



Technische Hochschule Nürnberg **Georg Simon Ohm** In Kooperation mit dem Institut für Fahrzeugtechnik angefertigt von Peter Weigand B. Eng. zur Erlangung des Titels Master of Science

(M.Sc.)



Master Thesis

Charakterisierung von Dieselsprays eines Hochdruck- Common- Rail-Systems anhand 2-dimensionaler Spraybilder in Hinblick auf quantitative 3-D-Sprayeigenschaften





Autor: Erstgutachter: Zweitgutachter: Ort, Abgabetermin:

B.Eng.	Peter Weigand
Prof.DrIng.	Georgios Bikas
Prof.DrIng.	Ulrich Grau
Nürnberg,	01.02.2017



Prüfungsrechtliche Erklärung der/des Studierenden							
Angaben des bzw. der Studierenden:							
Name: Weigand	Vorname: Peter		Matrikel-Nr.:	2177788			
Fakultät: Maschinenbau/Versorgu	ingstechnik	Studiengang:	Maschinenbau	I.			
Semester: Wintersemester	2017						

Titel der Abschlussarbeit:

Charakterisierung von Dieselsprays eines Hochdruck-Common-Rail-Systems anhand 2-dimensionaler Spraybilder in Hinblick auf quantitative 3-D-Sprayeigenschaften

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

ani 0 Ort. Datum, Unterschrift Studierende/Studierender

Erklärung zur Veröffentlichung der vorstehend bezeichneten Abschlussarbeit

Die Entscheidung über die vollständige oder auszugsweise Veröffentlichung der Abschlussarbeit liegt grundsätzlich erst einmal allein in der Zuständigkeit der/des studentischen Verfasserin/Verfassers. Nach dem Urheberrechtsgesetz (UrhG) erwirbt die Verfasserin/der Verfasser einer Abschlussarbeit mit Anfertigung ihrer/seiner Arbeit das alleinige Urheberrecht und grundsätzlich auch die hieraus resultierenden Nutzungsrechte wie z.B. Erstveröffentlichung (§ 12 UrhG), Verbreitung (§ 17 UrhG), Vervielfältigung (§ 16 UrhG), Online-Nutzung usw., also alle Rechte, die die nicht-kommerzielle oder kommerzielle Verwertung betreffen

Die Hochschule und deren Beschäftigte werden Abschlussarbeiten oder Teile davon nicht ohne Zustimmung der/des studentischen Verfasserin/Verfassers veröffentlichen, insbesondere nicht öffentlich zugänglich in die Bibliothek der Hochschule einstellen.

Hiermit Renehmige ich, wenn und soweit keine entgegenstehenden Vereinbarungen mit Dritten getroffen worden sind,

genehmige ich nicht,

dass die oben genannte Abschlussarbeit durch die Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, ggf. nach Ablauf einer mittels eines auf der Abschlussarbeit aufgebrachten Sperrvermerks kenntlich gemachten Sperrfrist

von 0 Jahren (0 - 5 Jahren ab Datum der Abgabe der Arbeit),

der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Im Falle der Genehmigung erfolgt diese unwiderruflich; hierzu wird der Abschlussarbeit ein Exemplar im digitalisierten PDF-Format auf einem Datenträger beigefügt. Bestimmungen der jeweils geltenden Studien- und Prüfungsordnung über Art und Umfang der im Rahmen der Arbeit abzugebenden Exemplare und Materialien werden hierdurch nicht berührt.

Ø gano

Ort, Datum, Usterschrift Studierende/Studierender

Peter Weigand

Masterarbeit



Bearbeiter:	Peter Weigand		Matrikel-Nr.:	2177788				
Studiengang:	Studiengang: Master Maschinenbau		Studienschwerpunkt:					
Erstprüfer:	Prof. DrIng Georgios Bikas	Zweitprüfer: Prof.	DrIng. Ulrich Gr	au				
Durchgeführt t	Durchgeführt bei der Firma: TH-Nürnberg Georg Simon Ohm, Institut für Fahrzeugtechnik							
Betreuer innerhalb der Firma Prof. DrIng. Georgios Bikas, IFZN, 0911/5880-1711 (Name, Abt., TelNr.)								
Ausgabedatur	n: 01.05.2017	Abgabedatum:	01.02.2018					
Thema der Arbeit: Charakterisierung von Dieselsprays eines Hochdruck-Common-Rail-Systems anhand 2-dimensiona- ler Spraybilder in Hinblick auf quantitative 3-D-Sprayeigenschaften								
Die Arbeit ist frei einsehbar: Ja: 🛛 Nein: 🗵								
Die Arbeit darf	Die Arbeit darf nur mit Zustimmung von (bel Filmenarbeiten Name, Abt., TelNr.):							

Prof. Dr.-Ing Georgios Bikas, IFZN, 0911/5880-1711 eingesehen werden.

Zusammenfassung:

Mittels Symmetrie-Analyse und Auswertung des Intensitätsverlaufs im Bereich eines jeden Sprays aus einem Magnet-Injektor werden die Sprayachsen ermittelt um eine genauere Aussage über die räumliche Verteilung des Diesel-Sprays treffen zu können. Ein rotationssymmetrischer Ansatz in Verbindung mit der weitläufig validierten und angewendeten Eigenschaft der "self-similarity" wird ein 3-dimensionales Sprayvolumina ermittelt.

Über Daten aus der Sandia-Datenbank wurde der Ansatz validiert und durch mannigfaltige Überprüfung als sehr robust eingestuft.

Mittels der Umsetzung eines auf Massen- und Momentenerhaltung fußenden Spraymodells in Matlab mit variierenden, radialabhängigen Geschwindigkeitsverlauf konnte ein Dichteverlauf extrahiert und schließlich eine Massenberechnung auf Basis des aus den Bildern ermittelten Sprayvolumens durchgeführt werden.

Als Ergebnis ist die –in den Bildern– sichtbare Spraymasse erfassbar was sehr teure Messtechnik ergänzen oder bei ausreichender Genauigkeit sogar ersetzen kann.

