

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Abschlussbericht

### COOREFLEX-turbo

Teilverbundprojekt: Verbrennung  
Vorhaben: 2.2.3a  
Forschungsvorhaben: FKZ 03ET7020H

# Zweibrennstoffverbrennungssystem für erweiterten Betriebsbereich

Zeitraum: 01.10.2013 – 30.04.2017  
Projektleitung: Bastian Werdelmann (Siemens AG)  
Industriepartner: Siemens AG

Autoren: Bastian Werdelmann, M.Eng.  
Datum: Oktober 2017  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des  
Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG UND VORAUSSETZUNGEN</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>PLANUNG UND DURCHFÜHRUNG DES PROJEKTS</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG DER HEIZÖLFÄHIGKEIT FÜR DAS STRAHLBRENNERKONZEPT</b> .....	<b>9</b>
4.1	Auslegung der Mehrbrennstoffinjektoren .....	9
4.1.1	Bestimmung von Korrelationen für die Eindringtiefe und Tropfengrößenverteilung ...	10
4.1.2	Vorauswahl von Injektorkonzepten .....	11
4.1.3	Numerische Voruntersuchung des Sprayverhaltens in der Vormischpassage .....	13
4.1.4	Hochdruck-Verbrennungstests .....	14
4.1.5	Verwertung der Ergebnisse der Verbrennungstests im Labormaßstab (am DLR Stuttgart, COOREFLEX 2.2.3b) .....	16
<b>5</b>	<b>BEWERTUNG DER VERKOKUNGSGEFAHR IM STRAHLBRENNER</b> .....	<b>19</b>
5.1	Verbesserung des Modellierungsansatzes von Zweiphasenströmungen in der Vormischpassage des Strahlbrenners .....	20
5.1.1	Verbesserung des Strahlzerfallsmodells .....	20
5.1.2	Rückkopplung der Quellterme in den Strömungslöser der Hauptströmung .....	22
5.1.3	Modelle für die Tropfen/Wand Interaktion und den Wandfilm .....	23
5.2	Modellierung der Zweiphasenströmung in der Vormischpassage .....	25
5.3	Verkokungsexperimente am Einzel-Emulsionstropfen .....	27
5.4	Bewertung des Verkokungsrisikos .....	30
<b>6</b>	<b>GESAMTBEWERTUNG DES STRAHLBRENNERKONZEPTS IM HEIZÖLBETRIEB</b> .....	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>NOTWENDIGKEIT, NUTZEN UND VERWERTBARKEIT</b> .....	<b>31</b>
7.1	Notwendigkeit der geleisteten Arbeit .....	31
7.2	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	32
7.3	Fortschritt bei anderen Stellen .....	33
<b>8</b>	<b>DANKSAGUNG</b> .....	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>34</b>

## 1 Abkürzungsverzeichnis

CFD	Numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics)
CO	Kohlenmonoxid
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
HBK-S	Hochdruck-Brennkammer-Prüfstand in Stuttgart
LES	Large Eddy Simulation
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
PDPA	Phase Doppler Particle Analyzer
SMD	Sauter Mean Diameter
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (-Modellierung)
FVM	Finite Volume Method

## 2 Aufgabenstellung und Voraussetzungen

Die Anforderungen an die Verbrennungstechnologie für Gasturbinen sind in den letzten Jahren einem sehr starken Wandel unterzogen worden. Der Grund hierfür ist die vielseitige Einsatzmöglichkeit von Gasturbinenkraftwerken. Gasturbinenkraftwerke erreichen die höchsten Wirkungsgrade, sind brennstoffflexibel, benötigen vergleichsweise geringe Investitionskosten und können vor allem mit hohen Lastgradienten gefahren werden. Heutzutage kann eine Gasturbine in 10 Minuten auf Grundlast belastet werden und ein Gas & Dampfturbinenkraftwerk benötigt hierzu auch nur eine Stunde. Gerade diese hohe Betriebsflexibilität ist in den vergangenen Jahren ein wesentlicher Grund für die Installation von Gasturbinenkraftwerken geworden. Im Rahmen der Zunahme des Anteils erneuerbarer Energien an der Energieerzeugung, die naturbedingt starken Erzeugungsschwankungen ausgesetzt sind, sind Kraftwerke notwendig, die die Lücke zwischen erzeugter Leistung und Verbrauchsanforderung schließen. Hierzu werden heute Gasturbinenkraftwerke eingesetzt, die eine möglichst hohe Betriebsflexibilität unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid und Stickoxid innerhalb eines weiten Betriebsbereiches besitzen. Kombikraftwerke zeichnen sich durch einen hohen thermischen Wirkungsgrad aus, und tragen somit auch dazu bei, die Emission von Kohlendioxid so gering wie möglich zu halten, und somit die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung zu erreichen.

In bisherigen AGTurbo Vorhaben hat die Siemens AG ein Strahlbrennerkonzept entwickelt, das bezüglich des CO Ausbrandes und der NO<sub>x</sub> Emissionen sehr vielversprechend erscheint [1]. Bei den bisherigen Entwicklungsarbeiten wurde der Erdgasbetrieb berücksichtigt. Ein wesentlicher Aspekt der verlässlichen Energieversorgung aus Gaskraftwerken ist allerdings auch deren Mehrbrennstofffähigkeit. Die Mehrbrennstofffähigkeit ermöglicht durch den Heizölbetrieb eine Sicherstellung der Stromversorgung für den Fall, dass Erdgaslieferungen aus politischen oder anderen Gründen reduziert werden. In der Vergangenheit war dies z.B. während des russisch-ukrainischen Gaskonfliktes der Fall. Aufgrund dieses Versorgungsengpases war ein Teil der Kraftwerksbetreiber gezwungen, ihre Gaskraftwerke entweder abzuschalten oder mit anderen Brennstoffen weiter zu betreiben. Deshalb ist oft die Verbrennung mit Heizöl als „Notbrennstoff“ in Gasturbinen vorgesehen. Im Heizölbetrieb sind im Vergleich zum Erdgasbetrieb zusätzliche physikalische Prozesse von Bedeutung.

Während Erdgas gasförmig vorliegt, muss das Öl zunächst zerstäubt und anschließend verdunstet werden. Erst nachdem der Brennstoff gasförmig vorliegt, kann die mikroskopische Mischung zwischen Brennstoff und Luft beginnen. Die Zeitskala der Tropfenaufheizung und Tropfenverdunstung bei Gasturbinenbedingungen liegt im Bereich der Zeitskala der Brennstoff/Luft-Mischung im Erdgasbetrieb. Entsprechend ist im Heizölbetrieb ein deutlich inhomogeneres Gemisch zwischen Brennstoff und Luft zu erwarten. Daher ist die Auslegung der Gemischaufbereitung im Heizölbetrieb für die Einhaltung der NO<sub>x</sub> Emissionsziele von besonderer Bedeutung. Die thermoakustische Stabilität von Gasturbinenverbrennungssystemen wird wesentlich durch die charakteristischen Zeitskalen der Gemischbildung und Verbrennung bestimmt. Beim Übergang vom Erdgas zum Heizölbetrieb verändern sich sowohl die Zeitskalen der Gemischbildung durch die zusätzlichen physikalischen Prozesse (Zerstäubung, Verdunstung) als auch die Zeitskala der Verbrennung durch die komplexere Reaktionskinetik. Entsprechend ist im Heizölbetrieb ein anderes thermoakustisches Verhalten als

im Erdgasbetrieb zu erwarten. Eine weitere Schwierigkeit bei der Entwicklung eines Heizölsystems ist die Verkokungsneigung des Heizöls, wenn es mit heißen metallischen Oberflächen in Berührung kommt. Die Verkokung an Bauteilen des Verbrennungssystems muss in jedem Fall verhindert werden, um den störungsfreien Betrieb des Verbrennungssystems zu gewährleisten.

Das vorliegende Forschungsvorhaben betrifft die Entwicklung eines Heizölsystems für ein bestehendes Strahlbrennerkonzept. Aus den Ausführungen im vorherigen Absatz ergeben sich für das Forschungsvorhaben folgende maßgebliche Ziele:

1. Einhaltung der Stickoxid Emissionen im Grundlastbetrieb sowie Einhaltung der Kohlenmonoxid Emissionen im Teillastbetrieb
2. Nachweis über die Fahrbarkeit des Flüssigbrennstoffsystems in Bezug auf thermoakustisches Verhalten
3. Bewertung der Machbarkeit des Heizölbetriebs bezogen auf die Verkokungsneigung

### **3 Planung und Durchführung des Projekts**

Das Projekt gliedert sich in zwei Hauptarbeitspakete:

1. Weiterentwicklung des Strahlbrennerkonzepts für den emissionsarmen Heizölbetrieb
2. Thermoakustische Auslegung des Strahlbrenners für den Heizölbetrieb

Der Projektplan ist in Abbildung 1 dargestellt.

Da während den Hochdruckverbrennungstests mit Flüssigbrennstoff kein störender Einfluss von thermoakustischen Schwingungen auf das Betriebsverhalten festzustellen war, rückte die Bearbeitung dieses Ziel (anders als im Antrag des Forschungsvorhabens geplant) in den Hintergrund. Stattdessen wurde (anders als im Antrag des Forschungsvorhabens geplant) festgestellt, dass das System ein erhöhtes Verkokungsrisiko aufweist. Die Bewertung der Machbarkeit mit dem Bezug auf die Verkokungsneigung wurde statt der Entwicklungsarbeit bezogen auf die Thermoakustik behandelt und findet sich im 3. Ziel des Forschungsvorhabens wieder. Einem entsprechenden Änderungsantrag wurde vom PTJ stattgegeben.

Das erste Arbeitspaket befasst sich mit der Entwicklung von Mehrbrennstoffinjektoren für das Strahlbrennerkonzept und deren Validierung. Für die Auslegung der Heizöl-Injektoren war die Entwicklung von Korrelationen für die Eindringtiefe und Tropfengrößenverteilung notwendig (AP 1.1). Mit Hilfe dieser Korrelationen konnten vielversprechende Injektorkonzepte abgeleitet werden (AP 1.2). Die Vorauswahl dieser Injektoren wurde mit dem Meilenstein 1.1 abgeschlossen. Die Validierung der Injektorkonzepte fand sowohl numerisch als auch experimentell statt. Als numerisches Auslegungswerkzeug wurde der CFD Code OpenFOAM genutzt (AP 1.3). Die numerischen Studien konnten früher als erwartet abgeschlossen werden. Für die experimentelle Validierung stand sowohl ein Hochdruckverbrennungsprüfstand als auch ein Prüfstand im Labormaßstab zur Verfügung. In dem Hochdruckprüfstand konnte das gesamte Verbrennungssystem bei thermodynamischen Bedingungen der Gasturbine getestet werden. Im Labormaßstab reduzierte sich das System auf einen einzigen Injektor plus

Vormischpassagen bei einem geringeren Betriebsdruck. Die Vorteile des Laborprüfstands sind die bessere Zugänglichkeit von Messsystemen und die geringeren Betriebskosten im Vergleich zum Hochdruckprüfstand. Hierdurch erhöhte sich die Anzahl der zu testenden Betriebspunkte und Hardwarevarianten. Ursprünglich war geplant, die experimentelle Validierung der Konzepte zuerst im Laborprüfstand zu vollziehen. Aus den gesammelten Daten, hätte eine weitere Bewertung der verschiedenen Injektorsysteme durchgeführt werden können. Die letztlich vielversprechendsten Konzepte wären dann im Hochdruckprüfstand bei den tatsächlichen thermodynamischen Bedingungen in der Gasturbine getestet worden. Da es Verzögerungen am Laborprüfstand gab, wurden die Messungen am Hochdruckprüfstand vorgezogen. Die Vorauswahl der Injektoren für den ersten Hochdrucktest wurde daher auf Basis der Konzeptbewertungsphase und der numerischen Ergebnisse durchgeführt. Für den Hochdrucktest musste der Versuchsbrenner erst konstruiert und gefertigt werden (AP 1.4). Die Durchführung der eigentlichen Hochdrucktests wurde im AP 1.5 behandelt. Die Machbarkeit des Heizölbetriebs des Strahlbrenners wurde mit dem Meilenstein 1.2 gezeigt. Da die Hochdrucktests vorgezogen wurden, konnte der Meilenstein deutlich eher erreicht werden.

