen Versprühung Einflüsse auf das Spray wie Umgebungsgas, Gegendruck, und Temperatur gezielt eingestellt werden. Mittels optischer Mess- und Auswerteverfahren, wie Shadowgraphy und lasergestützter Tropfengrößenmessung, sollen Sprayvermessungen durchgeführt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit sollen primär die Einflüsse von Umgebungsdruck, speziell simulierte Brennkammerdrücke, auf das Spray untersucht werden, wobei die Kammer auch für Vakuumeinspritzung, erhöhte Umgebungstemperaturen oder unterschiedliche Umgebungsgase ausgelegt sein soll.

Folgende Ziele sollen im ersten, konstruktiven Teil umgesetzt:

- 1) Identifikation der Anforderungen mit Lastenheft
- 2) Rechnerische Auslegung der Versprühkammer
- 3) Konstruktion der Versprühkammer
- 4) Fertigung der Versprühkammer
- 5) Integration der Versprühkammer in den bestehenden Prüfstands Aufbau

3.2 Untersuchung des Sprayverhaltens unter Einfluss von Gegendruck

Im zweiten, experimentellen Teil der Arbeit sollen mithilfe der zuvor gebauten Versprühkammer eingehende Untersuchungen eines Injektors bei verschiedenen Gegendrücken vorgenommen werden. Untersucht werden sollen typische Betriebszustände des Massenstroms, Druckverlustes über den Injektor, und Gegendrücken der am M11 getesteten Triebwerke. Dabei soll das Sprayverhalten analysiert und charakterisiert werden. Dazu zählen Sprühform, Sprühwinkel, Abbruchlänge und Tropfengröße. Abschließend sollen die Ergebnisse mit der Literatur verglichen werden. Nach Abschluss aller Versuchsreihen sollen die folgenden zwei Fragestellungen beantwortet sein:

Für den zweiten, experimentellen Teil sollen die nachfolgenden Ziele realisiert werden:

- 1) Untersuchung des Kammereinflusses im Vergleich zu atmosphärischen Bedingungen
- 2) Vergleich der Injektormessdaten mit den Auslegungswerten
- 3) Charakterisierung des Sprayverhaltens bei unterschiedlichen Gegendrücken

4 Projektplanung

Für eine erfolgreiche Projektarbeit ist es von besonderer Relevanz, zu Beginn einen roten Faden festzulegen. Mit dessen Struktur können Meilensteine und Teilaufgaben definiert und in zeitliche Abschnitte eingeteilt werden. So lassen sich vor Projektstart klare Prioritäten und zusätzliche Optionen festlegen. Mögliche Schwierigkeiten, welche im Verlauf des Projekts auftreten können, können so frühzeitig identifiziert werden.

Für das Projekt Bachelorthesis ist eine Gesamtzeit von sechs Monaten beziehungsweise sechsundzwanzig Wochen angesetzt. Hierbei wurden zu Beginn der Projektarbeit sechs Projektphasen definiert. Der Projektplan mit zeitlichen Vorgaben kann dem Anhang (Anhang A) entnommen werden.

4.1 Phase 1 – Einarbeitung und Recherche

Zu Beginn eines neuen Projektes steht zunächst die Einarbeitung im Vordergrund. Hierunter fallen zum einen Kennenlernen des Standortes, die Einfeldung in das Team, Einführungsveranstaltungen, Sicherheitsunterweisungen und organisatorische Abläufe. Weiterhin gilt es ein grundlegendes Verständnis für das zu bearbeitende Themenfeld Raketenantriebe zu erlangen.

Nach Abschluss der Einarbeitungsphase soll das nötige ‚Werkzeug‘ zur Umsetzung bereitstehen. Dazu gehören ebenfalls institutsinterne Abläufe wie Bestellvorgänge, Datenaustausch und Ansprechpartner.

Ziel der ersten Phase ist die Einarbeitung mittels bereitgestellter Literatur. Diese soll die Grundlage zur Funktionsweise chemischer Raumfahrtantriebe, den Forschungsbereichen der Abteilung und Injektoren sowie Versprühung bilden. Besonders die Themen Injektoren und Versprühung bilden die Basis für den theoretischen Hintergrund der Arbeit.

4.2 Phase 2 – Entwicklung von Konzepten und Vorauslegung

Nach Abschluss der themenbezogenen Grundlagenerarbeitung in Phase 1 sollen in der zweiten Projektphase erste Ideen und Konzepte zur Druckkammer erarbeitet und verglichen werden.

Um ein Entwicklungsprojekt erfolgreich und passgenau auf die Themenstellung umsetzen zu können, muss vor Beginn ein Lastenheft definiert werden. Innerhalb dieses Lastenhefts werden alle notwendigen Angaben und Parameter zur Konstruktion, dem Betrieb und der Implementierung in den Prüfstand festgehalten. Da die Messtechnik bereits zur Verfügung steht, muss dessen Einbindung bei der Entwicklung ebenfalls berücksichtigt werden.

Um die beste Lösung für den vorliegenden Anwendungsfall entwickeln zu können, sollen sowohl bereits umgesetzte Konstruktionen aus der Literatur als auch eigene Ideen gegenübergestellt und miteinander verglichen werden. Die Literaturrecherche deckt zudem Erfahrungswerte aus dem Umgang mit Druckbehältern in Sprayversuchen ab. Im Zuge der Ideenfindung soll die Gesamtkonstruktion in einzelne Teilgruppen untergliedert werden. So kann eine hohe Diversität an Lösungsansätzen erarbeitet werden.

Mit der Versprühkammer wird ein bereits vorhandener Injektoren-Prüfstand erweitert. Für eine passende Integration in den Prüfstand ist es wichtig, Abläufe wie Versuchsvorbereitungen und -

durchführung frühzeitig kennenzulernen und zu verstehen. Erkenntnisse hieraus sollen zusätzlich in den Entwicklungsprozess miteinfließen.

Mit zusätzlichen Informationen wie beispielsweise den Betriebspunkten der Injektoren sollen erste Vorauslegungsrechnungen Aufschluss über Größe und benötigtes Volumen geben. Ergänzend sind Auslegungswerke oder Normen zu bestimmen, nach dessen Vorgabe die Versprühkammer ausgelegt werden soll.

4.3 Phase 3 – Auslegung, Konstruktion und Bestellung

In der dritten Phase sollen aus den zuvor genannten Erkenntnissen konkrete Auslegungsrechnungen und Konstruktionen hervorgehen. Parallel dazu sollen Angebote für das benötigte Rohmaterial eingeholt werden. Ziel hierbei ist es frühzeitig, vor Abschluss der eigentlichen Konstruktion, Auskunft zur benötigten Lieferzeit und den Kosten verschiedener Varianten der Druckkammer zu erhalten. Die Konstruktion erfolgt in Abstimmung mit der Abteilung und den Lieferanten als iterativer Prozess. Fertigungsrelevante Zeichnungen sollen vollständig in dieser Projektetappe abgeschlossen werden.

Zum Abschluss von Phase 3 wird die Arbeit in der Abteilung präsentiert. Inhalte sind Stand der Technik aus der Literatur zum theoretischen Hintergrund sowie Umsetzungsmöglichkeiten zur Versprühkammer. Die Relevanz des Projektes wird dargelegt. Bereits erarbeitete Zwischenergebnisse werden besprochen und reflektiert. Phase 3 schließt mit der Bestellung von benötigtem Rohmaterial und Fertigungsteilen ab. Der erste Abschnitt der Arbeit, konstruktive Teil, wird an dieser Stelle abgeschlossen.

4.4 Phase 4 – Versuchsvorbereitung und Fertigung

Phase 4 beinhaltet die Fertigung und parallel dazu durchzuführenden Umbauarbeiten am Prüfstand zur Integration der Versprühkammer. Hierzu zählen vor allen Dingen die Einbau neuer Leitungen und Sensoren, sowie die Anpassung der Prüfstandssoftware. Die Neuordnung der Injektoraufnahme mit zugehörigem Versorgungsboard soll vorab als CAD-Modell aufgebaut werden. Hierbei soll entsprechendes Inventar des Containers berücksichtigt werden.

Für die Versuchskampagne in der darauffolgenden Projektphase, dem experimentellen Teil, soll zudem ein eigener Injektor ausgelegt und experimentell charakterisiert werden. Eingeplant sind insgesamt sechs Wochen für Auslegungsberechnung, Design und Fertigung. Da der Injektor als Kunststoff-3D-Druck-Bauteil in eigenständiger Arbeit gefertigt werden soll, sind hier mehrere Iterationsstufen eingeplant.

4.5 Phase 5 – Versuchskampagne

In der fünften Projektphase sollen in der zuvor entwickelten Versprühkammer Versuche bei unterschiedlichen Gegendrücken durchgeführt werden. Untersucht werden dabei verschiedene Druckverluste über den Injektor, die daraus resultierenden Massenströme und das dabei vorherrschende Sprühbild. Die Sprühbilder werden dabei mit einem Schattenbild-Messverfahren erfasst. Zunächst sollen Einflüsse der Kammer im Vergleich zur freien Versprühung analysiert werden. Im zweiten Schritt werden die eigentlichen Versuche bei Gegendruck durchgeführt. Nach Auswertung aller Messdaten ist der fünfte Projektabschnitt abgeschlossen.

4.6 Phase 6 – Dokumentation und Projektabschluss

In der abschließenden Phase des Projekts Bachelorthesis wird die eigentliche Dokumentation der Abschlussarbeit vorgenommen. Dieser Abschnitt beginnt frühzeitig und parallel zur vierten Projektphase. Zunächst werden grobe Form und Struktur der Textfassung festgelegt. Anschließend wird die Bachelorthesis in vollständiger Fassung verfasst, korrigiert und abgeschlossen. Beendet wird die Bachelorthesis beim DLR mit einer Abschlusspräsentation und der Abgabe der Schriftfassung beim DLR sowie der Hochschule.

4.7 Qualitätskontrolle und Statusupdates

Zur Bestimmung des aktuellen Projektfortschritts wird innerhalb eines wöchentlichen Regeltermins der aktuelle Ist-Zustand dokumentiert und mit dem Projektplan abgeglichen. Dies ist vor allem in Bezug auf Lieferzeiten ein wesentlicher Aspekt. Bei Bedarf kann somit flexibel reagiert werden. Zusätzlich werden in jedem Termin die Ziele und Aufgaben für die kommende Woche besprochen und festgelegt.

Innerhalb eines vier-Wochen-Turnus findet in diesem Rahmen ein fachlich, sowie personenbezogenes Feedbackgespräch in beide Richtungen statt. Das stellt sicher, dass die Vorstellungen beider Parteien (Bachelorand und Betreuer) kontinuierlich umgesetzt werden. Für eine erfolgreiche Projektumsetzung ist eine offene Kommunikation maßgeblich. Im Fall von Schwierigkeiten oder größeren Problemstellungen wird so ein Raum zum Gespräch geschaffen. Positive und erfolgreiche Arbeitsweisen können dokumentiert und beibehalten werden, negative und ineffektive Arbeitsweisen können konstruktiv besprochen und angepasst werden.

5 Entwicklung der Versprühkammer

Die Versprühkammer ist eine neue und eigenständige Entwicklung für den Cold-Flow-Injektoren-Prüfstand. Aus diesem Grund sollen zu Beginn alle Anforderungen zur allgemeinen Funktion und den Betriebsdaten definiert werden. Die Konzeptentwicklung und Konstruktion sollen anschließend mithilfe methodischer Herangehensweisen aus den VDI-Richtlinien umgesetzt werden. Vorversuche ergänzen die Auslegung.

5.1 Einsatzzweck

Grundsätzlich sollen in der Versprühkammer Versuche von Injektoren mit Simulationsmedien für Oxidator und Treibstoff bei verschiedenen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Darunter fällt die Variation des Umgebungsgases, des Gegendrucks und der Temperatur. Ziel ist es Cold-Flow-Versuche näher an die Brennkammerbedingungen eines Satellittriebwerks heranzubringen. Weiterhin sollen optische Zugänge das Spraybild für Messtechnik sichtbar machen.

Eine Versprühkammer kann in der Injektorentwicklung als Ergänzung zu Versuchen bei atmosphärischen Bedingungen und Heißgastests eingesetzt werden. Die Kammer stellt das Bindeglied zwischen beiden Versuchsvarianten dar. Das bringt einige Vorteile mit sich.

In der Versprühkammer können, wie bei den atmosphärischen Cold-Flow-Tests, verschiedene Simulationsmedien für die Treibstoffe genutzt werden. Diese sind gegenüber den in Heißgastests eingesetzten Treibstoffen deutlich kostengünstiger. Der Umgang mit den Simulationsmedien ist ungefährlich und gesundheitsverträglich. In ihren rheologischen Eigenschaften sind diese vergleichbar zu den eingesetzten Treibstoffen und geben in Verbindung mit den simulierten Bedingungen in der Versprühkammer Aufschluss auf das Sprayverhalten in einer Brennkammer. Aufgrund der geringeren Temperatur können Kunststoff-Injektoren in der Versprühkammer getestet werden. Das 3D-Druck-Verfahren mit Kunststoff senkt die Fertigungs- und Werkstoffkosten sowie die Fertigungszeit. Das erlaubt eine höhere Zahl an Iterationsschritten im Vergleich zu Injektoren aus Metall in derselben Zeit.

Bei neuartigen Injektoren und Treibstoffen liegen theoretische Auslegung und reale Betriebsdaten oft deutlich auseinander. Grund dafür sind fehlende Vergleichsdaten und Erfahrungswerte. Um das Risiko von Heißgastests für Mensch und Technik zu Beginn der Entwicklungsphase zu senken, ist es sinnvoll Injektoren bis zu einer gewissen technischen Reife im Cold-Flow-Verfahren und in der Versprühkammer ohne Zündung zu entwickeln.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Versprühkammer ist die optische Zugänglichkeit zu einem Injektionsvorgang ohne Zündung. In Abbildung 11 ist der Injektionsvorgang eines 3-auf-1 Prallinjektors in eine optisch zugängliche Brennkammer für verschiedene Zeitpunkte in Bezug auf die Zündung zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die Flammenbildung. Die Flammenbildung verhindert eine vollständige Charakterisierung des Injektors. Große Bereiche des Sprays bleiben verdeckt. Das Spray ist nur für einen kurzen Zeitintervall vor der Zündung voll sichtbar.

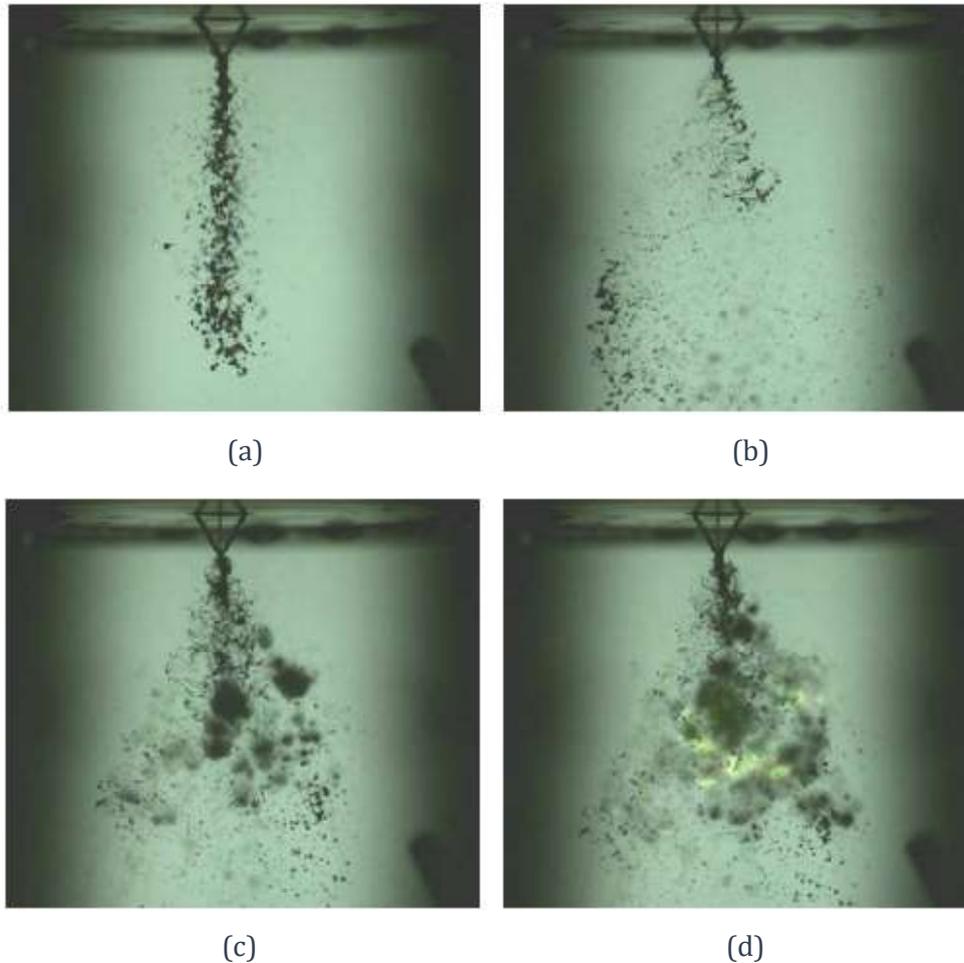


Abbildung 11: Injektionsvorgang mit Zündung eines hypergolen Treibstoffs in einer optisch zugänglichen Brennkammer (mit freundlicher Genehmigung aus [16]), (a): $t = -10$ ms, (b): $t = -5,3$ ms, (c): $t = 0$ ms, (d): $t = 5,8$ ms

5.2 Entwicklungsanforderungen

Zu Beginn eines Entwicklungsprojektes muss das Endergebnis möglichst zielgenau definiert werden. Hierzu wird anfangs ein Lastenheft definiert. Die Versprühkammer stellt eine zusätzliche Komponente eines bereits bestehenden Prüfstands dar. Um diese beiden Systeme miteinander kombinieren zu können, sind besonders die Schnittstellen von Relevanz. Zudem müssen mögliche Betriebszustände für den anschließenden Versuchsbetrieb festgelegt werden. Das Lastenheft ist ebenfalls als Teil dieser Arbeit entstanden. Folgende Parameter wurden definiert.

5.2.1 Bauraum und Formgebung

Der Bauraum wird durch den bereits bestehenden Prüfstand vorgegeben. Im späteren Versuchsbetrieb soll ausreichend Platz um den Behälter herum für den bestehenden atmosphärischen Versprühaufbau und Arbeiten am Prüfaufbau garantiert werden. Das Kammervolumen ist für einen maximalen Druckanstieg von 0,5 bar zwischen Versuchsbeginn und Versuchsende auszulegen. Für die optischen Zugänge muss ein maximaler Abstand von 680 mm von Außenkante zu Außenkante eingehalten werden. Das garantiert einen möglichen Einsatz des Spraytec-Tropfengrößenmessgeräts. Länge und Breite sind abhängig vom atmosphärischen Prüfstands-ausbau und sollen ein Maß von 600 mm nicht überschreiten. Die maximale Höhe

wurde auf 1000 mm festgesetzt. Der Abstand des Sprays zur Außenwand muss groß genug sein, um eine möglichst freie Versprühung zu ermöglichen. Eine Interaktion mit den Wandflächen kann das Messergebnis beeinflussen. Die Formgebung ist frei zu gestalten.

5.2.2 Physikalische Angaben

Die Versprühkammer soll unter anderem Sprayuntersuchungen bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken ermöglichen. Aus der Literatur gehen typische Brennkammerdrücke von 10 bar hervor. Abgedeckt werden soll ein Druckbereich von 0-30 bar relativ, um ein weiteres Feld abdecken zu können. Da Satellittriebwerke im All im Vakuum gezündet werden, sollen weiterhin Versuche bei Unterdruck bis -1 bar möglich sein. Die Kammer soll in einem Temperaturbereich von 0 bis 150 °C funktionsfähig sein. Damit können die Gaseigenschaften variiert und der Temperatureinfluss auf das Spray untersucht werden. Aus der genannten Literatur gehen Treibstoffmassenströme von etwa 12 g/s für einen Schub im Vakuum von 37 N hervor. Die Versprühkammer soll Massenströme bis maximal 100 g/s ermöglichen. So können auch Injektoren für größere Triebwerke untersucht werden.

5.2.3 Versorgung

Zur Integration in den Prüfstand soll die bestehende Versorgungsinfrastruktur genutzt werden. Dazu gehören die Stickstoff- und Sauerstoffversorgung des Prüfstands, die elektrischen Druckregelventile, bestehende Leitungs- und Anschlusssysteme sowie die Flüssigkeitstanks und die Ventile vor den Injektoren. Stickstoff ist aufgrund seiner inerten Eigenschaften hervorragend geeignet und soll aus diesem Grund als Bedrückungsmedium der Versprühkammer genutzt werden. In bisherigen atmosphärischen Tests kommen als Simulationsmedien Wasser und Wasser-Glycerin-Mischungen zum Einsatz. Diese sollen auch in der Kammer genutzt werden können. Weitere Fluide, die beispielsweise aufgrund von gesundheitsgefährdenden Eigenschaften nicht atmosphärisch versprüht werden, sollen in der Kammer genutzt werden können.

Anschlüsse werden für Versorgungsleitungen von Zu- und Ableitung des Bedrückungsmediums benötigt. Zusätzlich sind zwei Zuleitungen für zwei Simulationsmedien zu integrieren. Ein Auslass der angesammelten Flüssigkeit wird nicht benötigt, da die Versuchsmedien nach Abschluss der Versuche mittels Pumpe abgepumpt werden können.

5.2.4 Messtechnik und Sensorik

Um die Bedingungen in der Versprühkammer messen zu können, sind verschiedene Sensoren notwendig. Implementiert werden sollen ein Drucksensor zur Aufzeichnung des Kammerdrucks während des Versuchs mit einem Messbereich von mindestens -1 bis +35 bar relativ. Zusätzlich soll ein Thermoelement zur Aufzeichnung der Kammertemperatur mit einem Messbereich von 0-150 °C eingesetzt werden. Zur Messung von Druck und Temperatur des Fluids vor dem Injektor kann die bestehende Messtechnik übernommen werden.

Zur optischen Auswertung der Sprühbilder werden optische Zugänge zur Druckkammer benötigt. Diese müssen für einen Shadowgraph-Aufbau geeignet sein. Die Fenster sollen dabei einen ausreichend großen Bildausschnitt ermöglichen, um diese zu atmosphärischen Versuchen ohne Fensterscheiben vergleichen zu können. Die Form kann dabei rund oder eckig sein. Zusätzlich sollen Tropfengrößenmessungen möglich sein. Gemessen wird mit einem laserbasierten Messsystem. Die Scheiben müssen dafür durchlässig für einen Laser mit einer Wellenlänge λ von 633 nm sein.

5.2.5 Handling

Um unterschiedliche Injektoren testen zu können, ist eine universelle Injektoraufnahme im Inneren der Kammer notwendig. Zudem ist für die Konstruktion und den späteren Einsatz die Montage und Demontage der Injektoren zu berücksichtigen. Der Umbau soll mit maximal zwei Personen umsetzbar sein. An einem Versuchstag sollen mehrere Injektoren getestet werden können. Die Umbauzeit ist auf maximal 60 min festgelegt.

Zur Montage des Shadowgraph-Aufbaus mit Licht und Hochgeschwindigkeitskamera sowie des Spraytec-Tropfengrößenmessgeräts ist ein universeller Aufbau umzusetzen. Beides soll im Prüfstand für atmosphärische und Versprühkammerversuche möglich sein.

5.2.6 Sicherheitseinrichtungen

Zur Sicherheit des am Prüfstand arbeitenden Personals, sowie der vorhandenen Messtechnik, sind entsprechende Sicherheitseinrichtungen vorzusehen. Um Drücke in der Kammer oberhalb des vorgesehen Betriebsdrucks zu verhindern, ist ein Sicherheitsventil zu integrieren.

5.2.7 Sonstiges

Bei sehr gutem Projektfortschritt können zusätzliche Optionen zur Erweiterung der Versprühkammer eingebracht werden. Es wird davon ausgegangen, dass Verwirbelungen des Sprays aufgrund des geschlossenen Bauraums beim Injektionsvorgang auftreten. Diese können mitunter das Messergebnis beeinflussen. Ein Strömungsgleichrichter zur Reduktion der Wirbelbildung kann zusätzlich implementiert werden.

Die Massenverteilung im Sprühkegel gibt Auskunft über die Symmetrie eines Sprays. Eine mögliche Messmethode ist ein sogenannter mechanischer Patternator. Mittels kleinen Auffangeinheiten kann das Spray an verschiedenen Positionen aufgefangen werden. In einem geschlossenen Behälter kann ein Patternator über die volle Behälterfläche unterhalb des Injektors implementiert werden. Da die gesamte Fluidmasse in einem geschlossenen Behälter aufgefangen werden kann, sind besonders aussagekräftige Ergebnisse möglich. Optional soll ein mechanischer Patternator in der Versprühkammer eingesetzt werden können.

Falls im Versuchsbetrieb der Versprühkammer die Scheiben mit Tropfen oder Kondensat zugesetzt werden, sollen mittels einer optionalen Scheibenspülung die optischen Zugänge freigehalten werden. Die Scheibenspülung kann so ausgelegt sein, dass Tröpfchen zum Beispiel durch eine Trennströmung von der Scheibe ferngehalten werden oder Kondensat durch Zuströmung eines erwärmten Gases an der Scheibe verhindert wird.

5.3 Konzeptfindung - Morphologischer Kasten

Zu Beginn der Entwicklungsphase sollen drei Konzepte erarbeitet werden. Als Grundlage für methodisches Entwickeln dient die VDI-Richtlinie 2221. Zunächst wird das Gesamtsystem Versprühkammer in einzelne Teilbereiche untergliedert. Für jeden Teilbereich werden anschließend mehrere Teillösungen zusammengestellt. Aus der Gesamtmatrix mit allen Teillösungen, dem morphologischen Kasten, werden abschließend drei Konzepte aufgebaut. Dabei werden einzelne Teillösungen zu einem vollständigen Konzept kombiniert. Ziel dieser Methode ist eine neutrale Aufstellung möglicher Lösungen der Teilbereiche.

Die Versprühkammer als Gesamtsystem wird zu Beginn in einzelne Teilbereiche untergliedert. Für diese sollen später Lösungsmöglichkeiten gesammelt werden. Aufgeteilt wird die Kammer in Funktions- und Designbereiche. Die Form der Kammer beschreibt die grundlegende Körperform.

Diese beeinflusst maßgeblich Aspekte wie die Spannungsverteilung unter Last, das Fertigungsverfahren und Strömungs- und Versprühbedingungen im Inneren. Die Kammernaufteilung beschreibt den Aufbau der Kammer und nimmt Einfluss auf Gewicht und Handling der Kammer. Deckel und Boden sind vor allem für den Zugang zur Kammer und Einbindung der Medienversorgung von zuständig. Die Art der Deckelmontage kommt besonders beim Versuchsbetrieb zum Tragen. Sie beeinflusst unter anderem die Dichtung, als auch die benötigte Zeit für Umbau und Ausrichtung eines Injektors im Inneren der Kammer. Die Fensterform nimmt Einfluss auf das Sichtfeld des Sprays und ermöglicht optische Messungen am Spray. Die Dichtung sorgt für konstante Versuchsbedingungen innerhalb der Kammer. Ein Schnellverschluss kann einen schnelleren Zugang zum Injektor ermöglichen und Umbauarbeiten vereinfachen.

Morphologischer Kasten - Versprühkammer				
Parameter	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Kammerform	Viereckig	sechseckig	vieleckig	Rund
Aufteilung	einteilig	zweiteilig	mehrteilig	
Deckel	gewölbt	Platte	-	-
Boden	gewölbt	Platte	-	-
Deckelmontage	Stehbolzen	Schrauben	Schnellverschlüsse	Gelenk mit zusätzlicher Schraube
Fensterform	rund	viereckig		
Dichtung	Flachdichtung Kunststoff	Flachdichtung Metall	O-Ring in Deckel	O-Ring im Gehäuse
Schnellverschluss	nach innen öffnende Türe/Klappe	Schnellverschluss wie an Einmachgläsern	kein Schnellverschluss	
		V1	V2	V3

Abbildung 12: Morphologischer Kasten zur Konzeptfindung der Versprühkammer

In Abbildung 12 ist der morphologische Kasten mit den entsprechenden Teilbereichen, den Parametern, und den dafür gefundenen Optionen beziehungsweise Lösungsmöglichkeiten dargestellt. Die farblich markierten Linien bilden die drei verschiedenen Konzepte. Die Punkte markieren dabei die gewählte Lösung für ein ausgewähltes Konzept. Bei der Zusammenstellung der drei Varianten wurde darauf geachtet, eine möglichst breite Diversität zwischen den Konzepten zu erzielen.

5.3.1 Versprühkammer-Konzept 1

Konzept 1 ist in Abbildung 13 zu sehen. Gewählt wurde eine runde Kammerform. Das sorgt für einen gleichmäßigen Spannungsverlauf in der Mantelfläche bei Innendruck und ermöglicht eine höhere Ausnutzung der Werkstofffestigkeit. Eine runde Mantelfläche verringert weist keine technischen Kerben vor. Ein weiterer Vorteil ist der rotationssymmetrische Abstand zwischen Spray und Mantelfläche in alle Richtungen. So herrschen, abgesehen von den Einschnitten der Fensterflansche, zu allen Seiten hin gleiche Strömungsverhältnisse. Die Kammer ist neben Fensterscheiben, deren Flanschen und dem Deckelflansch als einteiliger Aufbau gestaltet. Auf der einen Seite erschwert dies das Handling der Kammer beim Einbau, auf der anderen Seite wird die Anzahl benötigter Dichtungen und daraus resultierenden Schwachstellen gering gehalten. Der Boden ist als Klöpperboden ausgeführt. Diese Variante ermöglicht ebenfalls, wie die runde Mantelform, eine sehr gleichmäßige Verteilung der Spannungen im Vergleich zu ebenen Böden. Für den Deckel werden weitere Standardteile aus dem Druckbehälterbau herangezogen. Ein glatter Schweißflansch in Kombination mit einem Blindflansch bildet einen abnehmbaren Deckel und ermöglichen den Zugang zur Kammer. Der Blindflansch wird über Schrauben geschlossen. Der Einsatz eines Standarddeckels ermöglicht weiterhin den Einsatz von Standarddichtungen aus dem Behälterbau, welche hier als Flachdichtungen aus Kunststoff ausgeführt sind. Die Fenster sind ebenfalls in runder Form ausgeführt. Auch hier verteilt sich die Spannung unter Last gleichmäßiger. Eine gleichmäßige Verformung reduziert das Risiko von Randschäden des Glases an der Einspannstelle.

Insgesamt ermöglicht Konzept 1 einen hohen Einsatz an Standardkomponenten aus dem Behälterbau, welche den Stand der Technik darstellen. Die einzelnen Komponenten sind innerhalb weniger Wochen lieferbar, in Summe preislich allerdings etwas teurer, als die Varianten 2 oder 3. Gefertigt werden kann diese Variante in Eigenarbeit innerhalb des DLRs oder durch einen externen Lieferanten.

