

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Abschlussbericht

## Verbundprojekt "ECOFlex-turbo"

Teilverbundprojekt: Verbrennung

Vorhabengruppe: Last- und Brennstoffflexible Verbrennung (LaBreVer)

### **„Grundlagenuntersuchung zur Spray-Akustik-Interaktion und Modellvalidierung bei erhöhtem Umgebungsdruck“**

Vorhaben-Nr.: 3.2

Zeitraum: 01.07.2019 – 30.09.2023

Projektleitung: Prof. Dr. Ing. Christian Oliver Paschereit

Bearbeiter/Autor: Christoph Peisdersky

Forschungstelle: TU Berlin

Industriepartner: GE Power

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von GE Power und mit Mitteln des Bundesministerrums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 0324295E gefördert

Die Verrantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor..

## **Abstract**

This project is intended to help understanding the interaction between an evaporating liquid spray and acoustic fields. Therefore, a generic Test-Rig was developed, allowing the determination of distributions of velocity and droplet diameter of an evaporating spray in cross flow, through an optical access. In addition, a measurement system is developed with the purpose of measuring spatially and temporally resolved fluctuations in concentration of the evaporated liquid. Main goal is to develop models that help predict the thermoacoustic behavior of modern combustion systems.

---

## **Kurzfassung**

Das Projekt soll helfen die Interaktion von verdampfenden Flüssigkeitssprays mit akustischen Feldern zu bestimmen. Hierzu wird ein generischer Prüfstand entwickelt, welcher es, durch einen optischen Zugang, ermöglicht Verteilungen der Tropfengröße und Durchmesser in einem Querangeströmten Spray zu bestimmen. Des Weiteren wird ein Messsystem zur räumlich und zeitlich aufgelösten Bestimmung der Konzentration entwickelt. Ziel ist es Modelle zur Vorhersage der thermoakustischen Stabilität von Verbrennungssystem zu entwickeln.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>PROJEKT .....</b>	<b>5</b>
3.1	Spektroskopiesystem: Aufbau.....	5
3.2	Bestimmung der Konzentration.....	7
3.3	Prüfstand.....	11
3.4	Flüssigkeitszufuhr .....	14
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>14</b>
4.1	Betrachtung der Kanalströmung .....	15
4.2	Eigenschaften des Sprays.....	15
4.3	TDLAS System .....	19
4.4	Bestimmung der Konzentration im Kanal.....	21
<b>5</b>	<b>MODELLIERUNG DER SPRAYDYNAMIK .....</b>	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG AUSBLICK .....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>26</b>

# 1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:Schematische Darstellung TDLAS Aufbau	7
Abbildung 2: Absorptionsspektrum von Wasserdampf bei $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $p = 1 \text{ atm}$ und einer Konzentration von 1 Vol % (links); Berechnetes Spektrum der Referenzzelle bei entsprechenden Bedingungen (Rechts).	8
Abbildung 3: Darstellung gemessener Rohsignal vor bzw. nach der Zuordnung der Wellenzahl.	8
Abbildung 4: Darstellung der Quasiabsorption sowie Vergleich des gemessenen Signals mit der Simulation bei den bestimmten Bedingungen (oben); Fehlerbetrachtung zwischen gemessenem und simuliertem Spektrum.	10
Abbildung 5: Prüfstand zur Charakterisierung der Spraydynamik und Messung der Brennstoffkonzentration bei akustischer Anregung.	12
Abbildung 6: Optische Sektion mit Injektor und optionaler perforierter Platte.	13
Abbildung 7: Mikrofonsektion mit wassergekühlten Mikrofonhaltern und Option einer weiteren Messstelle für Konzentrationsmessungen.	13
Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofile (links ohne Siebe, rechts zwei Siebe)	15
Abbildung 9: Spray Trajektorie auf Basis der mittleren Geschwindigkeit	16
Abbildung 10: Prüfstand mit PDA System. Blaue Strahlen messen Geschwindigkeit in axialer Richtung und grüne Geschwindigkeit in transversaler Richtung sowie Tropfengröße	16
Abbildung 11: Phasengemittelte Verteilungen der Tropfengröße bei 49 Hz (oben), 98 Hz (unten) und jeweils verschiedenen Amplituden.	17
Abbildung 12: Phasengemittelte Daten der PDA Messungen an verschiedenen axialen Positionen. Temperatur: $400^\circ\text{C}$ , Frequenz: 69 Hz und Schnelle: 0,4 u.	18
Abbildung 13: Vergleich der Volumenverteilung bei unterschiedlichen Frequenzen und Schnelleamplituden an konstanter axialer Position.	19
Abbildung 14: Signal mit Absorptionslinien durch unterschiedlich geformte Fenster und Winkel	20
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Messungen über den Kanalquerschnitt.	20
Abbildung 16: Phasengemittelte Konzentration in horizontaler (linke Seite) und vertikaler (rechte Seite) Richtung. Geschwindigkeit der Querströmung ist $u = 15 \text{ m/s}$ . Die Frequenz der Anregung beträgt 69 Hz (oben) bzw. 180 Hz (unten) bei einer Amplitude von 0,2 u.	21

Abbildung 17: Phasengemittelte Konzentration in horizontaler (linke Seite) und vertikaler (rechte Seite) Richtung. Geschwindigkeit der Querströmung ist  $u = 15 \text{ m/s}$ . Die Amplitude der Anregung beträgt  $0,4 u$  (oben) bzw.  $0,07 u$  (unten) bei  $69 \text{ Hz}$ . 22

Abbildung 18: Ergebnisse einer Simulation der Tropfenverdampfung unter akustischer Anregung bei folgenden Bedingungen:  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $u = 15 \text{ m/s}$ ,  $u' = 6 \text{ m/s}$  und  $D_0 = 25 \mu\text{m}$ . 24

Abbildung 19: Vergleich von DBI (links) mit Simulationsergebnissen ohne (mitte) und mit (rechts) akustischer Anregung 25

## **2 Einleitung**

Gasturbinenhersteller sehen sich wachsenden Herausforderungen im Hinblick auf Brennstoffflexibilität gegenübergestellt. Zusätzlich zu verschiedenen Gasförmigen Brennstoffen spielen auch Flüssigbrennstoffe eine zunehmend wichtige Rolle. Flüssigbrennstoffe enthalten langkettige Kohlenstoffverbindungen und verhalten sich bei der Verbrennung entsprechend anders als Erdgas. Zudem muss der Brennstoff vor der Verbrennung verdampft werden, um auch hier eine magere, vorgemischte und somit schadstoffarme Verbrennung zu erreichen. Eine wichtige Rolle hierbei spielt der Zerfall eines Flüssigkeitssprays in einzelne Tropfen, welches mit Hilfe von Injektoren dem Brennraum zugeführt wird.

Ein bisher wenig beachteter Aspekt ist die thermoakustische Stabilität von gasturbinentypischen Verbrennungssystem bei der Verwendung von Flüssigbrennstoff. Im Rahmen dieses Vorhabens soll diese besser verstanden und Werkzeuge entwickelt werden, um bei der Auslegung künftiger Verbrennungssysteme zu assistieren. Hierzu werden insbesondere die Tropfendynamik und der Verdampfungsprozess unter Einwirkung akustischer Felder untersucht. Ein weiteres Hauptaugenmerkt wird auf die hierdurch beeinflussten Fluktuationen der Brennstoffkonzentration gelegt.

## **3 Projekt**

Das Projekt lässt sich in zwei Teile teilen. Der erste Teil besteht aus Grundlagenuntersuchungen zur Spraydynamik und Verdampfung bei atmosphärischen Bedingungen. Ziel hierbei ist die Verbesserung des Verständnisses der Interaktion eines Flüssigkeitssprays mit akustischen Feldern. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand entwickelt, der einen guten optischen Zugang zum Spray während Zerfall und Verdampfung bietet und zudem die Möglichkeit bietet dieses akustisch anzuregen. Einen weiteren Aspekt stellt die Bestimmung von Schwankungen der Konzentration des verdampften Sprays dar. Diese sollen räumlich sowie zeitlich aufgelöst gemessen werden. Zu diesem Zweck wurde ein Spektroskopiesystem entwickelt, welches auf der Methode der Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) basiert. Bei allen atmosphärischen Messungen kommt Wasser als Ersatzbrennstoff zum Einsatz. Dies geschieht aus Gründen der einfacheren Handhabung, da der Einsatz von Brennstoff eine zusätzliche Nachverbrennung nötig machen würde.

In einem weiteren Schritt sollten die gewonnenen Erkenntnisse bei erhöhtem Umgebungsdruck validiert, bzw. erweitert. Dies war jedoch nicht möglich, da der hierfür vorgesehene Prüfstand während der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung stand.

Im Folgenden wird der Prüfstand sowie das Spektroskopiesystem näher erläutert.

### **3.1 Spektroskopiesystem: Aufbau**

Zur Bestimmung der Konzentration eines verdampften Ersatzbrennstoffes wurde ein Infrarot Spektroskopie Verfahren entwickelt.

Genutzt wird die Methode der Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS). Hierbei wird ein Laserstrahl durch ein Volumen mit dem zu untersuchenden gasförmigen Stoff geleitet. Nach Passieren des Volumens wird der Intensitätsverlust bestimmt, welcher aufgrund von Absorption zustande kommt. Dieser ist über das Gesetz von Beer-Lambert ((1) und (2)) direkt mit den physikalischen Eigenschaften der Spezies von Interesse verknüpft.

$$I = I_0 e^{-\alpha_\nu} \quad (1)$$

$$\alpha_\nu = P \cdot X \cdot S(T) \cdot \Phi(\nu) \cdot L \quad (2)$$

Hier ist  $P$  der Druck,  $X$  die molare Konzentration,  $T$  die Temperatur,  $\nu$  die Wellenlänge und  $L$  die Weglänge durch das absorbierende Medium. Die Größen  $S(T)$  und  $\Phi(\nu)$  sind Parameter der einzelnen Absorptionslinien, wobei  $S$  die temperaturabhängige Linienstärke und  $\Phi$  die wellenlängenabhängige Linienform bezeichnen. Diese Parameter sind in spektroskopischen Datenbanken wie z.B. HITRAN tabelliert und können zur Bestimmung von Druck, Temperatur oder Konzentration genutzt werden.

Die Spezies wird durch entsprechende Auswahl der Wellenlänge bestimmt. Wie der Name sagt, ist dieser Laser über einen kleinen Wellenlängenbereich ( $\Delta\nu \approx 1\text{nm}$ ) abstimmbar. Innerhalb dieses Wellenlängenbereiches darf ausschließlich die Zielspezies absorbieren und es können mehrere Absorptionsmerkmale vorkommen.

Der Laser wird über einen bestimmten Wellenlängenbereich moduliert. Liegt eine Absorptionslinie in diesem Bereich, wird die detektierte Intensität in Abhängigkeit der Konzentration und der Wellenlänge variieren. Mit Hilfe der Eigenschaften der Absorptionslinien, welche für viele Stoffe der Datenbank HITRAN entnommen werden können, ist so eine Bestimmung der Konzentration möglich. Bei gleichzeitiger Messung des Druckes, sowie der Temperatur wird keine Kalibration benötigt.