Das zweite Arbeitspaket befasste sich ursprünglich mit der thermoakustischen Auslegung des Strahlbrenners. Es war zu erwarten, dass der Strahlbrenner im Heizölbetrieb ein anderes thermoakustisches Verhalten als im Erdgasbetrieb aufweist und weitere konstruktive Änderungen am System vorgenommen werden müssen. Gründe hierfür wurden bereits in der Einleitung erwähnt. Im Hochdrucktest (erstes Arbeitspaket) konnten allerdings keine Limitierungen durch Brennkammerschwingungen festgestellt werden. Daher war eine weitere Untersuchung des thermoakustischen Verhaltens nicht mehr notwendig. Während der Phase des ersten Arbeitspakets wurden allerdings Risiken für Wandbenetzung und Verkokung festgestellt. Es wurde daher entschieden, diese Risiken im Arbeitspaket zwei zu bewerten. Die Bewertung bestand aus einer Kombination aus numerischer als auch experimenteller Untersuchungen. Numerische Werkzeuge sollten benutzt werden, um die komplizierten Zustände an den potentiell benetzten Wänden näher zu untersuchen. Da bis dato keine numerischen Werkzeuge zur Untersuchung solcher Phänomene bei der Firma Siemens existierten, waren die Arbeitspakete 2.1 und 2.2 damit befasst, solche Werkzeuge zu entwickeln und zu validieren. Im Arbeitspaket 2.1 wurden numerische Ansätze geringer Ordnung genutzt, um eine Vorabuntersuchung zur Wandbenetzungsgefahr durch zu führen. Dieser Ansatz konnte die Dynamik einer angenommenen Tropfenverteilung vereinfacht beschreiben. Der Einfluss der Turbulenz der Hauptströmung wird mit diesem Ansatz nicht erfasst. Hierfür wurde ein 3D CFD Modell genutzt, das im Arbeitspaket 2.2 mit verbesserten Tropfen/Wand Interaktionsmodellen und einem Modell zur Beschreibung von Wandfilmen erweitert wurde. Die Validierung der numerischen Werkzeuge wurde mit dem Meilenstein 2.1 abgeschlossen. Im Arbeitspaket 2.3 ging es um die Beurteilung der Wandbenetzungsgefahr mit dem CFD Modell. Neben den Modellen für die Tropfen/Wand Interaktion und den Wandfilm, waren weitere Modelle für die Zerstäubung des Heizöls und die weitere Interaktion mit der Hauptströmung für eine ausreichende Beschreibung der Dynamik des Sprays entscheidend. Arbeitspaket 2.3 befasste sich daher mit einer generellen Verbesserung des Berechnungsansatzes für die Zweiphasenströmung. Mit dem verbesserten Modell wurde dann Aussagen über die Wandbenetzungsgefahr gemacht. Außerdem wurden zusätzliche Messungen an Einzeltropfen durchgeführt, um das Verkokungsverhalten von Emulsionen zu verstehen. Zusammen mit der Einschätzung der Tropfen/Wand Interaktion aus den numerischen Untersuchungen, wurde eine gesamtheitliche Bewertung der Verkokungsgefahr geboten.

Da im Laufe des Projekts weitere luftseitige Änderungen am Verbrennungssystem vorgenommen wurden, musste in einer zweiten Hochdruckkampagne eine Validierung des Flüssigbrennstoffsystems mit der geänderten Aerodynamik vorgenommen werden. Die Konstruktion und Fertigung des Versuchsträgers sowie die Hochdruckversuche wurden in den Arbeitspaketen 2.4 bzw. 2.5 durchgeführt. Im Rahmen des Arbeitspakets 2.6 wurde eine abschließende Bewertung zum Gesamtsystem durchgeführt. Dies beinhaltet zum einen die Bewertung der Erreichung der Emissionsziele und des thermoakustischen Verhaltens. Zum anderen wurde hier der Fokus auf die Bewertung der Verkokungsgefahr gelegt. Der Meilenstein 2.2 betrifft darauf basierend abschließend die Potentialaussage für den Strahlbrenner im Heizölbetrieb.

Abbildung 1: Projektplan  
8

COOREFLEX 2.2.3a Zweibrennstoffverbrennungssystem für erweiterten Betriebsbereich / FKZ: xxxxxxxx																																																																																																																																								
Laufzeit vom 01.10.2013 bis zum 30.04.2017																																																																																																																																								
Jahr	2013												2014												2015												2016												2017												Erreicht																																																																											
Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																												
Bezeichnung																																																																																																																																								
<b>AP0 - Projektmanagement</b>	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
<b>AP1 - Weiterentwicklung des Strahlbrennerkonzeptes für den Emissionsarmen Ölbetrieb</b>	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP1.1 - Entwicklung von 1D Korrelationen für die Primärzerstäubung im für Strahlbrenner relevanten Parameterbereich und Auslegung mehrerer Zerstäuberkonzepte	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP1.2 - Konzeptphase Mehrbrennstoffinjektor	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP1.3 - Konzeptbewertung mit numerischen Auslegungswerkzeugen	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
<b>MS 1.1 - Vorauswahl der Injektorkonzepte</b>	[Milestone: 10.04.2014]																																																																																																																																							
AP1.4 - Konstruktion und Fertigung eines Versuchs Brenners	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP1.5 - Hochdruckversuche	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
<b>MS 1.2 - Nachweis der Machbarkeit des Ölbetriebs eines Strahlbrenners</b>	[Milestone: 10.04.2014]																																																																																																																																							
<b>AP2 - Thermoakustische Auslegung des Strahlbrenners für den Ölbetrieb</b>	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP2.1 - Entwicklung von 1-D Modellen zur Bewertung von Wandbenetzungsrisiken	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP2.2 - Evaluierung, Implementierung und Validierung von Tröpfchen-Wand Modellen in den CFD Code	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
<b>MS 2.1 - Validierung der implementierten Tröpfchen-Wand Modelle</b>	[Milestone: 10.04.2016]																																																																																																																																							
AP2.3 - Beurteilung der Verkokungsgefahr im Strahlbrenner mittels CFD	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP2.4 - Konstruktion und Fertigung des Versuchs Brenners	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP2.5 - Hochdruckversuche	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
AP2.6 - Abschlussbewertung	[Gantt bar: 100% completion]																																																																																																																																							100%
<b>MS 2.2 - Potentialaussage für den Strahlbrenner im Ölbetrieb</b>	[Milestone: 10.04.2017]																																																																																																																																							100%

**Legende**

Soll- Planung gemäß Zuwendungs- bzw. Änderungsbescheid

- Arbeitspaket APx
- Teil-Arbeitspaket APx.x
- Fertigstellungsgrad

Durchgeführte Arbeiten

- Arbeitspaket APx
- Teil-Arbeitspaket APx.x

Meilensteine (Ergebnisse)

## 4 Entwicklung und Validierung der Heizölfähigkeit für das Strahlbrennerkonzept

In vorherigen AGTurbo Projekten konnte gezeigt werden, dass das Strahlbrennerkonzept ein gutes Potential für die Erfüllung aktueller und zukünftiger Anforderungen an die schadstoffarme Verbrennung in Gasturbinen bietet. Die Mehrbrennstofffähigkeit (also die Möglichkeit die Gasturbine auch mit Heizöl zu betreiben) wurde bis dato noch nicht gezeigt. Das grundsätzliche Prinzip des Strahlbrenners, ist die Anordnung von mehreren Vormischpassagen in einem Strahlmuster. In jeder dieser Passagen wird Brennstoff mit der Verbrennungsluft vermischt (siehe Abbildung 2). Das Gemisch verlässt die Passage als unverdrallte Strömung. Um eine möglichst gute Mischung zu erzeugen, wird der Brennstoff möglichst weit stromauf der Passage eingedüst.

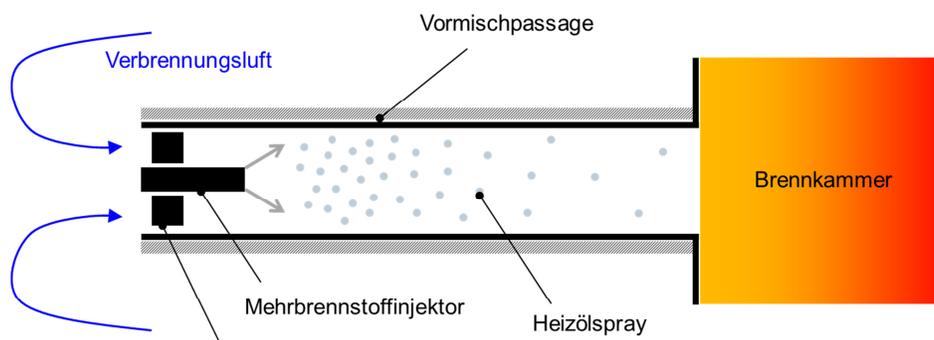


Abbildung 2: Prinzipskizze der Vormischpassage des Strahlbrenners

Die Mehrbrennstofffähigkeit wird im Vergleich zum bestehenden System insoweit gewährleistet, dass ein Mehrbrennstoffinjektor entwickelt wird, der sowohl Erdgas als auch Heizöl in die Vormischpassage eindüsen kann. Auch hier wirkt eine lange Vormischstrecke positiv, da neben der verbesserten Mischung auch eine verstärkte Vorverdunstung des Kraftstoffs ermöglicht wird. Entsprechend nachteilig wirkt sich eine große Mischungslänge allerdings auf ein erhöhtes Risiko der Wandbenetzung aus, da Tröpfchen des Heizölsprays durch die Turbulenz der Hauptströmung zur Wand der Vormischpassage getragen werden. Eine direkte Benetzung der Wand durch eine falsche Auslegung des Injektors muss in jedem Fall verhindert werden. Des Weiteren muss bei der Auslegung des Injektors auf die Tropfenverteilung geachtet werden. Je feiner das Heizöl zerstäubt wird, desto größer ist die Vorverdunstung des Sprays und desto geringer sind die Emissionswerte des Verbrennungssystems.

### 4.1 Auslegung der Mehrbrennstoffinjektoren

Wie einleitend erwähnt, wird bei der Auslegung des Injektors primär auf die Tröpfchengrößenverteilung als auch die örtliche Verteilung des Brennstoffs hinter der Eindüsung fokussiert. Als Eindüskonzepte wurden sogenannte Plain-Jet Injektoren als auch Pressure-Swirl Injektoren in Betracht gezogen. Bei Plain-Jet Injektoren handelt es sich um einfache Flüssigstrahlen, die durch kleine Bohrungen im Injektor in die Hauptströmung eindringen. Durch die aerodynamischen Kräfte der Hauptströmung, zerfällt der Strahl in Ligamente und weiter in kleine Tröpfchen. Neben dem Durchmesser und der Anzahl der Injektorbohrungen ist auch

der Eindüswinkel von großer Bedeutung. Er bestimmt zum einen maßgeblich die Eindringtiefe des Sprays, als auch die Tropfengrößenverteilung, da sich die aerodynamischen Kräfte der Hauptströmung mit dem Winkel des Strahls ändern.

#### 4.1.1 Bestimmung von Korrelationen für die Eindringtiefe und Tropfengrößenverteilung

In der Literatur ist die angewinkelte Eindüsung in eine Querströmung bei den relevanten thermodynamischen und geometrischen Randbedingungen nicht behandelt. Messungen die bereits bei Siemens vor Projektstart durchgeführt wurden, wurden daher innerhalb des Projekts ausgewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung sind Korrelationen für die Eindringtiefe und die Tropfengrößenverteilung, die für eine Auslegung von Plain-Jet Injektoren im vorliegenden System verwendet werden können.

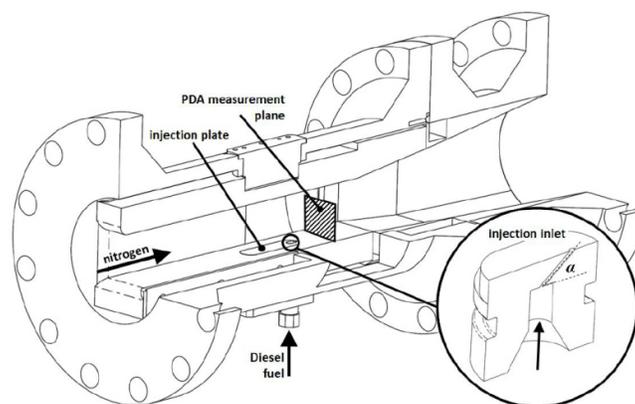


Abbildung 3: Laborprüfstand zur Charakterisierung von Heizölsprays

In Abbildung 3 ist der Laborprüfstand der Firma Siemens zur Charakterisierung von Heizölsprays gezeigt. Die Testsektion besteht aus einem rechteckigen Kanal. Am Boden des Kanals können verschiedene Injektorplatten eingesetzt werden, die die Injektorbohrung beinhalten. Der Kanal ist mit Stickstoff durchströmt. Das Heizöl wird durch die Injektorplatte eingespritzt. In einer Ebene stromab des Injektors wurden PDPA-Messungen durchgeführt, die eine räumliche Auflösung der Tropfendurchmesser- und Tropfenvolumenstrom-Verteilung in dieser Ebene ermöglichen. Diese räumlichen Verteilungen sind in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt.

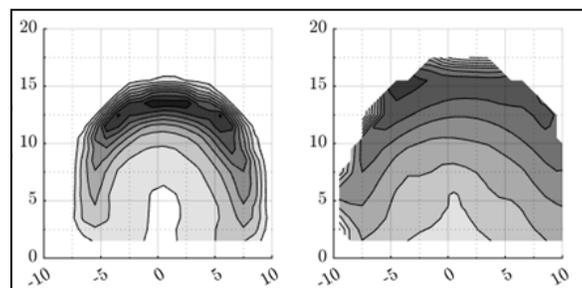


Abbildung 4: Verteilung des Tropfenvolumenstroms (links) und Verteilung des mittleren Sauter-Durchmessers (rechts)

Aus diesen Daten wurden innerhalb des Projekts Korrelationen für die Eindringtiefe des Sprays und den globalen mittleren Sauter-Durchmessers in der gezeigten Ebene hergeleitet. Die Eingangsgrößen in die Korrelationen sind dimensionslose Kennzahlen, die die maßgeblichen Betriebsparameter abbilden. Diese dimensionslosen Kennzahlen sind das Impulsstromdichteverhältnis, das Dichteverhältnis, die Reynoldszahl der Hauptströmung sowie die aerodynamische Weberzahl.