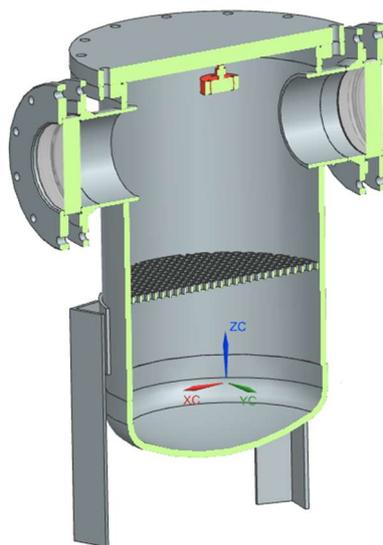


Abbildung 13: Konzept 1 - CAD-Schnittzeichnung

5.3.2 Versprühkammer-Konzept 2

Konzept 2 (Abbildung 14) stellt eine vereinfachte Ausführung der ersten Variante dar. Der Behälter wird in Konzept 2 aus rechteckigen Platten zu einer quaderförmigen Schweißkonstruktion zusammengesetzt. Die Kammer ist abgesehen von Deckel und Fenstern als einteiliger Aufbau ausgeführt. Wie die Wände sind Boden und Deckel als rechteckige Platten ausgeführt, um die Anzahl gleicher Bauteile zu erhöhen. Der Deckel wird mit Schrauben und passendem Flansch montiert. Die Fensterscheiben sind in runder Form ausgeführt. Unter Last verteilt sich die Spannung gleichmäßiger. Eine gleichmäßige Verformung reduziert das Risiko von Randschäden des Glases an der Einspannstelle. Als Dichtungen kommen O-Ringe zum Einsatz. Diese sind in ihrer Form flexibel und können an die eckige Form angepasst werden. Diese sind im Flansch an der Kammer vorgesehen. Viereckige Standarddichtungen aus dem Behälterbau gibt es nicht.

Die quaderförmige Kammer begünstigt Kerbwirkung in den Ecken. Vorliegende Spannungen unter Last verteilen sich ungleichmäßig über die Kammerwände. Ein Vorteil dieser Variante ist die im Vergleich zu Konzept 1 vergleichsweise einfache Beschaffung der Grundbauteile. Platten sind innerhalb weniger Tage lieferbar, was eine zeitnahe Umsetzung der Kammer ermöglicht. Die Kosten für einfache Platten sind deutlich geringer als für Rundrohre. Standardflansche für den Deckel gibt es nicht. Hier müssten eigene Konstruktionen ausgelegt und gefertigt werden.

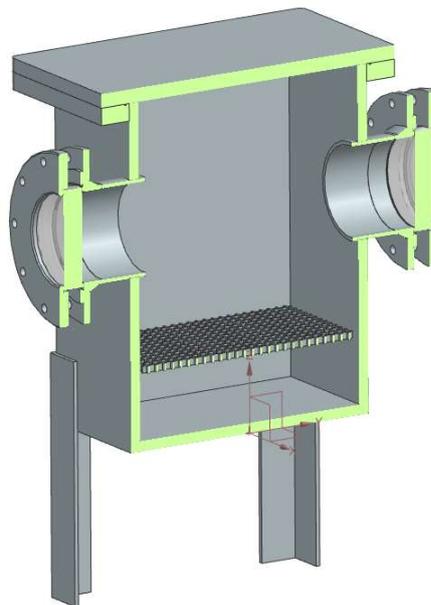


Abbildung 14: Konzept 3 - CAD-Schnittzeichnung

5.3.3 Versprühkammer-Konzept 3

Konzept 3 (Abbildung 15) besteht darin, eine bereits am DLR bestehende Kammer auf die gewünschten Bedingungen umzubauen. Diese bestehende Kammer. Diese wurde in der Vergangenheit für Vakuumversuche eingesetzt und könnte für die geplanten Überdruckversuche angepasst werden. Die Kammer ist bereits verfügbar, muss aber auf seine Eignung geprüft werden.

Das dritte Konzept ist eine zylindrische Kammer, bestehend aus einzelnen aufeinandergesetzten Segmenten. Der Deckel ist als ebene Platte ausgeführt. Die Kammer ist direkt mit der Bodenplatte des gesamten Aufbaus verschweißt. Dieser ist größer, als die reine Kammer und dient gleichzeitig als Grundaufbau zur Montage der Füße. Deckel und Segmente werden über dazwischenliegende O-Ringe gedichtet. Der Deckel kann über ein Gelenk geöffnet oder geschlossen werden und wird lediglich mit einer Schraube gehalten. Im Vakuumbetrieb ziehen sich alle Segmente zusammen und dichten sich selbst. Die Sichtfenster sind rechteckig ausgeführt.

Für einen Überdruckbetrieb ist diese Variante in vorliegender Ausführung untauglich. Dafür müssten einige Änderungen vorgenommen werden. Die Segmente müssten zunächst miteinander verschweißt oder mit Flanschen versehen werden, um diese auch bei hohem Innendruck zueinander dicht halten zu können. Die Rahmen der Fensterscheiben wurden im Vakuumbetrieb mit M3 Schrauben befestigt. Für einen Überdruckbetrieb müssen größere Schrauben verwendet werden. Wesentlicher Vorteil ist sofortige Verfügbarkeit der Kammer. Anpassungen könnten in der DLR eigenen Werkstatt vorgenommen werden.



Abbildung 15: Konzept 3 - Bild der bestehenden Versprühkammer

5.4 Dominanz- und Bewertungsmatrix

In der Dominanzmatrix (Abbildung 16) werden Gewichtungen für die einzelnen Teilbereiche aus dem morphologischen Kasten festgelegt. Aspekte mit höherer Relevanz fließen stärker in die Bewertung ein, Aspekte mit geringerer Relevanz fließen weniger stark in die Bewertung ein. Die Konzepte werden anschließend in Bezug auf die technische Erfüllung der Teilbereiche bewertet und mit den Gewichtungen aus der Dominanzmatrix verrechnet. Daraus ergibt sich eine Gesamtpunktzahl und Rangfolge in Bezug auf den technischen Erfüllungsgrad der Konzepte.

Dominanzmatrix											
	Kammerform	Aufteilung	Deckel	Boden	Deckelmontage	Fensterform	Dichtung	Schnellverschl.	Summe	Gewichtung in %	Rang
Kammerform		2	1	1	2	1	2	2	11	19,6	1
Aufteilung	0		0	0	0	0	0	1	1	1,8	8
Deckel	1	2		1	2	1	2	2	11	19,6	1
Boden	1	2	1		2	1	2	2	11	19,6	1
Deckelmontage	0	2	0	0		0	0	1	3	5,4	6
Fensterform	1	2	1	1	2		2	2	11	19,6	1
Dichtung	0	2	0	0	2	0		2	6	10,7	5
Schnellverschl.	0	1	0	0	1	0	0		2	3,6	7
Summe	3	13	3	3	11	3	8	12	56	100	-

Abbildung 16: Dominanzmatrix zur Gewichtung der Parameter

2 Punkte: Das Kriterium in der Zeile ist wichtiger als in der Spalte

1 Punkt: Beide Kriterien sind gleich wichtig

0 Punkte: Das Kriterium in der Spalte ist wichtiger als in der Zeile

In der Dominanz werden nacheinander jeweils zwei Teilbereiche miteinander verglichen. Ist das Kriterium in der Zeile wichtiger als das in der Spalte werden 2 Punkte eingetragen. Sind beide Kriterien gleich wichtig wird 1 Punkt eingetragen. Ist das Kriterium in der Spalte wichtiger als das in der Zeile werden 0 Punkte eingetragen. Die eingetragenen Punkte werden zeilen- und spaltenweise für die jeweiligen Teilbereiche addiert. Die Gewichtung ergibt sich aus dem Verhältnis von erreichter Punktzahl eines Teilbereichs im Vergleich zur insgesamt vergebenen Gesamtpunktzahl. Vor allem Bereiche, die in direktem Zusammenhang mit der Kammerfestigkeit und somit der Sicherheit von Personal und Messtechnik stehen, sind von hoher Relevanz.

In der darauffolgenden Bewertungsmatrix (Abbildung 17) werden alle Teilbereiche der drei Konzeptausführungen in Bezug auf deren technische Umsetzung bewertet. Hierbei werden zunächst Punkte vergeben. Die Maximalpunktzahl für einen Teilbereich ist 4. Die einzelnen Kategorien werden abschließend mit der jeweiligen Gewichtung verrechnet. Daraus ergibt sich die finale Gesamtpunktzahl.

Bewertungsmatrix					
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Maximum	Gewichtung in %
Kammerform	4	2	4	4	19,6
Kammeraufteilung	2	2	4	4	1,8
Deckel	4	4	4	4	19,6
Boden	3	2	2	4	19,6
Deckelmontage	4	4	0	4	5,4
Fensterform	4	4	2	4	19,6
Dichtung	4	2	0	4	10,7
Schnellverschluss	0	0	2	4	3,6
Summe Punkte	25	20	18	32	
Summe in %	78,1	62,5	56,3	100	
Gewichtete Punkte	362,5	282,1	250,0	400	
Technischer Erfüllungsgrad	90,6	70,5	62,5	100	
Rangfolge	1	2	3		

Abbildung 17: Bewertungsmatrix zur Bewertung der Konzepte

Punktevergabe nach VDI 2225	
4 Punkte	ideal
3 Punkte	gut
2 Punkte	ausreichend
1 Punkt	gerade noch tragbar
0 Punkte	unbefriedigend

Tabelle 3: Punktevergabe nach VDI 2225

Konzept 1 geht nach Abschluss aller Bewertungen als beste Ausführung hervor. Grund hierfür sind die im Vergleich zu den beiden weiteren Konzepten guten Ausführungen in Bezug auf Festigkeit und Funktionssicherheit. Diese stellt somit die Wunschlösung dar.

5.5 Auslegung und Konstruktion

Die Auslegung der Versprühkammer erfolgt nach DIN EN 13445 [17]. In dieser Norm sind alle nötigen Anforderungen zur Konstruktion, Hersteller, Prüfung und Inspektion von unbefeuerten Druckbehältern festgelegt.

„In EN 13445 umfasst der Begriff Druckbehälter die Anschweißteile bis einschließlich Stutzenflansche, Schraub- oder Schweißverbindungen oder die an der ersten Rundnaht zu Anschlussrohrleitungen oder anderen Teilen zu schweißende Stirnnaht. Der Begriff „unbefeuert“ schließt Behälter mit direkter Wärmeerzeugung oder Flammenbeaufschlagung aus einem Feuerungsprozess aus, jedoch nicht Behälter, die elektrisch beheizt werden oder für beheizte Prozessströme.“ [18]

In Abbildung 18 ist das Konzept 1 der Versprühkammer mit seinen Teilbereichen dargestellt.

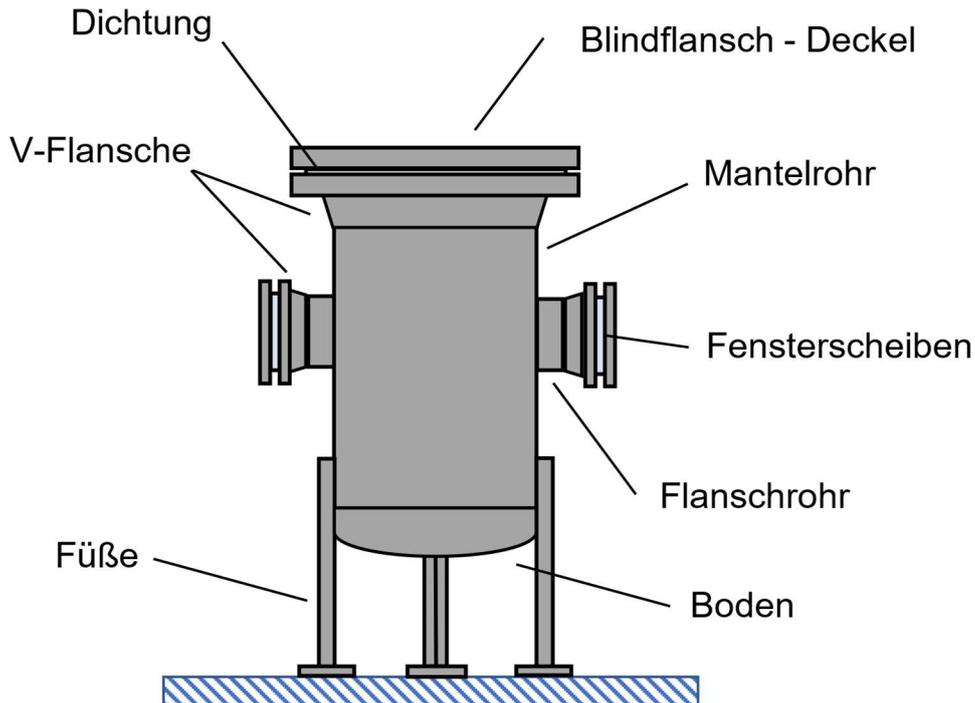


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Versprühkammer

5.5.1 Kammervolumen und Abmessungen

In der Versprühkammer sollen unter anderem Sprühversuche bei Gegendruck durchgeführt werden. Für konsistente Messergebnisse ist es von hoher Relevanz, dass der Druck über die gesamte Versuchsdauer annähernd konstant bleibt. So lassen sich einzelne Betriebspunkte gezielt anfahren und analysieren. Bedrückt wird die Kammer mit Stickstoff. Als Injektionsfluid kommt zum Beispiel Wasser zum Einsatz. Der Druckanstieg

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (5.1)$$

wurde mithilfe des Drucks im Zustand 2

$$p_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-\kappa} p_1 \quad (5.2)$$

berechnet. Der Druck p_2 wurde über die isentrope Zustandsänderung berechnet. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass während der Versuchsdauer keine Wärme über die Kammerwände abgeführt wird. Das Volumen V_1 entspricht dem gewünschten Kammervolumen und beruht auf den gewünschten Außenabmaßen der Versprühkammer. Das Volumen

$$V_2 = V_1 - V_{Fluid} \quad (5.3)$$

entspricht dem resultierenden Gasvolumen nach Versuchsende in der Versprühkammer. Das Fluidvolumen

$$V_{Fluid} = \frac{\dot{m}t}{\rho_{Fluid}} \quad (5.4)$$

ist dabei das Gesamtvolumen des über die Versuchsdauer versprühten Fluids. In Tabelle 4 sind und 5 die Berechnungsgrößen sowie die resultierenden Ergebnisse aufgeführt.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Versuchsdauer	t	5	s
Ausgangsdruck	p ₁	30	bar
Massenstrom Fluid	ṁ	0,1	kg/s
Dichte Wasser	ρ _{Wasser}	998	kg/m ³
Isentropenexponent	κ	1,4	-
Gewünschtes Kammervolumen	V ₁	50	l

Tabelle 4: Berechnungsgrößen zur Berechnung des Druckanstiegs in der Versprühkammer

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
versprühtes Fluidvolumen	V _{Fluid}	0,0005	m ³
Resultierendes Gasvolumen	V ₂	0,0495	m ³
Druck im Zustand 2	p ₂	30,426	bar
Druckanstieg	Δp	0,426	bar

Tabelle 5: Berechnungsergebnis des Druckanstiegs mit Zwischenergebnissen

Prinzipiell kann durch ein höheres Kammervolumen eine längere Versuchszeit oder höherer Massenstrom realisiert werden, da der Druckanstieg dadurch geringer ausfällt. Daher scheint eine möglichst große Kammer zunächst sinnvoll. Mit zunehmender Größe steigen das Gewicht und die Kosten für den Aufbau. Somit muss ein Kompromiss gefunden werden. Nach mehreren Iterationen wurde ein Volumen von 50 l gewählt. Bei diesem Volumen liegt der Druckanstieg bei 0,426 bar nach 5 s. Ein maximaler Druckanstieg von 0,5 bar gemäß Anforderungsliste Position 1.2 kann damit eingehalten werden.

Die Druckgeräterichtlinie kategorisiert Druckbehälter grundsätzlich in vier Gefahrenklassen. Aus der Multiplikation von Betriebsdruck und Gesamtvolumen

$$\text{Gefahrenwert} = pV \quad (5.5)$$

ergibt sich ein Wert von 1500 l•bar. In Abbildung 19 ist die Kategorisierung nach Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) für Behälter mit Gasen nach Fluidgruppe 2 dargestellt. Hieraus kann die Einstufung des Behälters entnommen werden. Der Behälter befindet sich in der Gefahrenklasse 3 [19]. Zur Sicherheit der Mitarbeiter sollen die geplanten Versuche in der Versprühkammer aufgrund dessen von einem Remote-Kontrollraum gesteuert werden.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Volumen	V	50 l	l
Auslegungsdruck	p	30 bar	bar
Gefahrenwert	-	1500	l • bar
Gefahrenklasse	-	III	-

Tabelle 6: Angaben zur Gefahrenklasse der Versprühkammer nach Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU)

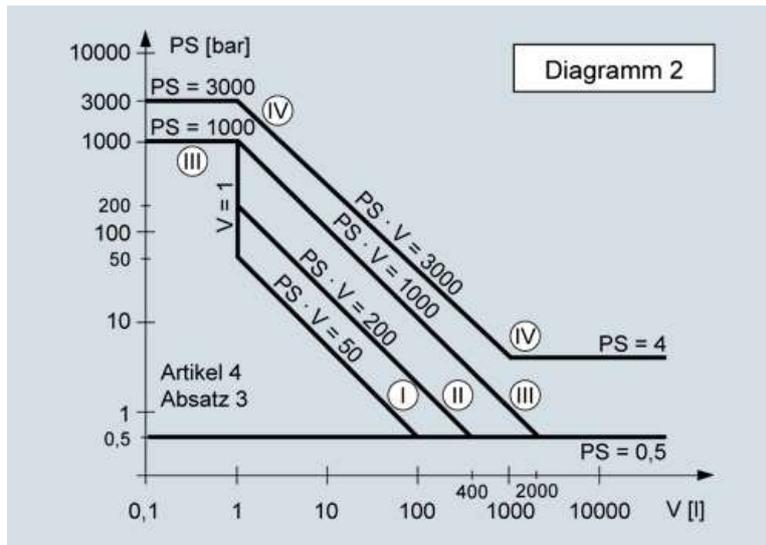


Abbildung 19: Diagramm zur Einstufung der Gefahrenklasse eines druck-beaufschlagten Behälters nach Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) [19]

5.5.2 Werkstoffauswahl und Werkstoffangaben

Da die Werkstoffeigenschaften einen wesentlichen Beitrag zur späteren Konstruktion leisten, muss dessen Auswahl zu Beginn der Auslegung getroffen werden. Der Werkstoff gibt zum einen auslegungsrelevante Daten wie Streckgrenze und Zugfestigkeit vor, entscheidet allerdings auch über Beständigkeit im Umgang mit unterschiedlichen Medien oder Korrosion. Zusätzlich trägt der Einkaufspreis wesentlich zu den Gesamtkosten bei.

Für die Versprühkammer soll Edelstahl zum Einsatz kommen. Edelstahl bietet mehrere Vorteile. Im Betrieb wird die Kammer unterschiedlichen Medien wie Wasser oder Glycerin-Mischungen ausgesetzt. Edelstähle sind in Bezug auf diese Medien korrosionsbeständig und leicht zu reinigen. Die Kammer kann nach Fertigstellung unbehandelt bleiben. Eine zusätzliche Oberflächenversiegelung mit Lack entfällt. Die Kammer wird im späteren Versuchseinsatz regelmäßig geöffnet und verschlossen. Kratzer durch Werkzeuge und Arbeiten an der Kammer haben keinen Einfluss auf die Medienbeständigkeit.

Nach umfassender Recherche und ersten Übersichtsrechnungen zur Festigkeit zu möglichen Werkstoffoptionen fiel die Auswahl auf den Edelstahl 1.4301. Dieser weist ausreichend gute Festigkeitswerte auf und kann für zu einem im Vergleich zu anderen Edelstählen niedrigeren Einkaufspreis bezogen werden. Der Werkstoff lässt sich zudem sehr gut verschweißen. Das ist beispielsweise für die Flanschrohre der Fensterscheiben oder den Flansch des Deckels relevant. Die Zerspanbarkeit ist gut. Bohrungen für Anschlüsse sind damit einfach zu realisieren. Die Kennwerte $R_{P0,2}$ und $R_{P1,0}$ in Abhängigkeit der Temperatur sind in Tabelle 7 aufgeführt.

T	20	50	100	150	200	°C
$R_{P0,2}$	195	177	157	142	127	N/mm ²
$R_{P1,0}$	230	211	191	172	157	N/mm ²

Tabelle 7: Festigkeitskennwerte von 1.4301 in Abhängigkeit von der Temperatur [20]

5.5.3 Mantelrohr

Die nachfolgenden Berechnungsvorgaben zur Festigkeitsauslegung wurden aus der DIN EN 13445 [17] entnommen. Diese Norm dient der Erfüllung grundlegender Anforderungen der Druckgeräterichtlinie. Zur Auslegung sind alle aus der weit verbreiteten AD-2000 Berechnungsvorgaben für Stahlwerkstoffe enthalten. Im direkten Vergleich ist die DIN EN 13445 für verschiedene Bodentypen, Stutzen oder Kammerformen detaillierte ausgeführt.

Um das zur Verfügung stehende Bauraumvolumen einhalten zu können, gilt es einen Kompromiss zwischen Kammervolumen, Durchmesser, Höhe und daraus resultierender Wandstärke zu finden. Ein größerer Außendurchmesser senkt die Gesamthöhe der Kammer, erfordert allerdings höhere Wandstärken, aufgrund der größeren Innenfläche. Der Wandquerschnitt eines Zylinders wird bei Druckbeaufschlagung auf Zug belastet. In Abbildung 20 sind die daraus resultierenden Umfangsspannung schematisch dargestellt. Eine höhere Innenfläche bei gleicher Wandstärke würde zu höheren Umfangsspannungen führen.

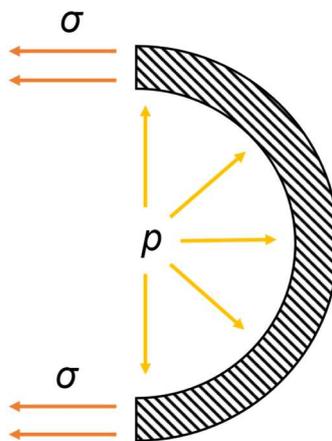


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Umfangsspannung in der Mantelfläche infolge von Innendruck nach [21]

Für kleinere Durchmesser sinkt die erforderliche Wandstärke, allerdings steigt die Gesamthöhe des Aufbaus. Mit steigenden Wandstärken steigt zudem der Einkaufspreis für Rohr-Rohmaterial. Gewählt wird ein Außendurchmesser von 355,6 mm nach DIN EN ISO 1127 [22]. Rohre nach dieser Norm können als standardisierte Meterware bezogen werden. Das angezielte Kammervolumen von 50 l kann mit diesem Durchmesser bei einer geringen Höhe von etwa 600 mm erreicht werden. Diese Kammermaße lassen ausreichend Raum, um Standfüße, Deckel und Anschlüsse in der Konstruktion im vorgegebenen Bauraum unterzubringen.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Abmaße der Kammer ist die Spraygröße. In Abbildung 21 ist der zylindrische Teil der Kammer dargestellt. Zusätzlich ist ein Sprühkegel mit typischen Abmaßen schematisch eingezeichnet. Das Spray hat ausreichend Platz, um sich in der Kammer vollständig entfalten zu können. So können auch dessen Randbereiche untersucht werden. Zudem ist davon auszugehen, dass die Kammerwandung bei den gewählten Abmaßen einen geringen Einfluss auf das Spray haben.

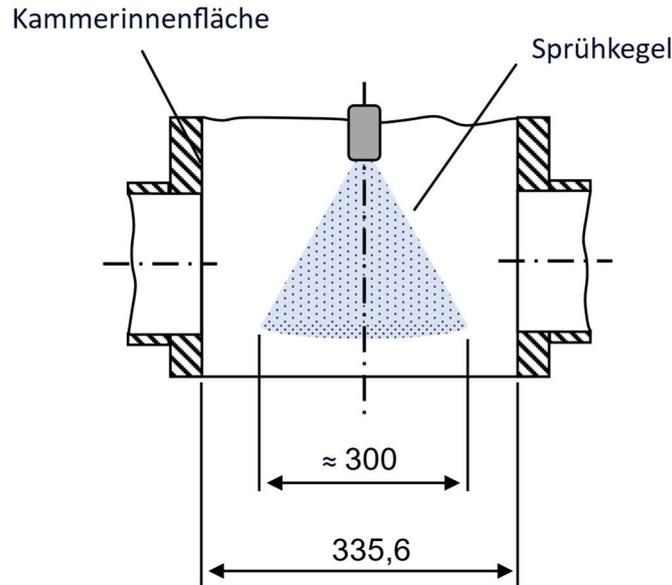


Abbildung 21: Schematische Darstellung des Sprühkegels zur Auswahl des Kammerdurchmessers

Zur Berechnung der Mindestwandstärke

$$e = \frac{PD_i}{2fz - P} = \frac{P(D_a - 2e)}{2fz - P} \quad (5.6)$$

mit der zulässigen Spannung

$$f = \frac{R_{p0,2,150^\circ\text{C}}}{2} \quad (5.7)$$

im zylindrischen Teil der Kammer wird der maximale Lastfall betrachtet. Dieser geht aus den Entwicklungsanforderungen mit einem Innendruck von 30 bar bei einer Maximaltemperatur von 150 °C hervor. Der Edelstahl 1.4301 ist ein austenitischer Chrom-Nickel Stahl. In der Norm wird die zulässige Spannung für austenitische Stähle mit $R_{p1,0}$ berechnet. Für die Auslegung der Druckkammer wird in diesem Fall $R_{p0,2}$ als Berechnungswert für eine höhere Sicherheitsreserve herangezogen. Grund hierfür sind die verbaute Messtechnik im Prüfstand, sowie die räumliche Nähe zwischen Personal und Druckbehälter. Da gegebenenfalls Arbeiten während des Druckbetriebs im direkten Umfeld des Behälters vorgenommen werden müssen, gilt es das Personal bestmöglich abzusichern. Zudem befindet sich der Behälter in einem geschlossenen Raum, in einer hohen Gefahrenklasse III nach der Gerätedrucklinie. Der Sicherheitsfaktor wird im Gegensatz zur Norm mit $S_f = 2$ höher angesetzt. In der Norm wird $S_f = 1,5$ angesetzt.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Betriebsdruck	P	30	bar
Außendurchmesser	D_a	355,6	mm
Schweißnahtfaktor	z	0,85 bis 1	-
Sicherheitsfaktor	S_f	2	-
Dehngrenze bei 150°C	$R_{p0,2,150^\circ\text{C}}$	142	N/mm ²

Tabelle 8: Berechnungsgrößen zu Bestimmung der Mindestwandstärke der Mantelfläche

Für nahtlos gezogene Rohre mit einem Schweißfaktor von $z = 1$ ergibt sich ein Wert für die Mindestwandstärke von $e = 7,2 \text{ mm}$. Für geschweißte Rohre mit einem Schweißfaktor von $z = 0,85$ ergibt sich eine Mindestwandstärke von $e = 8,6 \text{ mm}$.

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Zulässige Spannung	f	71	N/mm ²
Mindestwandstärke für geschweißte Mantelfläche	$e_{\text{geschweißt}}$	8,6	mm
Mindestwandstärke für nahtlos gezogene Mantelfläche	e_{nahtlos}	7,2	mm

Tabelle 9: Berechnungsergebnisse der Mindestwandstärke der Mantelfläche mit Zwischenergebnissen

Die Kammer soll aus einem gewalzten und geschweißten Blech gefertigt werden. Für die Wandstärke wird die nächstmögliche Wandstärke von $e = 10 \text{ mm}$ nach DIN EN ISO 1127 [22] gewählt.

5.5.4 Boden

Für den Boden soll ein Standard-Klörperboden nach DIN 28011 [23] verwendet werden. Da das Rohr für die Mantelfläche zuvor nach Norm ausgewählt wurde, kann ein ebenfalls genormter Boden verwendet werden. Vorteil hierbei ist eine schnellere Lieferzeit und geringere Kosten. Eine Sonderanfertigung für Spezialmaße ist nicht notwendig. Die runde Form des Bodens sorgt für eine gleichmäßige Spannungsverteilung. In Abbildung 22 sind die Bezeichnungen nach DIN 28011 [23] dargestellt.