Technische Hochschule Nümberg Georg Simon Ohm •••• Keßlerplatz 12 ••• 90489 Nümberg ••• Telefon: + 49 911/5880-0 Telefax: + 49 911/5880-8309 •••• Internet: www.th-nuemberg.de •••• E-Mail: Info@th-nuemberg.de •••• Konto: Staatsoberkasse Bayern •••• Technische Hochschule Nümberg •••• Konto 130 1190 315 •••• BLZ 700 500 00 •••• Bayerische Landesbank

1/1

1. Danksagung

Zu allererst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Georgios Bikas und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grau bedanken, die meine Idee für diese Arbeit akzeptiert und unterstützt haben und hier die Rolle des Erst- und Zweitkorrektors übernehmen. Ganz besonders große Unterstützung erhielt ich von Prof. Dr.-Ing. Georgios Bikas während der Umsetzung und Gestaltung meiner Abschlussarbeit. Hierzu zähle ich die unzähligen, sehr hilfreichen Diskussionen zum Vorgehen an entscheidenden Knotenpunkten der Arbeit und die unglaubliche Geduld und Mühe die er an dieser Stelle investiert hat. Auch bei der Literaturrecherche muss ich meinen Dank für einige der genannten Quellen an Prof. Dr.-Ing Georgios Bikas richten, ohne den ich vermutlich nicht so weit in meiner Arbeit gekommen wäre. Vielen vielen Dank für die große Unterstützung.

Ein großer Dank geht auch an die Mitarbeiter der Fakultät Maschinenbau und des IFZN's für die immer sehr teamfähige und Entspannte sowie produktive Zusammenarbeit ohne die diese Abschlussarbeit nur halb so viel Spaß gemacht hätte. Ebenso für die Gewährleistung der Kaffeeversorgung, die mich häufig mit ausreichend Energie versorgt hat um einfach weiter zu machen.

Vielen lieben Dank an das Institut POF-AC (Polymer Optical Fiber Application Center) welches –durch die Leihgabe einiger Komponenten zum experimentellen Aufbau– diese Arbeit erst ermöglicht und unterstützt haben. Danke im Besonderen an Herrn Alexander Bachmann, der die Abwicklung des Verleihs so unkompliziert und einfach gestaltet hat und stets an den Vorhaben unseres Instituts interessiert war und deshalb einige Male mit kompetentem fachlichen Rat zur Umsetzung beiseite stand.

Auch meinem Freundeskreis möchte ich danken, da jeder einzelne aus diesem stets ein Quell der Entspannung darstellte und mich oftmals durch Diskussionen auf neue Ideen gebracht hat. Im Einzelnen erwähnen möchte ich hier Bastian Weber und Maksim Negorozhin die mir meist eine andere Sichtweise auf Probleme vermitteln und somit mit zur Lösung der Herausforderungen beigetragen haben.

Unglaublich Dankbar bin ich ebenfalls meiner Familie, die mich in meinem ganzen Leben tatkräftig emotional, psychisch und in allen anderen Bereichen ungeheuerlich getragen und unterstützt, mir jeder Zeit einen Rückzugsort und ein Sicherheitsnetz geboten haben. Allen voran meine Eltern Johanna und Detlef Weigand die schon in frühester Kindheit mein Interesse an Technik gefördert haben. Ohne eure Hilfe und das frühzeitige Erwecken meiner Leidenschaft für Autos wäre ich nie so weit gekommen. Hierzu zähle ich auch meine Liebe Mahsa die mich immer bei Laune gehalten und motiviert hat alles bestmöglich zu vollenden, die mich in Zeiten der Demotivation wieder auf den richtigen Kurs gebracht und sich immer um mich gekümmert hat.

Hier nochmal Danke für alles was Ihr für mich in meinem Leben getan habt.

2. Inhalt

1.	Danksagung	. 1
2.	Inhalt	. 2
3.	Einleitung	. 4
4.	Motivation	. 5
5.	Ziel	. 6
6.	Stand am IFZN	. 7
7.	Prüfstands-Setup	. 8
В	esonderheiten	. 8
А	ufbau des Einspritzprüfstands	11
	Kraftstoffsystem	11
	Signallaufplan	12
	Timing	13
8.	Übersicht Vorgehen	15
V	orbereitung für die Ermittlung der Sprayachse	15
	Schritt 1: Erweitern des Spraygebietes	16
	Schritt 2: Erweiterung und Korrektur der Umrandung	16
9.	Sprayachse	17
L	änge der Sprayachse	22
	Subroutine fitcurve.m	27
10.	Orthogonalenbildung	28
S	ubroutine axisanalysis.m	28
11.	Sprayvolumina	31
Ir	ntensitätsverlauf	34
L	ichtinteraktion mit Aerosolen	38
S	praystruktur	43
12.	Spraymasse	47
G	Grundüberlegungen zur Kalibrierung	47
V	olumen-Masse-Korrelation	50
S	elf-Similarity	50
E	rste Korrelation	51
K	alibrierung mittels experimenteller Daten	54
K	alibrierung über Spraymodelle	64
	Naber-Siebers	64
	Musculus-Kattke	67
	Integration des Musculus-Kattke-Modells	73
В	erechnung der Spraymasse	77
13.	Ergebnisse	78

Verg	gleich	30
14.	Fazit	32
Vor	gehen	32
Higł	nlights	32
Aus	sichten	32
15.	Ausblick	33
16.	Abkürzungsverzeichnis	. I
17.	Verweise	II
18.	Appendix	IV
a.	Problematik der Röntgen-Daten - Dichte	IV
b.	Problematik der Röntgen-Daten – Zeitpunkt	IV
c.	Projektion der Dichteverläufe	32

3. Einleitung

Schon 1893 legte Rudolf Diesel den Grundstein für die Erfolgsgeschichte des Dieselmotors. Das Prinzip des Selbstzünders hat sich bis heute in vielen Bereichen vor allem durch den hohen Wirkungsgrad und dem hohen Drehmoment behauptet. Auch heutzutage bietet der nach seinem Erfinder benannte Verbrennungsmotor in weiten Gebieten viele Vorteile gegenüber seinen Konkurrenten.

Mit dem Publikwerden des sogenannten "Diesel-Skandals" (mittlerweile nicht nur noch) um den VW-Konzern am 03.September 2015 wird der Ruf des weithin eingesetzten Diesels stark geschädigt. Eine Software erkennt etwaige Fahrzyklen und beeinflusst die Abgaswerte in -für die Umwelt- positive Richtung. Dennoch besitzt der Verbrennungsmotor nach Diesel-Prinzip global gesehen eine zu positive Ökobilanz als dass sofort auf ihn verzichtet werden sollte.

Weltweit sind Motorenentwickler auf der Suche nach Möglichkeiten den Brennverlauf weiter in Hinblick auf die Abgasemissionen zu verbessern. Bezogen auf das jeweilige Triebwerk bieten sich unterschiedliche Strategien, Grenzen und Größenordnungen für die Maßnahmen. Zusätzlich schränken die gesetzliche Limitierung der Emissionen und die gegenseitige Beeinflussung den Spielraum ein. So kann zum Beispiel eine Maßnahme zur Reduktion der NOx-Emissionen zeitgleich zu einem Zuwachs an Rußausstoß führen.