#### **4.1.2 Vorauswahl von Injektorkonzepten**

Die in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Korrelationen wurden angewendet, um vielversprechende Plain-Jet Injektorkonfigurationen abzuleiten. Die Designparameter sind der Durchmesser der Injektorbohrungen, die Anzahl der Bohrungen des Injektors sowie der Winkel zwischen der Hauptströmungsrichtung und der Richtung der Eindüsung. Das Auslegungsziel ist es, einen möglichst kleinen Tropfendurchmesser bei einer Eindringtiefe unterhalb eines Wandkontakts zu erreichen. Des Weiteren musste beachtet werden, dass die effektive Fläche des Injektors (also die Anzahl und Größe der Injektorbohrungen) nicht zu groß gewählt wurde, um bei niedrigen Teillastbedingungen weiterhin ein ausreichend großes Druckgefälle über die Injektorbohrungen zu ermöglichen.

Mit Hilfe von Korrelationen aus der Literatur (z.B. [2]) wurden des weiteren Pressure-Swirl Düsen ausgelegt. Die Designparameter dieses Düsentyps beeinflussen hauptsächlich den Winkel und die Dicke des sich ergebenden Flüssighohlkegels, sowie die Geschwindigkeit mit der sich der Kegel gegen die Hauptströmung bewegt. Zur Reduzierung des Wandbenetzungsrisikos wurden des weiteren Zerstäuber entwickelt, die koaxial in die Hauptströmung eindüsen und somit nur eine geringe radiale Eindringtiefe in die Vormischpassage erzeugen sollen. Der Nachteil einer solchen Eindüsung ist die schlechte Zerstäubung, da die aerodynamischen Kräfte aufgrund von geringen Relativgeschwindigkeiten zwischen Hauptströmung und Flüssigstrahl eher klein ausfallen.

Aus den Korrelationen und Literaturdaten wurden etwa 15 Injektoren definiert, die einer weiteren experimentellen Untersuchung unterzogen wurden. Die Injektoren wurden am NRC (National Research Center) in Kanada getestet. Die Messungen wurden nicht aus den Projektgeldern bezahlt. Die Auswertung der Messungen und die Verwendungen der Daten in der Entwicklung des Mehrbrennstoffsystems waren allerdings Teil des Projekts.

Die Messungen wurden bei zwar kalter aber mit Druck beaufschlagter Luft durchgeführt. So konnten die für die Tropfendynamik entscheidenden dimensionslosen Kennzahlen entsprechend der Gasturbine angepasst werden. Die Vormischpassage wurde aus Acrylglas gefertigt. Dadurch war es möglich die Ausbreitung des Sprays in der Passage zu bewerten. In Abbildung 5 sind die Sprühstrahlen von unterschiedlichen Injektoren bei gleichen Betriebsbedingungen gezeigt. Es ist bereits qualitativ zu erkennen, dass die 90° Eindüsung in die Hauptströmung die größte Eindringtiefe erzeugt und somit auch die stärkste Interaktion zwischen Tropfen und Wand erzeugen wird. Auch bei den anderen Düsen (Eindüsung mit Winkel kleiner 90° und Pressure-Swirl) sind turbulente Strukturen im Sprühbild zu erkennen, die ebenfalls eine Tropfen/Wand Interaktion hervorrufen können.

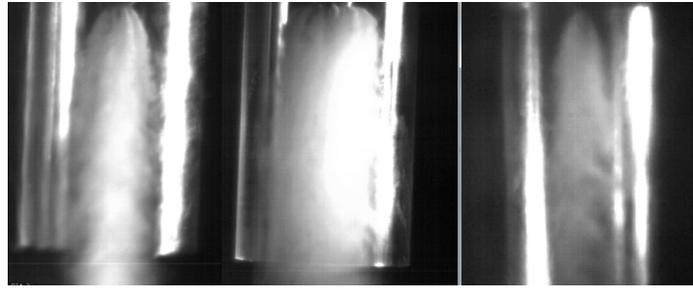


Abbildung 5: Sprühstrahlen von unterschiedlichen Injektortypen. Links: Plain-Jet Injektor mit Eindüswinkel  $< 90^\circ$ , Mitte: Plain-Jet Injektor mit  $90^\circ$  Eindüswinkel, Rechts: Pressure-Swirl Injektor

Durch bildbearbeitende Methoden wurden die Ergebnisse des Experiments weiter analysiert. Da es sich um Highspeed Videoaufnahmen handelt, konnte das instationäre Verhalten des Sprays untersucht werden. Es wurde darauf geachtet, Düsen auszuwählen, die möglichst stabile Sprays und wenig Anzeichen für Wandbenetzung zeigen. Des Weiteren wurden am Austritt des Kanals PDPA Messungen durchgeführt, um die Güte der Zerstäubung zu quantifizieren. In Abbildung 6 ist exemplarisch ein Vergleich der Tropfengrößenverteilung für verschiedene Düsenkonfigurationen dargestellt.

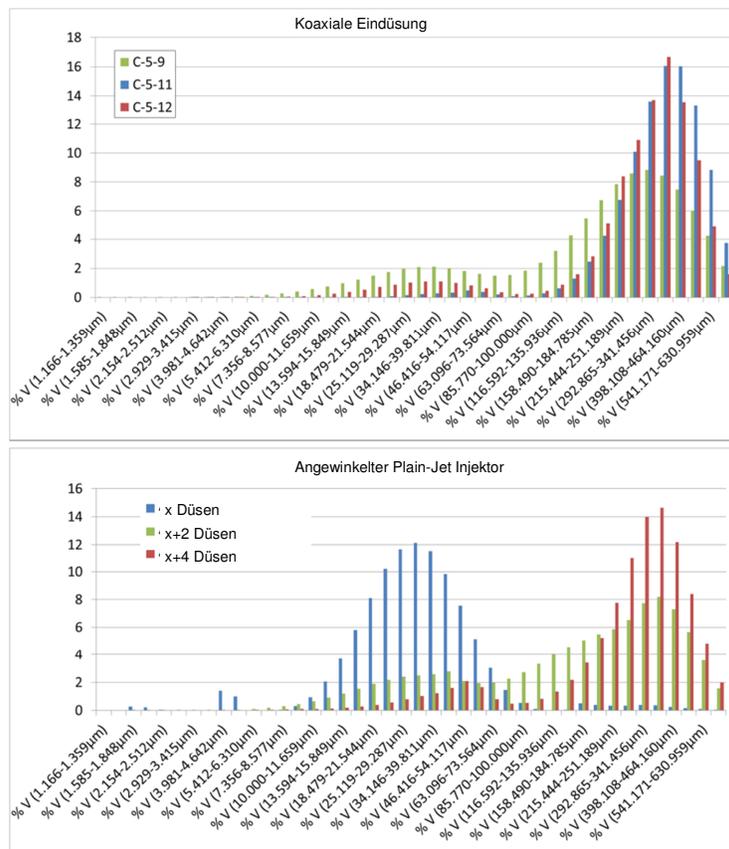


Abbildung 6: Volumenanteil verschiedener Tropfengrößenbereiche am Austritt der Vormischpassage gemessen mit Malvern. Oben: Koaxiale Eindüsung in die Hauptströmung. Unten: Angewinkelte Eindüsung in die Hauptströmung. Farben entsprechen verschiedener Anzahl von Düsenbohrungen.

Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen der koaxialen und der angewinkelten Eindüsung in die Hauptströmung. Da die koaxiale Eindüsung eine wesentlich geringere Relativgeschwindigkeit zur Hauptströmung besitzt, verschiebt sich die Tropfengrößenverteilung generell zu höheren Werten im Vergleich zur angewinkelten Eindüsung. Einen großen Einfluss auf die Verteilung hat ebenfalls die Anzahl der Düsenbohrungen bei der angewinkelten Eindüsung. Mit ansteigender Anzahl von Bohrungen verschiebt sich die Verteilung zu größeren Werten. Hierfür kann unter anderem die Interaktion zwischen den Sprühstrahlen verantwortlich sein, die mit steigender Anzahl von Bohrungen tendenziell intensiver wird.

Auf Grundlage dieser Datensätze wurde eine weitere Auswahl von Düsenkonfigurationen getroffen. Insgesamt wurden sechs Injektoren für eine weitere Untersuchung im Hochdruck-Verbrennungsprüfstand am DLR in Köln und dem Labor-Verbrennungsprüfstand am DLR in Stuttgart ausgewählt. Darunter waren sowohl Plain-Jet Injektoren mit angewinkelter und koaxialer Eindüsung als auch Pressure-Swirl Injektoren.

#### **4.1.3 Numerische Voruntersuchung des Sprayverhaltens in der Vormischpassage**

Eine numerische Untersuchung des Sprayverhaltens in der Vormischpassage mittels CFD ermöglicht im Vergleich zur experimentellen Studie einen größeren und detaillierten Informationsgehalt. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Simulationsansatz lediglich mit einfachen Testfällen validiert. Die Zweiphasenströmung in der Passage ist durchaus sehr komplex. Daher sind diese Ergebnisse mit einer gewissen (unbekannten) Unsicherheit behaftet.

Es wurde das Euler-Lagrange CFD Verfahren in OpenFOAM [3] verwendet. Die Geometrie umfasst ein Segment des Gesamtverbrennungssystems. Daher sind geometrische Einbauten stromauf der Vormischpassage berücksichtigt, die maßgeblich die Hauptströmung in der Vormischpassage beeinflussen. Durch die Anwendung des URANS Verfahrens zur Modellierung der Turbulenz der Hauptströmung, werden großskalige Wirbel zeitlich aufgelöst. Die Dispersion des Sprays durch die Hauptströmung wird somit auf diesen Skalen berücksichtigt. Die Flüssigphase wird durch Partikel abgebildet, die jeweils einen Teil der Tropfenpopulation repräsentieren. Da nicht alle Tropfen aufgelöst werden, wird somit ein statistischer Fehler akzeptiert. Die Interaktion zwischen den Partikeln und dem Finite-Volumen-Verfahren (FVM), das für die Hauptströmung verwendet wird, wird durch geeignete Modelle beschrieben. Hierzu zählen unter anderem Modelle für den Masseaustausch (durch Tropfenverdampfung), Wärmeaustausch, Impulsaustausch und Tropfenzerfall.

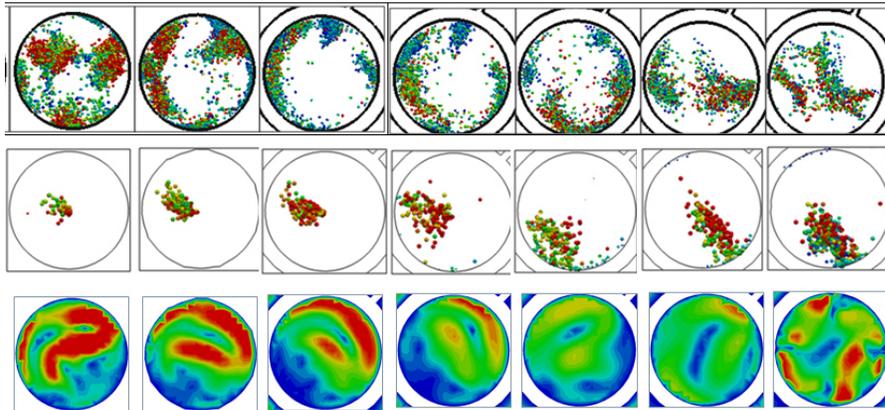


Abbildung 7: Schnittebenen durch die Vormischpassage. Von links nach rechts ist der Abstand von der Eindüsung aufsteigend. Oben: Partikelverteilung bei einer 90° Eindüsung in die Hauptströmung. Mitte: Partikelverteilung bei einer coaxialen Eindüsung in die Hauptströmung. Unten: Geschwindigkeitsprofil der Hauptströmung (Betrag der Geschwindigkeitskomponenten rechtwinklig zur Hauptströmung).

Aufgrund der noch ausstehenden Validierung beschränkten sich die Simulationen auf Konfigurationen, die deutliche Unterschiede aufweisen. Daher wurde zum einen eine Konfiguration mit 90° Eindüsung und eine Konfiguration mit coaxialer Eindüsung in die Hauptströmung betrachtet. In Abbildung 7 sind die Partikelverteilungen entlang der Vormischpassage gezeigt. Bei der 90° Eindüsung ist bereits nach kurzer Mischstrecke mit einer intensiven Interaktion mit der Kanalwand zu rechnen. Bei der coaxialen Eindüsung ist erst ab einer längeren Mischstrecke damit zu rechnen. Allerdings sieht man, dass die Dispersion der Partikel durch die großskalige Turbulenz im Kanal selbst bei coaxialer Eindüsung zu einer Tropfen/Wand Interaktion führen wird. Die großskaligen Wirbel sind ebenfalls in Abbildung 7 dargestellt. Ebenfalls sichtbar sind die Unterschiede in der Homogenität der Tropfenverteilung. Die coaxiale Eindüsung erzeugt ein Spray, das sich weniger gut in den Kanalquerschnitten verteilt und sich jeweils auf eine kleinere Fläche konzentriert als das Spray der 90° Eindüsung. Die Studie zeigt im Wesentlichen, dass scheinbar unabhängig vom Eindüskonzept je nach Mischlänge eine Interaktion zwischen Tropfen und Wand zu erwarten ist.