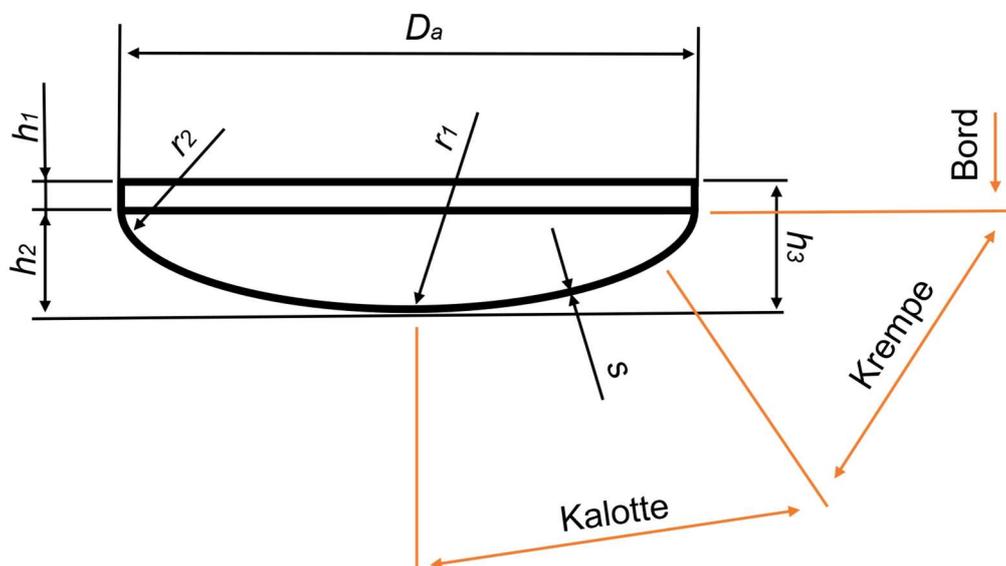


Abbildung 22: Klörperboden Geometriebezeichnungen DIN 28011 nach [24]

Der äußere Bodendurchmesser d_a entspricht dem Durchmesser der zylindrischen Mantelfläche der Kammer. Die Wandstärke e ist ebenfalls identisch mit der Wandstärke der Mantelfläche. Der Wölbungsradius der Kalotte

$$r_1 = D_a \quad (5.8)$$

entspricht dem Außendurchmesser. Weiterhin wird der Eckradius der Krempe

$$r_2 = 0,1D_a \quad (5.9)$$

berechnet. Die zylindrische Bordhöhe

$$h_1 = 3,5e \quad (5.10)$$

sowie die Wölbungshöhe

$$h_2 = 0,1935D_a - 0,455e \quad (5.11)$$

schließen die geometrische Berechnung ab. In Tabelle 10 und 11 sind die Berechnungsgrößen sowie die Berechnungsergebnisse aufgeführt.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Außendurchmesser	D_a	355,6	mm
Wandstärke	e	10	mm

Tabelle 10: Berechnungsgrößen zur geometrischen Berechnung des Klöpperbodens

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Wölbungsinnenradius Kalotte	r_1	355,6	mm
Eckinnenradius Krempe	r_2	35,6	mm
Zylindrische Bordhöhe	h_1	35	mm
Wölbungshöhe	h_2	64,3	mm

Tabelle 11: Berechnungsergebnisse der geometrischen Berechnung des Klöpperbodens

Abschließend muss geprüft werden, ob die gewählte Wandstärke die Festigkeitskriterien erfüllt. Die Berechnungsvorgaben wurden aus DIN EN 13445 [17] entnommen. Die Mindestwandstärke muss kleiner als die gewählte Wandstärke sein. Die Mindestwandstärke zur Begrenzung der Membranspannung in der Mitte

$$e_s = \frac{Pr_1}{2fz - 0,5P'} \quad (5.12)$$

die Mindestwandstärke der Krempe zur Verhinderung achssymmetrischen Fließens

$$e_y = \frac{\beta P(0,75r_1 + 0,2D_i)}{f} \quad (5.13)$$

sowie die Mindestwandstärke der Krempe zur Verhinderung plastischen Beulens

$$e_b = (0,75r_1 + 0,2D_i) \left[\frac{P}{111f} \left(\frac{D_i}{r_2} \right)^{0,825} \right]^{\left(\frac{1}{1,5} \right)} \quad (5.14)$$

werden berechnet. Der Faktor β wird aus dem Diagramm in Anhang C entnommen. Die Berechnungsgrößen sowie die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 12 und 13 aufgeführt.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Betriebsdruck	P	30	bar
Innendurchmesser	D_i	335,6	mm
Zulässige Spannung	f	71	N/mm ²
Schweißnahtfaktor	z	1	-
Berechnungsbeiwert	β	0,65	-
Wölbungsinnenradius Kalotte	r_1	355,6	mm
Eckinnenradius Krempe	r_2	35,6	mm

Tabelle 12: Berechnungsgrößen zur Bestimmung der erforderlichen Mindestwandstärke des Klöpperbodens

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Mindestwandstärke Begrenzung Membranspannungen	e_s	7,6	mm
Mindestwandstärke gegen achssymmetrisches Fließen	e_y	9,2	mm
Mindestwandstärke gegen plastisches Beulen	e_b	6,0	mm

Tabelle 13: Berechnungsergebnisse der erforderlichen Mindestwandstärke des Klöpperbodens

5.5.5 Deckel

Flansche

Um in der Versprühkammer verschiedene Injektoren testen zu können, müssen diese in der Versprühkammer montiert und getauscht werden können. Durch einen Deckel soll die Kammer geöffnet und geschlossen werden. Das ermöglicht einen Zugang ins Innere der Kammer. Im Normteilkatalog für Druckbehälterbau gibt es hierfür eine Auswahl verschiedener Flansche für verschiedene Druckklassen.

Grundsätzlich gibt es Varianten zum Aufschrauben, Verschweißen oder lose Aufschieben. Aufgrund des Kammerdurchmessers entfällt die Variante zum Aufschrauben. Ein Aufschiebeflansch ist aufgrund des Eigengewichts bei den vorliegenden Abmessungen unpraktikabel. Somit verbleibt der Schweißflansch. Hierfür gibt es zwei Varianten wie in Abbildung 23 dargestellt. In Absprache mit dem gewählten Lieferanten, fiel die Auswahl auf den Vorschweißflansch für die Verschraubung des Deckels. Dieser weist in Bezug auf die Bauform einige Vorteile auf. Im Vergleich zum glatten Flansch lässt sich dieser einfacher verschweißen. Es ist lediglich eine statt zwei Schweißnähten notwendig. Die Zugänglichkeit während des Schweißprozesses ist deutlich besser. Mit größerem Abstand zum Bund kann der Schweißer die Naht von außen an die Kammer legen. Weitere Vorteile sind die höhere Steifigkeit und ein homogenerer Spannungsverlauf zwischen Flansch und Rohrstück. Ein V-Flansch ist bei gleicher Druckklasse schwerer als ein Glattflansch.

Angeboten werden Flansche für Druckbehälter und Leitungen in unterschiedlichen Druckklassen. Zur Verfügung stehen beispielsweise PN25 oder PN40. Dabei steht die Ziffer für den maximal zulässigen Druck. Um die Kammer mit den geforderten 30 bar betreiben zu können, muss somit ein PN40 Flansch verbaut werden. [25] Der Deckel selbst wird als Blindflansch ausgeführt. Ein Blindflansch ist im Wesentlichen eine ebene Platte mit Bohrungen für die Verschraubung. Hieran werden zusätzlich die Leitungsanschlüsse für die Versorgung der Versprühkammer geschweißt. Zur einfachen Handhabung im Versuchsbetrieb sollen drei Laschen seitlich am Deckel angeschweißt werden. Damit kann der Deckel angehoben und abgesenkt werden.

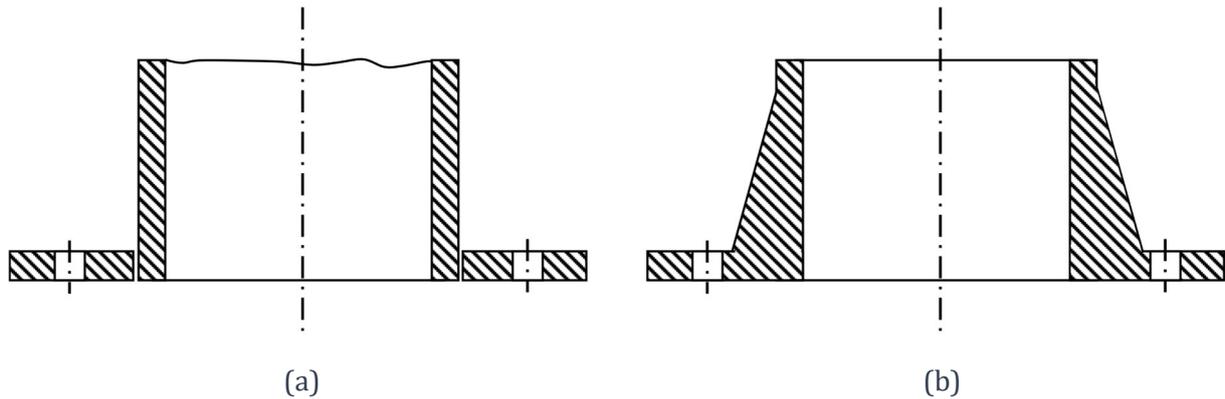


Abbildung 23: Schematische Schnittzeichnung - Glatter Flansch und V-Flansch im Vergleich nach [26], (a): glatter Flansch, (b): V-Flansch

Dichtungen

Als Dichtungsmaterial wurde in Rücksprache mit dem Lieferanten der Werkstoff EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-(Monomer)-Kautschuk) ausgewählt. Die Dichtung ist als Flachdichtung ausgeführt. Mit seinen vielfältigen Eigenschaften und Beständigkeiten kann EPDM in vielen Anwendungsbereichen als Dichtungsmaterial eingesetzt werden. Das synthetische Gummi weist eine hohe Beständigkeit gegenüber Ozon, UV-Strahlungen, Hitze und Sauerstoff auf und zeichnet sich somit durch eine sehr gute Alterungsbeständigkeit aus. Außerdem ist EPDM beständig gegenüber Heißwasser und polaren Medien, darunter verdünnte Säuren und Laugen, Alkohole, Ketone, Salzlösungen und Silikonöle. Zum Einsatz kommt EPDM vor allem im Automobil- und Wasserleitungsbau. [27]

Im Zuge der TÜV-Abnahme wurde der Behälter mit einem laut Norm vorgegebenen Prüfdruck von 50 bar anstelle des ausgelegten Betriebsdrucks von 30 bar beaufschlagt. Während des Prüfverfahrens wurden Undichtigkeiten an der Kammer festgestellt. Der Dichtungswerkstoff wurde aus diesem Grund nachträglich geändert. Vollständige Dichtheit wurde mit einer Dichtung aus PTFE (Polytetrafluorethylen) erreicht.

Schraubverbindungen

Die Flansche geben als Normteile die Größe und Anzahl der Schrauben vor. Für den Deckel kommen bei der Druckklasse PN40 sechzehn Schrauben in M33 zum Einsatz. Als Werkstoff wird ebenfalls Edelstahl ausgewählt. Die Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben sollen ebenso wie die Kammer korrosionsfrei sein. Die Schraubverbindung sorgt für die benötigte Flächenpressung der Dichtung. Für PTFE liegt die erforderliche Flächenpressung bei mindestens 15 N/mm² und maximal 90 N/mm² [28]. Um die erforderliche Flächenpressung der Dichtung zu erreichen, muss die benötigte Vorspannkraft einer Schraube bestimmt werden.

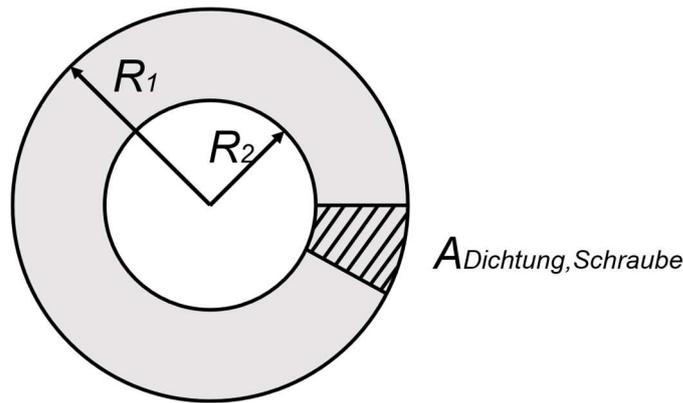


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Dichtung und der von einer Schraube zu dichtenden Fläche

$$A_{\text{Dichtung,Schraube}} = \frac{\pi R_1^2 - \pi R_2^2}{n} \quad (5.15)$$

die von einer Schraube gedichtet werden muss, ergibt sich aus einem Sechzehntel der Gesamtdichtungsfläche wie in Abbildung 24. Davon abgezogen wird die Fläche der Durchgangsbohrung. Die benötigte Dichtungskraft einer Schraube

$$F_{\text{Dichtung,Schraube}} = p A_{\text{Dichtung,Schraube}} \quad (5.16)$$

ergibt sich aus der benötigten Flächenpressung des Dichtungswerkstoffes sowie der von einer Schraube zu dichtenden Fläche. Die von einer Schraube zu tragende Gesamtkraft

$$F_{\text{Schraube,ges}} = F_{\text{Dichtung,Schraube}} + F_{\text{Betriebsdruck,Schraube}} \quad (5.17)$$

berechnet sich aus der benötigten Dichtungskraft sowie der resultierenden Kraft bei Druckbeaufschlagung des Behälters einer Schraube. Die bei Druckbeaufschlagung resultierende Kraft auf eine Schraube

$$F_{\text{Betriebsdruck,Schraube}} = \frac{P A_{\text{Deckel,res}}}{n} = \frac{P \pi R_2^2}{n} \quad (5.18)$$

kann aus der Innenfläche des Deckels bei geschlossener Versprühkammer und dem maximalen Betriebsdruck errechnet werden. Die benötigte Vorspannkraft einer Schraube muss zum Erreichen einer Dichtwirkung über dem berechneten Wert angesetzt werden. Die Vorspannkraft

$$F_{\text{Vorspannung}} = F_{\text{Schraube,ges}} S_f \quad (5.19)$$

wird aus diesem Grund mit einem Sicherheitsfaktor beaufschlagt. In Tabelle 14 und 15 sind die Berechnungsgrößen sowie die Berechnungsergebnisse aufgeführt.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Außenradius Dichtung	R_1	232,5	mm
Innenradius Dichtung	R_2	170	mm
Schraubenzahl	n	16	-
Flächenpressung Dichtung	p	37,5	N/mm ²
Betriebsdruck	P	3	N/mm ²
Sicherheitsfaktor	S_f	1,2	-

Tabelle 14: Berechnungsgrößen zur Bestimmung der benötigten Schraubenvorspannkraft

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Zu dichtende Fläche einer Schraube	$A_{Dichtung,Schraube}$	4939,4	mm ²
Benötigte Dichtkraft einer Schraube	$F_{Dichtung,Schraube}$	185 228	N
Resultierende Schraubenkraft bei Druckbeaufschlagung	$F_{Betriebsdruck,Schraube}$	17 024	N
Zu tragende Gesamtkraft einer Schraube	$F_{Schraube,ges}$	202252	N
Benötigte Vorspannkraft	$F_{Vorspannung}$	242 702	N

Tabelle 15: Berechnungsergebnis der Schraubenvorspannkraft mit Zwischenergebnissen

Für diese Vorspannkraft muss nun eine geeignete Schraube ausgewählt werden. Dafür werden die in der Schraube auftretenden Spannungen berechnet. Zunächst wird hierfür der Spannungsquerschnitt einer Schraube nach [29]

$$A_s = \frac{(d_2 + d_3)^2 \pi}{16} \quad (5.20)$$

mit dem Flankendurchmesser nach [29]

$$d_2 = d - 0,6495s_G \quad (5.21)$$

und dem Kerndurchmesser des Bolzengewindes nach [29]

$$d_3 = d - 1,22687s_G \quad (5.22)$$

berechnet. Die auftretenden Spannungen nach Roloff/Mattek [30]

$$\sigma = \frac{F_{Vorspannung}}{A_s} \quad (5.23)$$

geben einen Richtwert zur Auswahl der Schraubenfestigkeit. Die vorliegenden Spannungen betragen 350 N/mm². Zur Auswahl stehen Edelstahlschrauben der Festigkeitsklasse 50, 70 oder 80 aus Tabelle 18.

In Tabelle 16 und 17 sind die Berechnungsgrößen sowie die Berechnungsergebnisse aufgeführt.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Schraubendurchmesser	d	33	mm
Gewindesteigung	s_G	3,5	mm
Benötigte Vorspannkraft	$F_{Vorspannung}$	242 702	N

Tabelle 16: Berechnungsgrößen zur Bestimmung der vorliegenden Spannungen im Deckelschraubenspannungsquerschnitt

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Spannungsquerschnitt	A_s	693,6	mm ²
Flankendurchmesser	d_2	30,73	mm
Kerndurchmesser Bolzengewinde	d_3	28,71	mm
Vorliegende Spannungen in der Schraube	σ	349,5	N/mm ²

Tabelle 17: Berechnungsergebnisse der vorliegenden Spannungen im Deckelschraubenspannungsquerschnitt mit Zwischenergebnissen

Festigkeitsklasse	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm ²
50	210
70	450
80	600

Tabelle 18: Dehngrenzen der unterschiedlichen Festigkeitsklassen für Edelstahlschrauben [31]

Die Klasse 50 ist für die vorliegenden Spannungen zu schwach, die Klasse 80 wäre deutlich überdimensioniert. Gewählt werden Schrauben der Festigkeitsklasse 70. Abschließend wird der vorliegende Sicherheitsfaktor

$$S_{f,Schraube} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma} \quad (5.24)$$

nach [30] berechnet. Der vorliegende Sicherheitsfaktor beträgt 1,29. Die Schrauben sind damit ausreichend dimensioniert. Das nötige Anzugsmoment

$$M_A = F_{Vorspannung} \frac{1}{2} (d_2 \tan(\varphi + \rho_G) + \mu_K d_K) \quad (5.25)$$

nach [30] folgt als letzter Berechnungsschritt mit dem Gewindesteigungswinkel nach [29]

$$\varphi = \arctan\left(\frac{s_G}{d_2 \pi}\right), \quad (5.26)$$

dem Gewindereibungswinkel nach [29]

$$\rho_G = \arctan\left(\frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \quad (5.27)$$

und dem wirksamen Kopfkreisdurchmesser nach [30]

$$d_K = 0,65d. \quad (5.28)$$

Die Berechnungsgrößen sowie die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 19 und 20 aufgeführt. Die bisher nicht genannten Angaben zum Flankenwinkel sowie den Reibwerten wurden aus Tabellen aus Roloff/Mattek [30] entnommen.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Flankenwinkel metrisches Gewinde	β	60	°
Reibungszahl an der Kopfauflage	μ_K	0,12	-
Gewindereibzahl	μ_G	0,12	-
Dehngrenze A2-70	$R_{p0,2}$	450	N/mm ²

Tabelle 19: Berechnungsgrößen zur Bestimmung des Deckelschraubenanzugmoments

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Gewindesteigungswinkel	φ	2,08	°
Gewindereibungswinkel	ρ_G	7,89	°
Wirksamer Reibungsdurchmesser	d_K	21,5	mm
Anzugsmoment Deckelschrauben	$M_{A,Deckel}$	968,6	Nm

Tabelle 20: Berechnungsergebnis des Deckelschraubenanzugmoments mit Zwischenergebnissen

Die Schrauben des Deckels sind an der Versprühkammer mit einem Drehmoment von Mindestens 968,6 Nm unter dem Einsatz von Kupferpaste zur Gewindeschmierung anzuziehen. Der Anzug erfolgt in drei Stufen bis zum Erreichen des vollen Anzugmoments über Kreuz. So wird ein gleichmäßiges Setzen der Dichtung sichergestellt.

5.5.6 Optische Zugänge

Vorversuche Fensterscheiben

Für optische Messungen mittels Shadowgraph-Verfahren ist es wichtig ein ausreichend großes Sichtfeld abdecken zu können. So können Sprühbilder bis in den Randbereich untersucht werden. Zur Bestimmung der Fenstergröße wurden Vorversuche am Prüfstand durchgeführt. Verschiedene Fenstergrößen und -formen wurden mit Schablonen simuliert. In Abbildung 25 werden quadratische und runde Ausführungen zwischen 80 mm und 120 mm gezeigt. Prinzipiell sind größere Fenster für optische Messungen besser geeignet, da insgesamt größere Bereiche des Sprays sichtbar sind. Dem entgegen steht die Auslegung des Fensters an sich. Mit zunehmender Größe steigt die resultierende Kraft infolge des Behälterinnendrucks auf das Fenster. Die Materialstärke würde zunehmen und der Preis deutlich ansteigen. Aufgrund der homogeneren Spannungsverteilung bei runden Formen, fiel die Auswahl auf ein rundes Fenster als Standardteil mit einem Durchmesser von 132 mm. Der Sichtverlust infolge der runden Form im Vergleich zur quadratischen Form konnte durch den 12 mm größeren Durchmesser teilweise kompensiert werden.

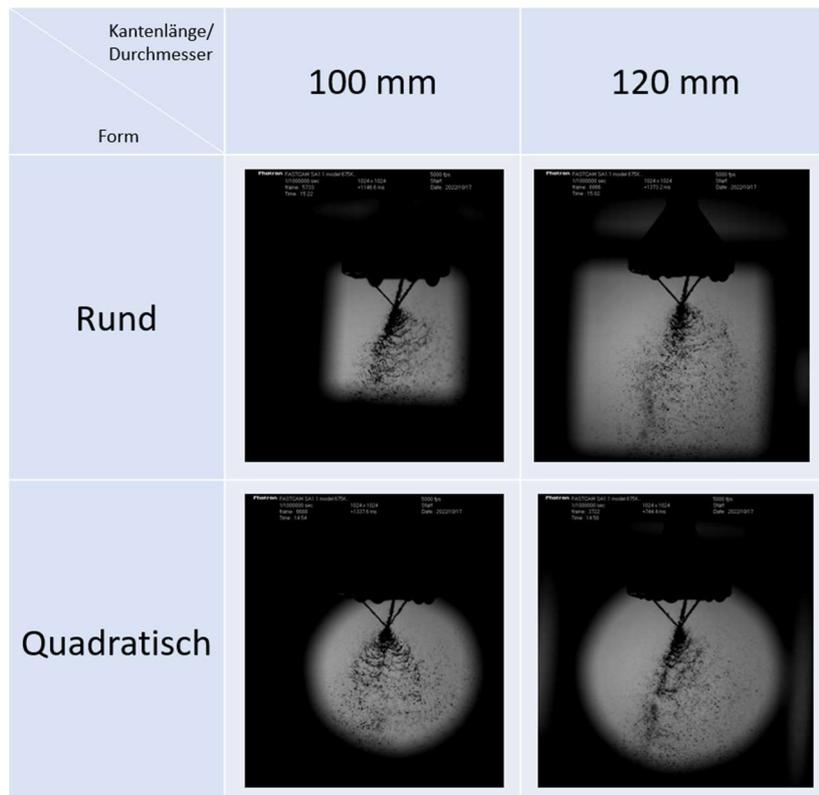


Abbildung 25: Vorversuche zur Scheibengröße

Zusätzlich zur Scheibengröße ist der Werkstoff der Fensterscheiben zu wählen. Hier gibt es eine Vielzahl an möglichen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften und Einkaufspreisen. Besonders Festigkeit, Medienbeständigkeit und Preis spielen bei der Auswahl eine Rolle. Neben Shadowgraph-Aufnahmen sollen Messungen mit einem lasergestützten Messgerät möglich sein. Hierzu ist die Lichtdurchlässigkeit zu berücksichtigen. In der vorliegenden Auslegung sollen Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm zum Einsatz kommen.

Nach Rücksprache mit möglichen Lieferanten fiel die Auswahl auf Borosilikatglas. Dieses weist ausreichende mechanische Eigenschaften [32] bezüglich Festigkeit auf und findet im Behälterbau als Standardwerkstoff für Sichtfenster seine Anwendung. Die Durchlässigkeit für Borosilikatglas für unterschiedliche Wellenlängen kann dem Diagramm in Anhang B entnommen werden. Für 633 nm liegt die Durchlässigkeit bei einer Scheibendicke von 40 bei etwa 95% der Lichtleistung.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Ungeklemmter/freier Durchmesser der Fensterscheibe	D	132 mm	mm
Sicherheitsfaktor	S_f	4	-
Konstante der Klemmungart	K	0,75	-
Betriebsdruck	P	3	N/mm ²
Biegefestigkeit Borosilikatglas	$F_{a,B}$	83	N/mm ²

Tabelle 21: Berechnungsgrößen zur Ermittlung der erforderlichen Mindestwandstärke der Fensterscheiben

Die Auslegung der Scheiben ist von hoher Relevanz, da diese die kritischen Stellen der Versprühkammer darstellen. Glas weist im Vergleich zu Metall spröde Werkstoffeigenschaften auf und bricht bei Überlastung schlagartig [33]. Zunächst wird die Mindeststärke

$$L_{min} = D \sqrt{\frac{S_f K}{4}} \sqrt{\frac{P}{F_a}} \quad (5.29)$$

nach [34] einer runden, druckbelasteten Scheibe berechnet. Für den Sicherheitsfaktor wird mit einem Wert von $S_f = 4$ gerechnet. Die Konstante K ist abhängig von der Art der Klemmung. Die Scheiben sollen für höhere Dichtwirkung von beiden Seiten eingespannt werden. K wird für diesen Fall mit einem Wert von 0,75 für geklemmte Fensterscheiben angegeben. Für die Wandstärke ergeben sich die Werte in Tabelle 22. Die Mindestwandstärke beträgt 21,7 mm. Die Auswahl fällt somit auf handelsübliches Glas mit einer Stärke von 30 mm.

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Mindestwandstärke	L_{min}	21,7	mm
Ausgewählte Wandstärke	L	30	mm

Tabelle 22: Berechnungsergebnis der erforderlichen Mindestwandstärke der Fensterscheiben

Flanschrohre

Die Mindestwandstärkenberechnung der Flanschrohre für die Sichtfenster erfolgt analog zum Kapitel zur Berechnung der Mantelwandstärke [17]. Die Berechnungsgrößen und -ergebnisse sind in Tabelle 23 und 24 aufgeführt. Basierend auf dem Maß des Standardglases wird der Innendurchmesser der Rohre mit 132 mm gewählt. Für die Mindestwandstärke ergibt sich somit ein Wert von $e_{Flanschrohr} = 2,9 \text{ mm}$. Gewählt wird ein Durchmesser von 4 mm.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Betriebsdruck	P	30	bar
Innendurchmesser	D_i	132	mm
Schweißnahtfaktor	z	0,85 bis 1	-
Sicherheitsfaktor	S_f	2	-
Dehngrenze bei 150°C	$R_{p0,2,150^\circ\text{C}}$	142	N/mm ²

Tabelle 23: Berechnungsgrößen zur Ermittlung der erforderlichen Rohrwandstärke

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Zulässige Spannung	f	71	N/mm ²
Mindestwandstärke für geschweißte Mantelfläche	$e_{geschwei\beta t}$	3,4	mm
Mindestwandstärke für nahtlos gezogene Mantelfläche	$e_{nahtlos}$	2,85	mm

Tabelle 24: Berechnungsergebnis der erforderlichen Rohrwandstärke mit Zwischenergebnis

Flansche

Für die Einspannung der beiden Fensterscheiben werden ebenfalls Flansche benötigt. Diese sind wie auch der Deckelflansch als V-Flansch ausgeführt. In Abstimmung mit dem Lieferanten wird der Deckel der Einspannung aus einem Blindflansch gefertigt. Dazu wird dieser in einem zusätzlichen Bearbeitungsschritt ausgedreht.

Dichtung

Für die Fensterdichtungen werden ebenfalls PTFE-Dichtungen eingesetzt.

Schraubverbindungen

Die Berechnung der Schraubverbindung der Fensterscheiben erfolgt analog zur oben durchgeführten Berechnung zur Auswahl der Deckelschrauben. Nachfolgend werden die Berechnungsgrößen sowie die Berechnungsergebnisse aufgeführt. Für die Berechnung der benötigten Schraubenvorspannkraft ergeben sich die Werte aus Tabelle 26 mit den Werten aus Tabelle 25.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Außenradius Dichtung	R_1	80,5	mm
Innenradius Dichtung	R_2	66	mm
Schraubenzahl	n	8	-
Flächenpressung Dichtung	p	37,5	N/mm ²
Sicherheitsfaktor	S_f	1,2	-

Tabelle 25: Berechnungsgrößen zur Bestimmung der benötigten Fensterschraubenvorspannkraft

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Zu dichtende Fläche einer Schraube	$A_{Dichtung,Schraube}$	834,2	mm ²
Benötigte Dichtkraft einer Schraube	$F_{Dichtung,Schraube}$	31 282	N
Resultierende Schraubenkraft bei Druckbeaufschlagung	$F_{Betriebsdruck,Schraube}$	5 132	N
Zu tragende Gesamtkraft einer Schraube	$F_{Schraube,ges}$	36 414	N
Benötigte Vorspannkraft	$F_{Vorspannung}$	43 697	N

Tabelle 26: Berechnungsergebnis der Fensterschraubenvorspannkraft mit Zwischenergebnissen

Für die Berechnung der vorliegenden Spannungen im Schraubenspannungsquerschnitt ergeben sich die Werte aus Tabelle 28 mit den Werten aus Tabelle 27.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Schraubendurchmesser	d	24	mm
Gewindesteigung	s_G	3	mm
Benötigte Vorspannkraft	$F_{Vorspannung}$	43 697	N

Tabelle 27: Berechnungsgrößen zur Bestimmung der vorliegenden Spannungen im Fensterschraubenspannungsquerschnitt

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Spannungsquerschnitt	A_s	352,5	mm ²
Flankendurchmesser	d_2	22,05	mm
Kerndurchmesser Bolzengewinde	d_3	20,32	mm
Vorliegende Spannungen in der Schraube	σ	124	N/mm ²
Vorliegender Sicherheitsfaktor	S_f	3,63	-

Tabelle 28: Berechnungsergebnisse der vorliegenden Spannungen im Fensterschraubenspannungsquerschnitt mit Zwischenergebnissen

Für die Berechnung des Anzugmoments der Fensterschrauben ergeben sich die Werte aus Tabelle 30 mit den Werten aus Tabelle 29.

Berechnungsgrößen			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Flankenwinkel metrisches Gewinde	β	60	°
Reibungszahl an der Kopfaufgabe	μ_K	0,12	-
Gewindereibzahl	μ_G	0,12	-
Dehngrenze A2-70	$R_{p0,2}$	450	N/mm ²

Tabelle 29: Berechnungsgrößen zur Bestimmung des Fensterschraubenanzugmoments

Berechnungsergebnisse			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Gewindesteigungswinkel	φ	2,48	°
Gewindereibungswinkel	ρ_G	6,84	°
Wirksamer Reibungsdurchmesser	d_K	15,6	mm
Anzugsmoment Fensterschrauben	$M_{A,Fenster}$	120	Nm

Tabelle 30: Berechnungsergebnis des Fensterschraubenanzugmoments mit Zwischenergebnissen

5.5.7 Fußkonstruktion

Die Kammer soll aufrecht, wie in Abbildung 18 (Darstellung oben) in den Prüfcontainer eingebaut werden. Hierzu wird eine Fußkonstruktion benötigt. Diese Fußkonstruktion wird mit drei Winkelstählen realisiert, welche seitlich an die Kammer geschweißt werden. Die Winkelform sorgt für ausreichende Steifigkeit und kann aus einfachen Platten günstig und schnell gefertigt werden. In Rücksprache mit dem Fertiger viel die Auswahl auf Abmessungen von 60x60x6 mm. Um die Kammer am Einbauort fest zu montieren, werden zusätzlich Platten an der Unterseite der Füße angeschweißt. Mit integrierten Bohrungen kann die Kammer so vor Ort verschraubt werden.

5.5.8 Sicherheitseinrichtungen

Um einen sicheren Versuchsbetrieb gewährleisten zu können, werden unterschiedliche Sicherheitseinrichtungen am Prüfstand integriert. Die Versprühkammer wird mit einem Sicherheitsventil ausgestattet. Dieses öffnet sich bei Überschreitung des ausgelegten Betriebsdrucks automatisch. Zusätzlich sind in der Steuerungssoftware des Prüfstands Maximalwerte zur Bedrückung der Kammer hinterlegt. Im Programm können maximal 30 bar eingestellt werden. Die Versuchsdurchführung wird im Gegensatz zu den atmosphärischen Tests von einem Remote-Kontrollraum gesteuert.

5.6 Kosten, Lieferzeit und Abstimmung mit Lieferanten

Nachdem Konzeptauswahl, Auslegung und Konstruktion erfolgt sind, folgt die Fertigung der Versprühkammer. Um Preise und Lieferzeiten besser einschätzen zu können, wurden bei unterschiedlichen Unternehmen Angebote eingeholt. Grundsätzlich standen zwei Möglichkeiten für die Fertigung zur Option:

Die erste Option beinhaltet die eigenständige Bestellung von Standardteilen und Halbzeugen. Darauf folgende Fertigungsschritte sind anschließend in der hauseigenen Fertigungswerkstatt vorgesehen. Notwendige Arbeitsschritte wie beispielsweise Bohren und Drehen können hier umgesetzt werden. Die abschließende Endmontage aller Einzelkomponenten erfolgt am Einsatzort im Prüfstand.