Als Ersatzbrennstoff wurde Wasser gewählt. Dies bringt besonders in der Handhabung große Vorteile mit sich. Es kann auf eine Nachbehandlung eines Brennstoff-Luft Gemisches wie eine Nachverbrennung oder Kondensation verzichtet werden. Als Wellenlänge für die Absorptionsmessungen wurde die Region um 1392 nm im nahen Infrarotbereich gewählt. Wasser weist in diesem Bereich starke Absorption auf und gleichzeitig sind dort keine Störungen durch Absorption anderer Stoffe, wie z.B. Sauerstoff oder CO<sub>2</sub>, zu erwarten. Zudem ist die Verfügbarkeit aller weiteren benötigten Komponenten (Lichtwellenleiter, Kollimatoren, Detektoren) in diesem Wellenlängenbereich

sehr gut und auch die Verfügbarkeit von Gläsern mit entsprechend guter Transmission ist gewährleistet.

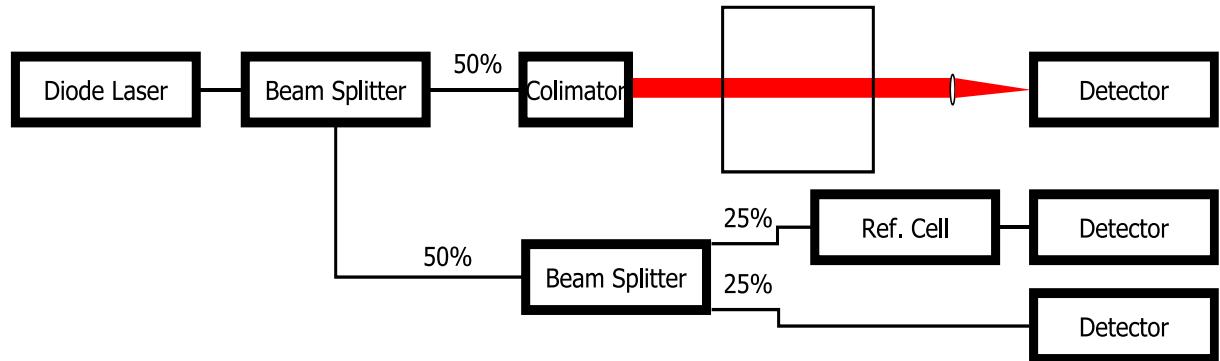


Abbildung 1:Schematische Darstellung TDLAS Aufbau

Eine schematische Skizze des Sensoraufbaus ist in Abbildung 1 dargestellt. Den Kern des Aufbaus stellt eine Laser Diode (Distributed Feed Back), welche mittels TEC controller über Ihre Temperatur bzw. über den zugeführten Strom (Bias) in der Wellenlänge moduliert werden kann. Diese Modulation über den Strom kann mit sehr hoher Frequenz durchgeführt werden, was es ermöglicht eine hohe zeitliche Auflösung zu erzielen. Das Modulationssignal wird mit Hilfe eines Signalgenerators erzeugt. Die gewählte Laserdiode verfügt über einen integrierten Treiber sowie einen TEC Controller und der Laser ist bereits in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt. Über einen Strahlteiler wird ein Teil des Lichtes über einen weiteren Strahlteiler direkt auf einen Detektor geleitet, welcher der Bestimmung von Schwankungen der Ausgangsintensität dient. Der zweite Teil des zuerst abgespaltenen Lichtes wird in eine Referenzzelle geleitet, welche der Bestimmung des nichtlinearen Zusammenhangs von Stromstärke und emittierter Wellenlänge der Laser Diode dient. Der Hauptanteil der ersten Aufspaltung wird zur Aufweitung des Strahls in einen Kollimator geleitet. Nun passiert er das Messvolumen und trifft schließlich, gebündelt von einer Linse, auf einen Detektor, um die Intensität zu messen. Optional kann ein Lock-In Verstärker verwendet werden, um ein eventuell schlechtes Signal-Rauschverhältnis zu verbessern. Dies war bei den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen jedoch nicht vonnöten.

### 3.2 Bestimmung der Konzentration

Im Folgenden wird die Bestimmung der Konzentration von Wasserdampf aus dem gemessenen Intensitätsverlust des Lasersignals erläutert. Das Absorptionsspektrum von Wasserdampf innerhalb des relevanten Wellenlängenbereiches ist in Abbildung 2 (links) dargestellt. Die Darstellung erfolgt hier über der Wellenzahl. Das Spektrum wurde mittels der Datenbank HITRAN erstellt, wobei ein Druck von  $p = 1 \text{ atm}$ , eine Temperatur von  $T = 20^\circ \text{C}$ , eine Weglänge von  $L = 5,5 \text{ cm}$ , sowie eine Konzentration von  $C = 1 \text{ Vol \%}$  in Luft gewählt wurde. Zu erkennen sind einige Absorptionslinien,

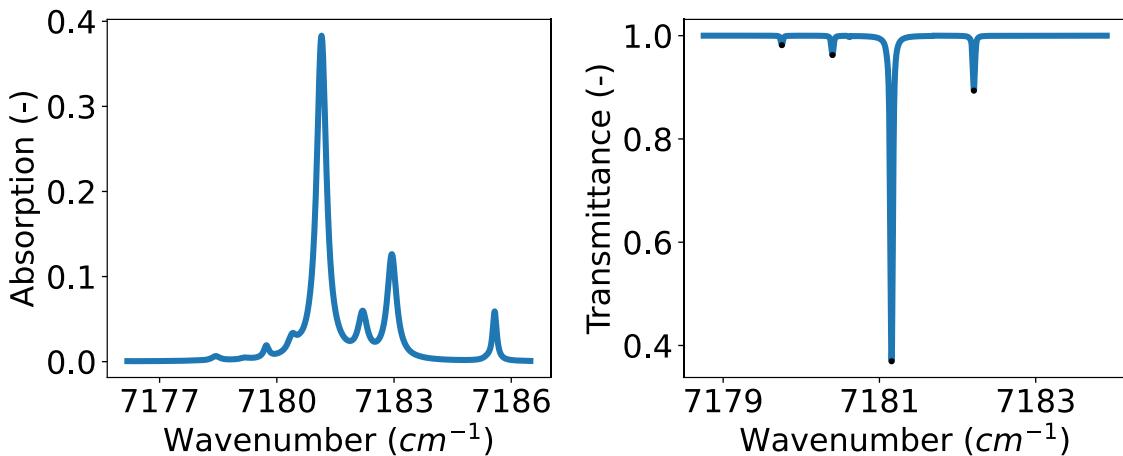


Abbildung 2: Absorptionsspektrum von Wasserdampf bei  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 1\text{ atm}$  und einer Konzentration von 1 Vol % (links); Berechnetes Spektrum der Referenzzelle bei entsprechenden Bedingungen (Rechts).

deren Breite, Form und Intensität im Allgemeinen von den thermodynamischen Bedingungen abhängen und sich bei Änderung dieser ebenfalls verändern. Diese Tatsache kann ausgenutzt werden um ein gemessenes Spektrum mit einem Simulierten zu vergleichen und auf diesem Weg die unbekannten Eigenschaften, im vorliegenden Fall die Konzentration, der absorbierenden Spezies zu bestimmen.

In Abbildung 3 sind im linken Bild Rohsignale der drei Detektoren dargestellt. Im Signal, welches durch die Referenzzelle geht, sowie im Signal welches das zu untersuchende

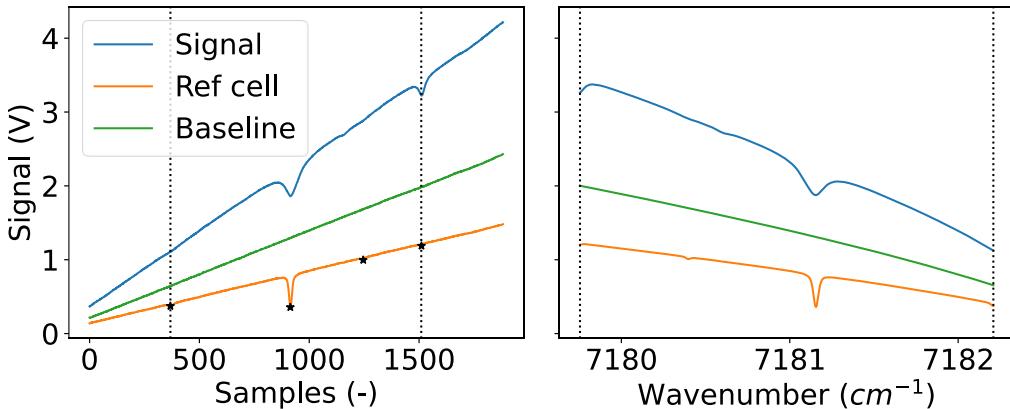


Abbildung 3: Darstellung gemessener Rohsignal vor bzw. nach der Zuordnung der Wellenzahl.

absorbierende Medium passiert hat sind entsprechende Absorptionsmerkmale zu erkennen, woraus sich deutlich eine Änderung der Wellenlänge erkennen lässt. Zugleich ist eine Zunahme der Intensität zu beobachten. Für die Bestimmung der Konzentration, bzw. dem Vergleich mit simulierten Spektren ist es notwendig zum einen die

zugehörigen Wellenzahlen zu bestimmen und außerdem die variierende Ausgangintensität der Laserdiode zu kompensieren.

Die Bestimmung der Wellenzahl erfolgt mittels Vergleiches des gemessenen Signals der Referenzzelle und dem bei gleichen Bedingungen berechneten Spektrum auf Basis der Datenbank HITRAN. Diese Methode eignet sich besonders gut, da die Bedingungen, Druck und Konzentration, innerhalb der Referenzzelle wohl definiert und bekannt sind. Die momentane Temperatur wird extern mit einem Widerstandsthermometer bestimmt. Abbildung 2 rechts zeigt beispielhaft ein berechnetes Spektrum der Referenzzelle, welches vier sehr scharfe Absorptionsmerkmale aufweist. Die geringe Halbwertsbreite ist auf den geringen Druck von lediglich 40 torr innerhalb der Referenzzelle zurückzuführen. In dem gemessenen Signal der Referenzzelle in Abbildung 3 links lassen sich dieselben Merkmale identifizieren, wobei hier zu beachten ist, dass die Reihenfolge gespiegelt ist. Dies ist auf die Zunahme der Wellenlänge, bzw. Abnahme der Wellenzahl mit steigendem Diodenstrom zurückzuführen. Auf Basis dieser vier Punkte lässt sich ein Polynom dritten Grades bestimmen, welches es erlaubt jedem gemessenen Wert eine Wellenzahl zuzuordnen. Aufgrund der verwendeten Polynominterpolation beschränkt sich die sinnvolle Bestimmung der Wellenzahl auf den Bereich zwischen den beiden äußeren Merkmalen. Die gemessenen Signale mit entsprechender Zuordnung der Wellenzahl sind in Abbildung 3 rechts dargestellt.