#### 4.1.4 Hochdruck-Verbrennungstests

Wie bereits weiter oben beschrieben, wurden sechs Injektoren zur weiteren Untersuchung ausgewählt. In den vorherigen Studien beschränkte man sich auf das Verhalten des Heizöl-Sprays. Diese Studien zielten vor allem darauf ab, Injektoren auszuwählen, die ein mögliches Risiko der Wandbenetzung minimieren, als auch ein homogenes und fein zerstäubtes Spray generieren. Ein feines und homogenes Spray verbessert die Vorverdunstung und minimiert die Ungemischtheit im Brennstoff/Luft Gemisch. Hinsichtlich der Verbrennung sollte dies zu geringeren Schadstoffemissionswerten führen. Um dies zu validieren, wurden Hochdruckverbrennungstests am DLR in Köln (Prüfstand siehe Abbildung 8) durchgeführt. Diese Tests werden bei thermodynamischen Bedingungen der Gasturbine (Hochdruck, Hochtemperatur) gefahren und mit dem vollständigen Verbrennungssystem betrieben. Diese zwei Anforderungen erzeugen eine hohe Komplexität und hohe Kosten. Daher können in gegebener Zeit nur wenige Betriebspunkte und Injektorkonfigurationen getestet werden. Aus diesem

Grund musste man sich für die Hochdrucktests auf die vielversprechendste Konfiguration beschränken. Ein detaillierter Vergleich zwischen verschiedenen Hardwarekonfigurationen konnte in einem Laborprüfstand (ebenfalls mit reagierender Strömung) am DLR Stuttgart durchgeführt werden.

Die Hauptziele der Hochdruck-Verbrennungstests am DLR Köln waren:

1. Die grundsätzliche Betriebbarkeit des entwickelten Mehrbrennstoffsystems sollte gezeigt werden.
2. Das Risiko der Verkokung sollte bewertet werden.
3. Limitierungen des Betriebs des Verbrennungssystems durch Brennkammerschwingungen sollten identifiziert werden.
4. Die Konformität mit Schadstoffgrenzwerten (NOx und CO) sollte demonstriert werden.

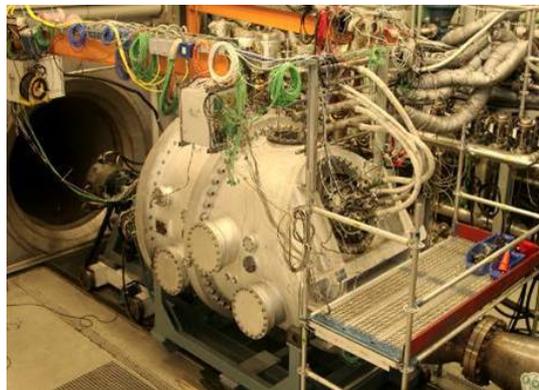


Abbildung 8 Hochdruckbrennkammerprüfstand am HBK4 des DLR-Instituts für Antriebstechnik in Köln

Mit den Verbrennungstest konnte gezeigt werden, dass das Verbrennungssystem über einen weiten und ausreichend großen Bereich mit Heizöl betrieben werden konnte. Brennkammerschwingungen waren bei der Optimierung der Betriebszustände nicht limitierend. Bei der Ziel-Turbineneintrittstemperatur bei Grundlast konnte gezeigt werden, dass die NOx Emissionen unterhalb der Grenzwerte lagen (Abbildung 9), wenn eine gewisse Menge an Wasser zum Brennstoff hinzugefügt wurde.

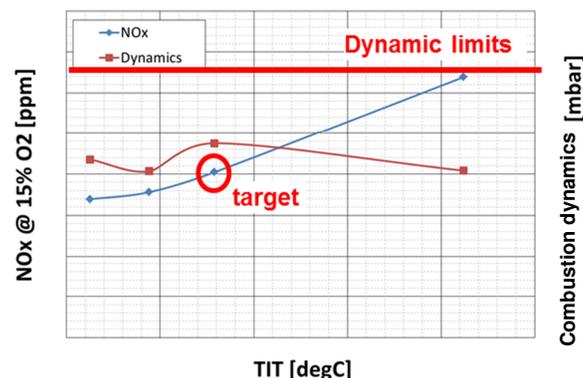


Abbildung 9: NOx Emissionen

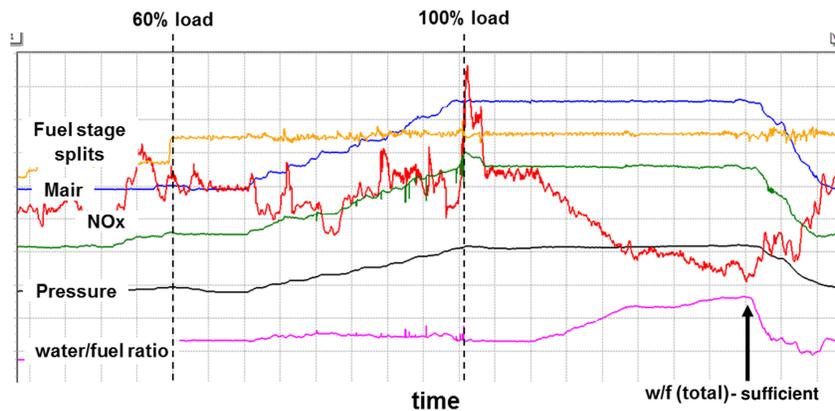


Abbildung 10: Betriebsparameter

In Abbildung 10 ist das Hochlasten von 60% Last auf Grundlast zu sehen. Bei Grundlast wurde eine Variation des Wasser/Heizöl Verhältnisses vorgenommen. Ab einem bestimmten Wert konnten die Grenzwerte für NOx Emissionen unterschritten werden.

Mit den Hochdruck-Testkampagnen konnte gezeigt werden, dass das Verbrennungssystem im Heizölbetrieb grundsätzlich bei gegebenen Randbedingungen und Grenzwerten betreibbar ist. Es konnten nach Inspizierung der Hardware auch keine Anzeichen von Verkokungen festgestellt werden. Da die Verkokung des Brennstoffs allerdings ein Prozess ist, der auf recht langen Zeitskalen abläuft, reichte der Test für eine endgültige Bewertung der Verkokungsgefahr nicht aus. Da in vorherigen Untersuchungen Anzeichen für eine Interaktion zwischen Tröpfchen und Wand des Vormischkanals gefunden wurden, entschied man sich dazu die Verkokungsgefahr im Arbeitspaket 2 weiter zu untersuchen.

#### 4.1.5 Verwertung der Ergebnisse der Verbrennungstests im Labormaßstab (am DLR Stuttgart, COOREFLEX 2.2.3b)

Des Weiteren wurden Verbrennungstest im Labormaßstab durchgeführt. Diese Verbrennungstests wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens COOREFLEX 2.2.3b unseres Projektpartners DLR Stuttgart durchgeführt [4]. Die Ergebnisse dieser Messungen waren wesentlicher Bestandteil in der Bewertung verschiedener Injektorkonzepte bzgl. der NOx Emissionen. Außerdem konnten neue Erkenntnisse bzgl. der Tropfen/Wand Interaktionen gewonnen werden. Die Daten des DLR Stuttgart konnten ebenfalls als hervorragende Validierungsdaten für unser CFD Programm genutzt werden. Ein kleiner Teil der Ergebnisse wird hier vorgestellt. Die vollständige Beschreibung der Messungen und des Versuchsaufbaus sind in [4] nachzulesen.

Der Laborprüfstand des DLR ist in Abbildung 11 gezeigt. Der Versuchsaufbau beschränkt sich auf eine einzelne Vormischpassage. Stromauf des Eintritts in die Passage befindet sich eine S-förmige Einlaufstrecke. Durch diese Maßnahme, sollte das Strömungsprofil am Eintritt der Vormischpassage im eigentlichen Verbrennungssystem simuliert werden. In der Vormischpassage wurde wie im eigentlichen Verbrennungssystem der Mehrbrennstoffinjektor positioniert.

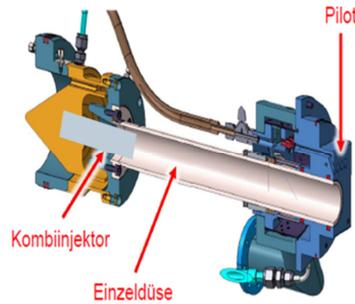


Abbildung 11: Laborprüfstand am DLR Stuttgart

Der Laborprüfstand hat den Vorteil, dass die Systemkomplexität und die Betriebskosten wesentlich geringer sind als im Hochdruckprüfstand. Außerdem besitzt der Prüfstand eine bessere optische Zugänglichkeit. Dadurch lässt sich das Flammenverhalten und die Spraykonzentration am Austritt der Passage bewerten. Der Nachteil besteht darin, dass der Prüfstand nicht bei den eigentlichen Gasturbinenbedingungen betrieben wird – weder bezogen auf die Systemgeometrie noch auf die Betriebsbedingungen. Die Daten eignen sich daher weniger um eine Validierung der Emissionswerte durchzuführen, sondern mehr um die Unterschiede zwischen den Injektorkonfigurationen zu bewerten. Die Messungen wurden auf die Konfigurationen mit angewinkelter Eindüsung und Pressure-Swirl Injektor fokussiert, da diese aus den vorherigen Studien das größte Potential zeigten. In Abbildung 12 sind die NO<sub>x</sub> Emissionen für die angewinkelte Eindüsung (AJICF) und den Pressure-Swirl Injektor über dem Wasser/Brennstoff Verhältnis (W/F) gezeigt. Vor allem bei geringem Wasseranteil in der Emulsion wies der Plain-Jet Injektor deutlich geringere NO<sub>x</sub> Werte auf. Hierdurch bestätigte sich die Auswahl des Plain-Jet Injektors in der Hochdruck-Testkampagne. Im Weiteren konzentrieren sich die Analysen daher auf den Plain-Jet Injektor mit angewinkelter Eindüsung.

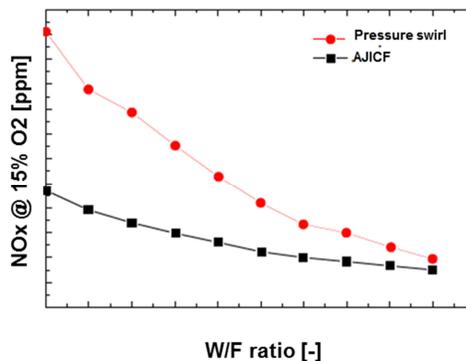


Abbildung 12: NO<sub>x</sub> Emissionen im Laborprüfstand

Eine weitere nützliche Verwendung der Daten vom DLR Stuttgart waren die Temperaturmessungen an der Wand der Vormischpassage und die Mie-Streuungsmessungen des Sprays am Austritt der Vormischpassage. Diese Daten gaben Aufschluss über die Interaktion zwischen Tröpfchen und Wand. In Abbildung 13 ist die Temperatur an der Wand über der Länge der Vormischpassage gezeigt.

Im linken Bild ist ein Vergleich für verschiedene Heizölmassenströme zu dem Betrieb mit Erdgas gezeigt. Die Temperaturen an der Wand variieren hier in der Größenordnung 30K. Eine Temperaturabsenkung in dieser Größenordnung lässt sich durch die Temperaturabsenkung in der Hauptströmung durch die Verdampfungsenthalpie des Heizöls erklären. Die Wandtemperatur lag hier im Bereich der Leidenfrost Temperatur des Heizöls. Eine Wandbenetzung könnte daher selbst beim Transport von Tröpfchen zur Wand unter Umständen unterbunden werden. Da nach diesen Tests keine Anzeichen von Verkokung an den Wänden der Vormischpassage festgestellt werden konnten, ist davon auszugehen, dass die Tröpfchen keinen Wandfilm gebildet haben.

Im rechten Bild ist ein Vergleich für verschiedene Wasseranteile in der Emulsion bei gleichem Brennstoffmassenstrom gezeigt. Die Temperaturunterschiede liegen hier im Bereich von 150K zwischen dem Fall mit reinem Heizöl und dem größten Wasseranteil. Eine solche Temperaturabsenkung kann nicht durch die Temperaturabsenkung in der Gasströmung durch die Verdampfungsenthalpie der Emulsion erklärt werden. Ein direkter und intensiver Wärmeaustausch zwischen Flüssigkeit und Wand muss daher stattfinden. Dies deutet auf den direkten Kontakt zwischen Flüssigkeit und Wand hin. Die Wandtemperatur liegt deutlich unter der Leidenfrost Temperatur des Heizöls. Auch hier konnte allerdings keine Verkokung an der Wand festgestellt werden. Ein positiver Einfluss des Wassers auf das Verkokungsverhalten wird daher vermutet.

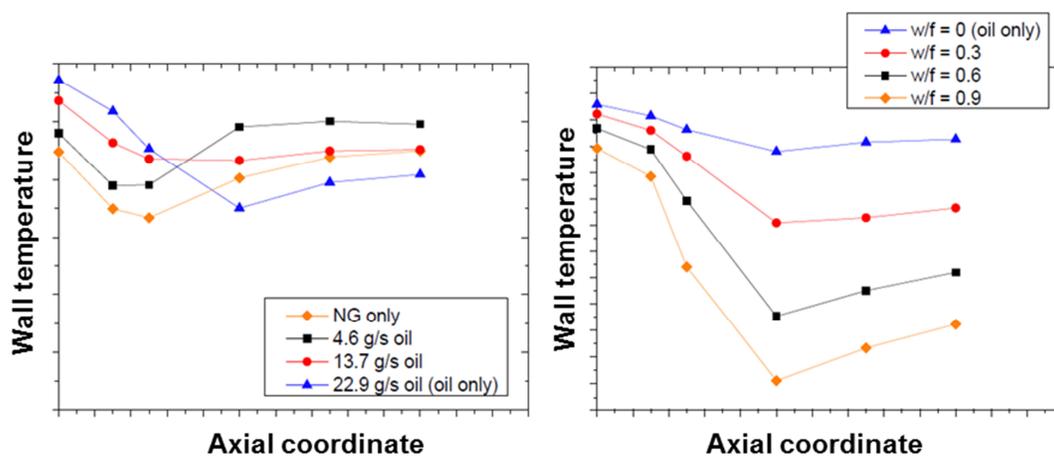


Abbildung 13: Temperatur der Vormischpassagenwand

Einen weiteren interessanten Datensatz lieferte die Mie-Streuungsmessung am Austritt der Vormischpassage. In Abbildung 14 sind die Aufnahmen am Austritt der Passage gezeigt. Links ist der Fall mit reinem Heizöl zu sehen. Nach rechts hin nimmt der Anteil des Wassers in der Emulsion zu. Zu sehen ist, dass in allen Fällen im Mittel eine gewisse Menge an Flüssigkeit aus der Passage austritt. Es ist zu beobachten, dass sich die Flüssigkeit am Rand der Passage akkumuliert. Der Grund könnte zum einen die Bildung eines Wandfilms und das abscheren von Ligamenten und Tröpfchen am Austritt der Passage sein, zum anderen aber die Akkumulation von Tröpfchen ohne Bildung des Wandfilms innerhalb der Passage im Bereich der Wand. Eine Verringerung der Vorverdunstung des Sprays mit ansteigendem Was-

seranteil ist durch die Absenkung der Temperatur in der Vormischpassage durch die Verdampfungsenthalpie des Wassers zu erklären.