Schon mehr als ein halbes Jahrhundert (1837) vor der Entwicklung des Dieselmotors legte Charles Babbage den Grundstein für eine Rechenmaschine, mittlerweile Computer genannt. Diese sind heutzutage so weit entwickelt, dass Sie für wahnsinnig viele Aufgaben kaum mehr entbehrlich sind. Vor allem in der Datenakquisition, der Datenanalyse und/oder Simulationen von Vorgängen sind sie ein Muss. Und obwohl oder gerade weil ihr Einsatzgebiet ungemein größer ist als das des Diesels müssen solch mächtige Werkzeuge natürlich richtig eingesetzt werden um maximalen Nutzen zu erwirtschaften und die Entwicklung rapide zu beschleunigen.

In einem Verbrennungsmotor finden unglaublich viele, komplexe Vorgänge nahezu gleichzeitig oder ganz und gar simultan statt, die auch noch in immensen Geschwindigkeiten ablaufen, weshalb bei vielen Entwicklungsschritten experimentelle Vorgehensweisen priorisiert werden um die Auswirkungen einer Maßnahme direkt zu messen. Gleichzeitig gibt es Abteilungen, welche sich unter Umständen ausschließlich mit der computergestützten Simulation von Teilaspekten des Verbrennungsmotors befassen. Die Schnittstellen dieser zwei Gruppen halten sich in Grenzen und es ist in vielerlei Hinsicht nützlich diese weiter ausbauen zu können. Ein Teil dieser Arbeit bezieht sich auf die Informationsgewinnung aus experimentell erfassten Daten und deren Erweiterung durch "virtuelle" Sensorik, geschaffen durch Algorithmen eines Computerprogramms.

Die Entwicklung solcher "virtuellen" Sensoren kann eine große Bandbreite an Aufgaben übernehmen. So birgt dies zum Beispiel die Möglichkeit direkt während der Datenaufzeichnung eine Plausibilitäts-Prüfung durchzuführen, was die Datenflut durch aussieben der ungültigen Werte reduziert und die Übersichtlichkeit erhöht. Es bieten sich viele Möglichkeiten Daten auch nach der Aufzeichnung weiter zu verwenden. Allein diese Nutzung birgt riesiges Lern- und Informationspotential, welches bislang nur sehr selten oder gar nicht genutzt wird.

4. Motivation

Es ist weithin bekannt, dass intensive, qualitativ hochwertige Forschung den technologischen Fortschritt antreibt und sichert, aber auch gewisse Kosten birgt. So ist hochgenaue Messtechnik nicht nur sehr teuer, sondern bis dato sehr wichtig für verlässliche Datenermittlung in der Forschung und Entwicklung.

Schon vor einiger Zeit gab es einen großen Trend hin zur Simulation von nahezu allen Vorgängen. Aber auch die Entwicklung solcher Simulationen wird kostspielig, soll das Modell einen hohen Detailierungsgrad besitzen oder einen breiten Bereich abdecken.

Die Erfahrung lehrt, dass nicht immer hochkomplexe Modelle für eine ausreichende prädiktive Abschätzung von Messgrößen oder des Verlaufs von Vorgängen nötig sein muss. Auch im Alltag spielen kleine, hilfreiche, teilweise visualisierende Programme, die aber nicht zwingend hochgenau rechnen -in Form von zum Beispiel mobilen Apps- eine immer größere Rolle. Die Aufteilung von Aufgaben in kleinere Arbeitspakete ist schon seit Urzeiten eine große Hilfe bei der Bewältigung von komplexen Arbeiten.

Auch in der Forschung und Entwicklung können partikuläre Modelle und Programme große Hilfe leisten um Messgrößen zu ermitteln, Sensorik zu unterstützen oder zu ersetzen, Daten übersichtlicher zu machen oder zur Verfügung zu stellen, Kosten zu reduzieren und dennoch gleichbleibende Qualität der Daten zu gewährleisten.

Am Institut für Fahrzeugtechnik der technischen Hochschule Nürnberg werden unter anderem auch Spraystrukturen von Diesel-Injektoren in Verbindung mit einem Hochdruck-Common-Rail-System erforscht. Die Charakterisierung der Spraystruktur ist für die Erforschung von neuen Brenn-, Einspritz- oder Homogenisierungsverfahren von hoher Bedeutung. Für die Vermessung von Eigenschaften des Diesel-Sprays gibt es mannigfaltige Messmethoden, allerdings ist durch technische oder schlicht bauraumseitige Grenzen nur eine kleine Schnittmenge sinnvoll simultan einsetzbar. Um hier einen Mehrwert schaffen zu können, sind sogenannte virtuelle Sensoren in Form von "kleinen" Modellen ein vielversprechender Ansatz. Zudem schlagen sie eine Brücke zwischen experimenteller Forschung und simulierter Vorhersagen.

Durch solche, kleine virtuelle Sensoren können der Industrie immer wieder neue Daten präsentiert, die Forschung vorangetrieben und Kunden neue Hilfsmittel geboten werden um (letzten Endes nicht nur) den Verbrennungsmotor weiter zu verbessern.

Als begeisterter Motoren-Enthusiast ist unter anderem auch dies meine -und als Leser dieser Abschlussarbeit bestimmt auch Ihre- Motivation: die stetige, systematische, schrittweise Verbesserung unserer technologisierten Welt.

5. Ziel

Virtuelle Sensoren ersetzen physikalische Messtechnik um Kosten zu senken und zusätzlich optional oder teilweise die Möglichkeit einer Vorhersage von Messdaten zu liefern. Während meiner Arbeit am Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) wurden mir die Kosten hochgenauer Messtechnik bewusst. Viel wichtiger jedoch ist die Möglichkeit durch kleinere Modelle aus einer limitierten Zahl an Messgrößen neue, zusätzliche Informationen zu gewinnen und diese sinnvoll zu nutzen.

Die Verknüpfung von Software und experimentell ermittelter Daten birgt den Charme, Werte zu ordnen, visualisieren, überprüfen und interpretieren zu können. Bisher wurde am IFZN nur ein sogenanntes Post-Processing, also eine nachgehende Analyse der Spraybilder, durchgeführt. In der Zukunft könnte man diese in eine Online-Auswertung umwandeln, die die Bilder schon während der Aufzeichnung bearbeitet.