Zur Bestimmung der Konzentration aus dem Messignal und der hierfür nötigen Anwendung des Gesetzes von Beer-Lambert ist es notwendig die Eingangsintensität, im Weiteren als Baseline bezeichnet, zu kennen. Diese variiert ebenfalls mit dem Diodenstrom und ist im Allgemeinen unbekannt. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Eingangsintensität ist es, im gemessenen Signal Bereiche ohne Absorption zu identifizieren und auf Basis dieser ein Polynom an das Signal anzupassen. Bei den hier verwendeten Drücken, um ca. 1 atm, ist diese Methode jedoch schwer umzusetzen, da die Absorptionslinien bereits recht große Halbwertsbreiten erreichen und die Bereiche ohne Absorption entsprechend klein sind. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Eingangsintensität separat zu messen, wofür der dritte Strang, in dem ein Teil der emittierten Laserintensität direkt auf einen Detektor gerichtet ist, hinzugefügt wurde. Das Problem bei dieser Methode ist jedoch, dass die gemessene Intensität nicht exakt der Eingangsintensität entspricht, ihr Verlauf jedoch schon. Dies hängt zum einen mit der Aufspaltung des Lasersignals als auch mit zusätzlichen Verlusten, welche aus der Tatsache resultieren, dass das eigentliche Messignal Fensterscheiben und den restlichen Aufbau passieren muss, zusammen. Bei den gewählten Umständen ist das Referenzsignal stets kleiner als das eigentliche Messignal.

Um dieses Problem zu umgehen ist in Gleichung (3) eine erweiterte Form des Beer-Lambert Gesetzes dargestellt. Der letzte Term der rechten Seite ( $P_2(\nu)$ ) stellt ein Polynom zweiten Grades dar. Es wurde gezeigt, dass hierdurch zum einen die o.g. Abweichung der Baseline zur eigentlichen Eingangsintensität  $I_0$ , sowie weitere störende Einflüsse abgebildet werden können, vgl. [1]. Diese Einflüsse können unter anderem

Effekte wie Strahlablenkung (beam steering), Abschwächung des Strahls durch noch vorhandene Tropfen, Transmissionsunterschiede an verschiedenen Stellen oder verschmutzte Fenster sein.

$$\underbrace{\ln\left(\frac{I_0(\nu)}{I(\nu)}\right)}_{QA} = \underbrace{XPL \sum_{i=1}^N S_i(T) \Phi_i(\nu) + P_2(\nu)}_{Sim} \quad (3)$$

Die linke Seite der Gleichung (3) stellt hier jetzt die Quasi-Absorption (QA) dar. Diese wird nicht mit der exakten Eingangsintensität gebildet, wobei die Abweichung durch den  $P_2$  Term kompensiert wird. Der erste Term der rechten Seiten kann mittels bekannter Parameter und der spektroskopischen Datenbank simuliert werden. Da, im hier vorliegenden Fall, die Temperatur, der Druck, die absorbierende Weglänge sowie die Wellenlänge bekannt sind, bleibt als freier Parameter lediglich die Konzentration. Zusammen mit den drei unbekannten Polynomkoeffizienten ergibt sich ein System mit vier zu bestimmenden Parametern. Dies kann mit geeigneten Methoden, wie z.B. Minimierung der Fehlerquadrate, iterativ approximiert werden. Abbildung 4 zeigt die

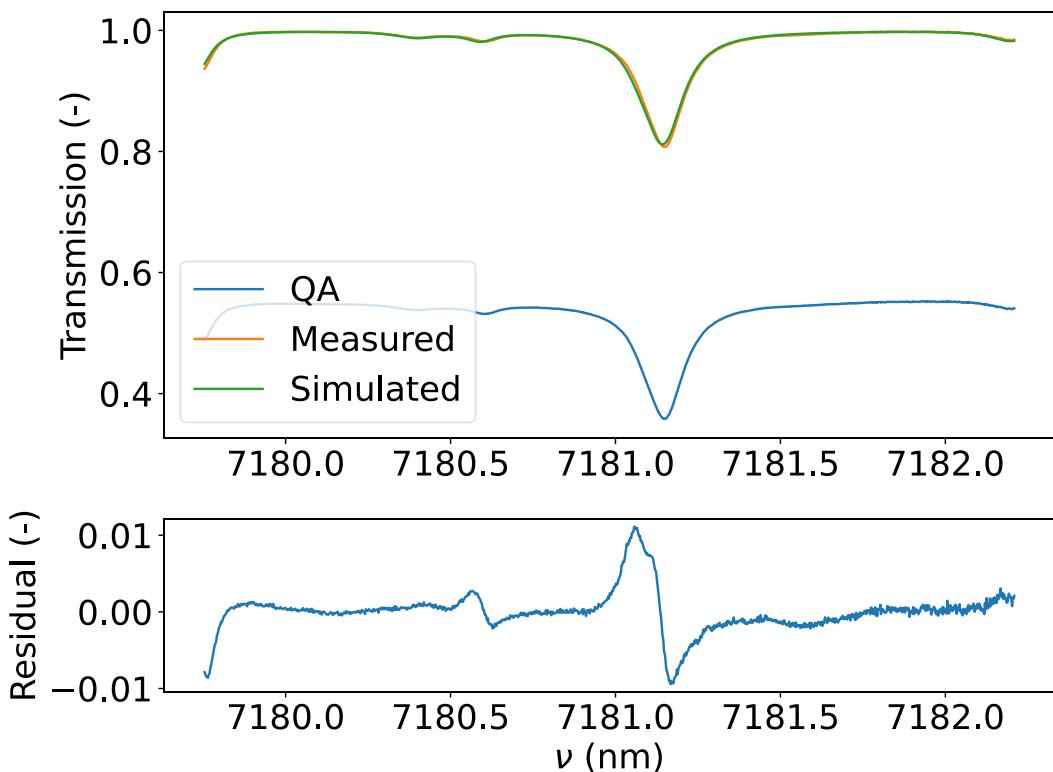


Abbildung 4: Darstellung der Quasiabsorption sowie Vergleich des gemessenen Signals mit der Simulation bei den bestimmten Bedingungen (oben); Fehlerbe trachtung zwischen gemessenem und simuliertem Spektrum.

Quasi Absorption, hier durch die blaue Linie dargestellt. Außerdem ist in Abbildung 4 das Messignal, welches die mittels des approximierten Polynoms korrigierte Quasi

Absorption darstellt, abgebildet, dargestellt durch die orange Linie. Die grüne Linie zeigt letztlich das berechnete Spektrum, mit den Bedingungen, welche bestimmt wurden und sich aus der QA ergibt. Die hierbei verwendete Konzentration ist die Gesuchte. In Abbildung 4 unten ist die Abweichung des gemessenen zu dem Berechneten Spektrum dargestellt, welche hier im Maximum ca. 1% entspricht. Dieser Prozess wird während der hier durchgeführten Konzentrationsmessungen an jeder Messposition für ca. 1000 Einzelmessungen durchgeführt.

### 3.3 Prüfstand

Für die Messungen der Spraydynamik sowie der Konzentrationsschwankungen bei akustischer Anregung wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher einen guten optischen Zugang zum Spray von der Eindüsung bis zum verdampften Spray bietet. Zudem ist es möglich akustische Transferfunktionen mittels der Multi-Mikrofon-Methode zu bestimmen. Zielgrößen bei der Auslegung waren eine Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s – 15 m/s bei einer Temperatur von 400 °C. Die Zielgröße des zu untersuchenden Sprays war ein Sauterdurchmesser der Tropfen von ~25 µm.

Der Teil des Versuchstandes für die angestrebten Messungen wurde in einen bestehenden Thermoakustik Prüfstand integriert. Abbildung 5 zeigt den Versuchsaufbau.

Aufgrund der Notwendigkeit einen guten optischen Zugang zum Spray zu haben wurde der Prüfstand mit einem quadratischen Querschnitt mit den Innenmaßen 130 mm x 130 mm entwickelt. Die Maße ergeben sich aus Abschätzungen der Trajektorie und der Verdampfungszeit des gewünschten Sprays [2], [3]. Der vorhandene Prüfstand hat einen runden Querschnitt und ist in verschiedene Sektionen unterteilt, welche um weitere Sektionen erweitert werden.

Am Anfang steht ein Mischrohr (1), welches die Möglichkeit bietet Vorheizer anzuschließen, um die in den Versuchstand eingebrachte Luft auf die gewünschte Temperatur zu heizen. Direkt angeschlossen ist eine Sektion, welche vier Lautsprecher enthält und der akustischen Anregung des Versuchstandes dient (2). Gefolgt wird diese Sektion von einer 180° Biegung (3). Diese Biegung kann in Ein- bzw. Ausströmrichtung verschoben werden und ermöglicht es so die Resonanzfrequenz des Versuchstandes zu verändern. Dies kann genutzt werden, um sehr große Amplituden der Anregung zu erreichen, ähnlich der Funktion einer Posaune. Nun erfolgt der Übergang zum Rechteckigen Querschnitt in Form eines Kanalteils, welches einen möglichst sanften Übergang des Querschnitts gewährleistet und somit die Einbringung von Störungen in die Strömung minimiert. Stromab folgt nun die erste Mikrofonsektion (4) zur Messung von Transfermatrizen, zu sehen in Abbildung 7. Zu diesem Zweck sind hier fünf wassergekühlte Halterungen für Mikrofone vorgesehen. Zudem sind in dieser Sektion Messstellen zur Temperaturüberwachung sowie eine Wanddruckbohrung zur Bestimmung des statischen Druckes vorgesehen. Kurz vor dem Stromabende der Sektion ist eine Möglichkeit einen Injektor zu platzieren vorgesehen. Diese dient dem Zweck der

Untersuchung des Fernfeldes des Sprays, da die Hauptposition des Injektors am Anfang der nächsten Sektion vorgesehen ist.

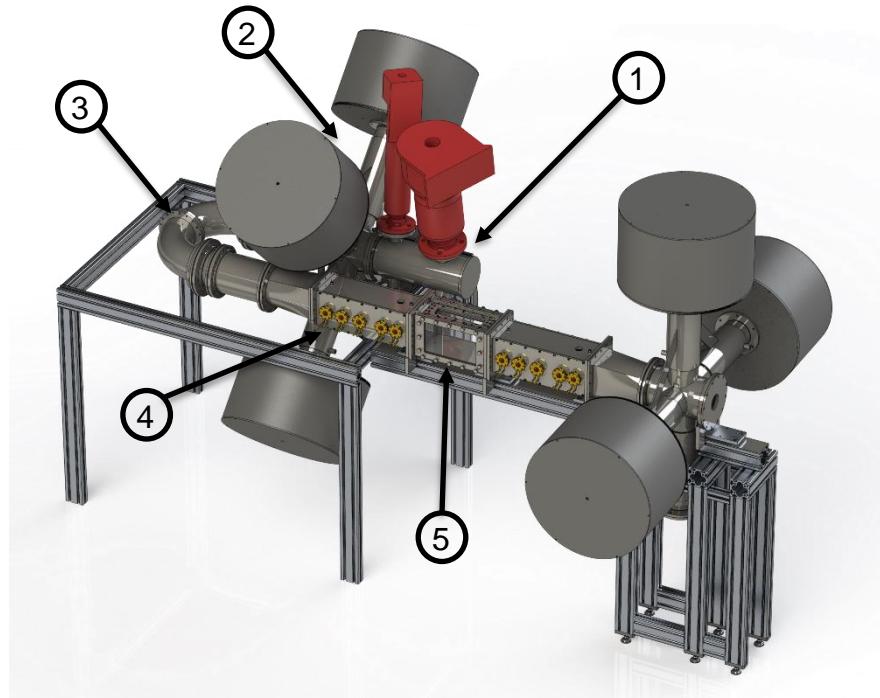


Abbildung 5: Prüfstand zur Charakterisierung der Spraydynamik und Messung der Brennstoffkonzentration bei akustischer Anregung.