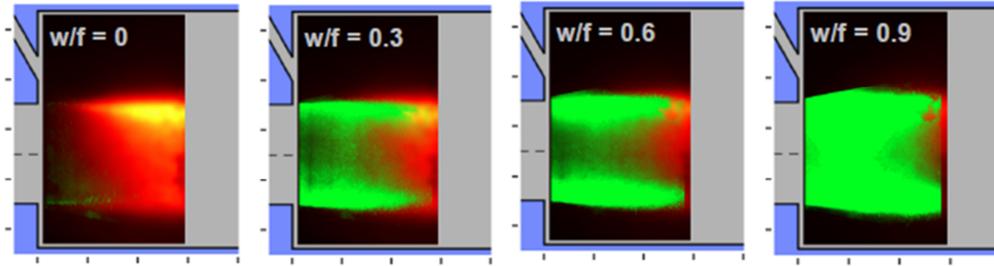


Abbildung 14: Mie-Streuungsbilder am Austritt der Vormischpassage

## 5 Bewertung der Verkokungsgefahr im Strahlbrenner

Sowohl aus experimentellen als auch numerischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Tropfen/Wand Interaktion in der Vormischpassage des Strahlbrenners eine wichtige Rolle spielt:

- Am NRC wurde die Vormischpassage aus Acrylglas gefertigt. Es konnte optisch beobachtet werden, dass Tröpfchen sich in der Nähe der Wand bewegen. Am Austritt der Vormischpassage verließen Tröpfchen die Passage am Rand des Kanals.
- Am DLR Stuttgart konnten Temperaturabfälle an der Wand der Vormischpassage gemessen werden, die auf einen Wärmeaustausch und damit einen Kontakt zwischen Tropfen und Wand hinweisen. Mie-Streuungsbilder konnten eine erhöhte Konzentration von Flüssigkeit am Austritt der Passage in Wandnähe feststellen.
- Eine CFD Studie konnte zeigen, dass die Tropfendispersion aufgrund großskaliger Turbulenz in der Vormischpassage die Tröpfchen in Richtung Wand tragen.

Aufgrund dieser Beobachtungen wurde entschieden, die Tropfen/Wand Interaktion in der Vormischpassage und das entsprechende Risiko der Verkokung näher zu untersuchen. Es wurden weder im Laborprüfstand am DLR Stuttgart noch im Hochdruckprüfstand Anzeichen von Verkokungen in der Vormischpassage gefunden. Dennoch ist es wichtig, die physikalischen Prozesse in der Vormischpassage zu verstehen, um ein Risiko besser einschätzen zu können.

Die Bewertung des Verkokungsrisikos sollte mittels detaillierter CFD Simulationen der Zweiphasenströmung in der Vormischpassage und Verkokungsmessungen an Einzelemulsionstropfen untersucht werden. Die Simulationen sind ein Werkzeug, um die Zustände der Tropfen an den Wänden der Vormischpassage zu untersuchen. Um Simulationsergebnisse ausreichender Konfidenz zu generieren, bedarf es weiterer Verbesserungen des Simulationsansatzes. Die Zustände der Tropfen an der Wand konnten dann als Randbedingungen für die Verkokungsmessungen dienen. Hier werden Emulsions-Einzeltropfen auf eine heiße Wand getropft. Mögliche Rückstände durch Verkokung können dann gravimetrisch gemessen werden.

## **5.1 Verbesserung des Modellierungsansatzes von Zweiphasenströmungen in der Vormischpassage des Strahlbrenners**

Der Modellierungsansatz für die Zweiphasenströmung ist die Euler-Lagrange Methode. Hierbei wird die Hauptströmung (Gasphase) mit einem Finite-Volumen-Verfahren (FVM) simuliert. Die flüssige Phase wird durch Partikel repräsentiert. Ein Partikel steht nicht für einen Tropfen sondern für einen gewissen Massenanteil der gesamten Flüssigkeit. Diese Masse beinhaltet mehrere Tropfen mit gleichen physikalischen Eigenschaften. Ein gewisser statistischer Fehler wird also für die Effizienz der Simulation in Kauf genommen. Die Interaktion zwischen den Phasen wird durch geeignete Submodelle realisiert. Hierzu zählen:

- Primärzerstäubung / Sekundärzerstäubung der Flüssigkeit
- Masseaustausch (Verdampfung der Flüssigkeit)
- Wärmeaustausch
- Impulsaustausch

Die Modelle berechnen eine Änderungsrate für die Masse, die Temperatur und die Geschwindigkeit sowie eine Neuverteilung der Masse in neue Tröpfchen, die durch den Zerfall entstehen. Hierfür werden Eigenschaften der Gasphase auf die Position des Partikels interpoliert. Um die Erhaltung der Masse, des Impuls und der Energie zu gewährleisten müssen Quellterme entsprechend der Änderungsraten der Partikel formuliert werden und in die Gleichungen für die Gasphase implementiert werden.

Um die Konfidenz in die Simulationsergebnisse zu erhöhen, wurden Schwachstellen in dem Modellierungsansatz in OpenFOAM identifiziert und verbesserte Modelle implementiert. Hierzu gehören:

- Strahlzerfallsmodell für die angewinkelte Eindüsung in die Hauptströmung
- Verfahren zur Rückkopplung der Quellterme in die Gasphase für große Verhältnisse von Flüssigvolumen zu Zellvolumen
- Tropfen/Wand Interaktionsmodell und Wandfilmmodell

### **5.1.1 Verbesserung des Strahlzerfallsmodells**

Für die Modellierung des Flüssigstrahls – hierzu zählt die Dynamik des zusammenhängenden Strahls sowie der Strahlzerfall – wird ein Modell verwendet, dass auf der Arbeit von Rachner et al. [5] basiert. In Abbildung 15 ist eine Prinzipskizze des Modells gezeigt.

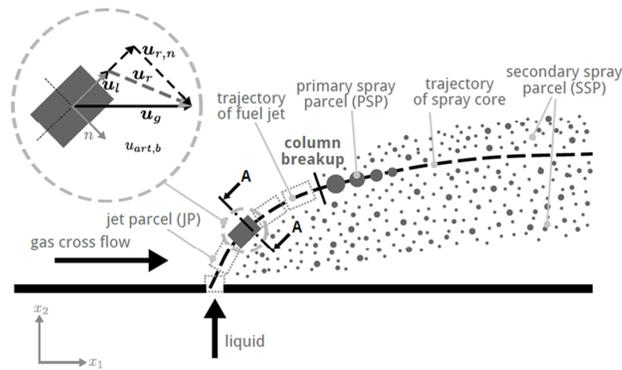


Abbildung 15: Prinzipskizze zum Strahlerfallsmodell in der CFD

Der zusammenhängende Flüssigstrahl ist durch mehrere zylinderförmige Partikel (Jet Parcel) diskretisiert. Die Impulsübertragung von der Hauptströmung auf das Partikel ist entsprechend der Zylinderform formuliert. Die Strahlablenkung kann somit mit Hilfe der Luftwiderstandsbeiwerte der Partikel kalibriert werden. Nach einer gewissen charakteristischen Zeit gibt es einen Strahlaufbruch (Column Breakup) aufgrund von sich auf der Oberfläche des Strahls ausbreitenden Wellen. Der zusammenhängende Strahl zerfällt dabei in Ligamente (Primary Spray Parcel). Diese Ligamente werden im Modell tropfenförmig angenommen. Aufgrund der Scherwirkung der Hauptströmung auf den Strahl und die Ligamente, werden außerdem kontinuierlich kleine Tropfen (Secondary Spray Parcel) abgeschert.

Um die Strahl- und Spraydynamik mit diesem Modell mit hoher Genauigkeit zu simulieren, ist die Kalibrierung folgender Größen von besonderer Wichtigkeit:

- Luftwiderstandskoeffizienten der Strahlpartikel
- Charakteristische Verweilzeit des Strahlpartikels bis zum Strahlaufbruch (Column Breakup)
- Größe der Sekundärtropfen

Für die Bestimmung der Größe der Sekundärtropfen war der bestehende Datensatz (siehe Kapitel 4.1.1) aus den PDPA Messungen für die angewinkelte Eindüsung ausreichend. Für die Kalibrierung der Luftwiderstandskoeffizienten und der charakteristisch Strahlaufbruchzeit konnte dieser Datensatz nicht angewendet werden, da die Anzahl der zu kalibrierenden Freiheitsgrade zu groß war, um sie an den Daten an einer einzelnen axialen Position festzulegen. Daher waren weitere Messungen nötig. Die Kalibrierung erforderte Schattenabbildungen der Seitenansicht des Sprays. Dadurch war die gesamte Trajektorie des Strahls sichtbar. Um den Punkt des Strahlaufbruchs zu analysieren, wurden instantane Bilder des Sprays generiert.

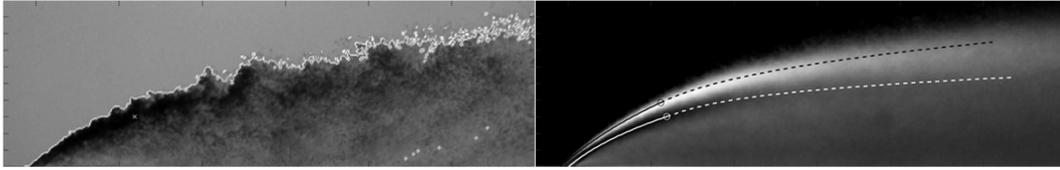


Abbildung 16: Links: Instantanes Bild des Sprays. Rechts: Standardabweichung der Einzelaufnahmen und Trajektorien

In Abbildung 16 links ist ein instantanes Bild des Sprays gezeigt. Die Außenkontur (also die Eindringung) des Sprays ist hier ebenfalls bereits eingezeichnet. Aus diesen Bildern wurden die mittlere Außenkontur, die Mittellinie und der Strahlaufbruchpunkt des Sprays mit statistischen Methoden bestimmt. In Abbildung 16 rechts ist das Bild der Standardabweichung der instantanen Einzelaufnahmen des Sprays gezeigt. Hier sind die mittlere Außenkontur, Mittellinie und der Strahlaufbruchpunkt eingezeichnet. Diese Daten wurden für eine Vielzahl von Winkel- und Durchmesserkombinationen sowie Betriebspunkte aufgenommen. Aus den Trajektorien der Mittelwertlinie wurden Korrelationen für die Luftwiderstandskoeffizienten hergeleitet. Aus dem Strahlaufbruchpunkt wurde eine Korrelation für die charakteristische Länge des Strahls bis zum Strahlaufbruch hergeleitet. Diese Korrelationen dienen als Input für das Strahlmodell im CFD Programm.

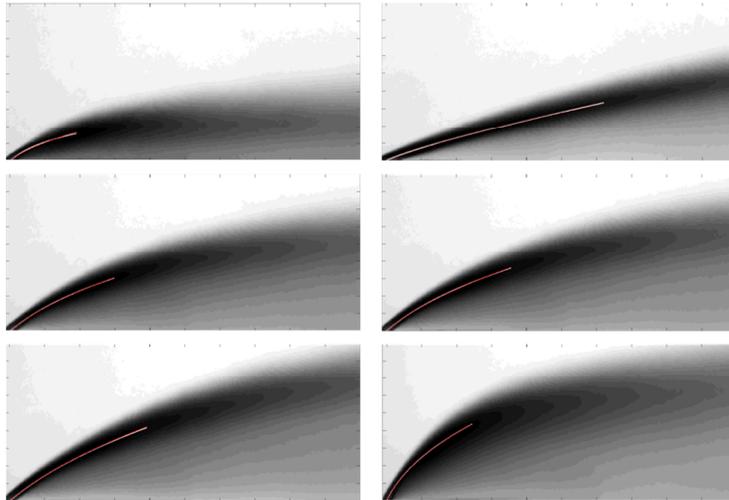


Abbildung 17: Vergleich der Strahltrajektorien aus Experiment und Simulation

In Abbildung 17 ist ein Vergleich zwischen dem Ergebnis des CFD Codes für die Strahltrajektorie (rot) bis zum kalibrierten Strahlaufbruch und der aus den Messungen ausgewerteten Kurve (weiß) gezeigt. Die Kurven liegen unmittelbar übereinander.