Als Zwischenschritt bzw. Ergänzung für die bis dato vorhandene Auswertesoftware soll im Verlauf dieser Arbeit ein virtueller Sensor entwickelt und validiert werden. Zweck dieser Entwicklung soll sein, auf Basis der akquirierten 2-dimensionalen Spraybilder mehr Informationen zu gewinnen.

Zunächst soll die bisherige Vorgehensweise der Auswertung in Augenschein genommen werden um die Geometrie bzw. die Abgrenzung des Sprays genauer zu definieren. Als Alternative zur bereits bestehenden Schwellwert-Technik, soll der Intensitätsverlauf betrachtet werden. Ist dies geschehen, soll mithilfe eines radialsymmetrischen Ansatzes auf quantitative Informationen des Sprays geschlossen werden können.

So ist es möglich jeweils ein 3-dimensionales Modell für Volumen, Intensitätsverlauf und Dichte aufzustellen und so das Spray besser zu beschreiben. Durch weitere Analyse der Zusammenhänge dieser Modelle kann zusätzlich noch die sichtbare Masse abgeschätzt bzw. ausgegeben werden.

Hiermit ergibt sich die Möglichkeit aus wenig Messtechnik und ein bisschen Software mehr Aufschluss über die Eigenschaften des aufgenommenen Sprays zu geben und somit Mehrwert an Wissen zu generieren. Sollte es möglich sein, diese Technik auch auf andere Bildgebende Verfahren zu kalibrieren können, ist eine wahnsinnig günstige Methode gewonnen Dampf- und Flüssigkeitsanteil eines Sprays zu deklarieren. Eventuell gilt dies auch mit beteiligter Verbrennung, was einen großen Vorteil für viele Forschungseinrichtungen bietet.

Da erfahrungsgemäß viele Forschungseinrichtungen von Fördergeldern abhängig sind, kann dadurch ein größerer Anteil des Budgets in tatsächliche Forschung statt in teure Messtechnik investiert werden.

6. Stand am IFZN

Die bisherige Auswertung, die am IFZN Verwendung findet, basiert rein auf monochromatischen Spraybildern. Diese werden zunächst gemittelt und mithilfe eines Schwellwertes in Spray- und Hintergrundanteile aufgeteilt. Die Bildinformation liefert 8 Bit Informationen oder anders gesagt 256 Graustufen. Mittels einer Bedienereingabe wird ein Wert zwischen 0 und 255 deklariert, welcher als Grenze zwischen dem Hintergrund und dem als Spray erkannten Bildbereichen gilt.

Die gefundenen Sprayregionen werden anschließend auf Charakteristika wie Umfang, Fläche, Form und die radiale und globale Verteilung untersucht. Führt man dies für alle aufgenommenen Zeitpunkte nach SOI durch, lässt sich anschließend die Sprayentwicklung über der Zeit rekonstruieren.

Dies wiederum gibt Aufschluss über die physikalischen Vorgänge während der Entwicklung der Spraystruktur und dessen Ausbreitung. Dennoch bezieht die momentan noch eingesetzte Analyse nur 2-dimensionale Größen mit ein. Natürlich bilden die Aufnahmen der Kamera nur die Projektion des tatsächlichen Sprays ab, trotzdem ist es möglich mittels mathematischen und physikalischen Betrachtungen hieraus ein Plus an Informationen zu ziehen.

Das Vorgehen der bisherigen Auswertung gliedert sich in folgende Schritte:

- Sichtung der Spraybilder
- Festlegen des Schwellwerts (zur Deklarierung Spray/Hintergrund)
- Errechnung der Schwellwertbilder, Häufigkeitsverteilungen und Mittelwertbilder für jeden Zeitpunkt
- Festlegen des kleinsten zu berücksichtigen Ligaments (Umfang)
- Definition des Injektormittelpunktes und Pixelmaßstabs
- Berechnung der Größen:
 - Fläche
 - Umfang
 - Mittlere Eindringtiefe (Schwellwertabhängig)
 - Abwicklung (Eindringtiefe 360° um den Injektor)
 - Umfang/Flächen-Verhältnis
 - Kreisförmigkeit
 - Exzentrizität
 - Momentane Geschwindigkeit (abhängig von dem Zeitschritt der Messung) des Sprays
 - Mittlere Geschwindigkeit des Sprays

Danach werden noch die nötigen Diagramme zu den erfassten Daten erstellt und gespeichert sowie die virtuelle Rekonstruktion der zeitlichen Sprayentwicklung visualisiert. Das Programm bietet zusätzlich noch die Möglichkeit extra Diagramme für interessante Zeitbereiche der Messung zu erstellen. Ein weiteres Unterprogramm der Auswertung gewährleistet einen Vergleich mit einem zuvor vermessenen Spray, womit Unterschiede klarer ersichtlich und die Einflüsse einzelner Parameter ermittelt werden können.

Nachträglich kann die Ergebnisdatei von einem weiteren Programmteil nachbearbeitet werden. Es kann durchaus vorkommen, dass durch eine unglückliche Kombination von Schwellwert und minimalem Ligamenten-Umfang zu bestimmten Zeitpunkten der Messung sogenannte Ausreißer¹ auftreten. Diese können in der Darstellung des gemessenen Sprays gewählt und extrahiert werden, sodass der Einfluss dieser Störungen entfernt werden kann.

¹ Z.B. Detektion von unerwünschten Hintergrundobjekten, Reflexionen oder Tropfen

Sowohl die Berechnung der neuen Werte für die Ergebnisdatei als auch die Diagramme der betroffenen Messpunkte werden automatisiert neu erstellt und abgespeichert.

7. Prüfstands-Setup

Besonderheiten

Bisweilen wurden am Einspritzprüfstand des IFZN's hauptsächlich Streulicht-Aufnahmen der Spraystrukturen realisiert. Aufgrund des einfachen Aufbaus und der Fülle an Information ist dies sicherlich gerechtfertigt, allerdings wurde für diese Arbeit der Ansatz der Hintergrundbeleuchtung gewählt.

Hintergrundbeleuchtung bietet bei richtiger Anwendung den Vorteil, dass ein Übersteuern des Kamerachips völlig ausgeschlossen werden kann. Bei konventioneller Streulicht-Aufnahmen kann es in Abhängigkeit des Reflexionsvermögens des betrachteten Objekts oft zu solchen Übersteuerungen kommen. Der Pixel des Chips zeigt dann den höchstmöglichen Wert (hier 255, da 8-Bit-Information) an, der tatsächliche Helligkeitswert kann aber für diesen Pixel auch deutlich oberhalb des vom Chip erfassbaren Wertes liegen. Somit ist eine genaue Analyse der Helligkeitswerte in diesen Regionen möglicherweise stark fehlerbehaftet.