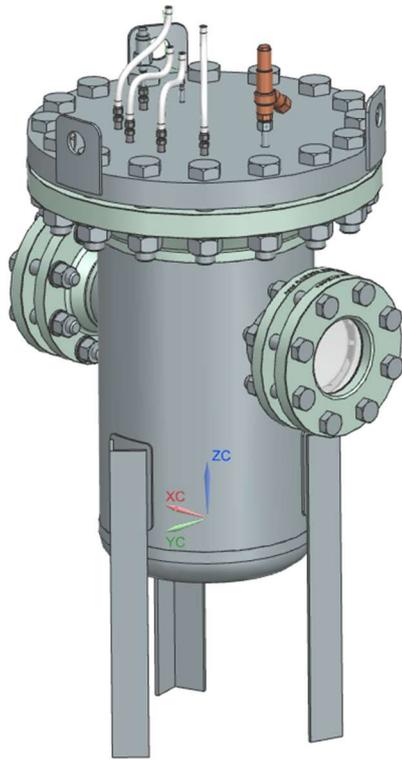
Die zweite Option deckt eine vollumfängliche Fertigung mit Zusammenbau des Behälters bei einer externen Firma ab. Diese ist in diesem Fall für alle Arbeitsvorgänge wie Bestellung von Halbzeugen und Standardteilen, Zeichnungsableitung für die Fertigung, die eigentliche Fertigung und Endmontage bis zum abschließenden Versand der Versprühkammer zuständig.

Angebote für beide Optionen wurden parallel zur Konstruktionsphase eingeholt, um frühzeitig über die notwendigen Informationen zu verfügen. Beide Fertigungsmöglichkeiten wurden in Betracht gezogen. Die Annahme, dass eine interne Fertigung günstiger und schneller umsetzbar sei, wurde dabei widerlegt. Angenommen wurden deutlich höhere Gesamtkosten durch zusätzliche Personalaufwendungen. Längere Lieferzeiten wurden durch weitere zuvor beauftragte Aufträge angenommen, in die die Fertigung der Versprühkammer hätte eingereiht werden müssen. Tatsächlich lag der Kostenumfang beider Fertigungsoptionen in einem ähnlichen Bereich. Die Lieferzeit wurde mit 7 Wochen angegeben. Eine Eigenfertigung mit Zeichnungserstellung und Lieferzeit hätte mindestens den gleichen Zeitraum in Anspruch genommen. Letztlich wurde eine externe Fertigung bei einer Behälterbaufirma gewählt und in Auftrag gegeben.

Die Fertigung bei einer externen Behälterbaufirma bringt gleich mehrere Vorteile mit sich. Die Abnahmemenge für Standardteile und Rohmaterial ermöglicht deutlich günstigere Einkaufspreise. So können die Eigenkosten und der Gewinnzuschlag der Firma mitabgedeckt werden. Gute Verbindungen zu Lieferanten können zudem Lieferzeiten senken. Eine einzelne Bestellung hat meist weniger Relevanz als ein Großauftrag eines langjährigen Kunden mit wiederkehrender Abnahme. Zusätzlich werden wesentliche Arbeitsabläufe für die Fertigung, wie Zeichnungsableitung und Bestellungen übernommen. Das spart Zeit und schafft Raum für ergänzende Themenfelder innerhalb der Bachelorthesis.

Neben den Vorteilen zu Lieferzeit und Preis, können zudem Erfahrungswerte in Bezug auf Konstruktion und Fertigung miteinfließen. In gemeinsamer Abstimmung wurde das oben genannte Konzept erweitert und verbessert. Abschließend erhält die Konstruktion eine Abnahme und Zulassung eine Prüfeinrichtung mit zugehörigen Dokumenten und praktischer Druckprüfung.

In Abbildung 26 sind das finale CAD-Modell sowie die gefertigte Versprühkammer zu sehen.



(a)



(b)

Abbildung 26: Finales CAD-Modell und Bild der gefertigten Versprühkammer, (a): CAD-Modell, (b): gefertigte Kammer

6 Integration in den Prüfstand

Die Versprühkammer muss nun in die bestehende Prüfstandsumgebung integriert werden. Hierzu sind Anpassungen am bisherigen Versuchsaufbau, dessen Versorgung und der Prüfstandssoftware vorzunehmen.

6.1 Ausgangssituation

In Abbildung 27 ist der virtuelle Aufbau des Prüfstands zu Beginn der Arbeit zu sehen. Der Prüfstand ist in zwei Bereiche aufgeteilt. Links in der Abbildung ist der Versuchsraum zu sehen. Untergebracht sind hier der Versuchsaufbau für atmosphärische Tests mit Versorgung von Prüf- und Bedrückungsmedien, Sensorik und Messtechnik, Werkzeugen und Arbeitsflächen, sowie Elektronik. Rechts in der Abbildung ist der Kontrollraum mit Prüfstands-PC zu erkennen.

Über Tanks im Freien strömt Stickstoff zum Prüfstand. Ein Handventil außerhalb des Prüfstandraums sowie ein weiteres innerhalb des Prüfstandraums trennen oder öffnen die Zufuhr. Am Cold-Flow-Prüfstand können Injektor-Versuche mit einem oder mit zwei Fluiden durchgeführt werden. Für den Einsatz von sogenannten Simulationsmedien für Oxidator und Brennstoff gibt es zwei separate Leitungs- und Tanksysteme. Zwei elektrische, PID-geregelte Druckminderer regeln die Bedrückung der beiden Tanks. Der Druck wird hierbei von 200 bar auf ein Bereich von 1 bis 30 bar gemindert. Die exakten Werte werden in der Prüfstandssoftware vom Anwender vorgegeben und können unterschiedlich für die beiden Tanks eingestellt werden. Am Versorgungsboard sind die Tanks mit zusätzlichen Handventilen zur Betankung montiert. Unterhalb der Tanks filtern ein Filter je Leitungssystem die zum Injektor strömenden Medien. Zusätzlich ist am Versorgungsboard die Messtechnik für Druck und Temperaturmessung sowie Massenstrommessung integriert. Final ist jeweils ein elektrisch betätigtes Ventil nach den Tanks beziehungsweise unmittelbar vor dem Injektor integriert. Der Injektor wird direkt an das Ventil geschraubt.

Der Shadowgraph-Aufbau ist mit einer Konstruktion aus Aluminiumprofilen umgesetzt. Hieran werden das Licht und die Hochgeschwindigkeitskamera montiert. Für Tropfengrößenmessungen werden diese beiden Komponenten entfernt und ein lasergestütztes Messgerät montiert. Mithilfe eines Trichters werden die versprühten Medien gesammelt und in einer Wanne aufgefangen.

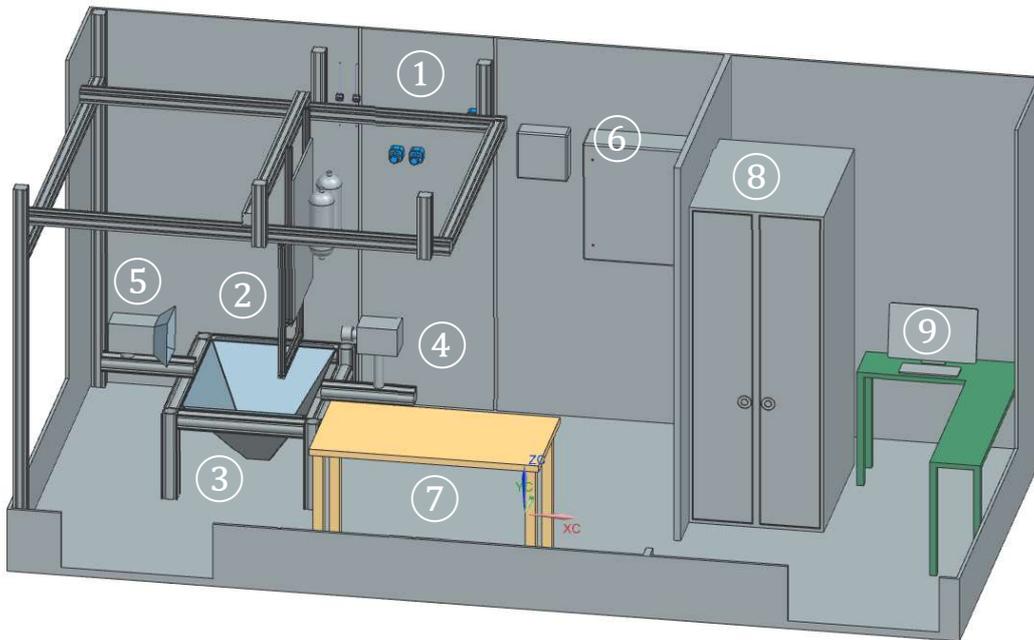


Abbildung 27: CAD-Modell des Ausgangszustands des Cold-Flow-Prüfstand zu Beginn der Arbeit

Pos.	Beschreibung
1	Stickstoffzu- und Abfuhr mit Ventilen und Druckreglern
2	Versorgungsboard mit Fluidtanks, Druck- und Temperatursensoren, Coriolis-Massenstrommessgeräte
3	Aluprofilaufbau mit Auffangwanne und Aufnahme für Shadowgraph-Technik oder Tropfengrößenmessgerät
4	Hochgeschwindigkeitskamera
5	Licht für Shadowgraph-Aufnahmen
6	Break-Out-Box, Sensoreingänge und Schaltschrank
7	Werkbank
8	Schaltschrank mit Messverstärker und Prüfstandscomputer
9	Bedieneinheit für Prüffingenieur

Tabelle 31: Bezeichnungen zum Prüfstand

In Abbildung 28 ist der Fluidplan des Versuchsaufbau für atmosphärische Tests dargestellt. Die Zu erkennen sind die Messstellen der Thermoelemente und der Drucksensoren. Alle ungeraden Messstellen beziehen sich auf Leitungssystem 1, alle geraden Messstellen beziehen sich auf Leitungssystem 2. Das erleichtert in der Versuchsauswertung die Zuordnung der Messdaten. Die Messstellen 0 messen atmosphärische Bedingungen. Von besonderer Relevanz sind die Messstellen unmittelbar vor dem Injektor. Mithilfe des Drucks vor dem Injektor und dem Umgebungsdruck kann der Druckverlust über den Injektor ermittelt werden.

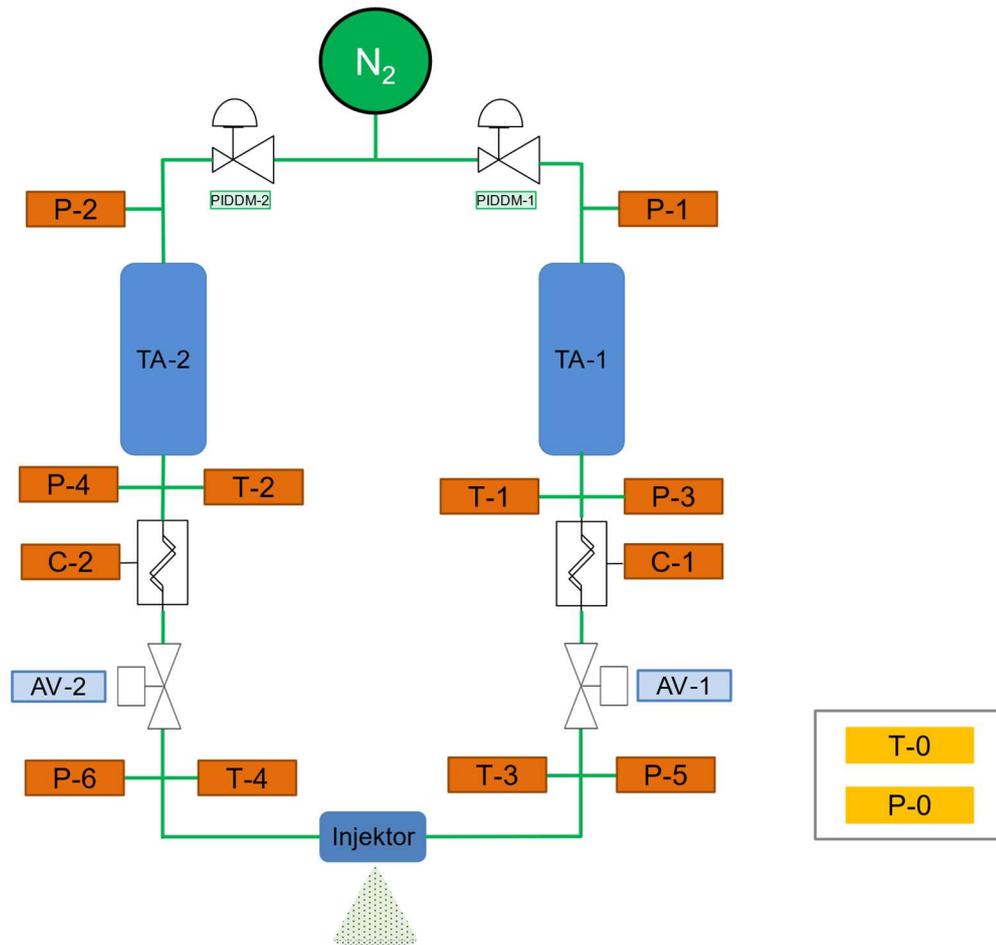


Abbildung 28: Fluidplan im Ausgangszustand des Cold-Flow-Prüfstands für atmosphärische Tests

In Abbildung 29 ist die graphische Bedienoberfläche des Prüfstands zu sehen. Der Anwender steuert von hier alle Abläufe der Cold-Flow-Versuche. Im Ausgabefenster links oben erhält der Anwender Rückmeldung über die Prozesse des Programms. In der mittleren oberen Eingabemaske werden alle relevanten Informationen zu der jeweiligen Versuchsreihe eingetragen. Hierzu zählen der Speicherort der Messdaten, die Benennung der Versuche sowie des Injektors und Angaben zum eingesetzten Messequipment (Kamerasetup oder Tropfengrößenmessgerät). Bei Störungen oder besonderen Beobachtungen während des Versuchablaufs können vom Anwender Kommentare zu den jeweiligen Versuchen eingetragen werden. Im grün hinterlegten Feld werden alle Messdaten von Druck, Temperatur und Massenströmen in Echtzeit ausgegeben. In Kombination mit den rechts dargestellten Graphen kann der Versuchablauf überwacht werden. Neben einer automatisierten Versuchsdurchführung (Ventilöffnungszeit, Triggersignal für die Kamera und Messdatenspeicherung) können die Ventile zu jeder Zeit manuell geöffnet und geschlossen werden. Der Druck der Tanks für den Versuch wird in jedem Fall vor Beginn manuell eingestellt.

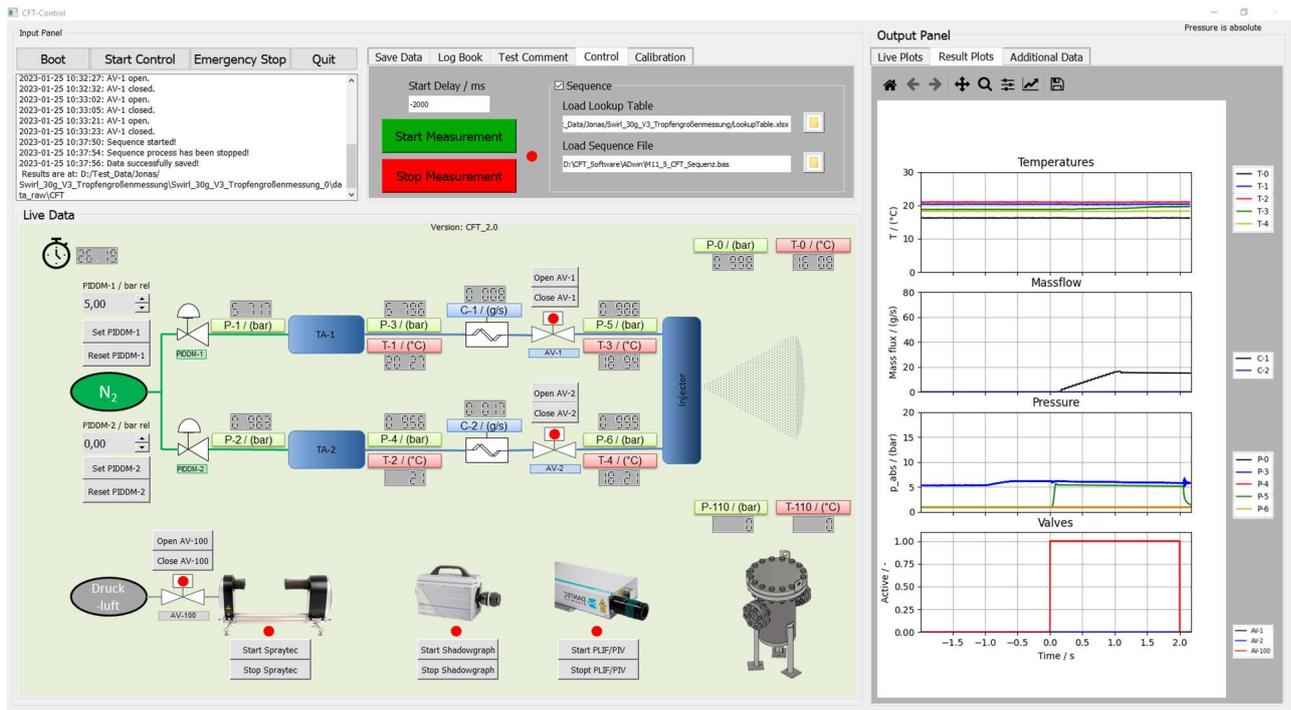


Abbildung 29: Graphische Bedienoberfläche des Cold-Flow-Prüfstands

6.2 Umbauarbeiten und Installation

Um die Druckkammer als Erweiterung im bestehenden Prüfstand unterzubringen, sind einige Änderungen am bestehenden Aufbau notwendig. Die Versprühkammer stellt eine Ergänzung zum bestehenden Prüfstand dar. Versuche bei atmosphärischen Bedingungen sollen weiterhin möglich sein. Die Versprühkammer wurde im vormontierten Zustand angeliefert, der Deckel war mit entsprechenden Bohrungen für die Leitungsanschlüsse versehen. Vor Beginn der eigentlichen Umbauarbeiten am Prüfstand wird die Versprühkammer mit den benötigten Anschlüssen für Fluidleitungen und Sensorik am Deckel finalisiert. Hierzu werden Aufnahmen angeschweißt. Zusätzlich erfolgt der Einbau der Injektoraufnahme aus ITEM-Aluprofilen auf der Innenseite des Deckels.

Aus Abbildung 30 geht die virtuelle Raumplanung mithilfe von CAD hervor. Zu erkennen ist der vergrößerte Trägeraufbau aus Aluminiumprofilen für Kamera und Licht oder Tropfengrößenmessgerät. In grün dargestellt ist der freizuhaltende Bereich. Um Zugang zu den Versorgungsventilen sowie zu Messtechnik und Elektronik sicherzustellen, muss dieser Bereich für den Anwender zugänglich bleiben.

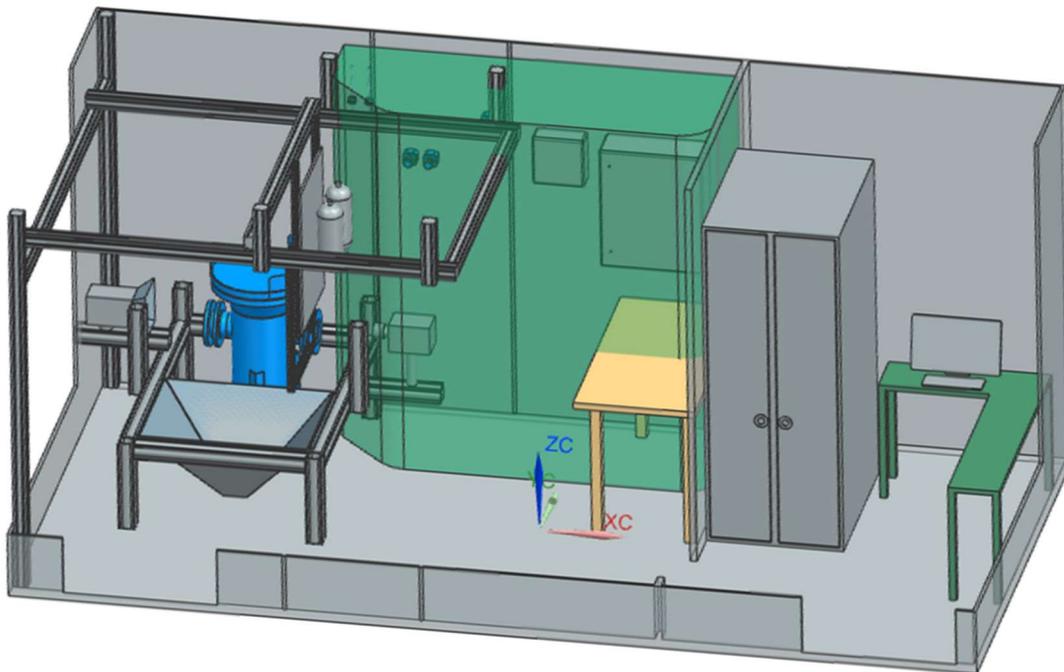


Abbildung 30: CAD-Modell des Prüfstands mit Versprühkammer

Der Rahmenaufbau aus Aluminiumprofilen diente bisher als Aufnahme für den Sammeltrichter und optischer Messtechnik. Dieses System ist modular aufgebaut und erlaubt dem Anwender eine schnelle Montage und Demontage von Kamera und Licht oder dem Tropfengrößenmessgerät. Dieses Prinzip soll aufgrund dieser Vorteile weiterhin genutzt werden. Zur Einbindung der Kammer wird der Aufbau vergrößert. Zwei zusätzliche Säulen, mittig am Profilaufbau, dienen zur Montage des Tropfengrößenmessgeräts. Dieses kann je nach Anwendungsfall (atmosphärische Versuche oder Versprühkammer) um 180° gedreht und somit für beide Versuchsvarianten genutzt werden.

Versprühkammer und Sammeltrichter werden nebeneinander angeordnet. Die Kammer wird nach hinten an die Außenwand gesetzt, der Sammeltrichter für Umgebungsversuche wird mittig im Prüfstandsraum platziert. Umbau- und Justagearbeiten während der Versuche können aufgrund der damit besseren Zugänglichkeit komfortabel vorgenommen werden. Zur Injektorentwicklung werden Tests bei atmosphärischen Bedingungen häufiger als Versuche in der Versprühkammer durchgeführt. Das Versorgungsboard mit Leitungen, Tanks und Injektoraufnahme wandert parallel mit dem Sammeltrichter weiter in die Raummitte.

Nachdem Sammeltrichter und Versprühkammer an ihren finalen Positionen stehen, können alle zusätzlichen Sensor- und Fluidleitungen gelegt werden. Aufgrund der veränderten Position des Versorgungsboards müssen neue Versorgungsleitungen zwischen den Druckreglern und Tanks gebogen und angebracht werden. Nach Abschluss aller Umbauarbeiten wurden alle Leitungen und Anschlüsse auf ihre Dichtheit und Funktion überprüft.

In Abbildung 31 ist der Prüfstand nach Abschluss der Umbauarbeiten zu sehen.



Abbildung 31: Cold-Flow-Prüfstand mit atmosphärischem Aufbau links und Versprühkammer rechts

6.3 Messtechnik

Um einen Versuch im Prüfbetrieb in Echtzeit überwachen und anschließend auswerten zu können, kommen am Prüfstand unterschiedliche Sensoren und zusätzliche Messtechnik zum Einsatz. Mithilfe dessen können Daten wie Druck, Massenstrom und Temperatur aufgezeichnet werden. Mit zusätzlicher Messtechnik kann der Versuch zusätzlich optisch überwacht und aufgezeichnet werden. Das ist besonders zur Auswertung der Sprühcharakteristiken wie Abbruchlänge oder Sprühwinkel notwendig.

6.3.1 Sensorik

In Abbildung 32 ist der Fluidplan für Versuche in der Versprühkammer dargestellt. Der ausgegraute Bereich stellt den Versuchsaufbau für atmosphärische Tests dar. Für Versuche in der Kammer werden die Versorgungsleitungen und Ventile des atmosphärischen Aufbaus an die Versprühkammer angeschlossen.

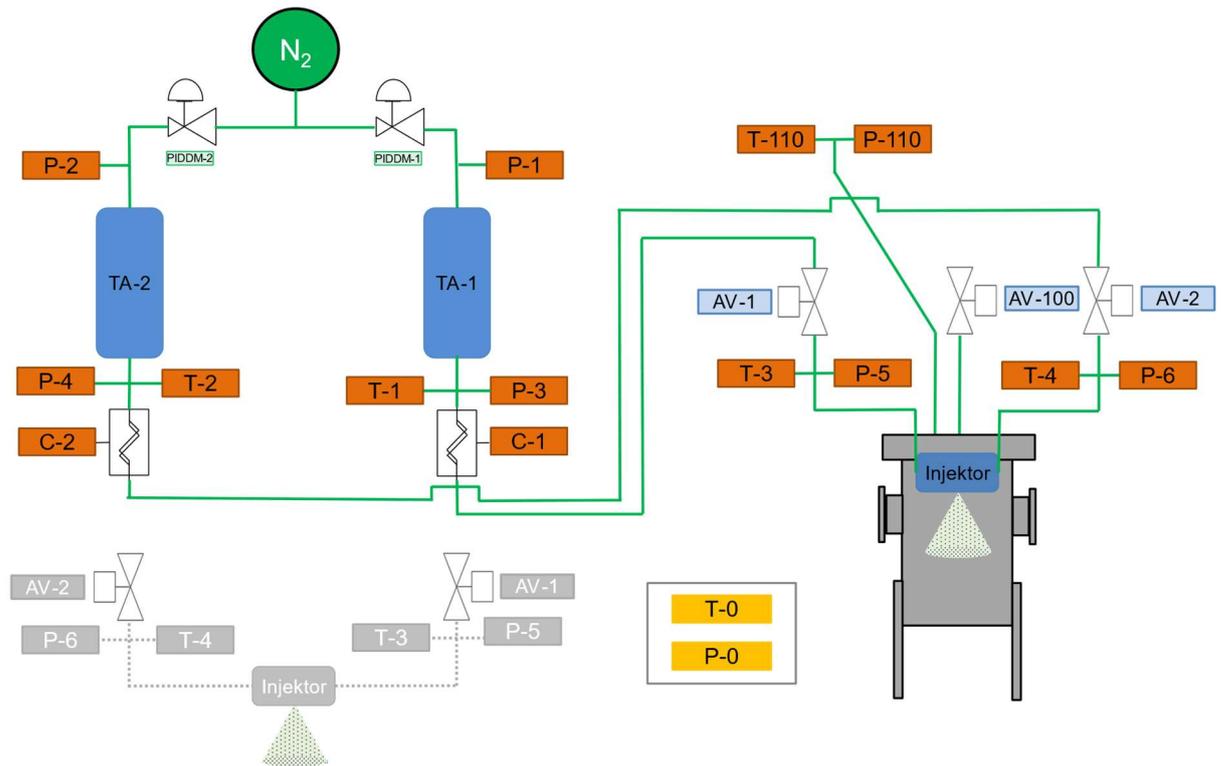


Abbildung 32: Schematischer Fluidplan des Cold-Flow-Prüfstands für Versuche in der Versprühkammer

Symbol	Bedeutung
TA	Tank
AV	Ventil
PIDDM	Druckregler
P	Drucksensor
T	Thermoelement
C	Coriolis-Massenstromsensor

Tabelle 32: Legende zum Fluidplan

Zur Aufzeichnung der Massenströme kommen zwei Coriolis-Massenstromsensoren zum Einsatz. Da die Massenströme der Simulationsfluide in unterschiedlichen Bereichen liegen, sind zwei unterschiedliche Varianten verbaut. Die Messbereiche liegen bei 0,5 g/s bis 125 g/s, wobei hier der Nennmassenstrom bei 83 g/s liegt und bei 0,17 g/s bis 45 g/s, wobei der Nennmassenstrom bei 30 g/s liegt. Die Messunsicherheit wird mit 1% angegeben. Gemessen wird in beiden Systemen zwischen Tank und Ventil [35] [36].

Der Druck beider Fluidstränge wird an mehreren Stellen gemessen. Für jeden Strang sind drei Drucksensoren verbaut. Montiert sind die Sensoren direkt nach dem PID-Druckregler, nach dem Tank und direkt vor dem Injektor. Zwei weitere Sensoren sind zur Messung des Umgebungs- und Kammerdrucks verbaut. Die Messabweichung des Umgebungsdrucksensors liegt bei $\pm 0,25\%$ des maximal messbaren Drucks (maximal 1,2 bar). Alle anderen Drucksensoren sind mit einer Abweichung von 0,3% des maximal möglichen Drucks angegeben (maximal 200 bar) [37].

Weiterhin wird an verschiedenen Stellen die Temperatur der Fluide, der Umgebung und innerhalb der Kammer gemessen. Verwendet werden Thermoelemente vom Typ K mit einer

Messunsicherheit von $\pm 1,5^\circ\text{C}$ [38]. Gemessen wird an den Positionen nach den Tanks und unmittelbar vor dem Injektor.

Speziell die Drücke und Temperaturen direkt vor dem Injektor (P-5, P-6, T-3 und T-4) werden später in der Auswertung herangezogen. Da die Drücke möglichst nahe am Injektor gemessen werden, können später exakte Aussagen über die Druckverluste des Injektors gemacht werden.

6.3.2 Shadowgraph-Aufbau

Mit dem Shadowgraph-Verfahren können Aspekte wie allgemeine Sprayform, Abbruchlänge, Sprühwinkel und das vorliegende Sprayregime bestimmt werden. Auch Aussagen zur Austrittsgeschwindigkeit einzelner Tropfen sind mit entsprechender Software möglich. Einfache oder direkte Shadowgraphy bezeichnet einen Versuchsaufbau, bei dem mithilfe einer Lichtquelle ein sogenanntes Schlierenobjekt als zweidimensionales Schattenbild dargestellt werden kann. Abbildung 33 zeigt den schematischen Versuchsaufbau [39].

Als Schlierenobjekt werden durchsichtige Bereiche im Sichtfeld zwischen Lichtquelle und Leinwand bezeichnet, die eine abweichende Dichte vom umliegenden Gas, in den meisten Fällen Luft, aufweisen. Infolgedessen werden die eintreffenden Lichtstrahlen gebrochen, gebogen oder abgelenkt und ein Schattenbild auf der dahinterliegenden Leinwand entsteht. Wird das Schlierenobjekt aus dem Sichtfeld des Aufbaus entfernt, wird die Projektionsleinwand gleichmäßig ausgeleuchtet. Infolge der Brechung durch das Schlierenobjekt unter dem Winkel ε trifft dieser um den Abstand a verschoben auf die Leinwand auf. Das führt zu höherer Lichtintensität am Auftreffpunkt auf der Leinwand, wohingegen die ursprüngliche Position (mittig auf der Leinwand) weniger stark ausgeleuchtet wird. Übertragen auf das vollständige Schlierenobjekt, führt dessen ungleichmäßige Verteilung zu einer neuen Lichtstrahlenverteilung infolge von Kreuzung und Ablenkung auf der Leinwand. Das dabei entstehende Schattenbild weicht von einem geschlossenen, lichtundurchlässigen Objekt ab und erscheint eher wie ein grauer Schleier [39].