### 5.1.2 Rückkopplung der Quellterme in den Strömungslöser der Hauptströmung

Das Strahlzerfallsmodell bringt eine Besonderheit mit sich. Partikel, die in das Rechengbiet am Eindüspunkt injiziert werden, haben den Durchmesser des Strahls. Hierdurch ergibt sich

ein großes Verhältnis von Partikelvolumen zu dem Volumen der Zelle, in der sich das Partikel befindet. Im Standard Euler-Lagrange Verfahren führen Volumenverhältnisse größer 10% zu Instabilitäten (bis hin zur Divergenz der Lösung) und zu einer starken Abhängigkeit der Lösung von der Gitterauflösung. Für eine übliche Gitterverfeinerung um die Eindüsstelle im Rahmen von LES Simulationen, liegt das Volumenverhältnis um eins. Eine Rückkopplung der Quellterme in die Hauptströmung wäre somit aufgrund der oben genannten Probleme nicht möglich. Um dennoch eine Rückkopplung zu ermöglichen wurde der Ansatz erweitert. Im Standardansatz wird der zum Partikel zugeordnete Quellterm in die Gleichung der Zelle eingebracht, in der sich das Partikel befindet. Der verbesserte Ansatz sieht eine Verteilung des Quellterms auf die das Partikel umgebenden Zellen vor. Die Zellen werden so ausgewählt, dass das Verhältnis aus Partikelvolumen und dem Volumen, das die Gesamtheit dieser Zellen aufspannt, einen sinnvollen Wert ergibt. Eine mit dem Abstand zwischen Partikel und Zelle gewichtete Verteilungsfunktion wird genutzt, um partikelnahe Zellen mit einem größeren Anteil des Quellterms zu beaufschlagen. Das Verhältnis des Partikelvolumens zum Volumen der beteiligten Zellen wurde so kalibriert, dass eine nahezu gitterunabhängige Lösung für das CFD Modell gezeigt werden konnte.

In Abbildung 18 ist der SMD für eine einfache Eindüsung eines Strahls in die Hauptströmung in einen rechteckigen Kanal gezeigt. Der SMD ist hier stromab der Eindüsung über der Höhe des Kanals gezeichnet. Die grauen Kurven entsprechen dem SMD mit dem Standardverfahren und die schwarzen Kurven dem SMD mit dem verbesserten Verfahren für die Rückkopplung der Quellterme. Jeder Linientyp steht für eine bestimmte Gitterauflösung. mesh0 steht für das Baseline Gitter. Die Zellweiten der Gitter mesh1 und mesh2 wurden bezogen auf das baseline Gitter mit dem Faktor 0.5 bzw. 0.25 multipliziert. Für das Standardverfahren gibt es eine deutlich sichtbare Gitterabhängigkeit. Die Sprayeindringung im Kanal variiert im betrachteten Bereich um 30%. Für das verbesserte Verfahren ist kaum eine Abhängigkeit vom Gitter sichtbar.

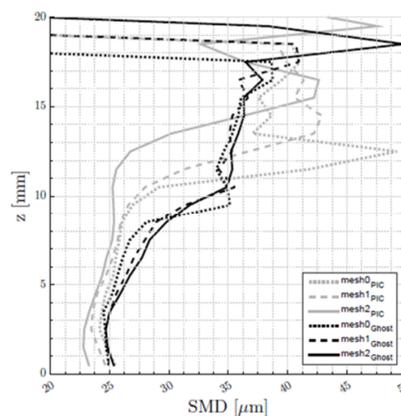


Abbildung 18: Vergleich der Gitterabhängigkeit der zwei Verfahren für die Quelltermrückkopplung

### 5.1.3 Modelle für die Tropfen/Wand Interaktion und den Wandfilm

Die Tropfen/Wand Interaktion ist ein kritischer Punkt in der Modellierungskette der Zweiphasenströmung in der Vormischpassage. Bei der Interaktion des Tropfens mit der Wand kommt es zum Impuls- und Wärmeaustausch zwischen Tropfen und Wand. Außerdem können sich unter bestimmten Bedingungen flüssige Ablagerungen an der Wand zu einem dünnen

Wandfilm ausbilden, der ebenfalls im direkten Austausch mit der Wand und der Hauptströmung steht. Die in OpenFOAM verfügbaren Modelle weisen gewisse Limitierungen auf, die für die vorliegende Analyse nicht in Kauf genommen werden konnten. Daher wurde entschieden ein verbessertes Modell in OpenFOAM zu implementieren. Die Modellentwicklung und Modellvalidierung sowie die Implementierung in die OpenFOAM Version, die bei Siemens genutzt wird, wurde vom Politecnico di Milano (Internal Combustion Engine Group, Prof. Lucchini) vorgenommen. Die Modelle weisen die folgenden Eigenschaften auf:

- Identifizierung des Tropfen/Wand Interaktionsregimes basierend auf einer dimensionslosen Wandtemperatur, der Mundo-Zahl (Kombination aus Tropfen Reynolds und Weber Zahlen) und der Unterscheidung von benetzten/unbenetzten Wänden
- Modell für den Sekundärzerfall des Tropfens bei Tropfen/Wand Aufprall
- Modell für den Wärmeaustausch während des Tropfen/Wand Aufpralls
- Modell für einen dünnen Wandfilm inklusive Impuls- und Wärmeaustausch zwischen Wandfilm/Wand und Wandfilm/Hauptströmung sowie Masseaustausch zwischen Wandfilm/Hauptströmung

Gerade die Interaktionsregime bei heißen Wänden als auch die Behandlung von Mehrkomponentenfluiden im Wandfilm, konnten mit dem Standardmodell in OpenFOAM nicht behandelt werden.

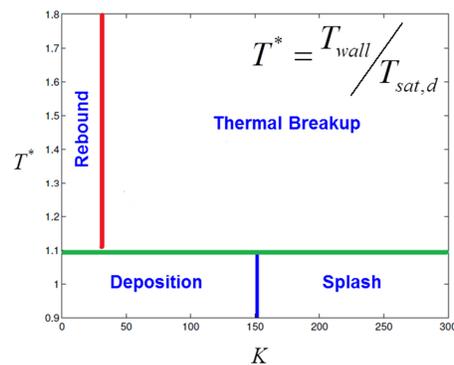


Abbildung 19: Regimekarte für Tropfen/Wand Interaktion

In Abbildung 19 ist das Diagramm mit den Regimen der Tropfen/Wand Interaktion als Funktion der Mundo-Zahl  $K$  und der dimensionslosen Wandtemperatur  $T^*$  (Wandtemperatur / Siedetemperatur der Flüssigkeit) gezeigt. Oberhalb einer dimensionslosen Temperatur von 1.1, gibt es keine flüssigen Ablagerungen an der Wand. Bei großen Werten der Mundo-Zahl entsteht eine Sekundärzerstäubung (Splash oder Thermal Breakup je nach Wandtemperatur) des aufprallenden Tropfens. Die Implementierung dieser Modelle basiert auf einem ausführlichen Datensatz und der Übergang zwischen den Regimen wird entsprechend der Arbeit von Kuhnke [6] behandelt. Die Interaktionsphänomene der Einzeltropfen wurden ausführlich validiert.

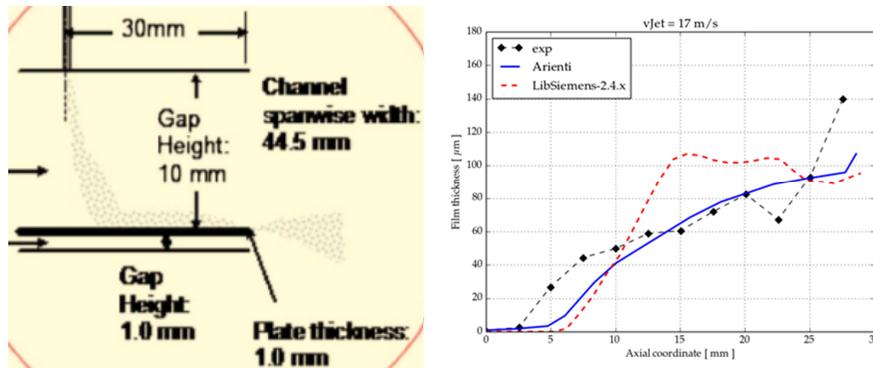


Abbildung 20: Links: Skizze des Arienti Testfalls. Rechts: Wandfilmdicke entlang des Kanals (experimentell und Simulation).

Für die Validierung der Interaktion zwischen einer Wand und einem Spray, wurde der Testfall nach Arienti et al. ausgewählt. In Abbildung 20 links ist der Testfall schematisch dargestellt. Ein Spray wird in eine Hauptströmung von der oberen Seite eines Kanals eingedüst. Auf der unteren Seite trifft das Spray auf die Wand. Durch die Interaktion entsteht ein Wandfilm. Die Wandfilmdicke wurde entlang der Richtung der Hauptströmung gemessen. In Abbildung 20 rechts ist die Wandfilmdicke aus dem Experiment (schwarz) mit der numerischen Lösung (rot) verglichen. Unter Beachtung der Komplexität der Zweiphasenströmung ist die Modellierung mit dem Euler-Lagrange Verfahren in guter Übereinstimmung mit dem Experiment.

## 5.2 Modellierung der Zweiphasenströmung in der Vormischpassage

Um die komplexen Bedingungen in der Vormischpassage zu verstehen wurden CFD Studien zu dem DLR Stuttgart Fall mit dem Tropfen/Wand Interaktionsmodell durchgeführt. Da die Modellkette keine Wärmeleitung in den Wänden der Geometrie behandeln kann, wurde das Temperaturprofil aus den experimentellen Daten auf die Wände projiziert.

Die Simulationen wurden ebenfalls vom Politecnico di Milano durchgeführt. Zwei Betriebspunkte, die ein stark unterschiedliches Verhalten im DLR Stuttgart Experiment zeigten, wurden ausgewählt.

Fall 1 ist durch den reinen Heizölbetrieb ohne Wasserzugabe definiert (siehe Kapitel 4.1.5, dry only und  $w/f = 0$ ). Hier wurde nur ein vernachlässigbarer Flüssigkeitsanteil am Austritt der Vormischpassage mit den Mie-Streuungsmessungen festgestellt. Die Temperaturabsenkung an der Wand der Vormischpassage deuteten nicht auf einen direkten Wärmeaustausch zwischen Tropfen und Wand hin. Das Simulationsergebnis ist in Abbildung 21 links dargestellt. Oben im Bild ist eine instantane Verteilung der Partikel gezeigt. Die Falschfarben entsprechen der Temperaturverteilung auf der Partikelpopulation. Am Ende der Passage ist kein flüssiger Brennstoff mehr vorhanden. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Experiment. Eine vollständige Verdunstung des Brennstoffs findet statt. Im unteren Bild ist die Wandfilmdicke auf der Wand der Vormischpassage gezeigt. Wie zu sehen ist, bildet sich in diesem Fall ein Wandfilm aus. Dieses Ergebnis deckt sich nicht mit dem Ergebnis des Experiments. Bei Vorliegen eines Wandfilms, wäre eine größere Temperaturabsenkung an der Wand zu erwarten gewesen. Die Leidenfrost Temperatur des Fluids liegt hier im Bereich der Wandtemperatur.

Leichte Fehler in der Bestimmung der Wandtemperatur oder der Leidenfrost Temperatur können somit entscheidend für die Ausbildung eines Wandfilms sein.

Fall 2 ist durch eine Zugabe von Wasser mit dem Wasser/Brennstoff Verhältnis 0.6 definiert (siehe Kapitel 4.1.5,  $w/f = 0.6$ ). Hier wurde ein hoher Flüssigkeitsanteil am Austritt der Vormischpassage in der Nähe der Rohrwand mit den Mie-Streuungsmessungen festgestellt. Die Temperaturabsenkung an der Wand der Vormischpassage deuteten auf einen direkten Wärmeaustausch zwischen Tropfen und Wand hin. Das Simulationsergebnis ist in Abbildung 21 rechts dargestellt. Die Falschfarben entsprechen der Brennstoffkonzentration auf der Partikelpopulation. Am Ende der Passage sind weiterhin Partikel zu sehen. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Experiment. Die Konzentration der Partikel zeigt, dass es sich um reinen Brennstoff handelt. Eine vollständige Vorverdunstung des Brennstoffs findet also nicht statt. Die Zugabe von Wasser verzögert hier die Verdunstung des Brennstoffs stark. Im unteren Bild ist die Wandfilmdicke auf der Wand der Vormischpassage gezeigt. Wie zu sehen ist, bildet sich auch in diesem Fall ein Wandfilm aus. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem Ergebnis des Experiments, da hier ein großer Temperaturabfall entlang der Vormischpassage zu verzeichnen war, der auf direkten Flüssigkeit/Wand Kontakt hindeutet. Die Leidenfrost Temperatur des Heizöls liegt hier deutlich über der Wandtemperatur. Ohne die Berücksichtigung weiterer komplexer Phänomene, die durch die Zugabe von Wasser zum Brennstoff auftreten können, ist die Vorhersage des CFD Programms sinnvoll. Da keine Verkokungen auf der Wand der Passage sichtbar waren, ist die Bildung eines Wandfilms allerdings nicht wahrscheinlich. Daher ist es wahrscheinlich, dass physikalische oder chemische Prozesse existieren, die durch Zugabe des Wassers zum Brennstoff entstehen und nicht mit dem vorliegenden Modell Berücksichtigung finden.