Direkt anschließend an die erste Mikrofonsektion folgt die optische Sektion (5), wie in Abbildung 6 dargestellt. Sie verfügt jeweils an den Seiten über zwei große Fenster, welche einen optischen Zugang über die gesamte Höhe des Kanals bieten. Diese Fenster werden für die Messungen der Spray-Eigenschaften mittels Phase Doppler Anemometry (PDA) sowie der Messungen der Konzentration des verdampften Sprays stromab. Mittels der PDA ist es gleichzeitig möglich die Tropfengröße und Geschwindigkeit mittels einer Punktmeßung zu bestimmen. Um Informationen im Raum zu erhalten, wird das PDA System, ebenso wie das Messsystem zur Bestimmung der Konzentration, an einer Traverse befestigt. Diese ermöglicht ein Anfahren des Kompletten sichtbaren Bereiches in allen drei Raumrichtungen. Zudem ist es möglich die Fenster für weitere Messverfahren, wie z.B. Schattenverfahren zu nutzen. Einen weiteren Optischen Zugang bietet ein drittes Fenster in der Oberseite dieser Sektion. Hier ist es möglich einen Lichtschnitt in das Messvolumen einzubringen und somit verschiedene Verfahren wie Particle Image Velocimetry (PIV) oder Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) anzuwenden. Der Injektor wird direkt am Anfang der Sektion platziert, so dass optischer Zugang bis direkt an den Punkt der Injektion möglich ist. Des Weiteren besteht die Möglichkeit eine Platte mit Löchern vor dem Injektor zu platzieren. Diese dient dem Zweck Turbulenz zu erzeugen und zudem lokal eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit direkt vor dem Injektor zu bewirken. Stromab der

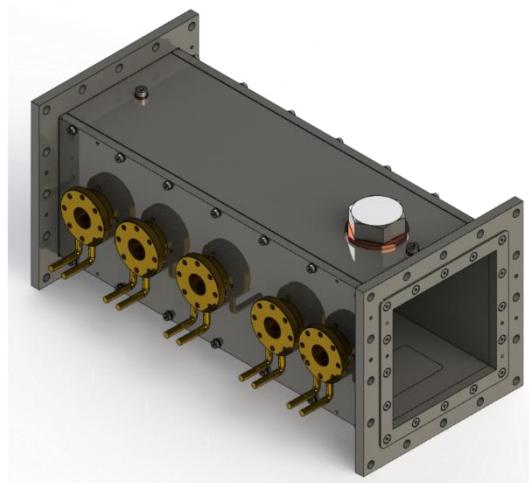


Abbildung 7: Mikrofonsektion mit wassergekühlten Mikrofonhaltern und Option einer weiteren Messstelle für Konzentrationsmessungen.

optischen Sektion folgt eine weitere Mikrofonsektion, welche weitestgehend der ersten Mikrofonsektion gleicht. Hier ist eine weitere Messstelle zur Bestimmung der Konzent-

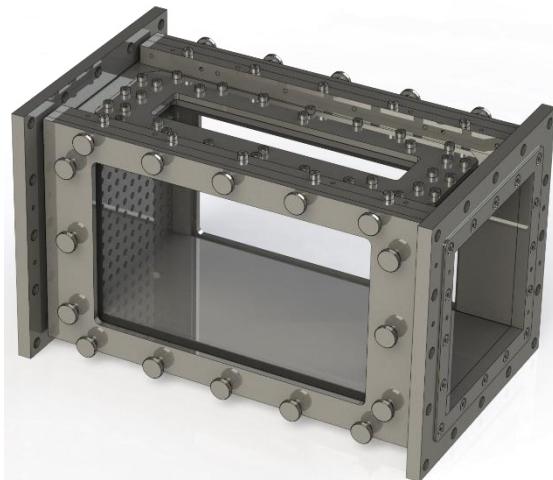


Abbildung 6: Optische Sektion mit Injektor und optionaler perforierter Platte.

ration vorgesehen. Diese ist in der Mitte des Kanals in transversaler Richtung vorgesehen und soll es ermöglichen einen Eindruck über die Konzentration im Fernfeld des Injektors zu bekommen.

Nun folgt eine Querschnittsänderung zurück auf den Runden Querschnitt mittels eines weiteren Kanalteils, welches dem ersten gleicht. Dies ermöglicht den Anschluss einer weiteren Lautsprechersektion, welche der Anregung von einer zweiten Position dient, um vollständige Transfermatrizen aufnehmen zu können. Als Abschluss ist es möglich eine Blende zu montieren, welche so ausgelegt ist, dass sie als nichtreflektierendes Ende bei den gegebenen Bedingungen fungiert. Diese Blende wurde nach [3] ausgelegt. Jedoch wurde im Großteil der Messungen auf diese Blende verzichtet, da nur so genügend große Schwankungsamplituden erreicht werden konnten.

Da bei den ersten Versuchen Temperaturen der Strömung im Kanal von über 300°C zu erreichen zum Reißen der Gläser kam, wurde das Befestigungskonzept der Gläser geändert. Die neue Variante verfügte über deutlich kleinere Gläser, welche jewils am Stromaufende der optischen Sektion montiert werden konnten. Außerdem war eine Montage in der Mitte und am Stromabende möglich. Somit war es, mit Wechsel der Glasposition, weiterhin möglich mit der PDA jeden Punkt in der Sektion zu erreichen. So wurde z.B. für Messungen in der Injektionsebene eine Scheibe am Stromaufende und die Gegenüberliegende in der Mitte montiert. Zusätzlich wurde ein weiterer Satz Fenster genutzt um die Konzentrationsmessungen am Stromabende durchzuführen. Diese Fenster waren schmäler und waren in Strömungsrichtung gekeilt. Somit ließ sich der weiter Unten beschriebene Etalon-Effekt verhindern.

### 3.4 Flüssigkeitszufuhr

Um die angestrebte Tropfengröße zu erreichen ist es beim Einsatz von Wasser als Flüssigkeit nötig eine Zweistoffdüse zu nutzen. Es wurde eine Zufuhr entwickelt mit dem Ziel eine möglichst störungsfreie und speziell pulsationsarme Bereitstellung der Flüssigkeit zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wird die Flüssigkeit mittels Stickstoffs aus einem Druckgefäß gedrückt, welches mit einem Steigrohr ausgestattet ist. Die Regelung des Wasserdurchflusses wird mittels eines Ultraschalldurchflusmmesers, kombiniert mit passendem Regelventil, realisiert.

Während der Messungen kamen zwei verschiedene Düsen zum Einsatz. Zum einen das Modell XA-SR der Firma Bete, bei dem es sich um eine Luftunterstützte Vollkegeldüse handelt. Bei diesem Modell ist es möglich sowohl die Flüssigkeitsdüse als auch den Austrittsquerschnitt der Luft zu verändern und somit die Eigenschaften des erzeugten Sprays wie Tropfengröße oder Spraybreite zu variieren. Als zweites Modell kam die Düse KL1 der Firma DIVA Sprühtechnik GmbH zum Einsatz. Dieses Modell verfügt als wichtigsten Unterschied über eine größeren Spraywinkel verglichen mit der Bete Düse.

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden Ergebnisse der Messungen im Atmosphärischen Prüfstand dargestellt. Zuerst wird die Strömungsqualität im Kanal betrachten. Es werden die Ergebnisse der Messungen der Tropfengröße und Geschwindigkeit dargestellt und zuletzt die Charakterisierung des TDLAS Systems vorgestellt, sowie die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen behandelt.

## 4.1 Betrachtung der Kanalströmung

Das Strömungsfeld innerhalb des Kanals wurde untersucht, um einen Eindruck über die Qualität dessen zu gewinnen. Hierzu wurde die Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene der Spray Eindüsung mittels einer Prandtlsonde bestimmt. Die Geschwindig-

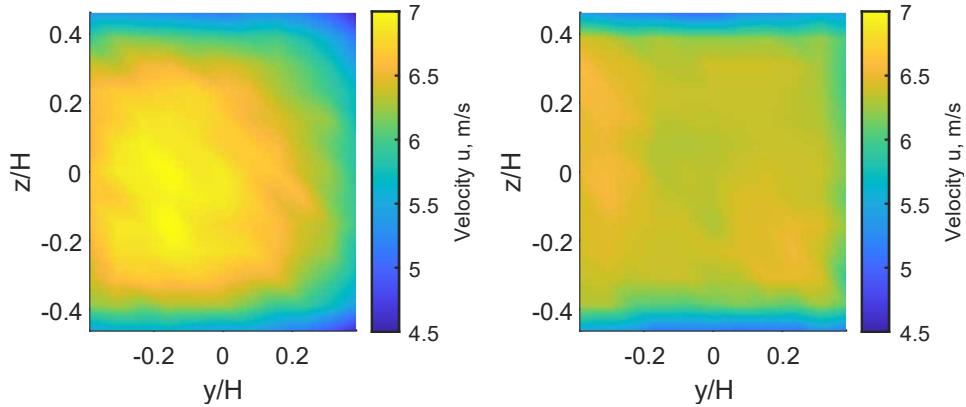


Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofile (links ohne Siebe, rechts zwei Siebe)

keitsverteilung innerhalb des Kanals ist in Abbildung 8 links dargestellt, die Blickrichtung ist hierbei Stromauf gerichtet. Es ist eine deutliche Überbeschleunigung am linken Rand zu erkennen, welche sich mit einer rechts befindlichen Ablösung hinter der  $180^\circ$  Umlenkung erklären lässt. Zur Vergleichmäßigung wurden hinter der Posaunensektion und vor der ersten Mikrofonsektion jeweils Siebe aus Edelstahl eingebracht. Der vergleichmäßigende Effekt dieser Siebe ist in Abbildung 8 rechts dargestellt. Die blauen Regionen an den Rändern stellen die jeweiligen Wandgrenzschichten dar.

## 4.2 Eigenschaften des Sprays

Das Spray wurde mittels PDA untersucht. Eine Skizze des Aufbaus ist in Abbildung 10 dargestellt. Die grüne Komponente des Lasers misst die Tropfengröße sowie die laterale Geschwindigkeitskomponente und die blaue die axiale Komponente der Geschwindigkeit. Der Laserkopf sowie die Empfangsoptik befinden sich gemeinsam auf einer 3-Achs Traverse. Aus Platzgründen wurde ein Winkel zwischen Sende und Empfangsoptik von  $30^\circ$  gewählt, es ist jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen Tropfengröße und Phase vorhanden. Abbildung 9 zeigt die Trajektorie der Mittellinie des Sprays sowie einige Profile entlang dieser Mittellinie. Die Mittelinie wurde hier jeweils auf Basis der maximalen Tropfengeschwindigkeit gewählt. Es handelt sich um Baseline Messungen ohne akustische Anregung.