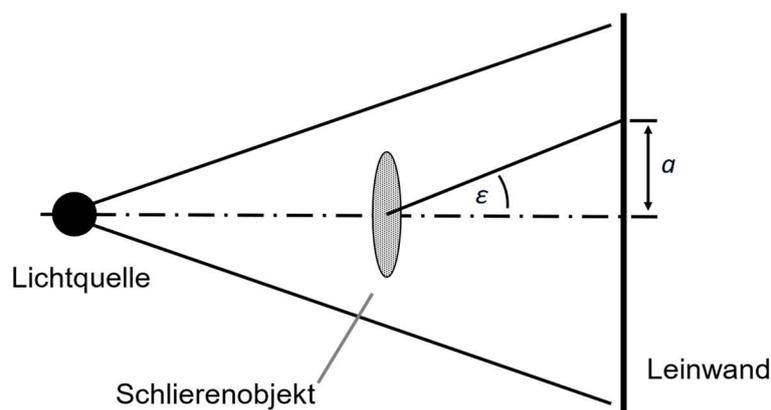


Abbildung 33: Schematischer Shadowgraph-Aufbau nach [40]

Der Versuchsaufbau im Prüfstand entspricht weitgehend dem der Abbildung. Einziger Unterschied ist die Hochgeschwindigkeitskamera statt der Projektionsleinwand. Aufgenommen werden Videos mit einer Bildrate von 5400 Bildern pro Sekunde. Kleinste Änderungen im Sprühbild können somit beobachtet und ausgewertet werden.

7 Injektorauswahl

Für die Versprühversuche soll ein entsprechender Injektor ausgelegt werden. Da sich diese Bachelorthesis im Wesentlichen mit der Auslegung einer Versprühkammer und den entsprechenden Versuchen beschäftigt, soll die Injektorauslegung einen vergleichsweise kleinen Umfang abdecken. Der Injektor nimmt dennoch grundlegende Einflüsse auf das Sprühbild. Deshalb wird die Auslegung im Folgenden zu einem besseren Verständnis beschrieben.

7.1 Auslegung eines Drall-Injektors

Grundsätzlich gehen aus der Literatur drei gängige Injektortypen im Bereich der Raketentreibstoffinjektion hervor: Strahl-Injektoren, Drall-Injektoren und Pintle-Injektoren. Ausgelegt werden soll ein Drall-Injektor. Für diesen Typ gibt es in der Literatur beschriebene Auslegungsverfahren. Bazarov [8] gibt unter Einbezug der Stoffdaten und den zu erzielenden physikalischen Randbedingungen zwei Auslegungsverfahren vor. Verfahren 1 beruht auf numerischen Berechnungen, Verfahren 2 beruht auf experimentellen Modellversuchen. Mit beiden Verfahren soll zunächst jeweils ein Injektor ausgelegt werden. Diese werden anschließend experimentell charakterisiert und die Messdaten mit den Auslegungsdaten abgeglichen.

Der Injektor soll für ein Fluid als Closed-End-Variante ausgelegt werden. Closed-End bedeutet, dass der Düsendurchmesser kleiner als der Drallkammerdurchmesser ist. Als Versprühmedium soll Wasser eingesetzt werden. Die Versprüheneigenschaften sind ähnlich zu Wasserstoffperoxid, welcher als Oxidator in den Triebwerken eingesetzt wird. Wasser wird deshalb als Simulationsmedium im Rahmen von Cold-Flow-Versuchen eingesetzt. Zudem ist Wasser in großer Menge und günstig verfügbar und im Versuchsablauf ohne persönliche Schutzausrüstung handhabbar.

Spezifikationen zur Injektorauslegung			
Injektortyp	Drall-Injektor		
Spezifikation 1	Closed-End		
Spezifikation 2	1-Fluid		
Stoffdaten Wasser			
Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Dichte	ρ	998	kg/m ³
Dynamische Viskosität	η	1	mPas
Angaben zum Betriebspunkt			
Massenstrom	\dot{m}	30	g/s
Druckverlust	Δp	7	bar
Sprühwinkel	φ	120	°

Abbildung 34: Angaben zur Injektorauslegung

Aus der Literatur [4] gehen Oxidatormassenströme von etwa 13 g/s für einen Schub von 37 N hervor. Für steigende Massenströme steigen auch die Dimensionen eines Injektors. Um mit dem Stereolithografie-Verfahren (SLA) Injektoren aus Kunststoff mit guten Resultaten in der abteilungsintern Werkstatt fertigen zu können, wird ein höherer Massenstrom angesetzt. Damit lassen sich Kanäle im Inneren des Injektors genauer fertigen. Die Wahrscheinlichkeit von verstopften Kanälen sinkt. Gewählt wurde ein Massenstrom von 30 g/s. Während der Verbrennung schwankt der Druck in der Brennkammer. Der Betrag des Druckverlustes beruht auf

Erfahrungswerten. Der eingestellte Druckverlust über den Injektor gewährt ausreichend Sicherheit zu den Brennkammerschwingungen. Ein Vordringen der Flammenfront in die Tanks wird damit verhindert. Höhere Druckverluste würden wiederum zu höheren Tankdrücken führen und steigende Tankwandstärken fordern. Das Gewicht des Systems würde unnötig steigen. Gewählt wird ein Druckverlust von 7 bar. Gängige Sprühwinkel liegen zwischen 90° und 120° [8]. Um eine großflächigere Verteilung des Sprays für spätere Untersuchungen zu erzielen, wurde ein Winkel von 120° gewählt. Nachdem Stoffdaten und Betriebspunkt ausgewählt wurden, erfolgt die rechnerische Auslegung. Alle eingehenden Daten sind in Tabelle 34 aufgeführt. In Abbildung 35 ist eine Schnittzeichnung eines Drall-Injektors zu sehen. Aus dem Auslegungsverfahren [8] gehen folgende geometrische Angaben hervor: Drallkammerdurchmesser und -höhe, Düsendurchmesser und -höhe, Einlasskanaldurchmesser und -länge.

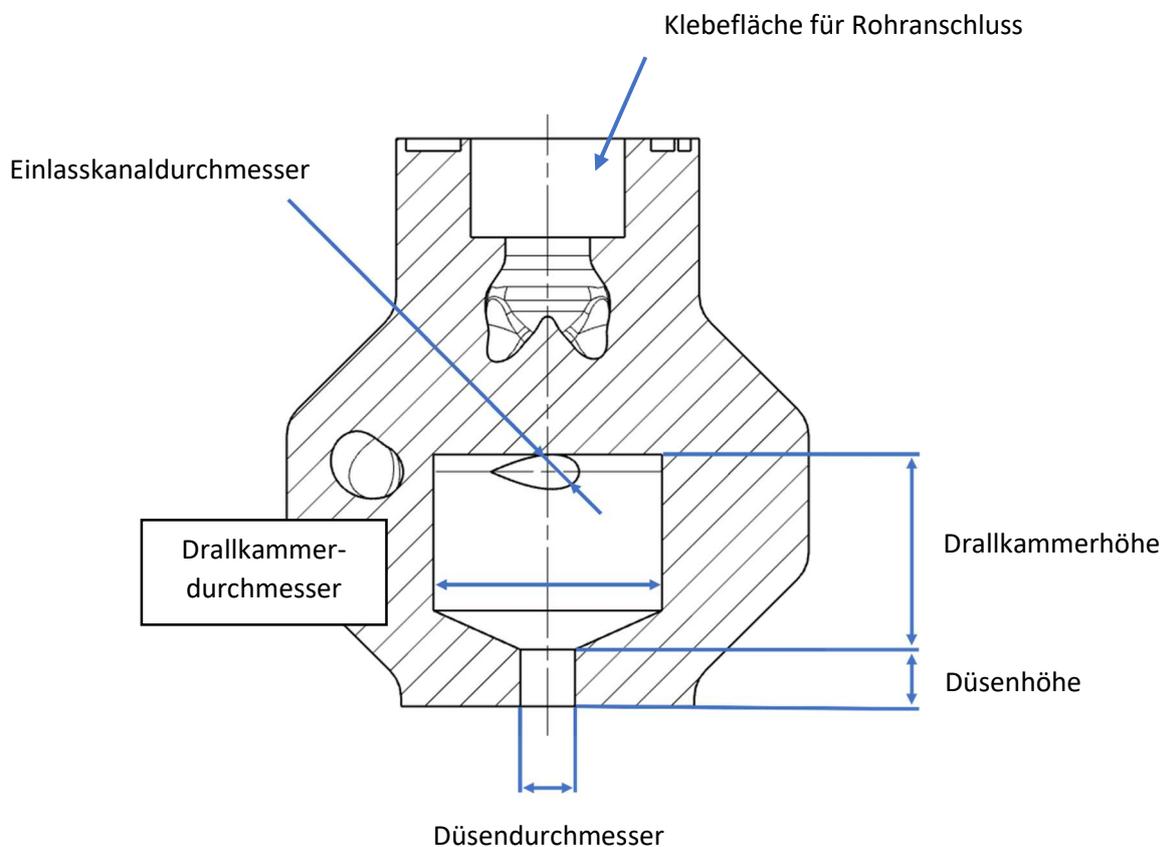


Abbildung 35: Schnittzeichnung eines Drall-Injektors

7.1.1 Verfahren 1

Verfahren 1 beschreibt das numerische Auslegungsverfahren nach Bazarov S.70 [8]. Alle folgenden Formeln in Kapitel 7.1.1 wurden hieraus entnommen.

- 1) Mit dem gewählten Sprühwinkel von 120° werden der geometrisch charakteristische Parameter A und der Durchflusskoeffizient μ graphisch ermittelt (Diagramm in Anhang D).

- 2) Der Düsenradius

$$R_n = 0,475 \sqrt{\frac{\dot{m}}{\mu \sqrt{\rho \Delta p_i}}} \quad (7.1)$$

wird aus dem Durchflusskoeffizient und den zu Beginn festgelegten Betriebsdaten berechnet.

- 3) Weiterhin muss die Anzahl n der Einlasskanäle festgelegt werden. Typische Werte liegen hier bei drei oder vier. Weniger Kanäle führen zu ungleichmäßiger Massenverteilung des Fluids im Sprühkegel. Zudem muss der Injektoröffnungskoeffizient C abgeschätzt werden. Für Closed-Type Drall-Injektoren liegt dieser Wert zwischen drei und vier [8]. Mithilfe dessen kann die axiale Position des Eintrittskanalradius

$$R_{in} = R_n C \quad (7.2)$$

berechnet werden. Daraus folgt der Eintrittskanalradius

$$r_{in} = \sqrt{\frac{R_{in} R_n}{nA}} \quad (7.3)$$

- 4) Weitere zu berechnende Injektorparameter sind:

- a) Länge Eintrittskanal: $l_{in} = (3 \dots 6)r_{in} \quad (7.4)$

- b) Länge Austrittsdüse: $l_n = (0,5 \dots 2)R_n \quad (7.5)$

- c) Länge Drallkammer: $l_s > 2R_{in} \quad (7.6)$

- d) Radius Drallkammer: $R_s = R_{in} + r_{in} \quad (7.7)$

Gewählt wurden Faktor 3 für die Länge des Düseneintrittskanal und Faktor 2 für die Länge der Austrittsdüse sowie die Länge der Drallkammer. Diese Werte sind angenommene Werte. Erfahrungen liegen hierzu bisher nicht vor.

Mit Verfahren 1 ergeben sich für die Konstruktion die Größen aus Tabelle 33.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Drallkammer Länge	l_s	7,9	mm
Drallkammer Radius	R_s	4,6	mm
Düsenlänge	l_n	2,3	mm
Düsenradius	R_n	1,1	mm
Eintrittskanal Länge	l_{in}	2,0	mm
Eintrittskanal Radius	r_{in}	0,7	mm

Tabelle 33: Geometrische Berechnungsergebnisse nach Verfahren 1

7.1.2 Verfahren 2

Verfahren 2 beschreibt das Auslegungsverfahren auf Basis experimenteller Modellversuche nach Bazarov S.71 [8]. Alle folgenden Formeln in Kapitel 7.1.2 wurden hieraus entnommen.

- 1) Mit dem gewählten Düsenlängen-Durchmesser-Verhältnisses l_n/D_n werden der geometrisch charakteristische Parameter A und der Durchflusskoeffizient μ graphisch ermittelt (Diagramm in Anhang E).

- 2) Der Düsenradius

$$R_n = 0,475 \sqrt{\frac{\dot{m}}{\mu \sqrt{\rho \Delta p_i}}} \quad (7.8)$$

wird aus dem Durchflusskoeffizient und den zu Beginn festgelegten Betriebsdaten berechnet.

- 3) Die Definition der Einlasskanalanzahl n sowie des Injektoröffnungskoeffizienten C erfolgt analog zu Verfahren 1. Mithilfe dessen kann die axiale Position des Eintrittskanalradius

$$R_{in} = R_n C \quad (7.9)$$

berechnet werden. Daraus folgt der Einlasskanaldurchmesser

$$r_{in} = \sqrt{\frac{R_{in} R_n}{nA}} \quad (7.10)$$

- 4) Die Reynoldszahl

$$Re_{in} = \frac{U_{in} r_{in} 2\sqrt{n}}{v} = \frac{2\dot{m}}{\pi \sqrt{n} r_{in} \rho v} \quad (7.11)$$

kann zur weiteren Berechnung genutzt werden, sofern $Re_{in} > 10^4$.

- 5) Weitere zu berechnende Injektorparameter sind:

- a) Länge Eintrittskanal: $l_{in} = (3 \dots 6)r_{in} \quad (7.12)$

- b) Länge Austrittsdüse: $l_n = (0,5 \dots 2)R_n \quad (7.13)$

- c) Länge Drallkammer: $l_s > 2R_{in} \quad (7.14)$

- d) Radius Drallkammer: $R_s = R_{in} + r_{in} \quad (7.15)$

- 6) Mit dem relativen Flüssigkeitsdrallradius \bar{r} , graphisch zu entnehmen aus dem Diagramm in Anhang F, kann das Verhältnis r_m/R_n graphisch ermittelt werden. Der Flüssigkeitsdrallradius

$$r_m = \bar{r} R_n \quad (7.16)$$

Mit Verfahren 2 ergeben sich für die Konstruktion die Größen aus Tabelle 34.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Drallkammer Länge	l_s	10,9	mm
Drallkammer Radius	R_s	5,9	mm
Düsenlänge	l_n	3,1	mm
Düsenradius	R_n	1,6	mm
Eintrittskanal Länge	l_{in}	1,4	mm
Eintrittskanal Radius	r_{in}	0,5	mm

Tabelle 34: Geometrische Berechnungsergebnisse nach Verfahren 2

7.2 Injektor-Konstruktion

Mit den berechneten Geometriedaten werden zwei Injektoren konstruiert. In Abbildung 36 sind die beiden CAD-Modelle dargestellt. Die Grundkonstruktion beider Injektoren ist gleich. Die Kreistasche oben dient zur Aufnahme eines 6 mm Edelstahlrohrs. Dieses wird später mit dem Injektor verklebt und dient zur Montage im Prüfstand. Das Fluid strömt von oben in den Injektor ein und teilt sich auf drei Kanäle auf. Der Übergang zwischen Rohr und Verteilerkanälen ist mit einem flachen Winkel umgesetzt worden. Das stellt den besten Kompromiss dar. Für einen parallelen und geraden Übergang von Rohr zu Kanal müsste der Kanal weiter nach oben gezogen werden, um eine Kollision mit der Drallkammer zu umgehen. Das würde die Länge der Kanäle und somit die Reibung erhöhen. Für kürzere Kanäle müsste der Einströmwinkel vergrößert werden. Die Wahrscheinlichkeit von ungewollten Druckverlusten im Kanalbogen würde steigen. Die Kanäle zu den Eintrittskanälen sind mit einem größeren Durchmesser im Vergleich zu den Eintrittskanälen in die Kammer gestaltet. Der Druck soll damit zum größten Teil über den tangentialen Eintrittskanal in die Drallkammer abfallen.

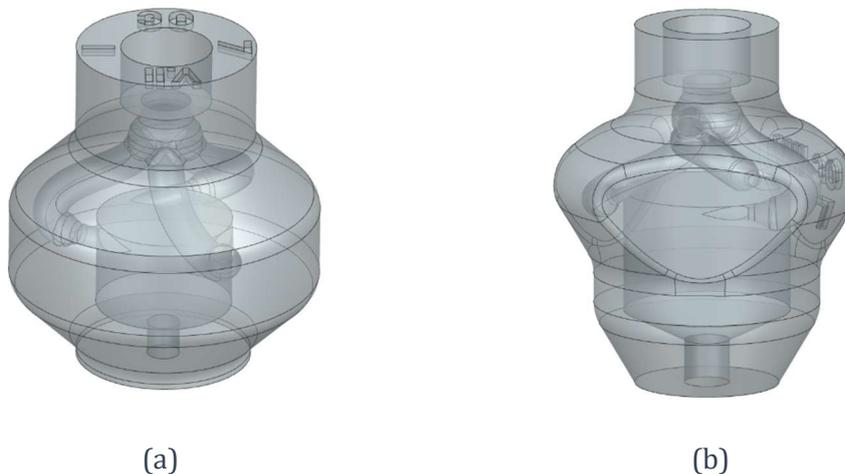


Abbildung 36: CAD-Modelle der Injektoren nach Bazarov für Cold-Flow-Versuche, (a): Injektor nach Verfahren 1, (b): Injektor nach Verfahren 2

7.3 Injektor-Fertigung und Charakterisierung

Nach Auslegung und Konstruktion soll der Injektor im Stereolithografie-Verfahren (SLA) 3D-gedruckt werden. Dieses Fertigungsverfahren kann eigenständig in der hauseigenen Werkstatt umgesetzt werden. Grundsätzlich lassen sich mit diesem Verfahren mehrere Varianten zeitnah und kostengünstig umsetzen. Kurze Fertigungszeiten ermöglichen schnelle iterative Weiterentwicklungen. Zudem sind komplexere Formen in Bezug auf die Innenkanalstruktur im

Vergleich zu konventionellen Fertigungsfahren möglich. Da die Injektoren im Cold-Flow-Verfahren getestet werden sollen, ist ein Kunststoffdruck für diesen Anwendungsfall ausreichend. Die Qualität der Drucke wurde iterativ untersucht und verbessert. Untersucht wurden unterschiedliche CAD-Export-Einstellungen, Schichthöhen und die Druckrichtungen. Um die Aussagekraft der Messdaten bewerten zu können, wurde ein Injektor zunächst aufgeschnitten und auf seine Toleranzen untersucht. Die Durchmesser von Tangentialbohrung, Drallkammer und Düse liegen im Vergleich zur CAD-Zeichnung in einem Bereich von -0,1 mm bis -0,2 mm. Die Untermaße werden auf den Aushärteprozess des Injektors zurückgeführt. Beim Export der CAD-Daten wurde die feinst mögliche Einstellung verwendet. Gedruckt wurde mit einer Schichtstärke von 0,025 mm.

Zur Charakterisierung der beiden Injektoren wurden Vorversuche bei atmosphärischen Bedingungen vorgenommen. Ausgewertet werden Massenströme, Druckverluste und Sprühwinkel in der Nähe des Auslegungspunktes. Damit soll eines der zwei Injektor-Auslegungsverfahren für weitere Versuche ausgewählt werden. In Abbildung 37 sind die Massenströme über den Druckverlust der beiden Injektoren dargestellt. Der Eckpunkt der rotgestrichelten Linien stellt den Auslegungspunkt dar. Beide Verfahren treffen den Auslegungspunkt von 30 g/s bei einem Druckverlust von 7 bar nicht. Verfahren 1 liegt mit etwa 40 g/s deutlich darüber, Verfahren 2 liegt mit etwa 20 g/s deutlich darunter.

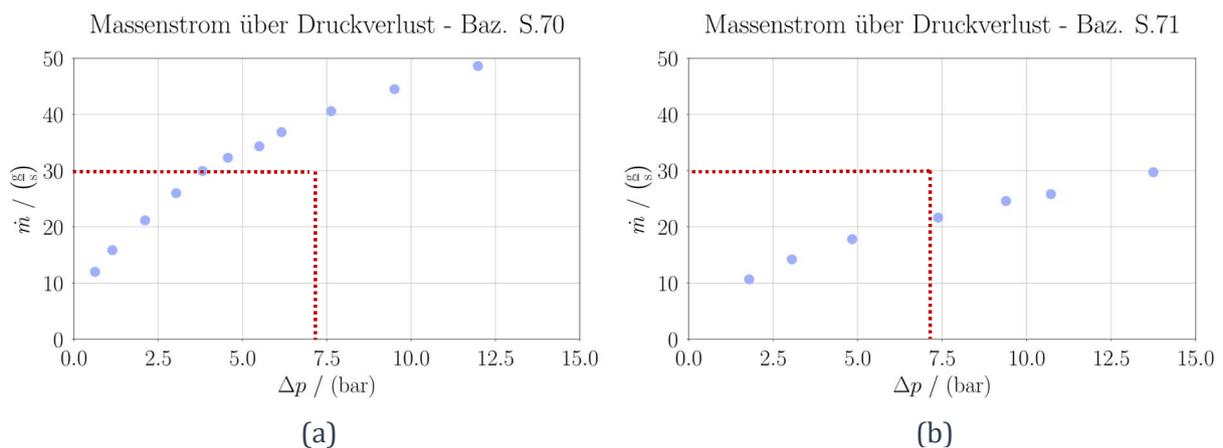
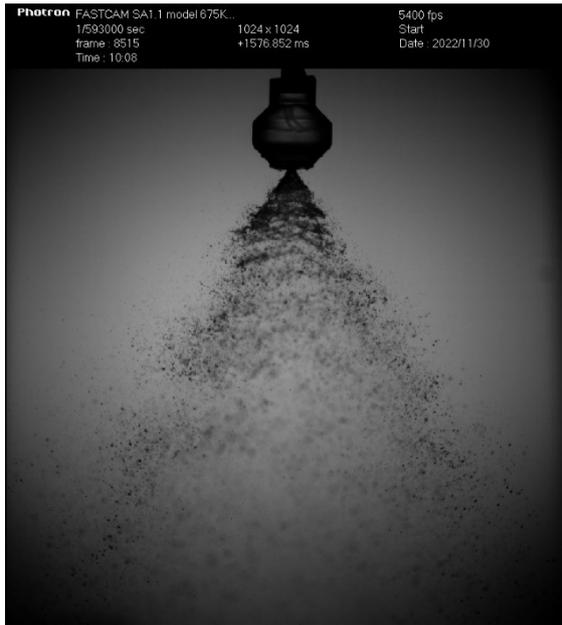
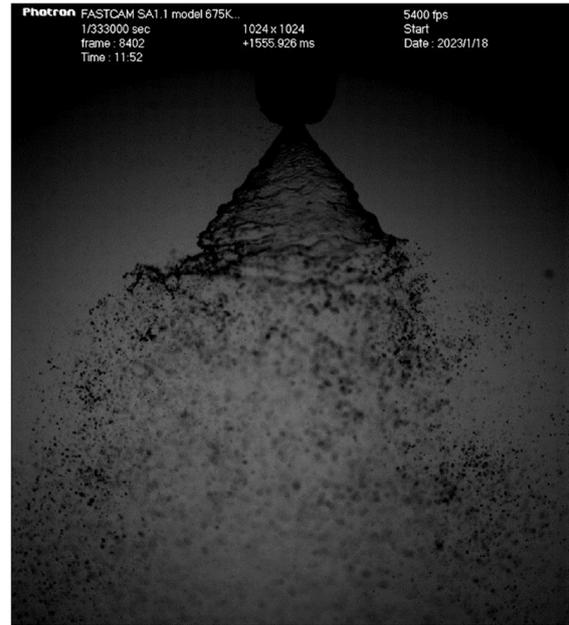


Abbildung 37: Massenstrom über Druckverlust der beiden Auslegungsverfahren, (a): Verfahren 1, (b): Verfahren 2

In Abbildung 38 sind zwei Bilder aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in der Nähe des Auslegungspunktes (Druckverlust knapp über 7 bar) dargestellt. Die gemessenen Winkel liegen bei 62° für den nach Verfahren 1 ausgelegten Injektor. Für den nach Verfahren 2 ausgelegten Injektor wurde ein Winkel von 69° gemessen. Das Verfahren zu Bestimmung der Sprühwinkel wird in Kapitel 8.2 detailliert beschrieben.



(a)



(b)

Abbildung 38: Einzelbilder aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der beiden Auslegungsverfahren bei einem Druckverlust von knapp über 7 bar, (a): Injektor nach Verfahren 1, (b): Injektor nach Verfahren 2

7.4 Konstruktive Überarbeitung des Injektordesigns

Um einen Injektor zu entwickeln, der näher an den realen und praktikablen Vorgabewerten liegt, wurden iterativ mehrere Konzepte und Varianten ausprobiert. Letztlich gibt es die Möglichkeit, den Injektor nach Verfahren 1 so abzuändern, dass geringere Massenströme resultieren. Alternativ kann man den Injektor nach Verfahren 2 so modifizieren, dass höhere Massenströme resultieren. Da die Dimensionen der Injektoren (vor allem die Einlassbohrungen) schon an der Grenze der Fertigbarkeit des Druckers liegen, wurde entschieden, den Injektor nach Verfahren 2 für höhere Massenströme zu modifizieren. Dadurch müssen die Dimensionen tendenziell vergrößert werden, wodurch die Druckbarkeit bestehen bleibt.

Für höhere Massenströme sind eine geringere Abbruchlänge sowie ein größerer Sprühwinkel zu erwarten. Aus diesem Grund soll der Injektor nach Verfahren 2 als Grundlage für eine weitere Entwicklungsstufe dienen. Die Gesamteinströmfläche der Einlasskanäle soll für höhere Massenströme vergrößert werden. Hierfür wird ein zusätzlicher Einlasskanal mit identischem Durchmesser von 1 mm implementiert. Aus größeren Eintrittskanaldurchmessern würden geringeren Einströmgeschwindigkeiten resultieren. Für gleichbleibende Einströmgeschwindigkeiten bleibt der Eintrittskanaldurchmesser erhalten. Ein zusätzlicher Eintrittskanal wird implementiert. Drall-Kammer- und Düsengeometrie sollen beibehalten werden. In Abbildung 39 ist der angepasste Injektor zu sehen. In seiner Form wurde dieser als Block mit zueinander parallelen Flächen konstruiert. Dies soll die Sicht nach innen in die Strömungskanäle und die Drall-Kammer ermöglichen. Um während eines Cold-Flow-Versuchs in die Kanalstrukturen schauen zu können, wurde iterativ ein Verfahren zur Oberflächennacharbeit entwickelt. Nach mehrstufigen Schleif- und Polierstufen wird der Kunststoff durchsichtig. Aus zeitlichen Gründen wurden Versuche zur getrennten Betrachtung der Strömungsvorgänge im Inneren des Injektors lediglich zur Überprüfung der Durchsichtigkeit in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen durchgeführt. Eine beispielhafte Aufnahme ist im Anhang in G dargestellt.

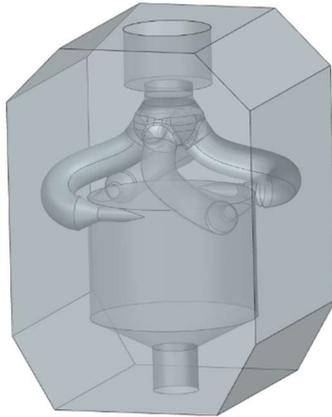


Abbildung 39: Angepasstes Injektordesign nach Baz. S.71 mit zusätzlichem Einströmkanal

Aus Abbildung 40 gehen die gemessenen Massenströme des neuen Injektors hervor. Auslegungspunkt und gemessene Werte sind nun fast deckungsgleich. Bei einem Druckverlust von 7,3 bar wurde ein Massenstrom von 31,9 g/s gemessen. Der Sprühwinkel liegt bei einem Wert von 94°,5 (Abbildung 41). Dieser Sprühwinkel ist immer noch nicht bei den angezielten 120°, wie in der Auslegung vorgegeben. Grund dafür könnten die erhöhten Wandrauigkeiten durch den 3D-Druck sein, welche nicht in der Auslegung berücksichtigt werden. Eine erhöhte Wandrauigkeit führt zu größeren Verlusten der Strömungsgeschwindigkeit in der Drallkammer. Da der Betriebspunkt aber gut mit den Auslegungskriterien übereinstimmt, wird dieser Injektor im Folgenden für die Versuche bei Umgebungsdruck in der Versprühkammer eingesetzt.

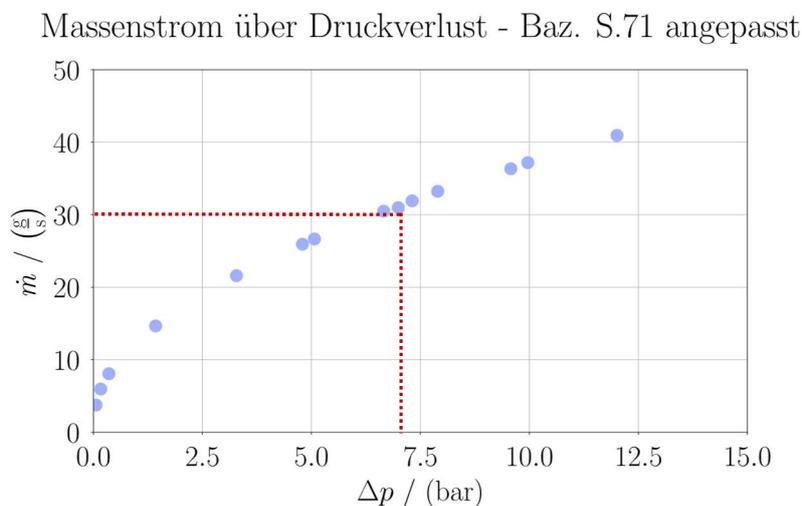


Abbildung 40: Massenstrom über Druckverlust des angepassten Injektordesigns

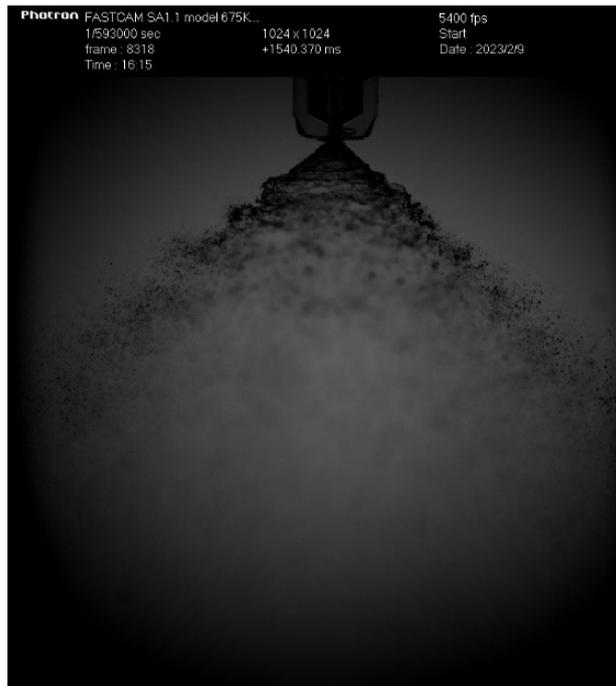


Abbildung 41: Einzelbild aus Hochgeschwindigkeitsaufnahme bei einem Druckverlust von 7 bar - angepasstes Injektordesign nach Baz. S.71 mit zusätzlichem Einströmkanal

8 Sprühversuche bei Gegendruck

Mit Abgleich von atmosphärischen Versuchen zu Versprühkammerversuchen soll zunächst der Einfluss der Kammer auf das Sprühverhalten untersucht werden. Anschließend soll der ausgelegte Injektor auf sein Verhalten bei Umgebungsdruck untersucht werden. Charakterisiert werden Sprühform, Sprühwinkel und Abbruchlänge sowie die Druckverlustbeiwerte.