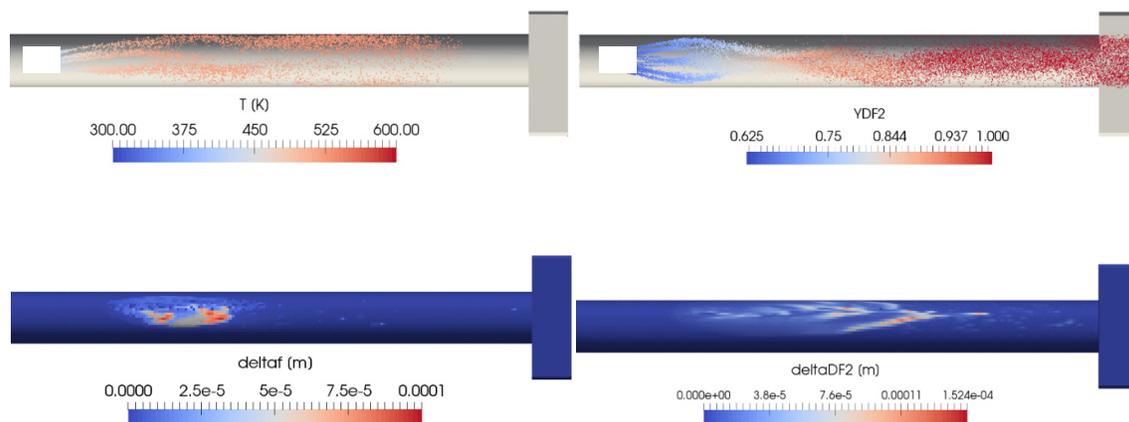


Abbildung 21: Oben: instantane Partikelverteilung. Unten: Wandfilmdicke. Links: Simulation mit purem Heizöl. Rechts: Simulation mit Emulsion.

Die Herkunft der Akkumulation der Flüssigkeit am Rand der Passagenwand am Austritt des Kanals, die auch durch die Mie-Streuungsbilder sichtbar war, ist demnach eine weitere Fragestellung. Eine naheliegende Erklärung hierfür, wäre die Bildung eines Wandfilms und das Abscheren von Ligamenten/Tropfen am Austritt der Vormischpassage. Da keine Verkokungen festgestellt wurden und somit ein Wandfilm nicht wahrscheinlich ist, sollte es auch eine weitere Erklärung hierfür geben. Um dies zu beleuchten, wurde eine weitere Simulation mit

dem CFD Modell durchgeführt. In dieser Simulation wurde das Wandfilmmodell ausgeschaltet und somit die Bildung eines Wandfilms unterdrückt.

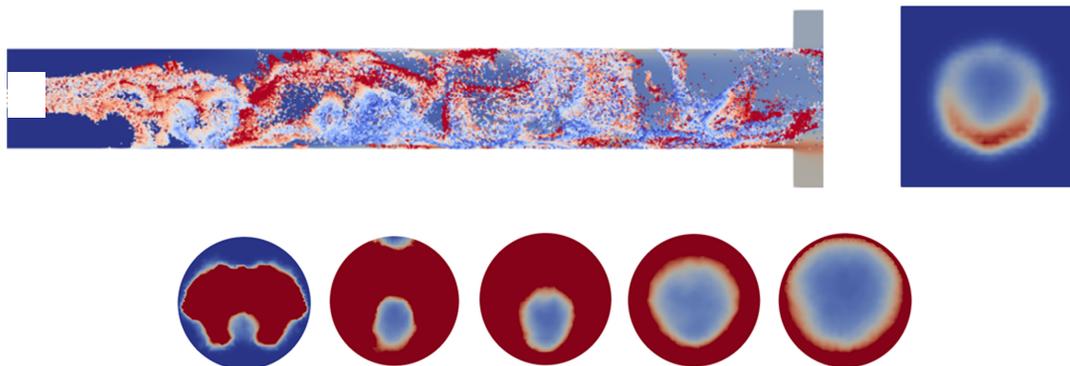


Abbildung 22: Oben links: Instantane Partikelverteilung im Vormischkanal. Oben rechts: Massenströmdichte der Flüssigkeit am Austritt der Passage. Unten: Massenströmdichte der Flüssigkeit in Querschnitten entlang der Vormischpassage.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 22 dargestellt. Im oberen Bild links ist die instantane Verteilung der Partikel in der Vormischpassage gezeigt. Die Falschfarben entsprechen der Tropfengröße. Es ist eine sehr turbulente Verteilung zu erkennen. Partikel interagieren mit der Wand. Unten im Bild sind Querschnitte der Passage zu sehen. Von links nach rechts steigt der Abstand zur Eindüsung an. Auf den Querschnitten ist die Massenströmdichte der Flüssigkeit zu sehen (von blau nach rot aufsteigend). Es ist also zu erkennen, dass es im Kanal eine Umverteilung der Flüssigkeitskonzentration gibt. Kurz hinter der Eindüsung ist der Brennstoff recht zentral im Kanal verteilt. Mit steigendem Abstand von der Eindüsstelle bewegt sich der Brennstoff zu den Wänden. Die Rate mit der Partikel in den wandnahen Bereich hineingetragen werden ist demnach größer als die Rate mit der Partikel hinausgetragen werden. Im Bild rechts ist die Verteilung des Flüssigbrennstoffs hinter der Passage zu sehen. Dies entspricht dem Querschnitt durch die Region hinter der Passage, in der die Mie-Streuungsbilder aufgenommen wurden. Zu sehen ist, dass die Brennstoffverteilung im wandnahen Bereich stärker ausgeprägt ist, als im zentralen Bereich. Die Verteilung des Brennstoffs am Austritt der Passage lässt sich also auch ohne Wandfilmbildung erklären.

### 5.3 Verkockungsexperimente am Einzel-Emulsionstropfen

Bei den Messungen am Laborprüfstand am DLR Stuttgart, sowie bei den Hochdrucktests konnten keine Verkockungen in den Passagen festgestellt werden. Die Temperaturmessungen als auch die CFD Simulationen legen eine starke Interaktion zwischen Tropfen und Wand nahe. Die Leidenfrost-Temperatur des Brennstoffs liegt zumindest für den Fall mit Emulsion im Laborexperiment deutlich oberhalb der Wandtemperatur. Daher liegt es nahe, dass die Wasserzugabe zum Brennstoff einen positiven Effekt auf das Verkockungsverhalten hat.

Um diesen Effekt zu untersuchen, wurden Verkockungsexperimente am Einzel-Emulsionstropfen durchgeführt. Diese Experimente wurden vom Karlsruher Institut für Tech-

nologie (Institut für thermische Strömungsmaschinen, Prof. Bauer) durchgeführt. Der experimentelle Aufbau basiert auf den experimentellen Untersuchungen von Brandauer et al. [7]. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Emulsion wird mit einem Rührer vorgemischt. Dabei entsteht noch eine recht grobe Verteilung der Wassertröpfchen im Heizöl. Die Emulsion wird dann in einem geschlossenen Kreislauf mit einer Pumpe gefördert. Innerhalb des Kreislaufs befindet sich ein Filter. Die Maschenweite des Filters ist so gewählt, dass die Größenverteilung der Wassertröpfchen im Heizöl in der Größenordnung wie in der Gasturbine vorliegt. Kurz hinter dem Filter sitzt eine Kanüle aus der kontinuierlich Einzeltropfen herausfallen. Unter der Kanüle ist ein Probenkörper aufgestellt, der auf die Zieltemperatur elektrisch aufgeheizt wird. Ab einer gewissen Ablagerungsmenge auf dem Probenkörper kann diese gravimetrisch bestimmt werden.

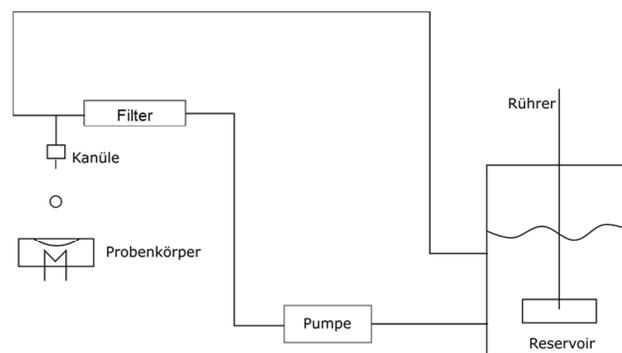


Abbildung 23: Versuchsaufbau für Emulsionseinzeltropfen Experiment

Da die Abtropffrequenz nicht beliebig gesteigert werden kann und die nötige Tropfenanzahl in der Größenordnung  $10^4$  liegt, dauert die Messung eines Betriebspunkts je nach Wassergehalt bis zu mehreren Tagen. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines stabilen Prozesses zur Herstellung der Emulsion im Kreislauf (diese entmischen sich zügig) und der langen Versuchszeit pro Betriebspunkt, konnten innerhalb des Projekts nur wenige Betriebspunkte aufgenommen werden.

In Abbildung 24 ist eine Zeitreihe einer Interaktion des Emulsionstropfen mit einem bestimmten Wasser/Brennstoff Verhältnis und einer Wandtemperatur von  $300^\circ\text{C}$  gezeigt. Links ist der Tropfen vor dem Erstaufprall auf die heiße Testoberfläche zu sehen. Beim Aufprall auf die Fläche (zweites Bild von links) verdampft ein Teil der Flüssigkeit – es bleibt ein Resttropfen übrig. Dieser benetzt die Oberfläche nicht, sondern wird als Tropfen über die Oberfläche bewegt. Im dritten Bild von links ist der Tropfen vor einer Micro-Explosion zu sehen. Hierbei erreicht das Wasser im Emulsionstropfen lokal die Siedetemperatur. Durch die Verdampfung des Wassers wird der Tropfen zerrissen. Die Micro-Tropfen nach der Micro-Explosion sind im rechten Bild zu sehen.

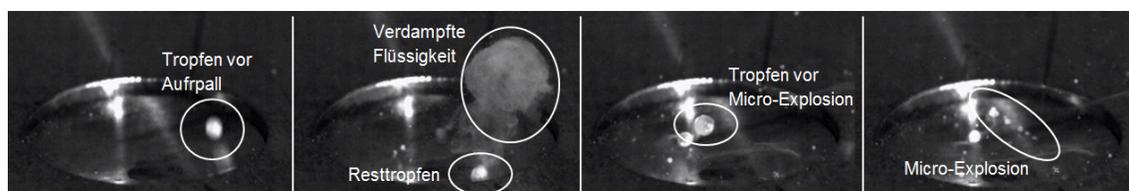


Abbildung 24: Zeitreihe der Interaktion zwischen Emulsionstropfen und heißer Wand

Die Micro-Explosionen sind der Grund, dass der Tropfen immer weiter in kleinere Bestandteile zerfällt. Während dieses Prozesses treffen Tropfen immer wieder auf die Oberfläche auf und ein Teil der Flüssigkeit verdampft erneut. Ebenfalls verlässt ein Teil der Flüssigkeit durch die Reflektion von Tropfen nach Aufprall auf die Oberfläche und durch die Micro-Explosionen die Testsektion. Eine genaue Bestimmung der Verkokungsrate war hierdurch nicht möglich.

Die Wandtemperatur von 300°C wurde bewusst gewählt, um den Zustand bei höchster Verkokungsrate im Experiment von Brandauer et al. mit reinem Diesel Kraftstoff nachzustellen. Das Diagramm nach Brandauer ist in Abbildung 25 dargestellt. Bei der gegebenen Temperatur erhält man eine Ablagerungsmasse von 0.05% der Masse des Heizöls. Bei dem gewählten Wasser/Brennstoff Verhältnis konnten keinerlei Ablagerungen gefunden werden.

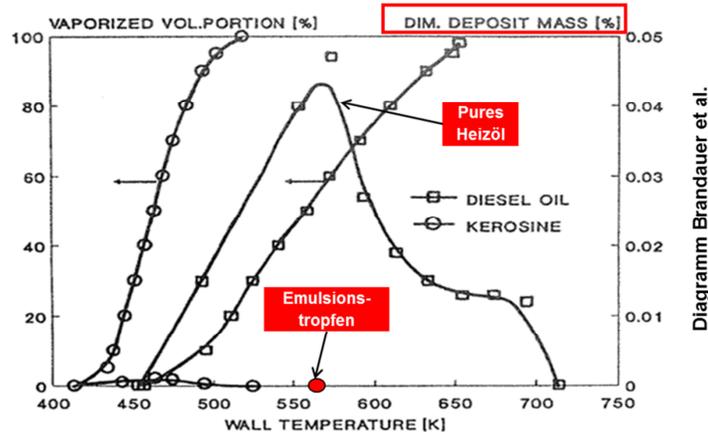


Abbildung 25: Verkokungsrate nach Brandauer et al. und entsprechend das Ergebnis mit Emulsion

Um die Sensitivität des Wasser/Brennstoff Verhältnisses zu bestimmen, wurde bei gleichbleibender Wandtemperatur das Wasser/Brennstoff Verhältnis variiert. Bereits bei kleinen Wasseranteilen konnte das grundsätzliche Interaktionsverhalten mit der heißen Wand entsprechend Abbildung 24 beobachtet werden. Selbst bei deutlich kleineren Wasseranteilen ist somit mit keiner bzw. vernachlässigbarer Menge an Ablagerungen zu rechnen. Eine exakte Erklärung für die Unterbindung von Verkokungen können im Rahmen des Projekts nicht geboten werden. Hierfür wären weitere Studien nötig. Mögliche Erklärungen können auf chemischer Ebene gefunden werden. Ebenfalls denkbar ist die Bildung eines Wasserdampffilms, der den direkten Kontakt des Heizöls mit der Wand verringert.