Ein ähnlicher aber nicht ganz so häufig auftretender Effekt lässt sich auch bei Hintergrundbeleuchtung feststellen. Ist hier das beobachtete Objekt optisch dicht genug, ergeben sich Pixelwerte von 0, da das gesamte Licht vom Chip abgeschirmt wird. Dieser Effekt kann aber dann nur vom betrachteten Objekt verursacht werden, während Reflexionen ebenfalls an Hintergrund-Objekten erfolgen können. Hierdurch hat man also schon eine Fehlerquelle beseitigt.

Des Weiteren kann und muss man seine Hintergrund-Helligkeit vorab festlegen. Findet dies in korrekter Weise statt, kann man die volle Bandbreite des Kamerachips ausnutzen, indem man ausreichend Licht für hohe Hintergrundwerte auf den Chip treffen lässt. In der Praxis verwendet man eine Beleuchtung, die knapp unter der Grenze des Chips eingestellt wird, um hohe, aber nicht zu hohe Pixel-Werte zu erreichen.



Abbildung 1: Schema des Belichtungsaufbaus am Prüfstand

Beim experimentellen Teil dieser Arbeit wurde der Aufbau wie in Abbildung 1 zu sehen umgesetzt. Einzige Abweichung bildet die dargestellte Lochblende, diese wurde durch die Irisblende der Blitzlichtquelle ersetzt.

Anzumerken ist hier, dass aufgrund des Bauraumes kein kollimiertes Licht verwendet werden konnte. Kollimiert beschreibt einen parallelen Strahlengang und somit sehr scharfe Kanten eines Objekts im Bild. Will man diese Eigenschaft nutzen, bietet es sich an einen kompletten Schlierenaufbau zu nutzen. Dieser enthält eine zweite Linse und eventuell eine Schlierenkante. Wird diese Schlierenkante nicht eingesetzt, ergibt sich ein Bild, welches die Vorteile des kollimierten Lichts nutzen kann.



Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Schlierenmethodik [1]

Ein kollimierter Strahlengang gewährleistet eine nahezu identische, sehr scharfe Abbildung des betrachteten Objektes während der sogenannte Schlierenaufbau sogar im Stande ist Dichteunterschiede (wie in Abbildung 2 dargestellt) kenntlich zu machen. Schon sehr kleine Abweichungen der Dichte bewirken einen Unterschied im Strahlengang in Bezug auf den Winkel des Lichts. Somit ergibt sich ein differenzierter Eintrittswinkel in die zweite Linse im Vergleich zu einem unbeeinflussten Strahlengang –was aus der die teilweisen Abschattung durch die Schlierenkante und die Überlagerung mit anderen Strahlen in einer Hell-Dunkel-Verschiebung resultiert.

Der verwendete Aufbau hingegen bietet durch Streuung, Brechung und Reflexion Möglichkeiten zur Verzerrung eines betrachteten Objekts. Eine scharfe Kante eines Bildinhalts kann also leicht unscharf bzw. "verwischt" werden. Diese Verwischung der Kantenlinien wird begünstigt durch große Abstände von Objekt zur Kamera, der Einbringung der Belichtung, deren Abstand zum Objekt und der Brennweite, Linsenanordnung und Qualität des verwendeten Objektivs der Kamera sowie dem geometrischen Auflösungsvermögen des Chips.

Es wurde ein Hintergrund-Setup umgesetzt, welches einen möglichst gleichmäßigen Hintergrund -sprich gleiche Helligkeit im gesamten Bildbereich- gewährleistet. Hierzu wurde der Filter (Abbildung 1) genutzt. Ein entscheidender Nachteil, den dieser Aufbau -im Vergleich zu Streulichtaufnahmen- bietet, ist ein Einschnitt in den beobachtbaren Raum. Denn durch die Verwendung eines Spiegels und der Notwendigkeit einer Beleuchtung im Hintergrund ist es unmöglich das Spray ab dem Düsenloch-Austritt zu beobachten. Man kann sich es so vorstellen, dass der Injektor der Belichtung "im Weg ist" oder sich selbst abschattet. Zusätzlich ergibt sich durch die Dicke des Spiegels ein zusätzlicher Totraum, in dem das Spray nicht erfasst werden kann. Dies muss auch bei der Auswertung der Bilder berücksichtigt werden.



Dieser blinde Raum (St) wird unterteilt in die Strecke Sti, die aus dem Aufbau des Injektors resultiert und dem Teil, welcher durch die Dicke des Spiegels verursacht wird Sts. Je nach Positionierung der Düsenlöcher am Injektor kann Sti variieren. Natürlich ist es sinnvoll den Totraum St so gering wie möglich zu gestalten. Auf die Injektorgeometrie kann allerdings keine Veränderung angewendet werden, der Injektor ist schon vorhanden und Sonderdüsen sind sehr teuer, weshalb die Anordnung bzw. Sti als gegeben betrachtet wird. Für die Minimierung von Sts wurde ein sehr dünner Spiegel besorgt und verwendet. Durch den Winkel des Spiegels kann der blinde Raum ebenfalls beeinflusst werden. Dies wurde beim Aufbau berücksichtigt und -beschränkt durch den Bauraum und die Konstruktion des Prüfstandesweit möglichst ausgenutzt.

Abbildung 3: Totraum der Beobachtungsstrecke

Die Prüfstandsparameter der Experimente gestalteten sich wie folgt:

Parameter	Wert
Raildruck	1200 bar
Kraftstofftemperatur	60 °C
Umgebungsdruck	1,013 bar
Umgebungstemperatur	21 °C
Injektortyp	Bosch-6-Loch-Magnetinjektor
Belichtungszeit pro Bildaufzeichnung	10 µs
Kamera	Allied Pike F505B
Ansteuerverlauf Injektor	18 A: 0-400µs, 12A: 400-1400µs

Aufbau des Einspritzprüfstands

Der verwendete Einspritzprüfstand ist unterteilbar in Hardware-gesteuerte und Softwaregesteuerte Komponenten. Ebenfalls unterscheidbar ist nach Kern des Prüfstandes und den für die Datenaufzeichnung nötigen Komponenten.