8.1 Vorbereitungen und Ablauf

Vor Beginn des eigentlichen Versuchs sind eine Reihe an Vorbereitungen und Umbauarbeiten am Prüfstand vorzunehmen. Zu Beginn muss die Versprühkammer an das Fluidnetz angeschlossen werden. Hierfür werden die Ventile des atmosphärischen Versuchsaufbaus auf der Kammer montiert, und die Leitungen für Bedrückung und Versprühmedium angeschlossen. Anschließend erfolgen Einbau und Positionierung des Injektors. In Abbildung 42 ist die Versprühkammer mit geöffnetem Deckel dargestellt. Zu sehen ist der bereits eingebaute Injektor. Dieser kann über die Aluprofilkonstruktion in alle drei Raumrichtungen verschoben und optimal positioniert werden. Zur späteren Auswertung muss vor Versuchsbeginn eine Referenzmessung durchgeführt werden. Hierbei wird ein Bild des Injektors im Vergleich zu einer daneben positionierten Messskala aufgenommen (siehe auch Abbildung 47). Längenbasierte Messungen am Sprühbild werden über die Skala im Bild kalibriert.



Abbildung 42: Eingebauter Injektor in der Versprühkammer bei geöffnetem Deckel

Ein einzelner Versuch wird durch Kammer- und Tankdruck, Versuchsdauer und Öffnungszeit des Ventils definiert. Diese Angaben sind vom Anwender zu Beginn festzulegen. In einer Sequenzdatei werden Versuchsdauer, Öffnungszeitpunkt und -dauer des Ventils und der Triggerzeitpunkt zum

Start der Videoaufnahme hinterlegt (siehe Tabelle 35). Für diese Arbeit wurde folgende Sequenz definiert:

Parameter	Wert	Einheit
Versuchsdauer	4	s
Zeitpunkt Ventilöffnung	2	s
Öffnungsdauer Ventil	2	s
Zeitpunkt Trigger Videoaufnahme	2	s

Tabelle 35: Definierte Sequenz für alle in der Arbeit durchgeführten Versuche

Kammer- und Tankdruck werden vom Anwender manuell vor jedem Versuch eingestellt. Der Versuch wird manuell gestartet. Bei Bedarf können einzelne Betriebspunkte einer Versuchsreihe so jederzeit vom Anwender wiederholt werden. Vor dem ersten Versuch wird das Ventil manuell geöffnet, um die Leitungen und Kanäle des Injektors zu füllen. Messfehler durch Luft im System nach der Injektormontage werden somit ausgeschlossen. Mit Start des Versuchs beginnt die Testsequenz. Diese wird vom Programm automatisch gesteuert. In Tabelle 36 und 37 sind die getesteten Druckverluste und Umgebungsdrücke aufgeführt. Die gewählten Druckverluste (1-14 bar) beinhalten den Auslegungspunkt des eingesetzten Injektors von 7 bar und decken Randbereiche ober- und unterhalb ab. Die gewählten Kammerdrücke (1-22 bar) decken den aus der Literatur genannten Brennkammerdruck ab. Auch hier sollen Randbereiche ober- und unterhalb abgefahren werden. In der Prüfstandssoftware ist aus Sicherheitsgründen für die PID-Regler eine Grenze bei 30 bar gesetzt. Um einen adäquaten Druckverlust bei hohen Umgebungsdrücken zu realisieren, beträgt der maximale Kammerdruck 22 bar. Somit ist noch ein Druckverlust von 8 bar realisierbar.

Injektordruckverluste								
1 bar	2 bar	4 bar	6 bar	7 bar	8 bar	10 bar	12 bar	14 bar

Tabelle 36: Injektordruckverluste für die Versuchsreihe in der Versprühkammer

Umgebungsdrücke					
1 bar	5 bar	10 bar	15 bar	20 bar	22 bar

Tabelle 37: Umgebungsdrücke für die Versuchsreihe in der Versprühkammer

8.2 Auswerteverfahren

Die am Prüfstand gemessenen Daten (Druck, Temperatur, Massenstrom, Ventiltaktung) werden für jeden Versuch als Textdatei im .txt-Format abgespeichert. Zur Auswertung werden diese Daten mit einem intern entwickelten Python-Skript eingelesen, aufgearbeitet und sortiert. In Abbildung 43 ist beispielhaft ein Diagramm der aufgenommenen Rohmessdaten aller Drücke und Massenströme über die Versuchszeit dargestellt.

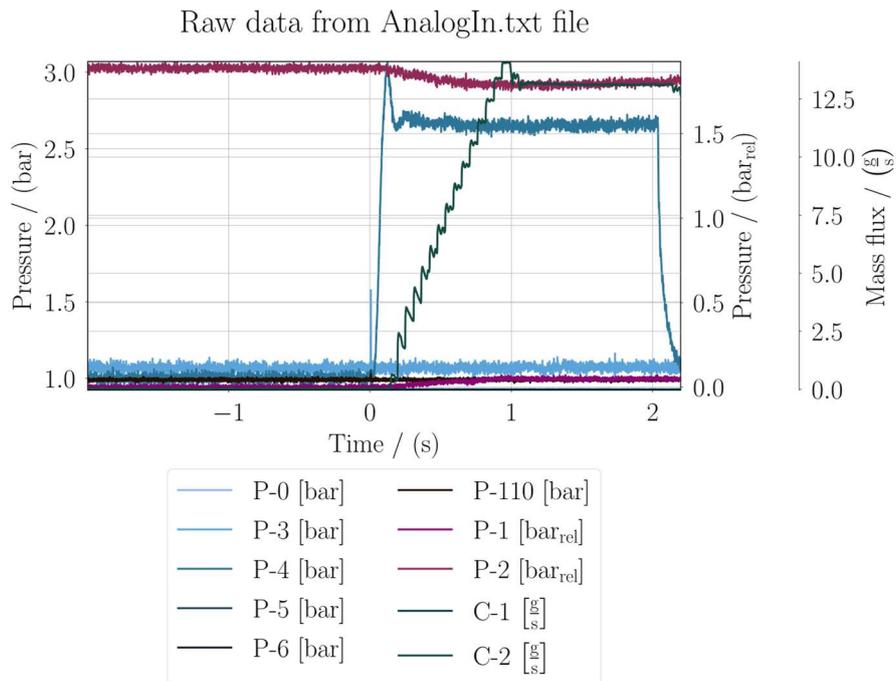


Abbildung 43: Plot der Rohdaten von Druck- und Massenstrom-Messwerten

Die Rohdaten der Einzelversuche werden zunächst mithilfe eines Kalman-Filters geglättet. Der Druckverlust den Injektors wird aus Leitungsdruck P6 vor dem Injektor und Umgebungsdruck P110 in der Kammer berechnet (siehe auch Fluidplan, Abbildung 32). In Abbildung 44 sind die dazugehörigen Diagramme der gefilterten Daten zu sehen. Diese Daten werden zur weiteren Auswertung genutzt.

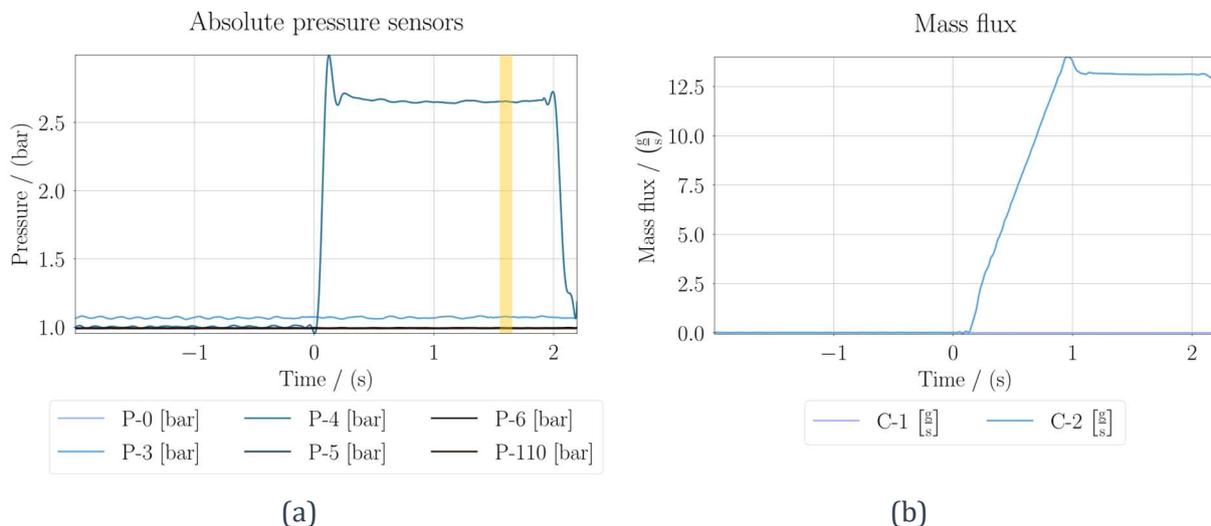


Abbildung 44: Plot der gefilterten Daten von Druck- und Massenstrom-Messwerten, (a): Plot der gefilterten Druckdaten, (b): Plot der gefilterten Massenstromdaten

Für die Auswertung werden die Daten im Bereich von 1,52 s bis 1,57 s gemittelt. Dieser Bereich ist in Abbildung 44 gelb markiert. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen werden aufgrund der Datenmenge auf dieses Intervall begrenzt und abgespeichert. Zur Bestimmung des Sprühwinkels werden die aufgenommenen Bilder übereinandergelegt. Links in Abbildung 45 ist zunächst ein

Einzelbild aus den gespeicherten Videos zu erkennen. Durch Überlagerung der Einzelbilder ergibt sich das Bild aus rechts in Abbildung 45. Instabilitäten des Sprays werden so geglättet.

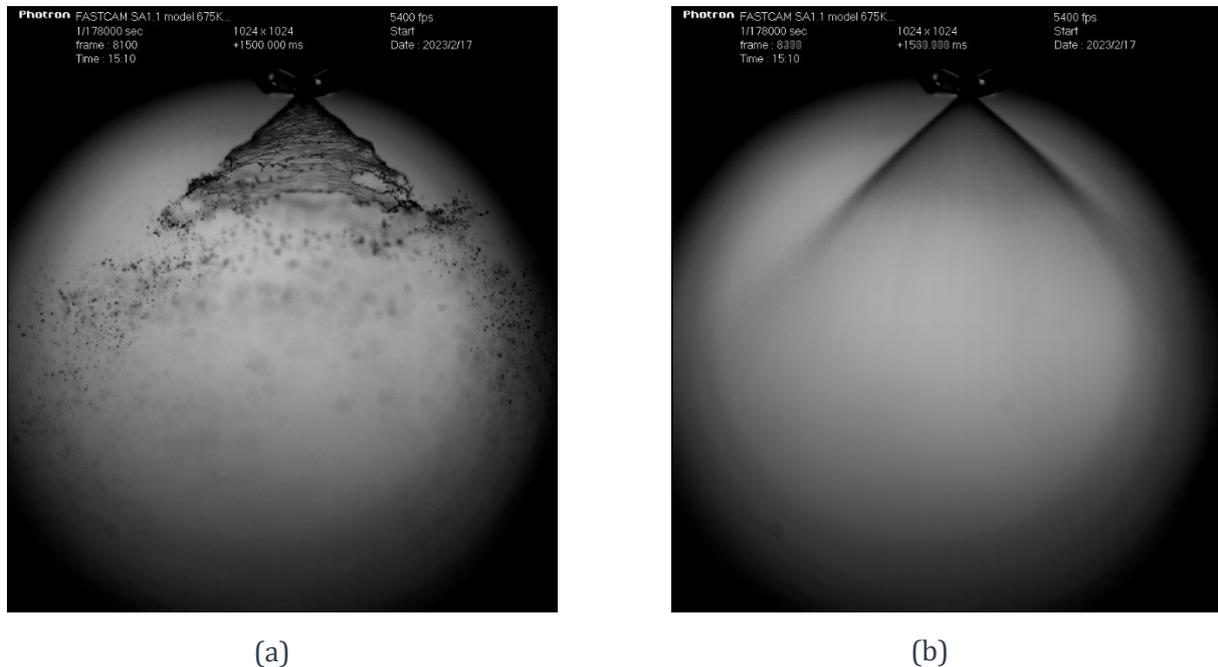


Abbildung 45: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Shadowgraph-Aufbau zur Bestimmung des Sprühwinkels, (a): Einzelbild, (b): überlagertes Bild für einen Zeitintervall von 50 ms

Der Sprühwinkel eines Sprays kann in verschiedenen Bereichen gemessen werden. Abhängig vom Abstand zum Injektoraustritt ergeben sich unterschiedliche Winkel. Für die Versuchsreihe dieser Arbeit wird der Winkel in einem Bereich von 2 mm ab Injektoraustritt bestimmt. Das Spray des getesteten Injektors weist in dieser Zone einen annähernd linearen Bereich auf. In Abbildung 46 ist das angewendete Messverfahren dargestellt. Zunächst wird die Injektorunterkante (durchgezogene horizontale Linie) als Referenzlinie definiert. Eine weitere Linie, parallel zur Unterkante, wird im Abstand von 2 mm zur durchgezogenen Linie positioniert. Das Maß wurde zuvor mithilfe der Referenzmessung kalibriert. Als Mittellinie dient die Mittelachse des Injektors. Diese steht senkrecht zu den angeordneten Linien. Der Winkel wird anschließend rechts und links separat gemessen. Der totale Sprühwinkel ergibt sich aus der Addition beider Halbwinkel.

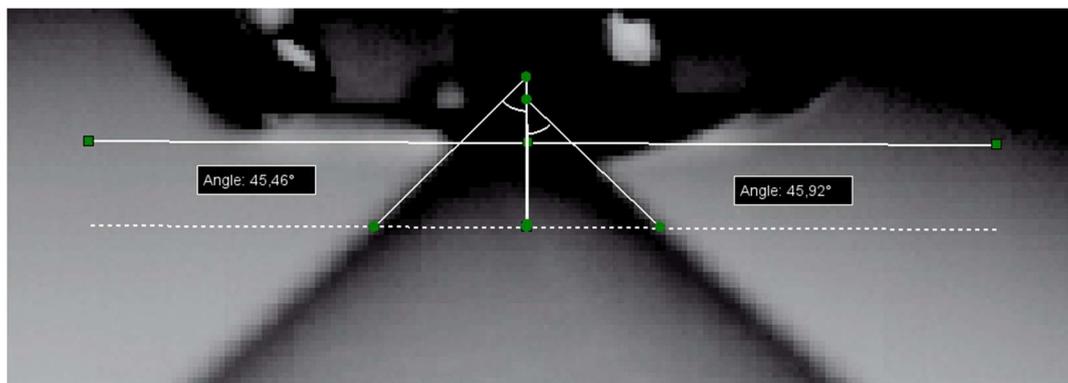


Abbildung 46: Darstellung zur Bestimmung des Sprühwinkels

Die Abbruchlänge eines Sprays wird mithilfe eines Python-Skripts automatisiert bestimmt. Dieses Skript kommt erstmalig in der Abteilung zum Einsatz und befindet sich im Prototypenstatus [41]. Zur Ermittlung der Abbruchlänge wird im Referenzbild die Anzahl der Bildpixel für 10 mm mit dem in Abbildung 47 blauen Gatter festgelegt.

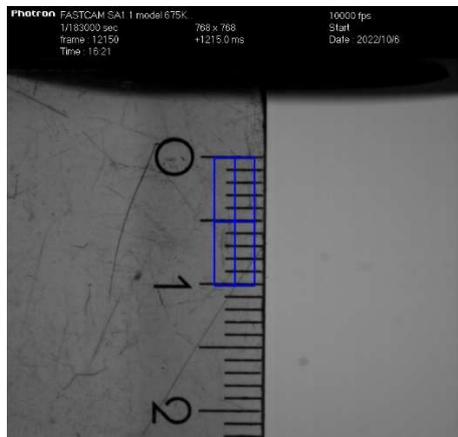


Abbildung 47: Referenzbild zur Kalibrierung der Abbruchlänge

Das Programm sucht anschließend nach der längsten zusammenhängenden Kontur (grün markierter Bereich in Abbildung 48) und wertet anschließend den Abstand zwischen Bildoberkante und der Unterkante der Kontur (rote Linie in Abbildung 48) aus. Die Bildoberkante ist zeitgleich die Unterkante des Injektors. Dieser Bereich wird vom Anwender zu Beginn definiert. Abbildung 48 zeigt zwei Beispiele aus der Abbruchlängenbestimmung mithilfe des Skripts. Links ist eine große Abbruchlänge mit geringer Tropfenbildung zu sehen, rechts ist eine kurze Abbruchlänge mit hoher Tropfenbildung und geringen Tropfendurchmessern zu sehen.

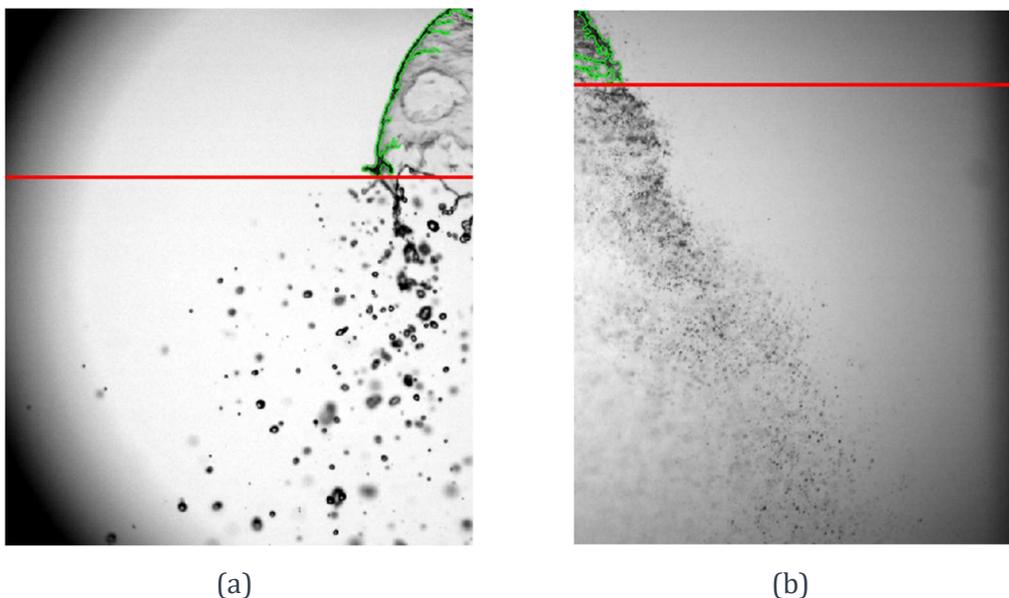


Abbildung 48: Automatisierte Bestimmung der Abbruchlänge mit einem Pythonskript, (a): geringer Druckverlust mit großer Abbruchlänge, (b): hoher Druckverlust mit kurzer Abbruchlänge

Die ermittelten Werte für Sprühwinkel und Abbruchlänge werden in das Auswerte-Skript eingelesen. Aus den gemittelten Prüfstandsdaten und Abbruchlängen, den errechneten Strömungsgrößen sowie den Sprühwinkeln ergibt sich abschließend eine Matrix für die

geführte Versuchsreihe. Auf Basis dessen können die gewünschten Diagramme zur abschließenden Auswertung erstellt werden.

8.3 Validierung der Versprühkammer

Vor Beginn der Versuchsreihe soll die Versprühkammer in Bezug auf den ausgelegten Druckanstieg während eines Versuchs sowie den Einfluss der Kammer auf das Spray untersucht werden. Abbildung 49 zeigt die gemessenen Druckwerte eines Versuchs über die Versuchszeit. Eingestellt wurde ein Kammerdruck von 10 bar. Der höchste Druckverlust über den Injektor wurde auf 14 bar gesetzt. Daraus resultiert der höchste zu erwartende Massen- beziehungsweise Volumenstrom der Versuchsreihe. Aus dem Diagramm geht ein konstanter Kammerdruck über die gesamte Versuchszeit hervor. Einflüsse auf das Spray aufgrund von Umgebungsdruckänderungen während des Versuchs können damit ausgeschlossen werden.

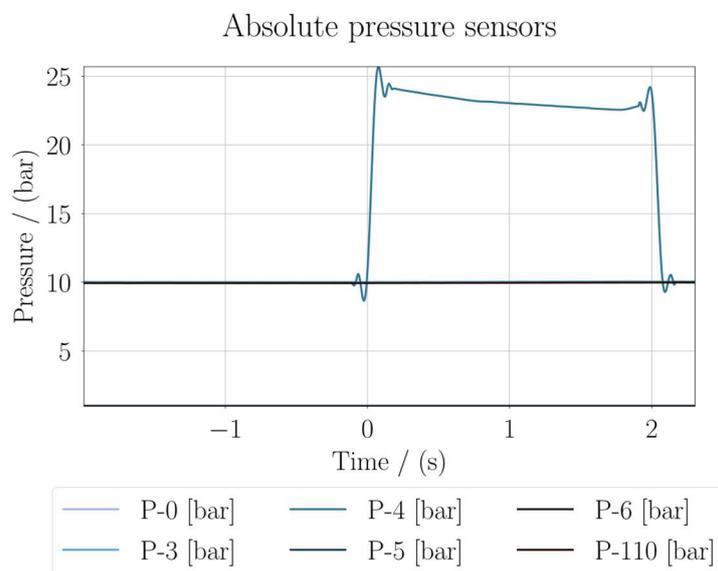
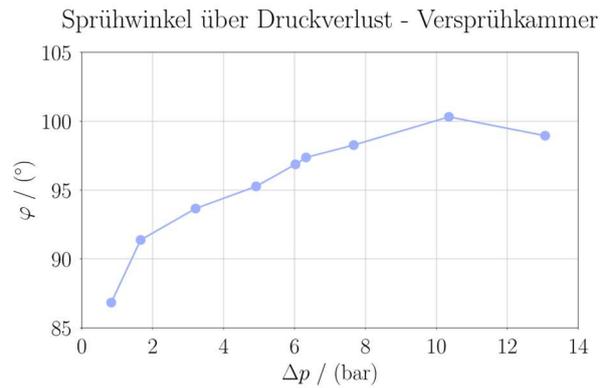
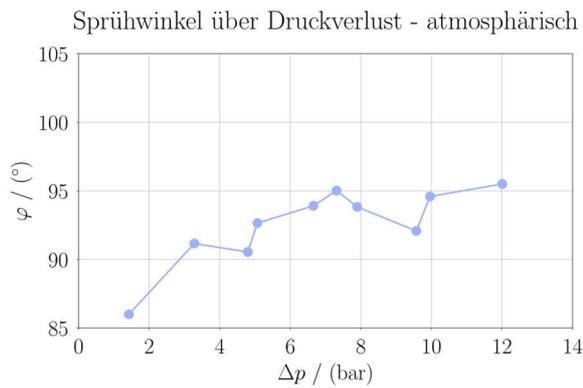


Abbildung 49: Umgebungsdruck und Druckverlust über die gesamte Versuchszeit

In Abbildung 50 sind die gemessenen Sprühwinkel von atmosphärischen Versuchen im Vergleich zu Versuchen in der Versprühkammer mit atmosphärischem Umgebungsdruck dargestellt. Beide Messungen bewegen sich auf ähnlichem Niveau. Abweichungen von $\pm 3^\circ$ sind auf die Messungenauigkeit zurückzuführen. Ein Einfluss der Kammer auf den Sprühwinkel ist nicht zu erkennen.

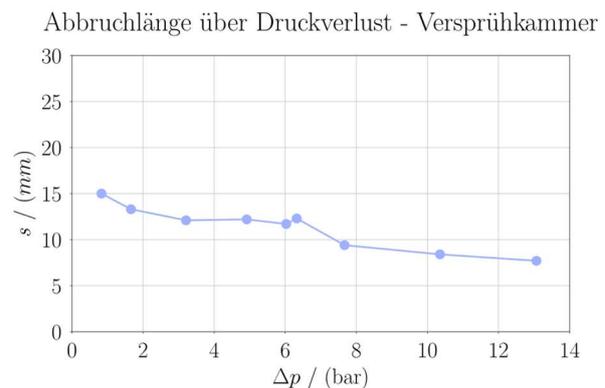
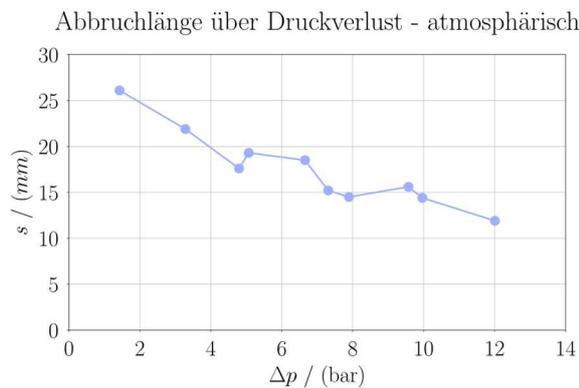


(a)

(b)

Abbildung 50: Vergleich der Sprühwinkel bei verschiedenen Druckverlusten zwischen atmosphärischen Versuchen und Versuchen in der Versprühkammer bei 1 bar, (a): atmosphärische Versuche, (b): Versuch in der Versprühkammer

Zusätzlich sind die gemessenen Abbruchlängen in Abbildung 51 dargestellt. Zwischen atmosphärischen Versuchen und Versuchen in der Versprühkammer sind deutliche Unterschiede trotz gleichem Umgebungsdruck zu erkennen. Für Versuche bei atmosphärischen Bedingungen wurden deutlich längere Abbruchlängen gemessen als bei Versuchen in der Versprühkammer. Bei einem Druckverlust von 2 bar liegt die atmosphärisch gemessene Abbruchlänge bei 22 mm im Vergleich zu 13 mm in der Kammer. Besonders stark ausgeprägt ist die Differenz bei niedrigen Druckverlusten von 1 bar bis 7 bar.



(a)

(b)

Abbildung 51: Vergleich der Abbruchlängen bei verschiedenen Druckverlusten zwischen atmosphärischen Versuchen und Versuchen in der Versprühkammer bei 1 bar, (a): atmosphärische Versuche, (b): Versuch in der Versprühkammer

In Abbildung 52 ist der direkte Vergleich des Sprühbilds bei einem Druckverlust von etwa 1,5 bar dargestellt. Der Unterschied in der Abbruchlänge ist auch rein optisch ohne Softwareauswertung zu erkennen. Dennoch sind Messfehler in der Software möglich. Die Abbruchzone für den atmosphärisch durchgeführten Versuch weist an jeder Stelle den in etwa gleichen vertikalen Abstand zur Injektoraustrittsfläche auf. Der Übergang von Flüssigkeitsfilm zu Tropfen findet auf einer Ebene statt. Beim Versuch in der Versprühkammer ist die Abbruchzone deutlich welliger ausgeprägt. Der Flüssigkeitsfilm reißt auf unterschiedlichen Ebenen ein. Als Grund für die großen Unterschiede in Abbruchlänge und Abbruchverhalten werden Wirbel in der Versprühkammer vermutet. Störungseinflüsse auf den Flüssigkeitsfilm rufen Instabilitäten hervor. Diese begünstigen die Wellenbildung sowie Schichtperforation und somit den Tropfenzerfall.

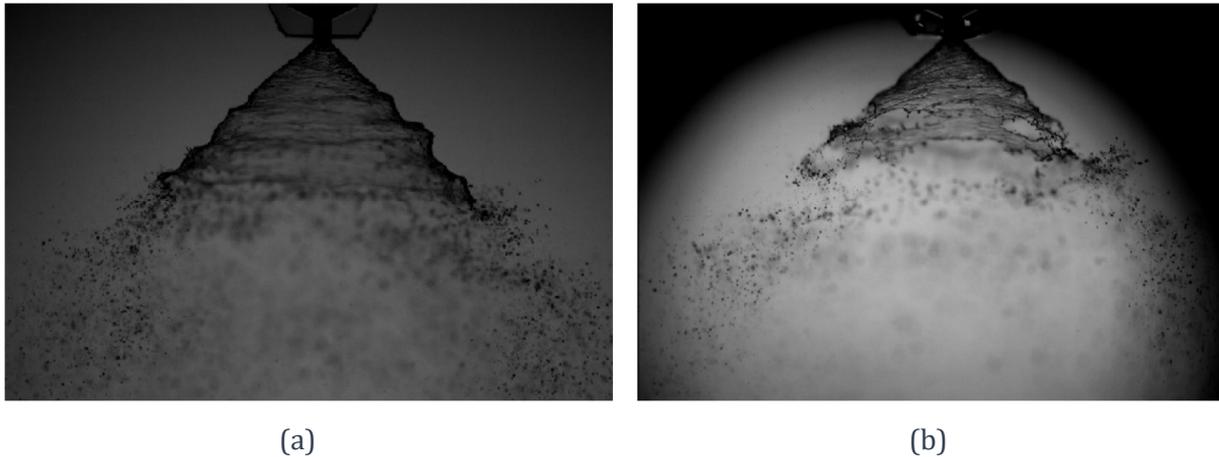


Abbildung 52: Vergleich der Abbruchlänge eines atmosphärischen Tests mit einem Test in der Versprühkammer bei etwa 1,5 bar Druckverlust und Umgebungsdruck von 1 bar, (a): atmosphärischer Versuch, (b): Versuch in der Versprühkammer

Die Validierungsversuchen zeigen, dass die Kammer Einfluss auf die Versuchsergebnisse nimmt. Ein direkter Vergleich mit atmosphärisch durchgeführten Versuchen ist daher nur bedingt sinnvoll. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass eine umliegende Geometrie um eines Injektors andere Bedingungen schafft. In einer Brennkammer ist der Injektor ebenfalls von einer Kammer eingeschlossen. Präzisere Ergebnisse könnten mit einer durchsichtigen Röhre innerhalb der Kammer um den Injektor erzielt werden. Weitere Messungen zur Reproduzierbarkeit könnten weitere Erkenntnisse hervorbringen.