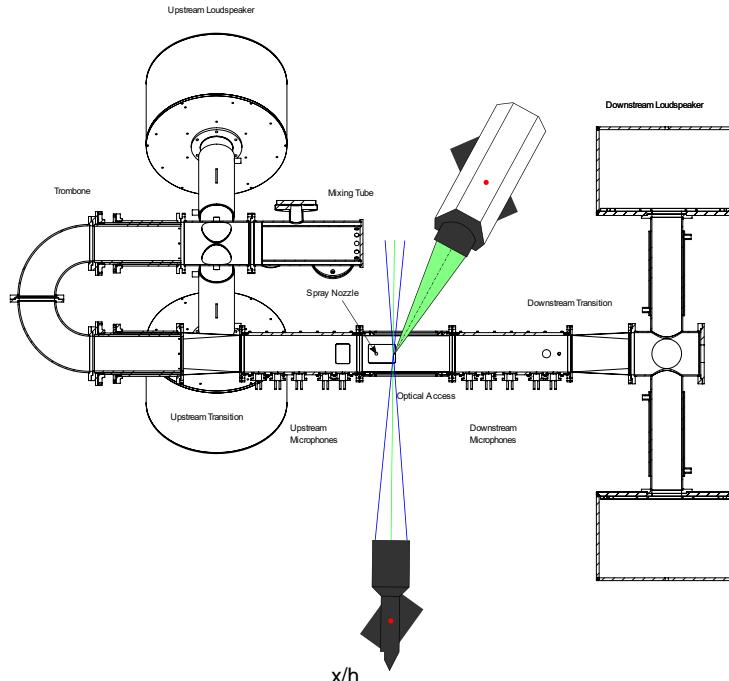


Abbildung 10: Prüfstand mit PDA System. Blaue Strahlen messen Geschwindigkeit in axialer Richtung und grüne Geschwindigkeit in transversaler Richtung sowie Tropfengröße

Für die Betrachtung des akustischen Einflusses ist es von Nöten die Verteilungen von Geschwindigkeit und Tropfengröße Phasengemittelt zu betrachten. Ein hierbei entstehendes Problem ist die Fehlende Synchronisation der Zeitbasen der verschiedenen Messsysteme. Das PDA System läuft auf einer anderen Zeitbasis als das System zur Aufzeichnung der anderen Parameter wie Mikrofonsignal aber auch die Anregung der Lautsprecher. Um trotzdem jeden Tropfen einer Phase der akustischen Anregung zuzuordnen zu können, wurde die Möglichkeit genutzt mit dem PDA System analoge

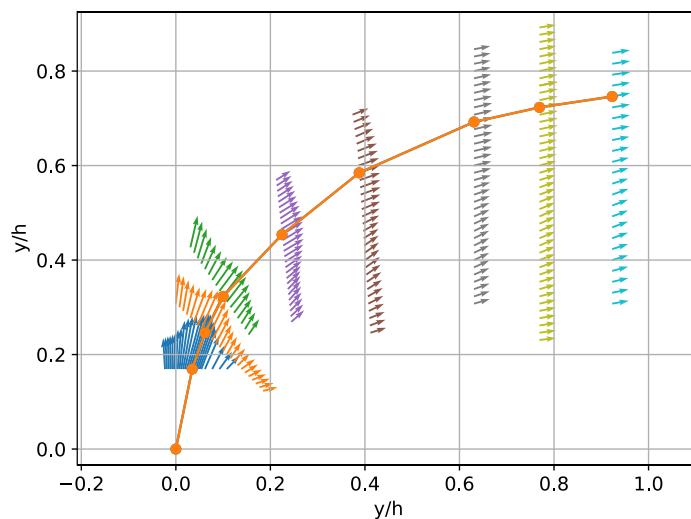


Abbildung 9: Spray Trajektorie auf Basis der mittleren Geschwindigkeit

Signale aufzeichnen zu können und das Anregungssignal der Lautsprecher ebenfalls mit aufgezeichnet. Dieses wurde auch mit dem Messsystem, welches die Anregung bereitstellt, aufgezeichnet. Aufgrund der unterschiedlich schnell laufenden Uhren ergibt sich jedoch ein Phasenversatz der aufgezeichneten Signale, welcher bei Messzeiten von bis zu 90 s pro Messpunkt ein Phasenmittel stark beeinträchtigt. Aus diesem Grund wird das Zeitsignal der PDA korrigiert, indem der Unterschied der momentanen Phase mittels Hilbert Transformation bestimmt wird. Mittels einer Korrelation der beiden Signale wird schließlich noch die unterschiedliche Anfangszeit der Messungen angepasst und es ist möglich Verteilungen phasengemittelt zu betrachten. Für spätere Messungen wurde auf einem zweiten Kanal, zusätzlich zum eigentlichen Anregesignal, die momentane Phase direkt an das PDA System gesendet. Nun ist es augenblicklich möglich jedem Messwert der PDA die Phase direkt zuzuordnen.

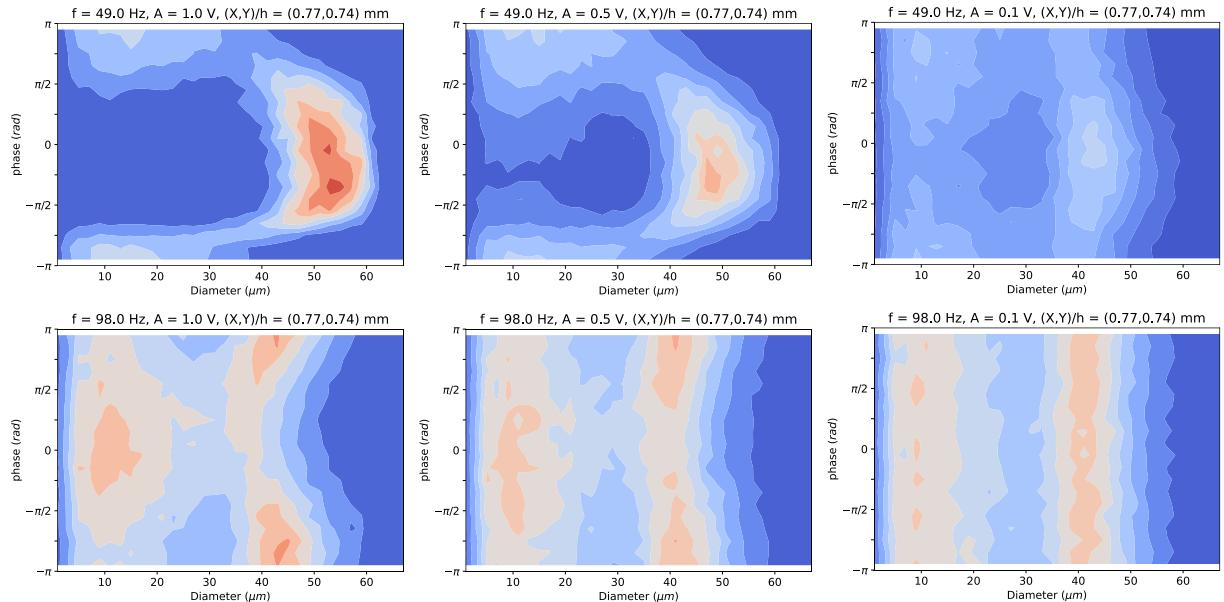


Abbildung 11: Phasengemittelte Verteilungen der Tropfengröße bei 49 Hz (oben), 98 Hz (unten) und jeweils verschiedenen Amplituden.

Zuerst werden im Folgenden Ergebnisse bei denen als Injektor die Düse von Bete zum Einsatz kam vorgestellt. Aufgrund der hier verwendeten Variante des Prüfstandes, mit den zuerst verwendeten größeren Gläsern, ist die Temperatur hier auf maximal 200°C beschränkt. Phasengemittelte Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt. Es handelt sich hierbei um Histogramme, welche die Durchmesserverteilung der Tropfen darstellen. Diese sind jeweils für Tropfen der gleichen Phasenlage der Anregung aufgetragen, wobei insgesamt 20 Phasen-Bins betrachtet werden. Alle Daten dieser Abbildung wurden an derselben Messposition aufgenommen, welche sich in einer Entfernung von  $x/h = 0,77$  von der Eindüsung befindet. Die Position in lateraler Richtung wurde auf der Mittellinie des Sprays gewählt. Die obere Reihe zeigt Daten bei einer Anregungsfrequenz von 49 Hz und verschiedenen Anregungsamplituden. Diese sind von links nach rechts: 3000 Pa, 1180 Pa und 250 Pa. Die untere Reihe zeigt die Daten einer Anregung

mit der doppelten, also 98 Hz und respektive den Schalldrücken 1450 Pa, 785 Pa und 170 Pa. Es ist eine klare, wenn auch für unterschiedliche Frequenzen varierende, Abhängigkeit der Tropfengröße von der Phase zu erkennen. Dies ist in erster Linie auf ein Flattern des Sprays zurückzuführen. Durch die Strömung quer zum Spray werden Tropfen mit kleinerem Durchmesser dieser besser folgen als Tropfen mit großem Durchmesser, was dazu führt, dass die kleinen Tropfen sich zur Leeseite des Sprays bewegen, wogegen die großen Tropfen eher auf der Luvseite zu finden sind. Nun wird das Spray in Phasen mit positiver Schnelle nach vorne gebogen und in Phasen mit negativer Schnelle entsprechend nach hinten. Da die Messposition jedoch unveränderlich ist, ergeben sich mit der Phase variierte Verteilungen der Tropfengröße.

Die folgenden Messungen wurden mit dem neuen Setup der Gläser sowie der Düse Diva K1 durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass durch die anderen Gläser nun Temperaturen bis 400°C erreicht werden konnten. Zudem zeigte die Diva Düse eine geringere Penetration in den Kanal, was zur Folge hatte, dass weniger Flüssigkeit vor dem Verdampfen die Kanaldecke erreichte. Bei allen Messungen betrug die mittlere Ge-

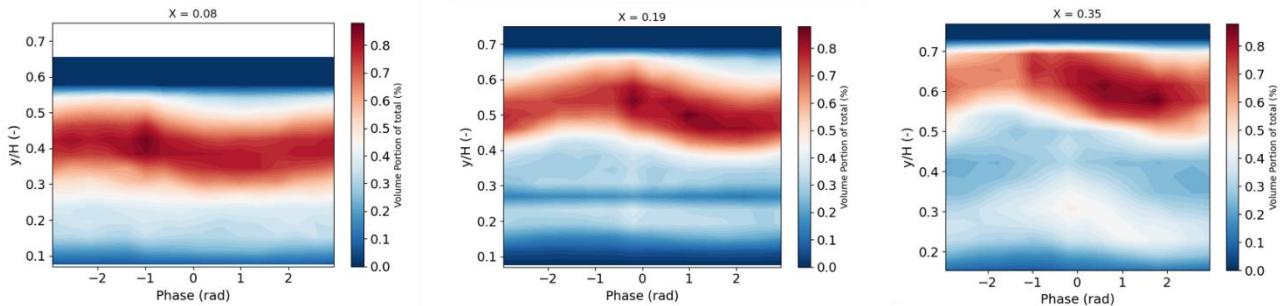


Abbildung 12: Phasengemittelte Daten der PDA Messungen an verschiedenen axialen Positionen. Temperatur: 400°C, Frequenz: 69 Hz und Schnelle: 0,4 u.

schwindigkeit der Anströmung  $u = 15 \text{ m/s}$ .