Kraftstoffsystem

Das verwendete System bedient sich der mittlerweile sehr üblichen Common-Rail-Technologie, welche einen hochdruckgespeisten, relativ großen Druckbehälter als Versorgungsquelle der Injektoren nutzt. Dies hat den Vorteil, dass durch den –ein Vielfaches der Einspritzmengen enthaltenden- Railkörper ein Einbrechen des Druckes über der Einspritzung (durch die Kraftstoffentnahme –resultierend aus der Einspritzung– aus dem Druckspeicher) nahezu vermieden wird.



Abbildung 4: Aufbau der Kraftstoffkreisläufe

Der Druck innerhalb des Rails wird durch die Variation des Massenstromverhältnisses zwischen Zu- und Rücklauf gesteuert. Diese Variation wird über das sog. Druckregelventil (Abbildung 5) durchgeführt, welches den Ablauf in die Rücklaufleitung steuert.

Jegliche Kompression eines Mediums hat einen Temperaturanstieg zufolge, was unerwünschte Verluste und die Notwendigkeit einer Kühlung (natürlich erst ab einem bestimmten Grenzwert) bedeuten. Durch die sehr hohen Drücke, die bei üblichen Common-Rail-Systemen verwendet werden, erhitzt sich der Kraftstoff besonders stark und eine Kühlung ist hier unausweichlich. Ein wichtiges Element im Kreislauf bildet die sogenannte Zumesseinheit, welche den Massenstrom durch den Hochdruckteil des Systems begrenzt. Je mehr Kraftstoff verdichtet wird, desto höher die energetischen Verluste bei konstanter Abnahmemenge (durch die Injektionen) ergo höherer Energieinhalt im Rücklauf und größerer Kühlungsbedarf. Deshalb möchte man nur so viel Kraftstoff wie nötig, aber so wenig wie möglich auf die hohen Raildrücke verdichten.

7

Signallaufplan

Die Signalsteuerung fußt auf einer Counter/Trigger-Karte der Firma National Instruments, welche zeitlich aufeinander getaktete Rechtecksignale ausgeben kann. Diese Triggerausgänge steuern die Reihenfolge und den zeitlich korrekten Ablauf einer Sprayaufnahme.



Abbildung 5: Aufbau des Signallaufs am Prüfstand

Am Prüfstand werden drei zueinander getaktete Trigger-Signale verwendet. Ausgehend vom Prüfstands-PC beziehungsweise der verbauten Counter/Trigger-Karte werden die Signale verteilt an:

- Injektorsteuergerät
- Kamera
- Stroboskop-Lichtquelle

Je nach Ziel bewirkt das Trigger-Signal die gewünschte Reaktion des Ziel-Geräts. Der Trigger an das Injektorsteuergerät leitet die gewünschte Ansteuerung des Injektors ein, welche direkt am Steuergerät festgelegt werden kann. Die Kamera startet die Aufzeichnung eines Bildes. Das Stroboskop gibt einen intensiven Lichtblitz für die Belichtung des Kamera-Chips aus.

Unabhängig von diesen Signalen existieren noch zwei weitere markante Signalleitungen. Die Leitung vom Netzteil zum Druckregelventil definiert die Stellung des Ventils und damit den resultierenden Raildruck für die Einspritzung. Die Verbindung von Drucksensor zu Multimeter gewährleistet die Kontrolle des gewünschten Rail-Drucks. Letztendlich schließt der Mensch den Regelkreis: vom Netzteil zum Druckregelventil zum Drucksensor über das Multimeter bis hin zum Bediener, welcher das Netzteil nachregelt bis der gewünschte Druck vorhanden ist.

Timing

Die zeitliche Steuerung der Komponenten bildet die größte und wichtigste Herausforderung bei der Vermessung von schnellen Vorgängen. Gerade bei der Dieseleinspritzung werden durch die unglaublich hohen Drücke extrem schnelle Vorgänge hervorgerufen. Um sich die Zeitspannen vorstellen zu können: innerhalb der Dauer eines Wimpernschlages könnte man theoretisch schon 300 bis 400 recht lange Einspritzungen vornehmen. Auch die Geschwindigkeiten sind enorm. Rechnet man mit 1200 bar verlustfrei, so erreicht die Austrittsgeschwindigkeit des Sprays einen Wert von ca. 530 m/s, was ungefähr 1900 km/h entspricht. Allein diese Randbedingungen bedingen eine hohe zeitliche Genauigkeit.

 Injektor: Bekommt das Steuergerät einen Triggerimpuls geliefert, so soll es ein sofortiges Öffnen der Einspritzdüse auslösen. Bereits die interne elektrische Verschaltung der Komponenten bewirkt einen zeitlichen Verzug. Den anteilig jedoch viel höheren Einfluss hat hier der Injektor selbst.



Abbildung 6: Schema des Steuerventils eines Magnetinjektors

Die Einheit, welche die Nadelbewegung induziert, nennt man Steuerventil. Dieses wird direkt vom Magnetfeld der Spule betätigt und öffnet einen Ablauf des Steuervolumens oberhalb der Injektornadel (hierzu gleich mehr). Die Ausbildung des Magnetfeldes der Spule benötigt physikalisch bedingt eine gewisse Zeit – eine Verwendung von möglichst großen Anzugs-Strömen reduziert diese merklich, erwärmt aber die Spule enorm. Aufgrund dessen muss eine gewisse Totzeit durch den Magneten akzeptiert werden. Durch das Öffnen des Ventils ergibt sich ein Massenabfluss aus dem oberen Steuerraum und damit ein Abfall des Druckes innerhalb dieses Volumens, was eine Reduktion der resultierenden Kraft auf die Nadel bewirkt.



Im unteren Bereich der Nadel gibt es ebenfalls eine Wirkfläche für die Einwirkung des Kraftstoffdruckes. Resultierend ergeben sich zwei Kräfte auf die Injektornadel, welche entgegengesetzt wirken. Im geschlossenen Zustand überwiegt die Kraft im oberen Steuerraum, was die Nadel in den Sitz presst und den Injektor geschlossen hält. Öffnet nun das Steuerventil, ergibt der Massenabfluss aus dem oberen Steuerraum einen Druckabfall und führt somit zum Abnehmen dieser Kraft. Nachdem der Raildruck quasi konstant bleibt, überwiegt irgendwann F_{pu} (Kraft aus der unteren Wirkfläche) und die resultierende Kraft wirkt nach oben. Es beginnen die beschleunigte Bewegung der Nadel und damit der eigentliche Öffnungsvorgang des Injektors.