8.4 Versuchsauswertung

In der Versprühkammer wurden Tests bei verschiedenen Umgebungsdrücken durchgeführt. Verwendet wurde dabei der zuvor ausgelegte Injektor (Kapitel 7). Die Druckverluste über den Injektor lagen dabei zwischen 1 bar und 14 bar, die Kammerdrücke lagen zwischen 1 bar und 22 bar. Als Versprühmedium wurde destilliertes Wasser eingesetzt. Als Umgebungsgas wurde Stickstoff eingesetzt.

8.4.1 Düsenaustrittskoeffizient

Die berechneten Düsenaustrittskoeffizienten sind in Abbildung 53 zu sehen. Diese liegt bei allen Umgebungsdrücken in einem vergleichbaren Bereich und innerhalb der Messtoleranz. Zu erkennen ist ein charakteristischer Abfall des C_D -Werts für Druckverluste im Bereich von 1 bar bis 5 bar bei allen Umgebungsdrücken. Die in [14] beschriebenen sinkenden C_D -Werte für steigende Kammerdrücke konnten nicht bestätigt werden. Die Wissenschaftler beobachteten zudem steigende C_D -Werte für steigenden Druckverlust, was im Vergleich zu den Ergebnissen der Arbeit dem umgekehrten Verhalten entspricht. Chen et al. [14] nutzten einen Open-End-Drall-Injektor mit im Gegensatz zu dem in der Arbeit eingesetzten Closed-End-Drall-Injektor. Beim Open-End-Typ entspricht der Drallkammerdurchmesser dem Düsendurchmesser. Möglicherweise wirkt sich Umgebungsdruck hierbei unterschiedlich aus. Die C_D -Charakteristik eines Injektors für steigende Druckverluste könnte von der jeweiligen Geometrie abhängig sein.

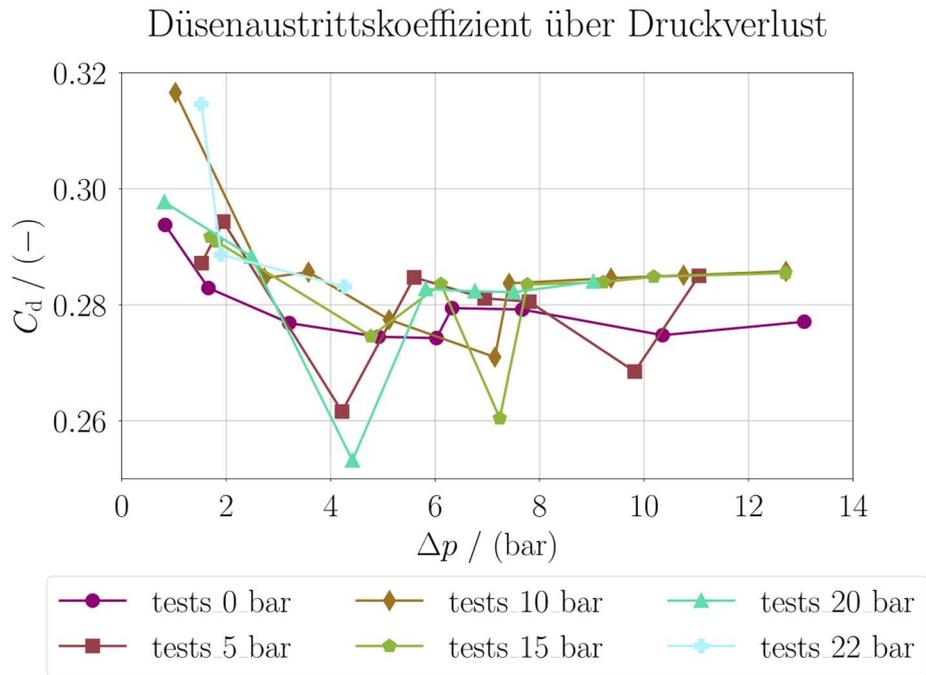


Abbildung 53: Düsenaustrittskoeffizient über Druckverlust für verschiedene Umgebungsdrücke

Das Diagramm der Massenströme in Abbildung 54 zeigt ein einheitliches Bild. Die Abhängigkeit zwischen Druckverlust und Massenstrom ist über alle getesteten Umgebungsdrücke hinweg identisch, was auch durch den annähernd konstanten Düsenaustrittskoeffizienten bestätigt wird.

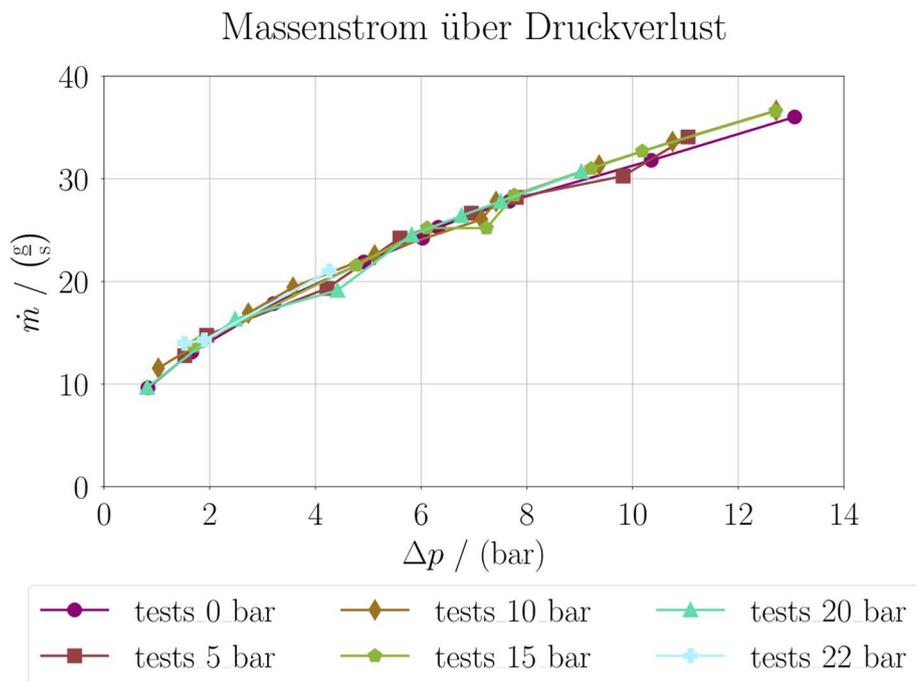


Abbildung 54: Massenstrom und Düsenaustrittsgeschwindigkeit über Druckverlust für verschiedene Umgebungsdrücke

8.4.2 Sprühwinkel

Grundlegend lässt sich erkennen, dass das Spray bei atmosphärischen Bedingungen die Form eines Hohlkegels annimmt. Dieser Hohlkegel verändert sich mit zunehmendem Umgebungsdruck hin zu einem glockenförmigen Sprühbild. Die Sprühweite, also der Durchmesser der breitesten Stelle des Sprays, wurde damit kleiner. In Abbildung 55 sind die Sprühbilder bei verschiedenen Umgebungsdrücken und Druckverlusten dargestellt. Hierbei handelt es sich um Einzelbilder aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen von Chen et al. [14]. Das Zusammenziehen des Sprays wurde in [14] und [15] mit einer Rezirkulationszone innerhalb des Sprays erklärt. Dieses Phänomen konnte bei den durchgeführten Tests ebenfalls festgestellt werden. Mit zunehmendem Umgebungsdruck sinkt der Druck in der Rezirkulationszone. Infolge der Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenseite zieht sich das Spray zusammen.

Zu erkennen ist, dass die Bilder mit zunehmendem Umgebungsdruck dunkler werden. Da die Fläche des Flüssigkeitsfilms mit zunehmendem Umgebungsdruck sank, stieg die Anzahl der rein optisch sichtbaren Tröpfchen in der Sprayregion deutlich an. Während der Versuche konnten folglich deutlich feinere Tröpfchen und ein deutlich dichteres Sprühbild beobachtet werden.

Druckverlust	1 bar	2 bar	4 bar	6 bar	7 bar	8 bar	10 bar	12 bar	14 bar
Kammerdruck									
1 bar									
5 bar									
10 bar									
15 bar									
20 bar									
22 bar									

Abbildung 55: Sprühbilder bei verschiedenen Umgebungsdrücken und Druckverlusten

In Abbildung 56 sind die Messwerte der Sprühwinkel in Abhängigkeit des Druckverlusts aufgetragen. Für Umgebungsdrücke von 1 bar, 5 bar und 10 bar konnten mit steigendem Umgebungsdruck sinkende Sprühwinkel beobachtet werden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Literaturaussagen nach [12] und [14]. Für einen Umgebungsdruck von 15 bar stiegen die gemessenen Sprühwinkel deutlich über den der Ausgangswerte von 1 bar. Bei 20 bar und 22 bar sanken die Sprühwinkel auf das Niveau von 1 bar ab. Dieses Verhalten weicht von der Literatur ab. Beschrieben werden sinkende Winkel über alle Druckbereiche hinweg. Chen und Yang [15] beschreiben in ihrer Arbeit die Form des Sprays anhand verschiedener Koordinatenpunkte unterhalb des Injektors.

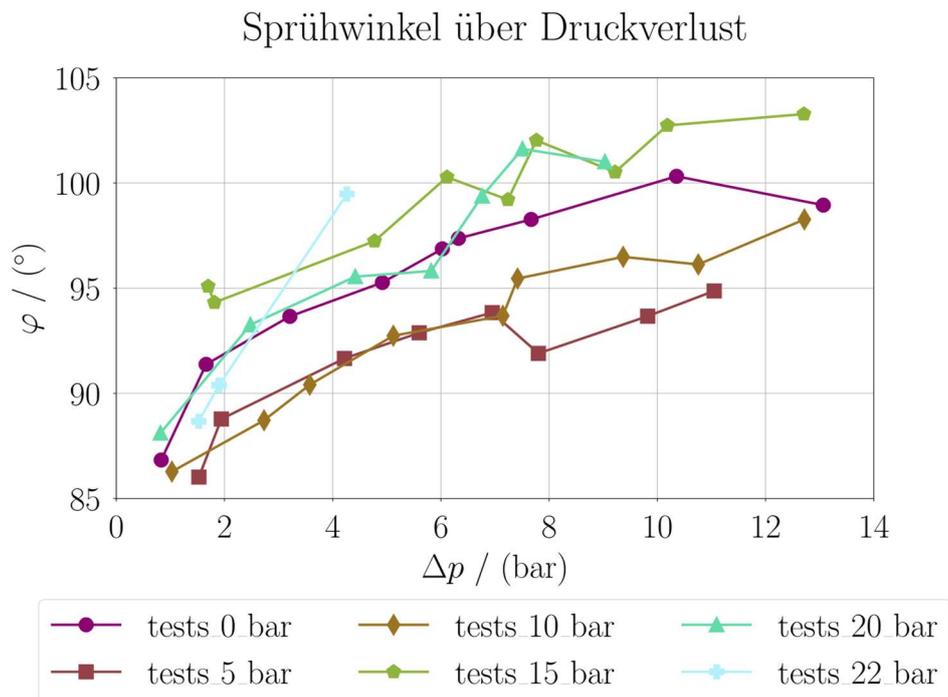


Abbildung 56: Sprühwinkel über Druckverlust für verschiedene Umgebungsdrücke

In Abbildung 57 sind zwei Spraykonturen eines Drall-Injektors bei unterschiedlichen Umgebungsdrücken abgebildet. Daraus geht hervor, dass der Betrag des Sprühwinkels abhängig vom betrachteten Bereich des Sprays ist. Nahe am Injektorausstritt ist ein größerer Winkel für einen Umgebungsdruck von 48,3 bar im Vergleich zu 1 bar zu erkennen. Wird der Winkel der Kontur weiter unten betrachtet, so ist ein kleinerer Sprühwinkel für hohen Druck im Vergleich zu niedrigem Druck erkennbar. Da Chen und Yang [15] dieses Phänomen lediglich für die beiden genannten Umgebungsdrücke beschreiben, ist das Verhalten der Kontur in dazwischen liegenden Druckbereichen unklar.

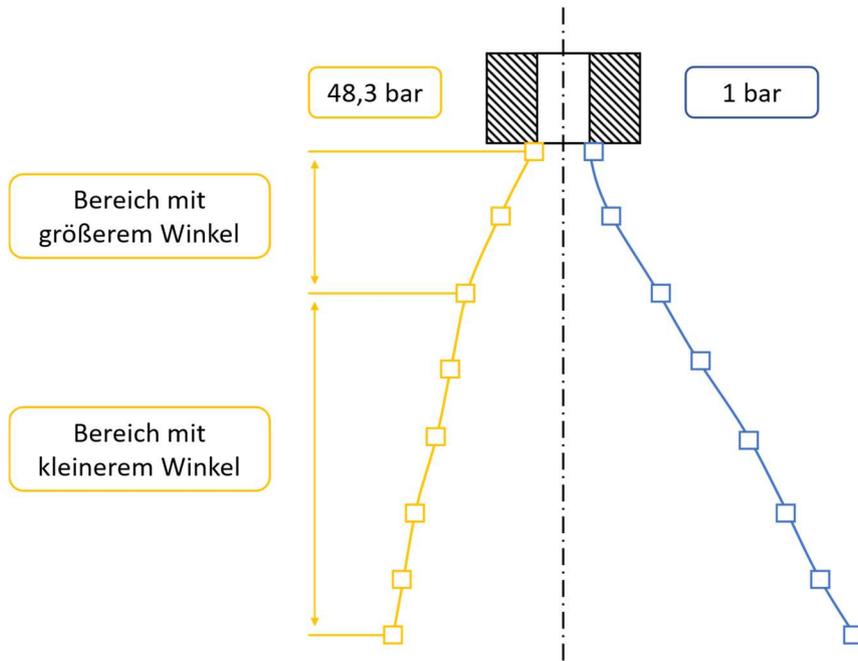


Abbildung 57: Schematische Darstellung der Spraykontur bei zwei verschiedenen Umgebungsdrücken nach [15]

8.4.3 Abbruchlänge

Grundsätzlich sank die Abbruchlänge für alle durchgeführten Versuche mit steigendem Druckverlust sowie steigendem Umgebungsdruck. In Abbildung 58 sind die gemessenen Werte in Abhängigkeit des Druckverlustes dargestellt. Zurückgeführt wird dieses Ergebnis auf die höheren auf das Spray wirkenden aerodynamischen Kräfte infolge der höheren Gasdichte bei höherem Umgebungsdruck. Instabilitäten nach Kelvin-Helmholtz werden dadurch verstärkt [10]. Auch für steigenden Druckverlust wurden sinkende Abbruchlängen beobachtet. Dies kann auf zwei Aspekte zurückgeführt werden: 1) Steigt der Druckverlust, so steigt die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Injektor. Das führt zu höher resultierenden Kräften auf das Spray und verstärkt die Instabilitäten. 2) Mit steigendem Druckverlust sinkt die Filmdicke des Flüssigkeitsfilms infolge der höheren Drall-Intensität. Da ein höherer Druckverlust beide Aspekte begünstigt, sinkt die Abbruchlänge [14]. Für Versuche bei atmosphärischem Umgebungsdruck von 1 bar konnte bis zum maximalen Druckverlust von 14 bar ein Flüssigkeitsfilm festgestellt werden. Eine vollständige Zerstäubung wurde bei diesem Umgebungsdruck somit nicht erreicht. Steigender Umgebungsdruck sowie steigender Druckverlust begünstigten das Zerstäubungsverhalten. Vollständige Zerstäubung konnte erstmals ab einem Umgebungsdruck von 5 bar und einem Druckverlust von 7,5 bar erreicht werden. Ein weiter steigender Umgebungsdruck setzte den notwendigen Druckverlust für vollständige Zerstäubung herab.

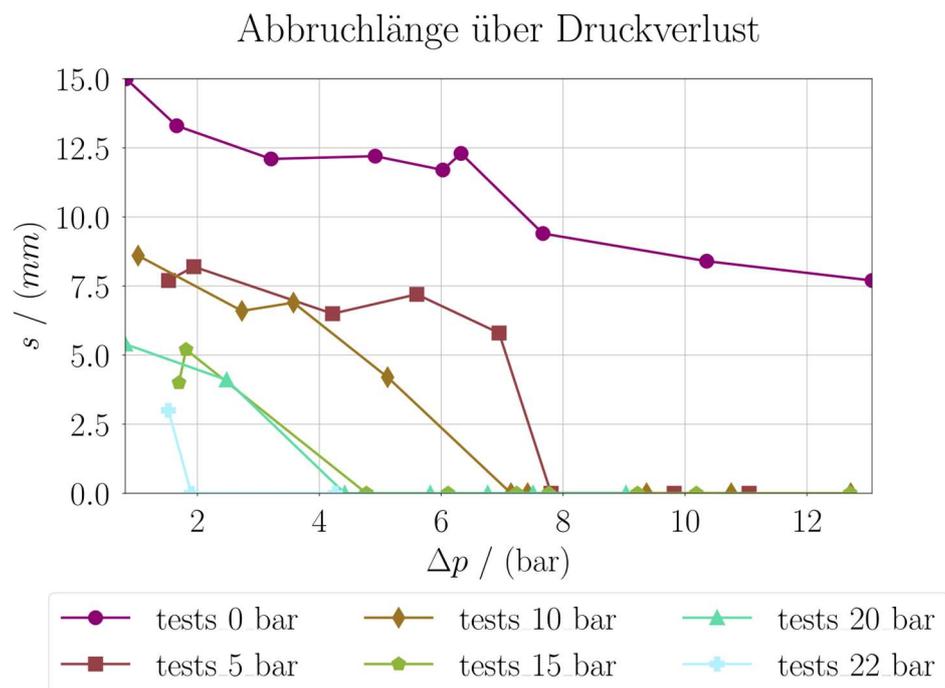


Abbildung 58: Abbruchlänge über Druckverlust bei verschiedenen Umgebungsdrücken

9 Reflektion der Versuchsergebnisse

Sowohl bei der Injektorauslegung als auch der Validierung der Versprühkammer wurden Abweichungen zwischen erwarteten und gemessenen Ergebnissen festgestellt. Der eingesetzte Injektor wurde ursprünglich für drei Einlasskanäle ausgelegt. Für die theoretische Einlassfläche

$$A_{theoretisch} = 3\pi r_{in}^2 \quad (9.1)$$

mit einem Einlasskanaldurchmesser von jeweils 1 mm resultiert daraus eine Gesamteinlassfläche von 2,36 mm². Der angezielte Massenstrom von 30 g/s bei einem Druckverlust von 7 bar wurde mit dem im Vergleich zur Auslegung angepassten Injektor erreicht. Die Einlassfläche wurde durch einen vierten Einlasskanal mit gleichem Durchmesser von 1 mm vergrößert. Geht man davon aus, dass hierbei die theoretisch berechnete Einlassfläche erreicht wurde, ergibt sich ein realer Einlasskanaldurchmesser von 0,87 mm. Der Durchmesser ist damit 0,13 mm kleiner als der Auslegungsdurchmesser, die Fläche damit 25% kleiner, was in etwa der Abweichung des Massenstroms entspricht. Das deckt sich mit den händisch gemessenen Abweichungen im Bereich von -0,1 mm bis -0,2 mm. Als Ursache für die Abweichung wird der Aushärteprozess unter Einfluss von Wärme und UV-Strahlung vermutet. Im SLA-Druckverfahren gefertigte Bauteile können hierbei in ihrer Größe schrumpfen [42]. Der Sprühwinkel liegt mit etwa 96° ebenfalls unterhalb des Auslegungswertes mit 120°. Die genannten Toleranzen können ebenfalls Einfluss auf die Düsengeometrie nehmen, was zu einem abweichenden resultierenden Sprühwinkel führt. Zudem wurde nach Druck- und Aushärteprozess eine leicht konvexe Unterseite des Injektors festgestellt. Zu den genannten geometrischen Toleranzen haben somit auch Form- und Lagetoleranzen Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Denkbar sind somit beispielsweise auch geneigte Einlasskanäle oder eine geneigte Düse.

Beim Vergleich der Sprühbilder zwischen atmosphärischem Versuch und Versuch in der Versprühkammer wurden große Differenzen in den Abbruchlängen festgestellt. Die Fläche des Flüssigkeitsfilms von Sprays innerhalb der Kammer war im direkten Vergleich kleiner, die Abbruchlänge kürzer. In Abbildung 59 ist der Randbereich des Sprays eines Versuchs bei 1 bar Umgebungsdruck vergrößert dargestellt. Orange umrandet sind Tröpfchen, welche sich in der Videoaufnahme von oben nach unten bewegen. Vermutet werden großflächige Wirbel in der Kammer, ähnlich wie in Abbildung 60, welche die Instabilitäten und das Abbruchverhalten des Flüssigkeitsfilms begünstigen. Um diese Wirbel zu reduzieren ist der Einsatz eines Strömungsgleichrichters denkbar. Möglich wäre ein wabenförmiges Gitter unterhalb des Injektors.

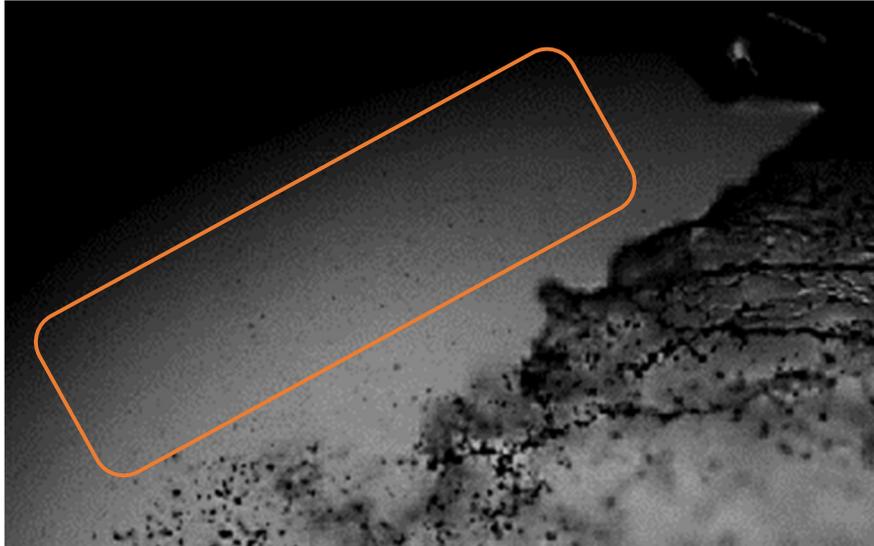


Abbildung 59: Versuch in der Versprühkammer bei 1 bar Kammerdruck - Rückströmende Tropfen

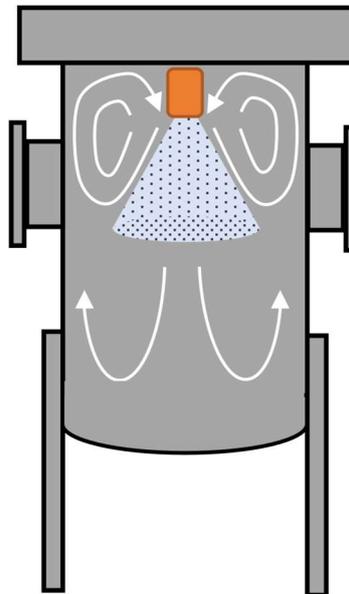


Abbildung 60: Schematische Darstellung der angenommenen Wirbelbildung in der Versprühkammer

Aus den durchgeführten Versuchen in der Versprühkammer gehen weiterhin Optionen zur Optimierung und Erweiterung der Kammer hervor. In Abbildung 61 ist der Tröpfchenbeschlag an den Scheiben nach Versuchsdurchführung zu sehen. Feinste Tröpfchen reichten bereits aus, um den Laser des Tropfengrößenmessgeräts drastisch aufzuweiten. Messungen waren somit nicht möglich. Künftig könnte hier ein Spülsystem integriert werden. Dieses könnte beispielsweise über innenliegende Leitungen durch den Deckel oder über zusätzliche Einsatzplatten direkt an den Scheibenflanschen realisiert werden. Die Spülung soll mithilfe einer Luft- oder Stickstoffschicht klare Sicht ermöglichen und ein Absetzen der Tropfen verhindern.



Abbildung 61: Tröpfchen an den Scheiben nach den Versprühversuchen

10 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurden Grundlagen für weitere Untersuchungen in der Zukunft geschaffen. Wesentlicher Forschungsbestandteil der Abteilung SOA ist die Untersuchung des Sprühverhaltens hochviskoser Treibstoffe. Angeknüpft werden an diese Arbeit kann in der Zukunft mit Versuchen können in der Versprühkammer unter Einsatz von Wasser-Glycerin-Mischungen. Das Verhalten hochviskoser Fluide bei Umgebungsdruck bringt weitere Erkenntnisse zur Treibstoffaufbereitung in einer Brennkammer. Neben den untersuchten Drall-Injektoren sind weiterhin die genannten Typen wie Strahl- oder Pintle-Injektoren möglich. Hierbei kann zusätzlich das Misch- und Zerstäubungsverhalten zweier Fluide bei Umgebungsdruck erforscht werden. Auch Einsätze, welche die Brennkammergeometrie um den Injektor abbilden, können eingesetzt werden. In diesem Zuge können gewonnene Erkenntnisse auf Heißgasversuche übertragen und Messdaten abgeglichen werden. Satellittriebwerke zünden im All im Vakuum. Weitere Versuchsfelder sind folglich Versprühversuche im Vakuum. Dieser Themenbereich wurde in der Auslegung der Kammer bereits berücksichtigt. Zusätzliche Anschlüsse für beispielsweise eine Vakuumpumpe sind in der Kammer integriert. Die optische Zugänglichkeit der Versprühkammer ermöglicht zudem Untersuchen des Strömungsverhalten im Inneren eines Drall-Injektors. Mit der Fertigung eines durchsichtigen Injektors wurden Möglichkeiten zur visuellen Untersuchung der Luftsäule im Inneren eines Drall-Injektors aufgezeigt. Untersucht werden können hierbei dessen Verhalten bei Vakuum oder Umgebungsdruck. Die Versprühkammer wurde weitergehend für erhöhte Temperaturen bis 150°C ausgelegt. Dies ermöglicht Sprayuntersuchungen bei variierenden Gas- und Fluideigenschaften.

11 Reflektion des Projektverlaufs

Zu Beginn dieser Arbeit wurde ein Projektplan mit einzelnen Projektphasen und Arbeitspaketen definiert. Dafür wurden entsprechende Zeiträume festgelegt, in denen die Arbeitspakete abgeschlossen werden sollen. Zudem wurde festgelegt, was zeitlich parallel oder nacheinander abgearbeitet wird. Der Verlauf der Arbeit soll rückblickend in Bezug auf den Projektplan reflektiert werden.

11.1 Phase 1

Der erste Abschnitt beinhaltete die Einarbeitung mit Literaturrecherche in das Themenfeld Raketen- und Satellitenantriebe. Zudem sollten organisatorische Dinge in der Abteilung und im Institut abgehandelt werden. In den ersten beiden Wochen ab KW 38 wurden planmäßig die Einführungen zum Standort, IT und Werkstatt absolviert. Die für die Arbeit notwendige Infrastruktur, dazugehörige Schlüssel, Ausweis, Computer und Softwareinstallationen, wurden in Betrieb genommen. Zum Thema Versprühkammer wurden Normen und Literatur zusammengestellt und gesichtet. Phase 1 konnte planmäßig nach den ersten beiden Wochen abgeschlossen werden.

11.2 Phase 2

In Phase 2 sollten erste Konzepte zur Umsetzung der Versprühkammer entwickelt werden. Zudem sollten erste Beispielversuche am Cold-Flow-Injektoren-Prüfstand weiteres Wissen zu Injektoren und Versprühung vermitteln. Diese Projektphase wurde planmäßig in KW 39 parallel zu Phase 1 eingeleitet. Eine vertiefende Literaturrecherche zum Thema Versprühung erweiterte das Verständnis physikalischer Zusammenhänge. Erste Auslegungsrechnungen und Cold-Flow-Versuche wurden in die Konzepterstellung einbezogen. Mit Erstellung einer Anforderungsliste wurden Vorgaben für die Entwicklung definiert und dokumentiert. Phase 2 wurde planmäßig nach KW 40 abgeschlossen.

11.3 Phase 3

Für Projektabschnitt 3 wurden im Projektplan die Konstruktion, Zeichnungserstellung und das Exposé in der Abteilung vorgesehen. In KW 41 wurde erwartungsgemäß mit der konstruktiven Umsetzung in CAD begonnen. Hierfür wurden zeitgleich Angebote zu Halbzeugen bei möglichen Lieferanten eingeholt. Weiterhin wurde der Zeitplan mit angegebenen Lieferfristen abgeglichen. Mit den gesammelten Informationen fiel die Entscheidung für eine externe Fertigung. Hauptargumente waren die deutlich geringere Lieferzeit für das Gesamtsystem bei etwa gleichem Kostenrahmen. Zur Auslegung und Konstruktion wurde Feedback vom gewählten Lieferanten eingeholt. Die Konstruktion wurde entsprechend überarbeitet. Phase 3 konnte im vorgegebenen Zeitrahmen mit dem Exposé in der Abteilung sowie der Bestellung der Druckkammer absolviert werden.

11.4 Phase 4

Der Zeitplan für die ersten drei Phasen wurde sehr straff gestaltet, um etwas mehr Puffer für die Fertigung, Lieferzeit und Integration am Prüfstand zu schaffen. Dieser Plan konnte im zeitlich vorgesehenen Rahmen absolviert werden. Die Fertigung der Kammer konnte wie geplant in KW 44 mit Phase 4 begonnen werden. Da die Fertigung in vollem Umfang extern vergeben wurde, konnten in Phase 4 zusätzliche Themen in die Arbeit einbezogen werden. Der Bereich

Injektorauslegung wurde ergänzt. Parallel zur Lieferantenbetreuung wurden mehrere Drall-Injektoren ausgelegt, gefertigt und am Cold-Flow-Container bei atmosphärischen Bedingungen untersucht. Zusätzlich wurde der Cold-Flow-Prüfstand virtuell im CAD aufgebaut, um darin den Versuchsaufbau mit der Versprühkammer zu planen. Die Lieferung der Versprühkammer erfolgte frühzeitig in KW 49. Zum Zeitpunkt der Bestellung wurde eine Lieferzeit von 7 Wochen angegeben. Die tatsächliche Lieferzeit betrug 5,5 Wochen. Der Einbau der Versprühkammer wurde planmäßig in KW 51 vorgenommen. Zeitgleich wurden neue Versorgungs- und Sensorleitungen zur Integration der Versprühkammer gelegt. Phase 4 wurde abweichend vom Projektplan bis in KW 3 nach Neujahr verlängert. Diese Zeit wurde genutzt, um eine neue Benutzeroberfläche zur Prüfstandssteuerung und Messdatenspeicherung in Betrieb zu nehmen. Zudem wurde der Prüfstand im Zuge des Umbaus gewartet und kleinere Optimierungen am Aufbau vorgenommen.