Die in Abbildung 12 dargestellten Ergebnisse basieren auf Messungen mittels PDA an verschiedenen axialen Positionen bei einer Temperatur der Luftströmung von 400°C sowie einer Anregung mit 69 Hz bei einer Schnelle von 0,4 u. Dargestellt ist die Phasengemittelte Volumenverteilung in Abhängigkeit der mit  $H = 130\text{mm}$  normierten Kanalhöhe. Die Normierung der Farbskala erfolgt hier jeweils mit dem Gesamtvolumen der während der Messungen registrierten Tropfen. Ein Integral über ein Bild ergibt somit 100%. Die axiale Position variiert von links nach rechts von 0,08 H über 0,19 H bis 0,35 H. Nach dieser Position ist ein Großteil des Sprays bereits verdampft, so dass es nicht sinnvoll ist hier weitere Messungen durchzuführen. In allen Bildern ist eine Sinusförmige Auf- und Abbewegung der größten Volumenkonzentration zu beobachten, wobei sie sich im Mittel mit zunehmender axialer Distanz nach oben bewegt. Dies ist auf ein sich in Abhängigkeit der Phase der Schnelle aufstellendes bzw. nach unten gebogenes Spray zurückzuführen. Des Weiteren ist eine Zunahme der Konzentration in einem bestimmten Bereich der Phase mit zunehmender axialer Distanz zu erkennen.

In den oberen Bereichen, welche in konstantem Blau oder Weiß dargestellt sind, war es nicht mehr möglich genügend Tropfen zu messen um statistisch relevante Aussa-

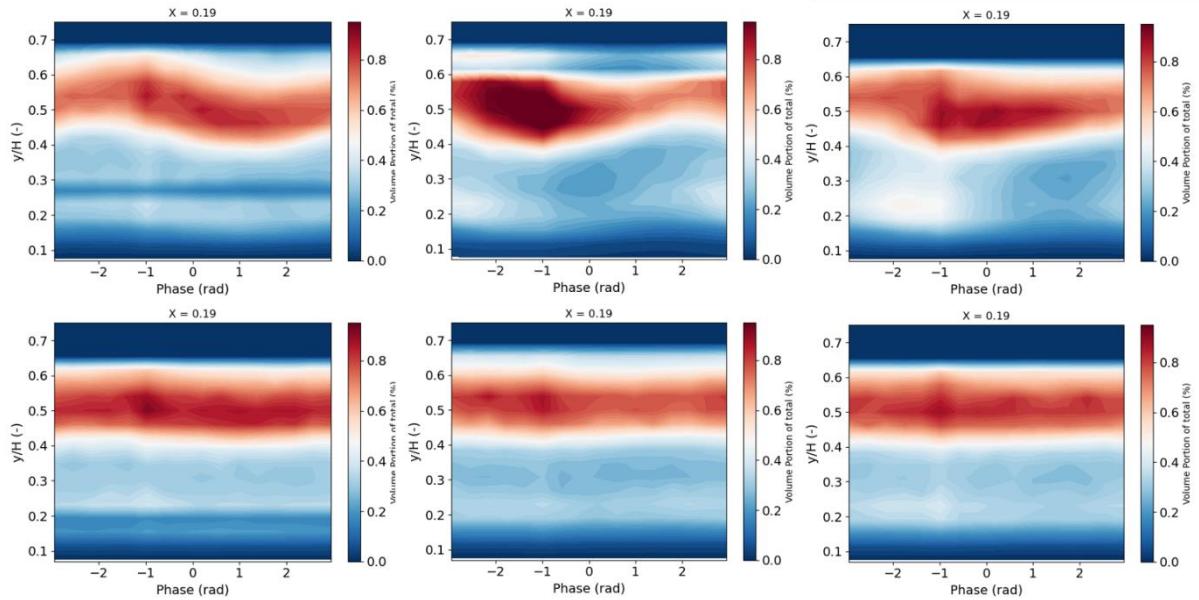


Abbildung 13: Vergleich der Volumenverteilung bei unterschiedlichen Frequenzen und Schnelleamplituden an konstanter axialer Position.

gen zu treffen. Sie erreichen diese Regionen nicht oder sind bereits verdampft.

Um den Einfluss der Frequenz und Schnelleamplitude zu vergleichen sind in Abbildung 13 Messungen an konstanter axialer Position  $x/H = 0,19$  bei verschiedenen Frequenzen und Amplituden dargestellt. Die obere Reihe zeigt Messungen bei einer Schnelle von 0,4 u und die untere bei 0,07 u. Die drei dargestellten Frequenzen betragen von links nach rechts 69 Hz, 180 Hz und 300 Hz. Bei der Variation der Frequenz zeigt sich eine Verschiebung des sinusförmigen Verlaufes zu verschiedenen Phasen. Dies kann auf die Trägheit des Sprays in seiner Auf- und Abbewegung zurückgeführt werden. Außerdem ist eine phasenabhängige Variation der Konzentration zu beobachten. Der Grund hierfür konnte nicht letztendlich geklärt werden. Im Falle der kleineren Schnelle (untere Reihe) ist der oben beschriebene Effekt nur noch minimal vorhanden. Es lässt sich jedoch der Trend erkennen, dass Maxima und Minima des Konzentrationsverlaufes in der Höhe an gleicher Position zu finden sind, wie es im Falle der größeren Schnelle der Fall ist. Dies lässt auf eine reine Amplitudenabhängigkeit des Phänomens schließen.

### 4.3 TDLAS System

Zur zeitlich und räumlich aufgelösten Bestimmung der Konzentration wird das oben beschriebene TDLAS System verwendet.

Ein Problem, welches bei Nutzung des Systems durch Glasfenster auftritt, ist der sogenannte Etalon-Effekt. Hierbei interferiert reflektiertes Licht, z.B. innerhalb der

Fenster, mit dem einfallenden Licht, was zu Schwankungen der Intensität führt. Da die Magnitude dieser Schwankungen in der Größenordnung der Absorptionslinien liegt, müssen diese in jedem Fall vermieden werden. Dies ist durch die Nutzung angewin-

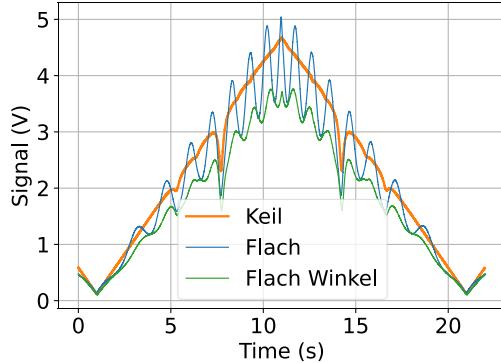


Abbildung 14: Signal mit Absorptionslinien durch unterschiedlich geformte Fenster und Winkel

kelter, keilförmiger Fenster möglich. In Abbildung 14 ist exemplarisch der Effekt von Keilförmigen Fenstern verglichen mit flachen Fenstern und flachen Fenster, durch die der Strahl nicht senkrecht trifft, dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass eine Schrägstellung des einfallenden Signals zwar den Effekt abmildert, jedoch nicht vollständig entfernt. Keilförmige Fenster zeigen hingegen keinen Etalon Effekt mehr.

Der Einsatz zweier gegenüberliegender Fenster, welche mit einem Winkel von  $0,5^\circ$  gekeilt waren machte es möglich den Etalon Effekt auszuschließen. Als Material kam hier Quarzglas zum Einsatz, welches optimiert für gute Transmission im nahen Infrarotbereich ist. Herkömmliche Quarzgläser weisen speziell in der hier verwendeten Region um 1400 nm deutliche Transmissionseinbußen auf. Wie bereits erwähnt ist es möglich die optische Sektion um  $90^\circ$  zu drehen, was es erlaubt Messungen in horizontaler als auch vertikaler Richtung durchzuführen. Gleichzeitig bleibt die Position des Sprays hierbei unverändert. Die axiale Position dieser Fenster ist ca. 2,5 Kanalhöhen stromab der Injektionsebene.

In Abbildung 15 ist schematisch dargestellt wie der Verlauf der Messpositionen ist. Die Querströmung kommt jeweils von links. Die blaue Linie stellt die Mittellinie des Sprays dar. Links ist folglich die Seitenansicht des Kanals und Rechts die Draufsicht dargestellt. Für die im Folgenden dargestellten Messung wurde jeweils die gesamte

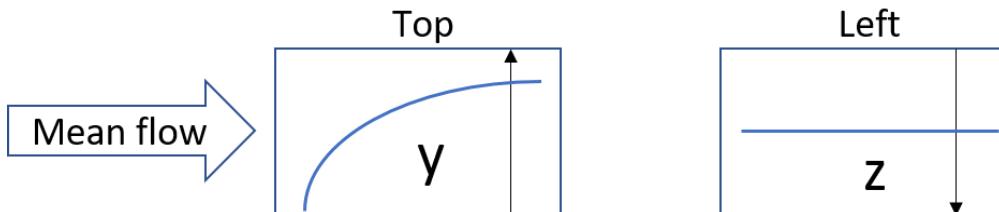


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Messungen über den Kanalquerschnitt.

Kanalhöhe bzw. Breite in Schritten von 5 mm abgefahren. Die Ergebnisse werden Phasengemittelt in Kontourplots dargestellt.