Die Übertragbarkeit des Ergebnis des Experiments auf die Zustände in der Gasturbine ist ebenfalls eine offene Fragestellung. Zwar erreichte man eine ähnliche Dispersion des Wassers im Brennstoff, jedoch ist der Emulsionstropfen deutlich größer als im technischen System (etwa Faktor 10-100). Die Verdampfungszeit ist somit deutlich größer als im technischen System. Es wurde abgeschätzt, dass die Entmischungszeit der Emulsion im Experiment in der gleichen Größenordnung liegt wie die Verdampfungszeit. In der Gasturbine ist die Entmischungszeit deutlich größer als die Verdampfungszeit. Das Auftreten von Micro-Explosionen ist ebenfalls für deutlich kleinere Tropfen noch nicht gezeigt worden. Weiterhin wurde das

Experiment bei Umgebungsdruck durchgeführt. Bei erhöhtem Druck in der Gasturbine sind die Siedetemperaturen des Wassers und des Heizöls deutlich größer.

#### 5.4 Bewertung des Verkokungsrisikos

In den Experimenten im Laborprüfstand des DLR Stuttgart wurden folgende Beobachtungen gemacht, die relevant für die Bewertung des Verkokungsrisikos sind:

- Die Temperaturmessungen an der Wand der Vormischpassage zeigten einen Temperaturabfall entlang des Kanals in Hauptströmungsrichtung.
- Bei reinem Heizöl (ohne Wasserzugabe) kann der Temperaturabfall durch die Abkühlung des Gases erklärt werden. Ein direkter Kontakt zwischen Heizöl und Wand ist nicht zwangsläufig gegeben. Die Wandtemperatur liegt im Bereich der Leidenfrost Temperatur.
- Bei Zugabe von Wasser wird der Temperaturabfall verstärkt. Dieser lässt sich nicht mehr mit der Abkühlung der Hauptströmung erklären. Es ist von einem direkten Wärmeaustausch zwischen Flüssigkeit und Wand auszugehen. Mit steigender Wassermenge verstärkt sich der Effekt.
- Am Austritt der Vormischpassage ist im Fall des Betriebs mit Wasserzugabe ein großer Anteil von Flüssigkeit mittels Mie-Streuung detektiert worden. Die Flüssigkeit verlässt den Kanal primär im wandnahen Bereich. Eine mögliche Ursache war die Ausbildung eines Wandfilms und die anschließende Abscherung von Flüssigkeit vom Rand der Passage.
- In keinem der Fälle konnten Verkokungen festgestellt werden.

Um die Zustände in der Vormischpassage zu untersuchen wurde der CFD Löser verbessert, um die Konfidenz in der Vorhersage der Spraydynamik sowie der Tropfen/Wand Interaktion zu erhöhen. Aus den Simulationen ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- In allen Betriebspunkten findet eine intensive Interaktion zwischen Tropfen und Wand statt. Die großskaligen Wirbel in der Strömung konvektieren die Tropfen zur Wand.
- Im Fall des reinen Heizöls bildet sich ein Wandfilm aus. Da die Wandtemperatur im Bereich der Leidenfrost Temperatur liegt, können allerdings wenige Kelvin Fehler in der Abschätzung der Wandtemperatur, über das Auftreten eines Wandfilms entscheiden. Es besteht daher keine hohe Konfidenz in der Vorhersage des Wandfilms.
- Im Fall mit Wasserzugabe entsteht ebenfalls ein Wandfilm. Es besteht eine erhöhte Konzentration an Flüssigkeit im wandnahen Bereich am Austritt der Passage, wie im Experiment zu sehen ist. Da die Wandtemperatur hier deutlich unterhalb der Leidenfrost Temperatur des Heizöls liegt, sagt das Modell einen Wandfilms voraus.
- Eine weitere Simulation wurde ohne Aktivierung des Wandfilmmodells durchgeführt, um die Verteilung des Brennstoffs am Austritt der Passage ohne Wandfilm zu analysieren. Auch ohne Wandfilm akkumuliert sich ein Großteil der Flüssigkeit im wandnahen Bereich. Demnach können die Mie-Streuungsbilder auch ohne die Bildung eines Wandfilms erklärt werden.

Die oben beschriebenen Studien zielen auf die Konditionen im Wandbereich ab. Hieraus ist noch keine Aussage über die eigentliche Verkokungsrate zu tätigen. Hierfür wurden die Experimente am Emulsionseinzeltropfen durchgeführt. Diese Experimente zeigten, dass bereits bei geringen Wasseranteilen, keine Verkokungen auftraten. Beim Auftreffen des Emulsionstropfens auf die Wand verdampft ein gewisser Anteil. Daher ist ein direkter Wärmeaustausch zwischen Tropfen und Wand zu erwarten, wodurch der Temperaturabfall in der Vormischpassage (im Laborprüfstand) zu erklären ist. Die Akkumulierung der Tropfen im wandnahen Bereich konnte mit den Simulationen ohne Wandfilm ebenfalls erklärt werden. Auch wenn die Übertragbarkeit der Zeit- und Längenskalen des Einzeltropfenexperiments auf die Gasturbine in Frage gestellt werden können: Es ist davon auszugehen, dass die grundsätzlichen Phänomene, die für die Reduzierung der Verkokungsrate im Einzeltropfenexperiment führen, auch in der Realität zu erwarten sind. Hierfür spricht, dass keine Ablagerungen – weder im Laborprüfstand noch im Hochdruckprüfstand – gefunden werden konnten.

## **6 Gesamtbewertung des Strahlbrennerkonzepts im Heizölbetrieb**

Im vorliegenden Projekt wurde ein Strahlbrennerkonzept für den Heizölbetrieb weiter entwickelt. Die Injektorkonzepte wurden dabei mittels Messdaten und Korrelationen auf Basis von generischen Experimenten abgeleitet. Die Injektorkonzepte wurden in das Verbrennungssystem integriert und wurden in Hochdrucktestkampagnen validiert. Es konnte gezeigt werden, dass das Verbrennungssystem über einen weiten und ausreichend großen Betriebsbereich unterhalb der Emissionsgrenzwerte betrieben werden kann. Thermoakustische Schwingungen waren während des Betriebs nicht limitierend. Insgesamt konnte demnach gezeigt werden, dass der Strahlbrenner im Flüssigbrennstoffbetrieb ein gutes Potential bezüglich der wesentlichen Anforderungen, die sich aus den Förderpolitischen Zielen ergeben, aufweist. Ein kritischer Punkt während der Entwicklung des Flüssigbrennstoffsystems war die Bewertung des Verkokungsrisikos. Durch die Verbesserung des numerischen Ansatzes in OpenFOAM für Zweiphasenströmungen konnte man wertvolle Erkenntnisse über die Dynamik des Sprays in den Vormischpassagen des Strahlbrenners sammeln. Es ist davon auszugehen, dass eine intensive Interaktion zwischen den Tropfen und der Wand der Vormischpassagen besteht. In einem Emulsionseinzeltropfen Experiment konnte allerdings festgestellt werden, dass Emulsionstropfen bereits bei geringen Wasseranteilen nicht zur Verkokung neigen. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf das technische System ist nicht trivial. Die experimentellen Studien im Hochdruckprüfstand und im Laborprüfstand, zeigten jedoch keinerlei Verkokungen. Es ist somit zum aktuellen Zeitpunkt davon auszugehen, dass die grundsätzlichen Prozesse im Einzeltropfenexperiment, die die Verkokungsneigung reduzieren, auch auf das technische System übertragbar sind. Das Verkokungsrisiko wird daher als gering eingestuft.

## **7 Notwendigkeit, Nutzen und Verwertbarkeit**

### **7.1 Notwendigkeit der geleisteten Arbeit**

Im Rahmen des Programms sollte ein Mehrbrennstoffsystem für die Anwendung in einem Strahlbrenner entwickelt werden. Die Mehrbrennstofffähigkeit ist eine wesentliche Voraussetzung für die Einführung des Strahlbrenners in zukünftige Gasturbinen. Der Strahlbrenner

zeigt Potential die Anforderungen von hocheffizienten und betriebsflexiblen Gasturbinen zu erfüllen.

Für die Entwicklung des Mehrbrennstoffsystems waren verschiedene Entwicklungsschritte nötig. Da die gängigen CFD-Methoden keine ausreichende Vorhersagekraft besitzen, musste man auf Basis von generischen Experimenten eine Vorauswahl von Injektorkonzepten treffen. Die Validierung dieser Injektorkonzepte konnte ebenfalls nur experimentell erfolgen. Dabei sind sowohl die Messungen im Labormaßstab als auch die Messungen im Hochdruckprüfstand von besonderer Bedeutung. Im Labormaßstab lassen sich mit geringerem finanziellen und zeitlichen Aufwand viele Designkonzepte und Betriebsbedingungen untersuchen. Unterschiede zwischen den Konzepten lassen sich hier sauber herausarbeiten. Des Weiteren bietet der Laborprüfstand die Möglichkeit einer optischen Zugänglichkeit. Hiermit erhält man eine Validierungsgrundlage für die CFD Methoden. Mit der Verbesserung der CFD Methoden lässt sich in Zukunft die Überprüfung bestimmter Design-Hypothesen bereits ohne finanziell aufwendige Experimente durchführen.

Die letztliche Validierung der vielversprechendsten Designvarianten muss zwingend im Hochdruckprüfstand unter möglichst realen Gasturbinen-Betriebsbedingungen passieren. Nur hier lässt sich sicher stellen, dass die relevanten physikalischen Prozesse genau genug abgebildet werden und somit aussagekräftige Daten bzgl. Emissionen und Thermoakustik gesammelt werden können. Gerade im Heizölbetrieb ist die Operation unter genauen Druckverhältnissen maßgeblich.

Im Heizölbetrieb kann unter bestimmten Voraussetzungen eine Gefahr für die Bildung fester Ablagerungen aufgrund von Verkokung bestehen. Diese Ablagerungen können bis hin zum Ausfall des Verbrennungssystems führen. Eine ausreichende Einschätzung dieses Risikos ist sehr wichtig. Das Risiko ist gerade im Strahlbrenner mit langen Vormischstrecken präsent, da Tropfen mit der Wand interagieren können. Da im Hochdruckprüfstand und auch im Laborprüfstand nur nach dem Test inspiziert werden kann, ob Verkokungen auftreten, fehlt ein Verständnis für die Interaktion zwischen Tropfen und Wänden, sowie für die Verkokungsraten. Um die Interaktionen zwischen Tropfen und Wand zu untersuchen, eignet sich ein CFD Berechnungsprogramm, da dieses eine detaillierte Betrachtung der Interaktionen erlaubt. Um eine gewisse Konfidenz in das verwendete CFD Programm zu erlangen, war es notwendig dieses ausreichend zu validieren und zu verbessern. Die Verkokungsraten lassen sich nur experimentell bestimmen. Hierfür wurde ein Experiment für Einzel-Emulsionstropfen entwickelt und angewendet. Die CFD Studien zusammen mit den Erkenntnissen aus dem Einzel-Emulsionstropfen Experiment waren wertvoll um die Verkokungsgefahr einzuschätzen.

## **7.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die am HBK-S für den skalierten Brenner gewonnenen Daten stellten eine wichtige Basis für die Bewertung verschiedener Injektorkonzepte sowie die Validierung und Kalibrierung des Simulationsverfahrens dar.

Die validierten und kalibrierten CFD-Modelle werden bereits in Anwendungsrechnungen verwendet, um neue Designhypothesen zu überprüfen. Durch die Validierung und Verbesserung des Modells ist es möglich, den zu erwartenden Genauigkeitsgrad der Ergebnisse besser einzuschätzen.

Die letztliche Validierung des Verbrennungssystems im Hochdruckprüfstand, war ein wichtiger Meilenstein. Es konnte demonstriert werden, dass das Verbrennungssystem Emissions-

grenzwerte einhält und thermoakustische Schwingungen nicht limitierend sind. Dieser Stand ist eine exzellente Basis, um an weiteren Systemverbesserungen zu arbeiten.

Die Bewertung der Verkokungsgefahr war ein wichtiger Schritt, um die Anwendbarkeit des entwickelten Systems zu demonstrieren. Gerade aufgrund der langen Mischstrecke des Systems, wurde dies zuvor als mögliches Risiko identifiziert.

### **7.3 Fortschritt bei anderen Stellen**

Es sind dem Autor keine entsprechenden Fortschritte an anderer Stelle bekannt.

## **8 Danksagung**

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des Verbundvorhabens **COOREFLEX-Turbo** der AG Turbo durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen **03ET7020H** gefördert. Die Autoren danken der AG Turbo und der SIEMENS AG für die Unterstützung und die Erlaubnis zur Veröffentlichung. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

## 9 Literatur

- [1] C. H. Beck, W. Krebs, O.Lammel, M. Aigner. „Entwicklung eines Hochtemperaturverbrennungssystems mit großem Betriebsbereich“. In 13. Statusseminar der AG TURBO
- [2] A. Lefebvre. „Atomization and Sprays“, CRC Press, 1988
- [3] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, C. Fureby. “A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques”, COMPUTERS IN PHYSICS, VOL. 12, NO. 6, NOV/DEC 1998.
- [4] O. Lammel, “FLOX Öl - Zweibrennstoffverbrennungssystem, Untersuchungen im Labormaßstab”, 2017
- [5] M. Rachner, J. Becker, C. Hassa, T. Doerr. “Modelling of the atomization of a plain liquid fuel jet in crossflow at gas turbine conditions”. Aerospace Science and Technology, 2002
- [6] D. Kuhnke. “Spray Wall Interaction Modelling by Dimensionless Data Analysis”. Dissertation, 2004
- [7] M. Brandauer, A. Schulz, A. Pfeiffer, S. Wittig. „Experimental Study of Coke Deposition under Gas Turbine Combustor Conditions“. Combust. Sci. and Tech., Vol. 89, 1993