11.5 Phase 5

Phase 5 reservierte einen Bereich von 6 Wochen ab KW 1 zur Inbetriebnahme der Versprühkammer, Durchführung aller geplanten Versuchsreihen sowie der Auswertung der Messdaten. Die geplanten Versuchsreihen mit dem Shadowgraph-Aufbau konnten vollumfänglich durchgeführt werden. Versuche mit dem Tropfengrößemessgerät schlugen zunächst fehl. Als Ursache für die Fehlfunktion wurde zunächst die Lichtdurchlässigkeit der Scheiben für den Laser vermutet. Als tatsächliche Fehlerquelle konnte Beschlag und Tröpfchenansammlung an den Scheiben identifiziert werden. Dieser weitete den Laser stark auf. Eine Messung war nicht mehr möglich. Aus zeitlichen Gründen für die benötigten Anpassungen an der Kammer wurde dieser Teil der Versuchsreihe gestrichen. Phase 5 wurde zudem genutzt, um grundlegende Kenntnisse in Python und der damit verbundenen Datenauswertung zu erlangen. Auf Basis bestehender Skripte wurden Anpassungen zur Winkel- und Abbruchlängenauswertung sowie zur Diagrammerstellung vorgenommen. Die Versuchsreihen wurden planmäßig durchgeführt, die Auswertung wurde abweichend vom Projektplan bis zum Abschluss der Arbeit verlängert. Parallel zur Dokumentation der Arbeit wurden wiederkehrend Messdaten analysiert und interpretiert.

11.6 Phase 6

Phase 6 beschreibt im Projektplan die Dokumentation der Arbeit. Dieser Abschnitt ist in zwei Teilbereiche untergliedert. Die Vordokumentation wurde bereits früh in den Arbeitsprozess integriert. Wie vorgesehen startet die Dokumentation mit der Definition einer Grobstruktur in KW 44. Zusätzlich wurden erste Erkenntnisse aus Literatur, Konzeptfindung und Konstruktion festgehalten. Der zweite Teil der Dokumentationsphase beschreibt die Ausarbeitung in vollem schriftlichem Umfang. Dieser Teil wurde eine Woche vor Zeitplan begonnen. Die vorliegende Bachelorthesis wurde planmäßig mit Beendigung der schriftlichen Dokumentation im März 2023 erfolgreich abgeschlossen.

Literaturverzeichnis

- [1] „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,“ [Online]. Available: <https://www.dlr.de/DE/organisation-dlr/das-dlr/dlr-im-ueberblick.html>. [Zugriff am 15 11 2022].
- [2] „Deutsches zenteum für Luft- und Raumfahrt,“ [Online]. Available: <https://www.dlr.de/content/de/artikel/standorte/lampoldshausen/ueber-lampoldshausen.html>. [Zugriff am 29 11 2022].
- [3] „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,“ [Online]. Available: <https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-17324/#gallery/36802>. [Zugriff am 27 12 2022].
- [4] F. L. Michele Negri, *Hot Firing Tests of a Novel Green Hypergolic Propellant in a Truster*, 2022.
- [5] O. B. George P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements*, Hoboken: Wiley, 2017.
- [6] „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,“ [Online]. Available: https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-18053/28666_read-74472/. [Zugriff am 27 12 2022].
- [7] G. Schmidt, *Technik der Flüssigkeits-Raketentriebwerke*, Taufkirchen: Daimler Chrysler Aerospace, 1999.
- [8] V. Bazarov, *Design and Dynamics of Jet and Swirl Injectors*, Moskau: the American Institute of Aeronautics and, 2004.
- [9] K. R. J. K. O. C. K. H. D. K. Min Son, *Design Procedure of a Movable Pintle Injector for Liquid Rocket Engines*, 2016.
- [10] N. Ashgriz, *Handbook of Atomization and Sprays - Theory and Applications*, Toronto: Springer, 2011.
- [11] D.-I. A. D. Sängler, *Zerstäubung hochviskoser Fluide bei variierendem Systemdruck - Grundlagenforschung zur Hochdruck-Flugstromvergasung*, Karlsruhe, 2018.
- [12] *Spray Characteristics of Impinging Jet Injectors at High Back-Pressure*, Edwards AFB CA: Air Force Research Laboratory, 2000.
- [13] A. Z. Rani Hanna, *Atomization of high viscosity liquids through hydraulic atomizers*, Palaiseau, 2017.
- [14] Y. Y. S.-h. Y. H.-l. G. Chen Chen, *The spray characteristics of an open-end swirl injector at ambient*, Chengdu, 2017.
- [15] V. Y. Xiaodong Chen, *Effect of ambient pressure on liquid swirl injector flow dynamics*, Atlanta: AIP Publishing, 2014.

- [16] J. Scholl, *Untersuchungen zum Zündverzug von hypergolen grünen Treibstoffen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen*, Stuttgart, 2020.
- [17] *Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion; Deutsche Fassung EN 13445-3*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021.
- [18] *Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 1: Allgemeines; Deutsche Fassung EN 13445-1*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2021.
- [19] „Siemens,“ [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/b1/Catalog/Products/10294892>. [Zugriff am 26 03 2023].
- [20] E. J. G. & C. K. *EU-Konformitätserklärung nach Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU für ein Druckgerät*, Wassenberg, 2022.
- [21] „Kunststoffrohrverband e.V.,“ [Online]. Available: <https://www.krv.de/artikel/kesselformel-kessel-formel-bockwurst-formel>. [Zugriff am 26 03 2023].
- [22] *DIN EN ISO 1127 - Nichtrostende Stähle - Maße, Grenzabmaße und längenbezogene Masse*, 2019.
- [23] *DIN 28011 - Gewölbte Böden - Klöpperform*, 2012.
- [24] K. N. Siegfried Ripperger, *Entwicklung und Planung Verfahrenstechnischer Anlagen*, Springer Vieweg, 2020.
- [25] E. J. G. & C. KG, *Wissenschaftliches Gespräch*, 2023.
- [26] „heco GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.heco.de/>. [Zugriff am 28 03 2023].
- [27] „Rehm Dichtungen Ehlers GmbH,“ [Online]. Available: <https://rehmdichtungen.de/werkstoffe-und-materialien/elastomerdichtungen/epdm-dichtungen>. [Zugriff am 31 01 2023].
- [28] k. & C. GmbH, *Flachdichtungen im Rohrleitungs- und Apparatebau*, Oberhausen.
- [29] A. Schweizer, „Formelsammlung und Berechnungsprogramme Maschinen- und Anlagenbau,“ [Online]. Available: <https://www.schweizer-fn.de/index.php>. [Zugriff am 26 03 2023].
- [30] C. S. D. J. Herbert Wittel, *Roloff/Matek Maschinenelemente*, Springer Vieweg, 2021.
- [31] Würth, *Datenblatt - Festigkeitseinteilung von Edelstahlschrauben*.
- [32] „Imetra, Inc.,“ [Online]. Available: <https://www.imetra.com/borosilicate-glass-material-properties/>. [Zugriff am 27 03 2023].
- [33] „VDI Verlag GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/werkstoffe/glasbauteil-brichtschlagartig/>. [Zugriff am 27 03 2023].

- [34] C. LTD, *The Design of Pressure Windows*, 2014.
- [35] „Rheonik Messtechnik GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.rheonik.com/products/coriolis-sensor/rhm-03/>. [Zugriff am 17 03 2023].
- [36] „Rheonik Messtechnik GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.rheonik.com/products/coriolis-sensor/rhm-02/>. [Zugriff am 17 03 2023].
- [37] *Sensor Technik Sirnach AG - Kalibrierungsdatenblatt Drucksensoren*, 2021.
- [38] „TC Mess- und Regeltechnik GmbH,“ [Online]. Available: <https://www.tcgbh.de/thermoelemente/typ-k-thermoelemente.html>. [Zugriff am 17 03 2023].
- [39] G. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques - Visualizing Phenomena in Transparent Media*, Springer, 2001.
- [40] G. S. S. Michael J. Hargather, *Retroreflective shadowgraph technique for large-scale flow visualization*, 2009.
- [41] A. Müller, *Python Ananlytics Tool for Swirl Injectors - Breakup Length*, Heilbronn, 2023.
- [42] Xometry Europe GmbH, [Online]. Available: <https://xometry.eu/de/toleranzen-im-3d-druck/>. [Zugriff am 25 03 2023].
- [43] A. I. GmbH, *Durchlässigkeit für verschiedene Wellenlängen von Borosilikatglas - Datenblatt*.
- [44] *Spraytec User Manual*, Worcestershire: Malvern Instruments Ltd., 2006.
- [45] [Online]. Available: <https://www.slawinski.de/produkte/kloeppeboeden/>. [Zugriff am 02 01 2023].
- [46] D.-I. A. D. Sängler, *Zerstäubung hochviskoser Fluide bei variierendem Systemdruck*, Niederhof, 2018.
- [47] „CORTEch AG,“ [Online]. Available: <https://www.cortechag.ch/Statische-Dichtungen/Elastomer-Dichtungen.htm>. [Zugriff am 07 02 2023].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Brennkammer mit Düse nach [5].....	13
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Satellittriebwerksystems nach [5]	14
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Koaxial-Drall-Injektor (Typ Open-End) nach [5] .	16
Abbildung 4: schematische Darstellung eines 2-auf-1 Prall-Injektor nach [5]	17
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Pintle-Injektors nach [9].....	18
Abbildung 6: Plateau-Rayleigh-Instabilität mit Haupt- und Satellitentropfen.....	20
Abbildung 7: Verschiedene Sprayregime und Instabilitäten eines Drall-Injektors, (a): Strahl, (b): Plateau-Rayleigh-Instabilität, Rayleigh-Taylor-Instabilität, (c): Aufbau eines Flüssigkeitsfilms, (d): Zwiebel-Regime, (e): Tulpen-Regime, (f): ausgebildeter Sprühkegel mit Flüssigkeitsfilm, Kelvin-Helmholtz-Instabilität.....	21
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Kelvin- Helmholtz-Instabilität hervorgerufen durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten nach [10]	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Rayleigh-Taylor-Instabilität nach [10]	22
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Stromlinien im Inneren eines Sprühkegels und dessen Formveränderung bei steigendem Umgebungsdruck nach [15], (a): Atmosphärischer Druck/Referenzdruck, (b): Mittlerer umgebungsdruck, (c): Hoher Umgebungsdruck.....	24
Abbildung 11: Injektionsvorgang mit Zündung eines hypergolten Treibstoffs in einer optisch zugänglichen Brennkammer (mit freundlicher Genehmigung aus [16]), (a): t = -10 ms, (b): t = -5,3 ms, (c): t = 0 ms, (d): t = 5,8 ms.....	32
Abbildung 12: Morphologischer Kasten zur Konzeptfindung der Versprühkammer	35
Abbildung 13: Konzept 1 - CAD-Schnittzeichnung.....	36
Abbildung 14: Konzept 3 - CAD-Schnittzeichnung.....	37
Abbildung 15: Konzept 3 - Bild der bestehenden Versprühkammer	38
Abbildung 16: Dominanzmatrix zur Gewichtung der Parameter	39
Abbildung 17: Bewertungsmatrix zur Bewertung der Konzepte	40
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Versprühkammer.....	41
Abbildung 19: Diagramm zur Einstufung der Gefahrenklasse eines druck-beaufschlagten Behälters nach Druckgeräterichtlinie (2014/68/EU) [19]	43
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Umfangsspannung in der Mantelfläche infolge von Innendruck nach [21].....	44
Abbildung 21: Schematische Darstellung des Sprühkegels zur Auswahl des Kammerdurchmessers.....	45
Abbildung 22: Klöpperboden Geometriebezeichnungen DIN 28011 nach [24].....	46
Abbildung 23: Schematische Schnittzeichnung - Glatter Flansch und V-Flansch im Vergleich nach [26], (a): glatter Flansch, (b): V-Flansch.....	49
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Dichtung und der von einer Schraube zu dichtenden Fläche.....	50
Abbildung 25: Vorversuche zur Scheibengröße	53
Abbildung 26: Finales CAD-Modell und Bild der gefertigten Versprühkammer, (a): CAD-Modell, (b): gefertigte Kammer	59
Abbildung 27: CAD-Modell des Ausgangszustands des Cold-Flow-Prüfstands zu Beginn der Arbeit	61
Abbildung 28: Fluidplan im Ausgangszustand des Cold-Flow-Prüfstands für atmosphärische Tests	62
Abbildung 29: Graphische Bedienoberfläche des Cold-Flow-Prüfstands.....	63
Abbildung 30: CAD-Modell des Prüfstands mit Versprühkammer	64
Abbildung 31: Cold-Flow-Prüfstand mit atmosphärischem Aufbau links und Versprühkammer rechts.....	65

Abbildung 32: Schematischer Fluidplan des Cold-Flow-Prüfstands für Versuche in der Versprühkammer	66
Abbildung 33: Schematischer Shadowgraph-Aufbau nach [40].....	67
Abbildung 34: Angaben zur Injektorauslegung.....	68
Abbildung 35: Schnittzeichnung eines Drall-Injektors	69
Abbildung 36: CAD-Modelle der Injektoren nach Bazarov für Cold-Flow-Versuche, (a): Injektor nach Verfahren 1, (b): Injektor nach Verfahren 2	72
Abbildung 37: Massenstrom über Druckverlust der beiden Auslegungsverfahren, (a): Verfahren 1, (b): Verfahren 2.....	73
Abbildung 38: Einzelbilder aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der beiden Auslegungsverfahren bei einem Druckverlust von knapp über 7 bar, (a): Injektor nach Verfahren 1, (b): Injektor nach Verfahren 2	74
Abbildung 39: Angepasstes Injektordesign nach Baz. S.71 mit zusätzlichem Einströmkanal.....	75
Abbildung 40: Massenstrom über Druckverlust des angepassten Injektordesigns.....	75
Abbildung 41: Einzelbild aus Hochgeschwindigkeitsaufnahme bei einem Druckverlust von 7 bar - angepasstes Injektordesign nach Baz. S.71 mit zusätzlichem Einströmkanal.....	76
Abbildung 42: Eingebauter Injektor in der Versprühkammer bei geöffnetem Deckel	77
Abbildung 43: Plot der Rohdaten von Druck- und Massenstrom-Messwerten	79
Abbildung 44: Plot der gefilterten Daten von Druck- und Massenstrom-Messwerten, (a): Plot der gefilterten Druckdaten, (b): Plot der gefilterten Massenstromdaten.....	79
Abbildung 45: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen mit Shadowgraph-Aufbau zur Bestimmung des Sprühwinkels, (a): Einzelbild, (b): überlagertes Bild für einen Zeitintervall von 50 ms	80
Abbildung 46: Darstellung zur Bestimmung des Sprühwinkels.....	80
Abbildung 47: Referenzbild zur Kalibrierung der Abbruchlänge.....	81
Abbildung 48: Automatisierte Bestimmung der Abbruchlänge mit einem Pythonskript, (a): geringer Druckverlust mit großer Abbruchlänge, (b): hoher Druckverlust mit kurzer Abbruchlänge.....	81
Abbildung 49: Umgebungsdruck und Druckverlust über die gesamte Versuchsdauer.....	82
Abbildung 50: Vergleich der Sprühwinkel bei verschiedenen Druckverlusten zwischen atmosphärischen Versuchen und Versuchen in der Versprühkammer bei 1 bar, (a): atmosphärische Versuche, (b): Versuch in der Versprühkammer	83
Abbildung 51: Vergleich der Abbruchlängen bei verschiedenen Druckverlusten zwischen atmosphärischen Versuchen und Versuchen in der Versprühkammer bei 1 bar, (a): atmosphärische Versuche, (b): Versuch in der Versprühkammer	83
Abbildung 52: Vergleich der Abbruchlänge eines atmosphärischen Tests mit einem Test in der Versprühkammer bei etwa 1,5 bar Druckverlust und Umgebungsdruck von 1 bar, (a): atmosphärischer Versuch, (b): Versuch in der Versprühkammer	84
Abbildung 53: Düsenaustrittskoeffizient über Druckverlust für verschiedene Umgebungsdrücke	85
Abbildung 54: Massenstrom und Düsenaustrittsgeschwindigkeit über Druckverlust für verschiedene Umgebungsdrücke	85
Abbildung 55: Sprühbilder bei verschiedenen Umgebungsdrücken und Druckverlusten	86
Abbildung 56: Sprühwinkel über Druckverlust für verschiedene Umgebungsdrücke.....	87
Abbildung 57: Schematische Darstellung der Spraykontur bei zwei verschiedenen Umgebungsdrücken nach [15]	88
Abbildung 58: Abbruchlänge über Druckverlust bei verschiedenen Umgebungsdrücken.....	89
Abbildung 59: Versuch in der Versprühkammer bei 1 bar Kammerdruck - Rückströmende Tropfen.....	91
Abbildung 60: Schematische Darstellung der angenommenen Wirbelbildung in der Versprühkammer	91
Abbildung 61: Tröpfchen an den Scheiben nach den Versprühversuchen	92

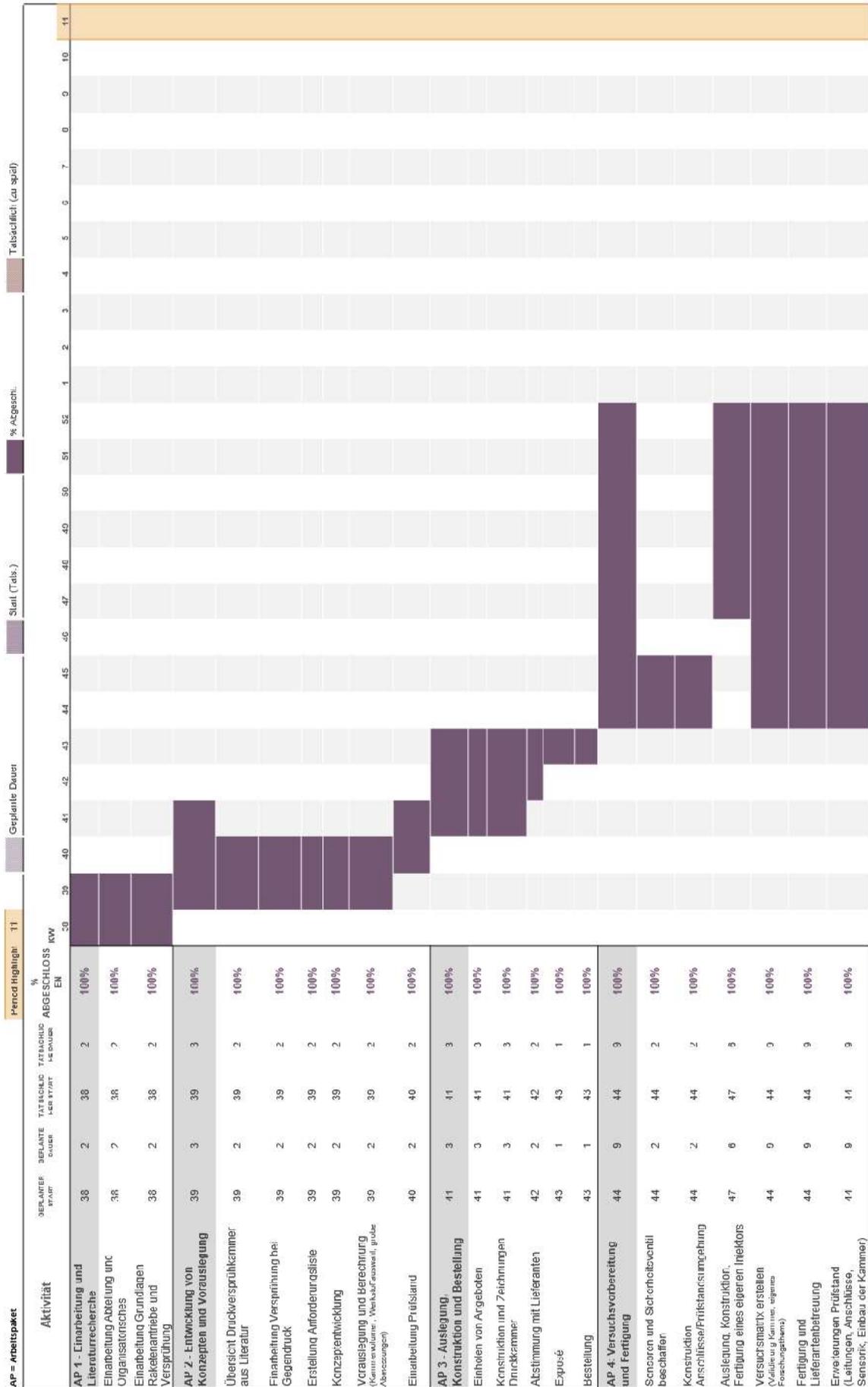
Anhang

Anhangsverzeichnis

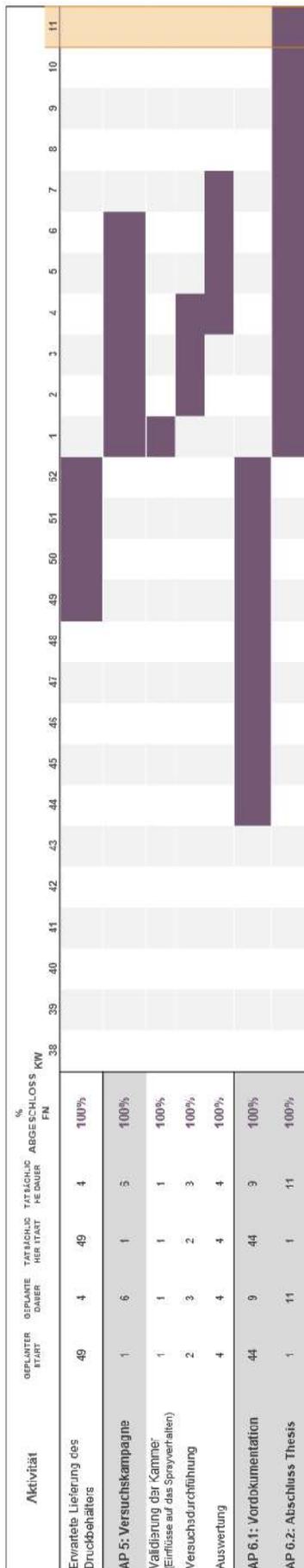
Anhang A:	Projektplan – Gant-Diagramm
Anhang B:	Borosilikatglas - Durchlässigkeit für verschiedene Wellenlängen [43]
Anhang C:	Diagramm zur Bestimmung des Berechnungsbeiwerts β für gewölbte Böden [17]
Anhang D:	Diagramm zur Bestimmung des geometrischen Parameters A und des Durchflusskoeffizienten μ für Verfahren 1 [8]
Anhang E:	Diagramm zur Bestimmung des geometrischen Parameters A und des Durchflusskoeffizienten μ für Verfahren 2 [8]
Anhang F:	Diagramm zur Bestimmung des relativen Flüssigkeitsradius [8]
Anhang G:	Versuche mit durchsichtigem Injektor zur Untersuchung der Strömungsbedingungen im Innen

Anhang A – Teil 1

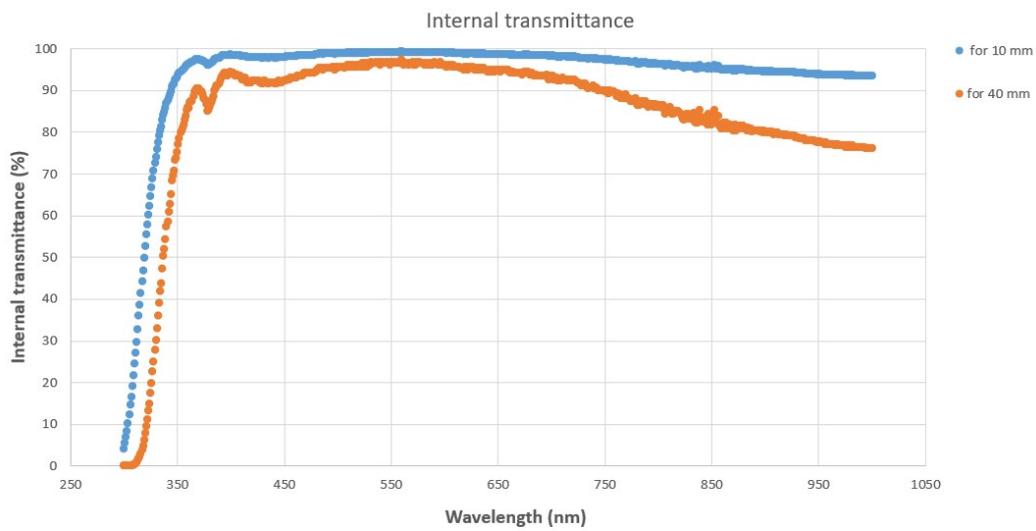
Projektplanung Bachelorthesis



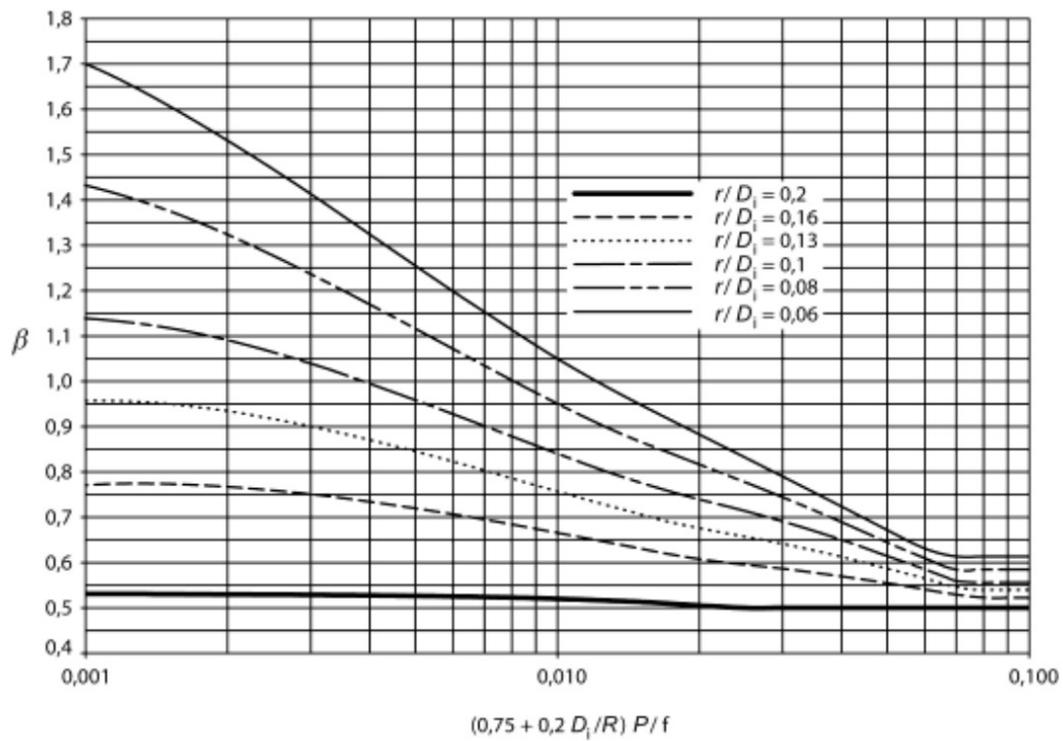
Anhang A – Teil 2



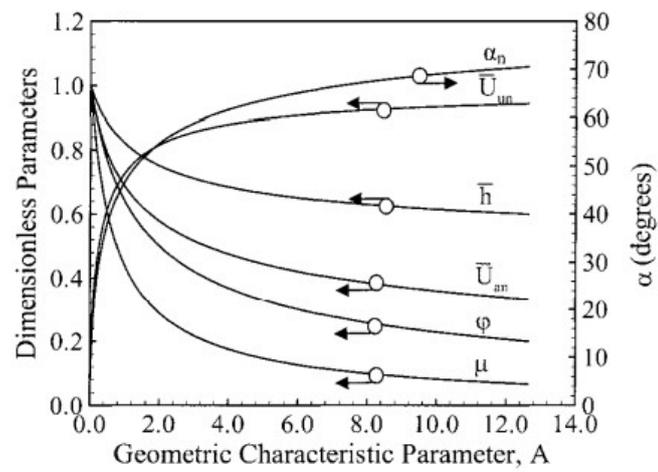
Anhang B



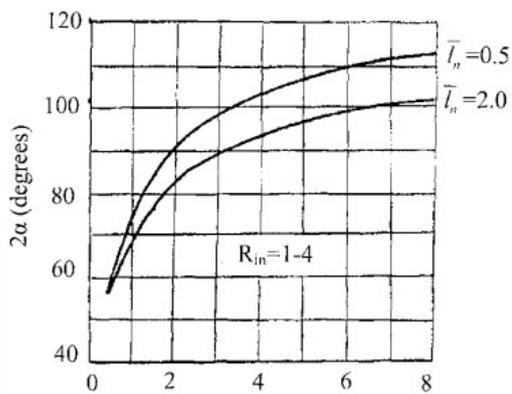
Anhang C



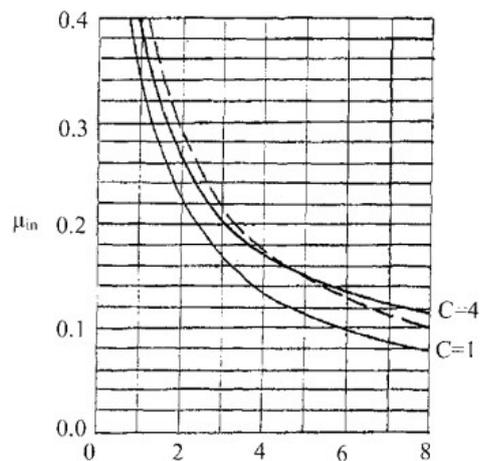
Anhang D



Anhang E

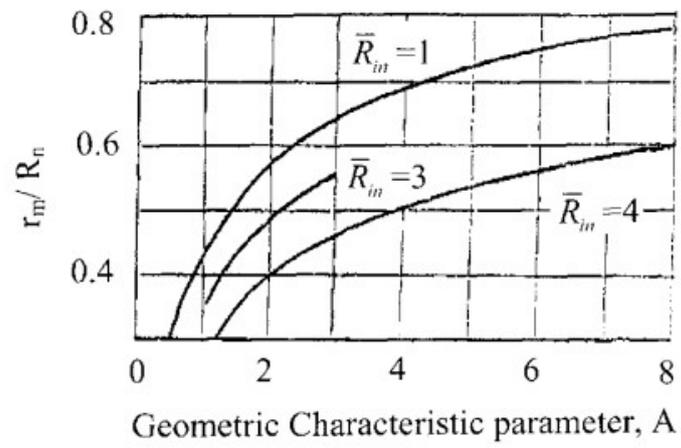


a) Geometric Characteristic parameter, A



b) Geometric Characteristic parameter, A

Anhang F



Anhang G