#### 4.4 Bestimmung der Konzentration im Kanal

In Abbildung 16 sind Messungen in beiden Richtungen dargestellt, wobei die linken Bilder Messungen in horizontaler Richtung und die rechten Bilder in vertikaler Richtung zeigen. Bei allen Messungen beträgt die Temperatur  $T = 400^\circ\text{C}$  und die Geschwindigkeit der Querströmung  $u = 15 \text{ m/s}$ . Die Farbskala stellt jeweils die gemessene Konzentration dar und ist Phasengemittelt über der mit  $H = 130 \text{ mm}$  normierten Höhe bzw. Breite des Kanals aufgetragen. Der Unterschied zwischen den oberen und unteren

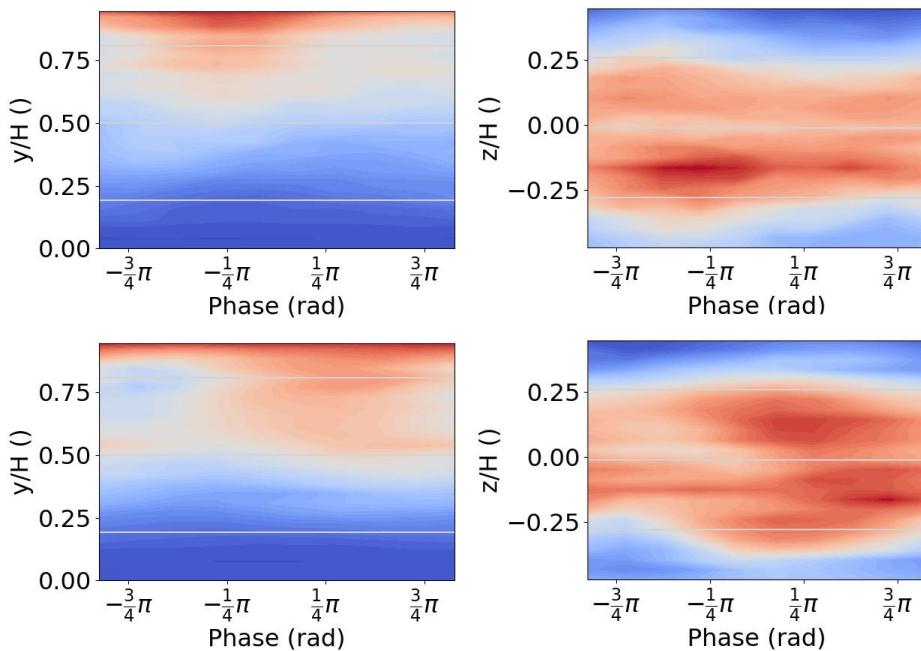


Abbildung 16: Phasengemittelte Konzentration in horizontaler (linke Seite) und vertikaler (rechte Seite) Richtung. Geschwindigkeit der Querströmung ist  $u = 15 \text{ m/s}$ . Die Frequenz der Anregung beträgt 69 Hz (oben) bzw. 180 Hz (unten) bei einer Amplitude von 0,2 u.

Bildern liegt in der Frequenz der akustischen Anregung, welche oben 69 Hz bzw. unten 180 Hz beträgt. In beiden Fällen beträgt die Schnelle 0,2 u. Es ist in beiden Fällen ein Umbiegen bzw. Aufstellen des Sprays zu beobachten, was zu Veränderungen der Konzentration in der Höhe in bestimmten Phasen der Anregung führt. Dies wurde auch schon in den PDA Messungen beobachtet. Der Fall bei 69 Hz. Zeigt ein Aufstellen des Sprays in der Region um  $-1/4\pi$ , was zu einer erhöhten Konzentration im oberen Bereich des Kanals führt. Derselbe Effekt tritt bei der höheren Frequenz von 180 Hz in der Region um  $1/4\pi$  auf, jedoch ist er hier über einen größeren Phasenbereich ausgeprägt. Dies lässt sich mit der Trägheit des Sprays erklären, welches in seiner Auf- und Abbewegung nicht im gleichen Maße der Anregung folgen kann. Ein Effekt,

welcher nicht mittels der PDA beobachtet wurde zeigt sich in den vertikalen Messungen (linke Bilder). Gleichzeitig mit der Auf- und Abbewegung kommt es zu einer Auf-

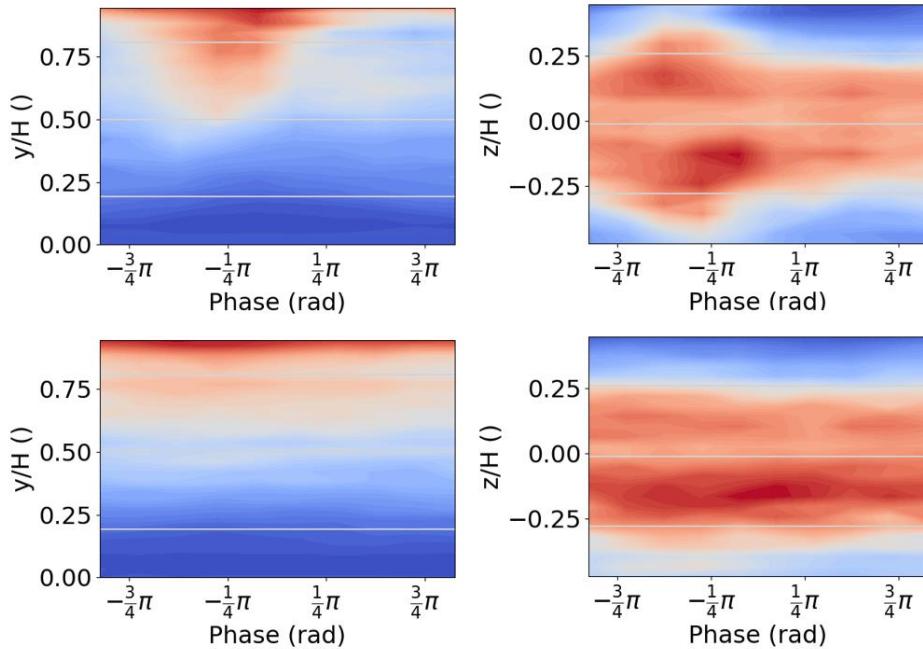


Abbildung 17: Phasengemittelte Konzentration in horizontaler (linke Seite) und vertikaler (rechte Seite) Richtung. Geschwindigkeit der Querströmung ist  $u = 15 \text{ m/s}$ . Die Amplitude der Anregung beträgt 0,4 u (oben) bzw. 0,07 u (unten) bei 69 Hz.

weitung des Sprays. Insbesondere dies hat eine deutliche Zunahme der Gesamtkonzentration in bestimmten Phasen der akustischen Anregung zur Folge. Übertragen auf ein Verbrennungssystem bedeutet dies eine periodische Schwankung der Brennstoffzufuhr und somit des Äquivalenzverhältnisses.

Eine Variation der Schnelle bei gleicher Frequenz ist in Abbildung 17 dargestellt. Im Fall oben handelt es sich um eine Anregung mit einer Schnelle von 0,4 u und im unteren beträgt die Schnelle 0,07 u. In beiden Fällen beträgt die Frequenz 69 Hz. Es lässt sich beobachten, dass der Effekt der Auf- und Abbewegung des Sprays im Fall der kleineren Amplitude fast verschwindet und die Konzentrationsverteilung über der Phase nahezu konstant bleibt. Im Falle der niedrigen Amplitude lässt sich deutlich eine Asymmetrie der Konzentration über der Kanalbreite erkennen. Diese wird auch in den anderen Fällen beobachtet. Ein Effekt der Spraydynamik konnte ausgeschlossen werden. Zu diesem Zweck wurde die Düse, bei gleichbleibenden weiteren Parametern um  $180^\circ$  gedreht in den Kanal eingebaut. Dies hatte eine Verlagerung der Asymmetrie auf die gegenüberliegende Seite zufolge. Somit konnte gezeigt werden, dass diese Asymmetrie inhärent aus der Düse resultiert.

## 5 Modellierung der Spraydynamik

Für die Modellierung der Spraydynamik wird ein zweidimensionales Modell gewählt, welches auf einem Kräftegleichgewicht an einem einzelnen Tropfen basiert. Die hierbei berücksichtigten Kräfte sind die auf den Tropfen wirkenden Widerstandskräfte in horizontaler sowie vertikaler Richtung. Außerdem werden die wirkende Schwerkraft und die Auftriebskraft des Tropfens berücksichtigt. Dies ergibt ein Differentialgleichungssystem mit vier Gleichungen. Dies sind die Gleichungen ((4)-(7)), wobei  $x$ ,  $z$  und  $t$  die räumlichen Koordinaten bzw. die Zeit darstellen. Der Index  $d$  steht für Eigenschaften des Tropfens und der Index  $g$  entsprechend für die Eigenschaften des umliegenden Gases, im vorliegenden Fall Luft. Die Geschwindigkeiten  $u$  und  $w$  beschreiben die horizontale und vertikale Geschwindigkeit. Der normalerweise in Gleichungen (6) und (7) vorkommende quadratische Ausdruck der Geschwindigkeit wird hier durch die Differenz der Geschwindigkeiten des Tropfens und des Gases, multipliziert mit dem Betrag dieser Differenz ( $|U_r|$ ), ausgedrückt. Dies geschieht um die Richtung der Bewegung des Tropfens korrekt beschreiben zu können. Unter anderem kann somit die Wirkung sehr großer Amplituden der akustischen Geschwindigkeit abgebildet werden. Diese wird der horizontalen Geschwindigkeitskomponente des Gases aufgeprägt. Die projizierte Fläche, das Volumen und die Dichte werden mit  $A$ ,  $V$  und  $\rho$  bezeichnet.  $C_d$  stellt den Widerstandsbeiwert des Tropfens dar, welcher für den Fall  $Re < 1000$  mit  $C_d = 24/Re_d^{2/3} \left[ 1 + 1/6 Re_d^{2/3} \right]$  bestimmt wird. Hierbei wird zur Berechnung der Reynoldszahl der Tropfendurchmesser sowie dessen Relativgeschwindigkeit zum Gas genutzt. Für den Fall größerer Reynoldszahlen wird der Wert des Widerstandskoeffizienten  $C_d = 0.424$ , was entsprechender Literatur entnommen werden kann.

$$\frac{dx}{dt} = u_d \quad (4)$$

$$\frac{dz}{dt} = w_d \quad (5)$$

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{-\frac{1}{2} \rho_g (u_d - u_g) |U_r| A_d C_D}{\rho_d V_d} \quad (6)$$

$$\frac{dw_d}{dt} = \frac{-\frac{1}{2} \rho_g (w_d - w_g) |U_r| A_d C_D + (\rho_g - \rho_d) V_d g}{\rho_d V_d} \quad (7)$$

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{\lambda}{2D} \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{m}_F L}{c_{p,F} m_d} \left( \frac{B_T}{B_M} - 1 \right) \quad (9)$$

Da sich im vorliegenden Fall der Durchmesser des Tropfens mit der Zeit ändert muss außerdem die, aus Verdampfung resultierende, Größenänderung des Tropfens berücksichtigt werden. Dies geschieht analog zu Lefebvre durch Einführung der Verdampfungskonstante  $\lambda$  in Gleichung (8). Diese beschreibt die Abnahme des Tropfendurchmessers infolge der Verdampfung und lässt sich anschaulich als die Steigung einer Kurve in einem Diagramm, in welchem der quadratische Durchmesser über der Zeit aufgetragen ist, beschreiben. Diese ist jedoch nur konstant, sobald der Tropfen eine konstante Temperatur erreicht hat. Anfänglich steigt die Tropfentemperatur, bis schließlich ein Gleichgewicht zwischen eingebrachter Wärme und der gleichzeitig stattfindenden Kühlung aufgrund der Verdampfung erreicht ist. Dies ist in Gleichung (9) dargestellt. Hier stellen  $B_T$  und  $B_M$  die Wärme- bzw. Massentransferzahl dar und es lässt sich leicht erkennen, dass die Änderung der Temperatur zu Null wird, sobald diese Zahlen gleich sind. Des Weiteren sind  $L$  die Verdampfungsenthalpie,  $m$  die Masse des Tropfens und  $c_{p,F}$  stellt die spezifische Wärmekapazität dar. Die Verdampfungsrate  $\dot{m}_F$  beschreibt, welche Masse pro Zeit von der Flüssigen in die Dampfphase übergeht. Die Berechnung dieser Größen ist im Anhang beschrieben. Das sich nun ergebende System aus 6 Differentialgleichungen ist gekoppelt, wobei die letzten beiden Gleichungen über den Durchmesser mit den anderen zusammenhängen. Mit ent-