Sowohl die Nadel selbst als auch das Steuerventil des Injektors sind massebehaftet. Die Massenträgheit der Komponenten und Reibung aus den Führungen und Flüssigkeitsreibung vergrößern nochmals die daraus entstehende Totzeit.

Jede Verzögerung muss für die Aufzeichnungen berücksichtigt werden. Im Falle des Injektors wird mithilfe der Spraybilder der erste Austritt von Kraftstoff aus den Düsenlöchern ermittelt. Mit Hilfe dieses Vorgehens kann die gesamte Totzeit aus dem Injektorsteuergerät und dem kompletten Injektor für die Messungen ermittelt und somit auch berücksichtigt werden.

Abbildung 7: Schema der Kraftwirkung innerhalb des Injektors

- Kamera: Die Latenzzeit der Kamera ist wenig entscheidend. Zwar benötigt auch hier die Elektronik Zeit bis eine tatsächliche Datenakquisition durch den Chip der Kamera eingeleitet wird, jedoch ist das Einspritzevent bezogen auf die minimale Belichtungszeit des Chips so winzig, dass die Kamera sehr lange vor dem Beginn der Einspritzung aktiviert werden muss. Wichtig hierbei ist den Chip richtig zu kalibrieren, sodass das Umgebungslicht keine Belichtung hervorruft, jedoch die Intensität des Stroboskops ausreicht den Chip zu belichten.
- Stroboskop: auch hier führt der Trigger-Eingang nicht zu einem sofortigen Lichtpuls. Wie bei bisher allen Bauteilen führen hier auch interne Vorgänge der Elektronik zu einem kleinen Verzug zwischen dem Eingang des Triggersignals und dem Auslösen des Lichtblitzes, welcher zwischen zehn und elf Mikrosekunden Dauer besitzt. Die Zeit, welche das Licht durch die Lichtleiter hin zum Austritt benötigt, ist hier durch die Größe der Lichtgeschwindigkeit vernachlässigbar. Auch diese Zeit wird praktisch automatisch kompensiert, da eine Belichtung des Kamera-Chips ja nur durch den erzeugten Blitz möglich ist.

Hieraus ist ersichtlich, dass lediglich der Verzug aus der Injektorsteuergerät- und Injektorreaktion zu korrigieren ist. Aus der optischen Bestimmung kann sie ermittelt und berücksichtigt werden.

8. Übersicht Vorgehen

Nachfolgend wird zum besseren Verständnis der Vorgehensweise zunächst ein Überblick über die einzelnen Programmteile/-schritte gegeben, die eine Verbesserung der bisherigen Auswertung (siehe Kapitel 6) mit sich bringen sollen.

- 1. Ermitteln der Spraymittelachse
- 2. Länge der Sprayachse: Auswertung des Helligkeit-Verlaufs über der Sprayachse
 - a. Curve-Fitting
 - b. Richtungsanalyse
 - c. Endpunktbestimmung
- 3. Orthogonalenbildung auf Sprayachse in Punkt x (0²..x..Spraylänge)
- 4. Auswertung des Helligkeit-Verlaufs über die Orthogonale Sprayweite
 - a. Curve-Fitting
 - b. Endpunktbestimmung
- 5. Bilden/Herstellung eines 3-D-Modells für dieses/jeweiliges Spray
- 6. Volumina-Berechnung
- 7. Spraymasse-Berechnung
 - a. Detektion des Plateau-Bereiches konstanten Massenstroms (Nadel am Anschlag / bzw. Vollhub der Nadel)
 - b. Bestimmung der Korrelation zwischen Dichte- und Intensitätsverlauf basierend auf Röntgenuntersuchungen.
 - c. Aufstellen des Spraymodell Musculus-Kattke
 - d. Kalibrieren des Musculus-Kattke-Modells
 - e. Ansatz eines symmetrischen Sprayverhaltens / Mittelung
 - f. Kalibrierung auf Injektor/Sprayverhalten
 - g. Berechnung der Gesamtmasse in t (0²..t..EOI)

Vorbereitung für die Ermittlung der Sprayachse

Das mit Matlab programmierte Analysewerkzeug stützt sich auf die bisherige Auswertesoftware (siehe Kapitel 6). Aus diesem Grund wird auch direkt mit der Ergebnisdatei aus der vorherigen Auswertung gearbeitet. Daraus wird zunächst jede erkannte Spray-Keule extrahiert und deren Region ermittelt. Die Maxima der Region werden in Abbildung 8 dargestellt. Auf dieses Ergebnis werden weitere Analysealgorithmen angewendet.



Abbildung 8: Durch vorherige Auswertung detektierte Sprayregion

² 0 entspricht hier der ersten Sichtbarkeit des Sprays im Bild

Schritt 1: Erweitern des Spraygebietes

Um die Sprayachse möglichst genau ermitteln zu können, ist es notwendig mehr als die zuvor ermittelte Sprayregion zu betrachten. Die vorherige Auswertung nutzte bisher einfach einen Schwellwert, alle Pixel mit Werten über diesem wurden als Spraybestandteil interpretiert. Nun sieht der Mensch aber sofort / ist es mit bloßem Auge sofort erkennbar, dass das Spray durchaus ein größeres Gebiet einnimmt. Dies ist extrem vom gewählten Schwellwert abhängig. Um nun einen größeren Teil zu nutzen, wird ausgehend vom gekennzeichneten Gebiet eine Erweiterung vorgenommen. Die gesamte Gebietserfassung findet hierbei mittels binären Matrizen statt. Die Pixel können nur True (Zugehörig zum Spray) oder False (Hintergrund) als Zustand annehmen.

Diese Vergrößerung des Betrachtungsgebietes basiert dennoch wieder auf einem Schwellwert. Der Algorithmus verwendet das Basisbild und variiert den Schwellwert um x Schritte. In meinem Programm wähle ich zunächst 50 Schritte. Das iterative Verfahren beginnt beim ursprünglichen Schwellwert, verringert diesen um einen Punkt und erweitert so die Umrandungslinie des gefundenen Objektes geringfügig. Dieser Vorgang wird dann solange wiederholt, bis entweder die 50 Schritte erledigt oder ein zweites Objekt erkannt worden ist. Diese Limitierung ist essentiell, da immer nur ein Sprayobjekt betrachtet werden darf. Ein zweites Spray im Betrachtungsbereich würde eventuell eine Symmetrielinie zwischen den beiden Objekten ergeben, was aber unbedingt zu vermeiden ist.