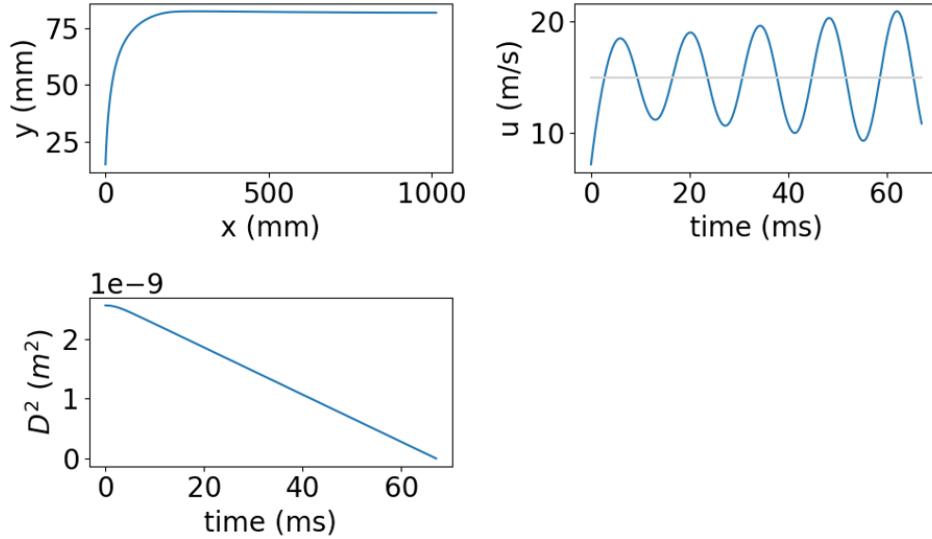


Abbildung 18: Ergebnisse einer Simulation der Tropfenverdampfung unter akustischer Anregung bei folgenden Bedingungen:  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $u = 15 \text{ m/s}$ ,  $u' = 6 \text{ m/s}$  und  $D_0 = 25 \mu\text{m}$ .

sprechend gewählten Anfangsbedingungen können diese Gleichungen nun mittels numerischer Verfahren integriert werden. Bei den im Folgenden dargestellten Ergebnissen kam das implizite Backward Differential Formula (BDF) Verfahren zum Einsatz. Die Anwendung expliziter Verfahren, wie z.B. Runge Kutta, führte nicht zum Erfolg.

Das Ergebnis einer Simulation ist exemplarisch in Abbildung 18 dargestellt. Sie wurde bei einer Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  und  $15 \text{ m/s}$  Querstömung unter akustischer Anregung durchgeführt. Die akustische Geschwindigkeit beträgt  $6 \text{ m/s}$  und der

Ausgangsdurchmesser ist  $25 \mu\text{m}$ . Die Simulation lief bis der Tropfen eine Strecke von 1m zurückgelegt hatte. Die Kurve oben links zeigt die Trajektorie des Tropfens. Es ist zu sehen, dass der Tropfen bis ca. 80 mm steigt und danach nur leicht abfällt, was auf den Widerstand in y-Richtung zurückzuführen ist. Der leichte Abfall lässt sich mit der Schwerkraft erklären. Im unteren linken Bild ist das oben erwähnte  $D^2$ -Gesetz erkennbar. Nach einer kurzen Aufheizphase ist die Abnahme des quadratischen Durchmessers mit der Zeit konstant. Die Steigung hierbei entspricht der Verdampfungskonstante  $\lambda$ . Der Einfluss der akustischen Anregung zeigt sich in Abbildung 18 ober rechts, wo der Verlauf der horizontalen Geschwindigkeit dargestellt ist. Die Schwankung dieser ist deutlich zu erkennen und Sie nimmt mit fortlaufender Simulationszeit zu. Dies ist auf die Abnahme der Tropfenmasse und somit Kleiner werdender Stokes-Zahl zurückzuführen.

Für die Modellierung des Sprays ist es nötig sehr viele Tropfen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen zu simulieren. Variiert werden im Wesentlichen die Tropfengröße, die Anfangsgeschwindigkeiten der Tropfen sowie die Phase der akustischen Anregung zum Start der Simulation, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Trajektorie hat. Eine statistisch relevante Menge an Startwertkombinationen kann aus Messungen der PDA gewonnen werden, da hier alle o.g. Größen enthalten sind.

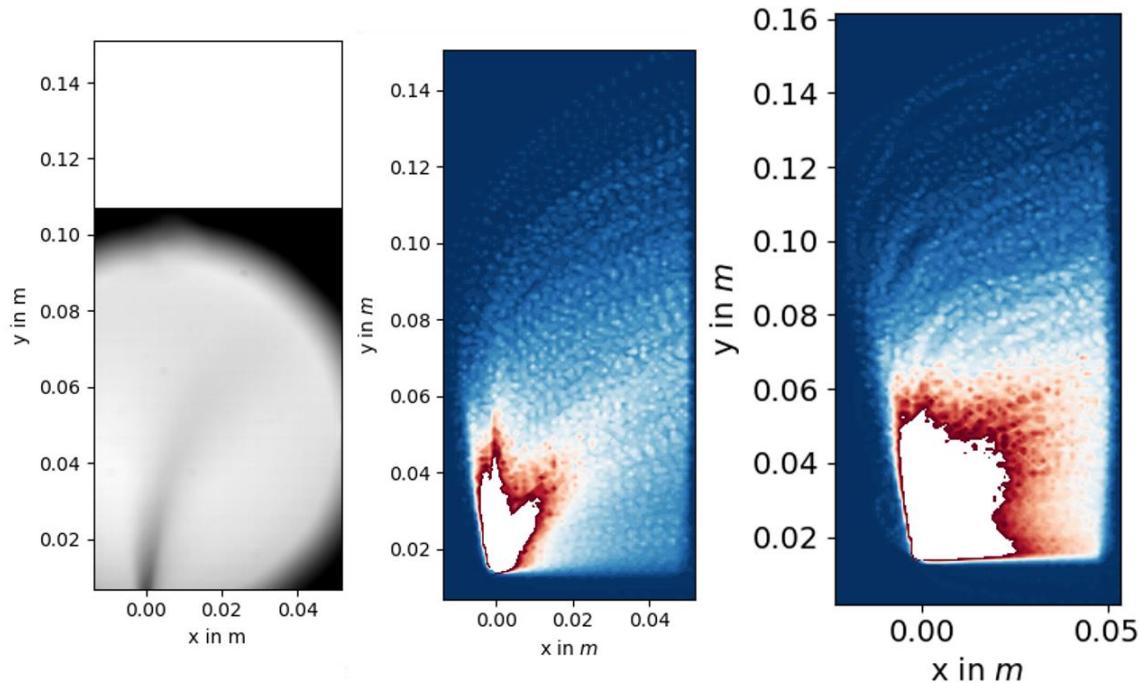


Abbildung 19: Vergleich von DBI (links) mit Simulationsergebnissen ohne (mitte) und mit (rechts) akustischer Anregung

Ein Vergleich zweier Simulationen, eine mit und eine ohne akustische Anregung, und Aufnahmen des Sprays mit Diffuse Back Illumination (DBI) ist in Abbildung 19 dargestellt. Die hierbei verwendete Temperatur beträgt  $400^\circ\text{C}$  und die mittlere Geschwindigkeit der Querströmung 15 m/s. Die Farbskala der Simulationsbilder (mitte und rechts) stellt das Volumen dar, dies ist die Größe, welche wesentlich die Absorption der DBI

beeinflusst. Die weißen Bereiche in den Simulationsbildern stellen das Ende der Farbskala dar, da diese Bereiche den größten Teil des Volumens enthalten. Im mittleren Bild, ohne Anregung, ist eine deutliche Bifurkation des Sprays erkennbar. Dies ist in der DBI nicht eindeutig zu erkennen, jedoch konnte es visuell beobachtet werden und der linke Teil ist im Wesentlichen auf wenige Große Tropfen zurückzuführen. Diese tragen einen großen Teil des Volumens und treten womöglich durch das Abschneiden der Farbskala stärker zutage. Das Rechte Bild zeigt deutliche "Knicke" in den Trajektorien, welche aus der akustischen Anregung resultieren.

## 6 Zusammenfassung Ausblick

Es wurde ein Prüfstand aufgebaut, welcher es ermöglicht gute Einblicke in die Interaktion eines Sprays mit akustischen Feldern zu erlangen. Sowohl Verdampfung als auch Variationen der Geschwindigkeits- und Durchmesserverteilungen können in guter Qualität bestimmt werden. Des Weiteren ist es möglich daraus resultierende Schwankungen der Konzentration des verdampften Sprays zu ermitteln.

Im AP 3.2.5 waren Untersuchungen an einem Mitteldruckprüfstand geplant. Dieser Prüfstand befand sich zum Zeitpunkt der Antragstellung noch in der Entwicklung. Leider verzögert sich die Fertigstellung dieses Prüfstandes erheblich, wodurch es nicht möglich ist die hier geplanten Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes durchzuführen. Die Verzögerungen erklären sich wie folgt.

Die Einschränkungen welche durch die Covid Pandemie entstanden sind führten zu erheblichen Verzögerungen auf Seiten der Universität wie auch der Lieferanten für die nötige Hardware. Insbesondere die durch weltweite Lieferengpässe bedingte eingeschränkte Verfügbarkeit elektronischer Bauteile bereitet Probleme. Nötige Komponenten zur Steuerung, Kontrolle und Datenerfassung sind, wenn überhaupt, mit sehr langen Lieferzeiten verfügbar.

Vorversuche zeigten eine bezüglich akustischer Stabilität fehlerhafte Erstauslegung des Prüfstandes. Aufgrund dessen ist es nötig essentielle Bestandteile des Prüfstandes zu überarbeiten. Dies trägt weiter zu erheblichen Verzögerungen bei.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Wang, S. Sanders and J. Jeffries, "Oxygenmeasurements at high pressures with vertical cavity surface-emitting lasers," *Applied Physics B*, no. 72, p. 865–872, 20 April 2001.

- [2] A. H. Lefebvre and V. G. McDonell, Atomization and Sprays, ISBN 9781498736268: CRC Press, 2017.
- [3] D. W. Bechert, "Sound absorption caused by vorticity shedding, demonstrated," *Journal of Sound and Vibration*, no. Volume 70, Issue 3, p. 389–405, Juni 1980.
- [4] A. Sinha, "Airblast spray in crossflow – Structure, trajectory and droplet sizing," *International Journal of Multiphase Flow*, no. 72, pp. 97-111, 2015.