Aufgrund von Unregelmäßigkeiten im Spray und dem sogenannten Air-entrainment kann es leicht dazu kommen, dass während dieser Erweiterung im Randgebiet des Sprays ein weiteres Ligament erkannt wird. Dieses soll aber dennoch beibehalten und nicht von der Analyse ausgeschlossen werden. Deshalb wird ein weiterer Schritt unternommen unter der Annahme, dass die Ligamente am Rand des Sprays in etwa dieselben Grauwerte besitzen. Unter Berücksichtigung von Untersuchungsergebnissen zur Tröpfchen-Größenverteilung ist diese Annahme gerechtfertigt. Durch die Matlab intrinsische Funktion "bwmorph" wird zunächst die Umrandung aufgedickt, um eine Verbindung zwischen den Ligamenten und dem Hauptspray herzustellen. Anschließend werden eventuell dadurch entstehende Löcher geschlossen.

Schritt 2: Erweiterung und Korrektur der Umrandung

Um zu gewährleisten, dass Rand-Ligamente des Sprays und zumindest ein kleiner Anteil des Hintergrundgebietes mit in die Betrachtung einbezogen werden, wird die festgestellte Umrandung nochmals um 10 Pixel nach außen "aufgedickt". Hierdurch ergibt sich erneut ein größeres Gebiet, allerdings können sich dadurch auch Berührungen der Umrandung ergeben und dadurch wiederum Einschlüsse von Hintergrundpixel. Um zu verhindern, dass diese eingeschlossenen Pixel in der weiteren Auswertung Probleme bereiten, wird das Objekt nochmal "geschlossen". Alle innerhalb der neuen Umrandung liegende Pixel werden zum Spray gerechnet, bekommen also den Zustand True zugewiesen.

Als Ergebnis ist die Region mindestens um 10 Pixel erweitert worden. Wie in Abbildung 9 zu sehen, ist hierdurch auch schon ein Anteil an Hintergrundpixel für die Detektion der Sprayachse gewonnen. Die limitierende Voraussetzung für die Sprayachse, definitiv nur ein Spray betrachten zu dürfen, ist hier ein entscheidender Punkt. Da dennoch bei der Sprayachsen-Betrachtung mehr als eine Sprayregion gefunden werden kann, werden hier ebenfalls noch einmal eine Überprüfung und ein Auswahlverfahren angewendet. Hierzu jedoch mehr im Kapitel Sprayachse.

detected spray area and spray axis



Abbildung 9: minimal erweiterte Sprayregion und detektierte Sprayachse

9. Sprayachse

Die Ermittlung einer Sprayachse war im ursprünglichen Programm nicht vorgesehen, ist aber für einige der später erklärten Teile des entwickelten Analysewerkzeugs dringend notwendig. Mitunter deshalb wurde ein Abschnitt gänzlich der Detektion der Sprayachse gewidmet.

Beim ersten Austritt aus der Düse besitzt das Spray noch nicht die übliche Keulen-Form, was die Detektion der Hauptachse erschwert. Deshalb wird im Programm berücksichtigt, wo sich der Injektormittelpunkt befindet (rotes Kreuz in Abbildung 9), um diese zuordnen zu können. Zudem ist die genaue Erfassung der Sprayachse, die in der Regel konzentrisch zum Düsenloch verläuft, an sich komplex.

Wird ein Spraybild betrachtet, fällt es einem Menschen leicht die Achse zu erkennen, da dieser etwaige Unregelmäßigkeiten am Sprayrand oder mehrere Sprayfragmente/-Ligamente zu trennen vermag. Dies aber einem Computer beizubringen ist nicht gerade trivial. Meist reicht hierfür eine einfache Formanalyse nicht aus. Hierbei werden nämlich Unregelmäßigkeiten ebenso erfasst und wie schon erwähnt, ist bei einem sehr kleinen Aufnahme-Zeitpunkt auch das Spray noch nicht voll ausgebildet bzw. hat es noch eine kleine Fläche respektive Anzahl von Pixeln, was das Erkennen der Sprayachse erheblich erschwert. Es stellt sich mehr rund als keulenförmig dar. Hier eine eindeutige Achse als Hauptachse des Sprays festzulegen ist nicht unmöglich, aber trotzdem nicht sehr einfach.

Aus diesem Grund wurde eine alternative Methodik zur Formanalyse gewählt um die Sprayachse zu finden/detektieren. Ziel dieser Methode ist es, das ganze Objekt an sich und zusätzlich noch den umgebenden Hintergrundbereich zu untersuchen, nicht nur die Form beziehungsweise äußere Kontur. Die gewählte Vorgehensweise zieht die Gradienten eines jeden Pixels mit ein und untersucht die Symmetrie zu -in definierten Abständen angeordnetenanderen Bildpunkten. Unter der Annahme, dass das Spray sich nahezu symmetrisch zur Sprayachse entwickelt, finden hier auch Unregelmäßigkeiten nur geringe Beachtung, da hier der gesamte Bildbereich mit einbezogen wird.

Die Annahme einer symmetrischen Sprayentwicklung ist nicht unüblich und dadurch gerechtfertigt, dass der Injektor einen symmetrischen Aufbau besitzt, dass wir die Projektion in Injektorachsenrichtung / in die Richtung der Injektorachse betrachten und auch außerhalb des Injektors mit zumindest nahezu gleichen aerodynamischen und thermischen Einflüssen beidseitig der Sprayachse zu rechnen ist. Auch bei vielen anderen wissenschaftlichen Arbeiten wurden und werden solche Annahmen zu Recht getroffen ([2], [3]).

Sprayachse

Das verwendete Verfahren wurde von Prof. Dr. Christoph Dalitz, Regina Pohle-Fröhlich und Tobias Bolten auf der International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP) unter dem Titel "Detection of Symmetry Points in Images" [4] vorgestellt und auf der Webseite der Hochschule Niederrhein zur Verfügung gestellt und gestaltet sich wie folgt:

Zunächst wird das Gradientenbild des Spraybildes errechnet. In Matlab gibt es die Möglichkeit zwischen zwei Gradienten-Matrizen zu wählen, die aber im Endeffekt dieselbe Aussage liefern. Entweder man nutzt Gradientenvektoren für x- und y-Richtung oder die Betrags- und – Richtungsmatrix der Gradienten. Für die Berechnung des Symmetriewertes eines Punktes können beide verwendet werden, da sie in Kombination denselben Gradientenvektor wiederspiegeln.

Um das Verfahren erklären zu können, stelle man sich ein Gradientenbild vor, welches durch $\vec{G}(x, y)$ beschrieben wird. Dieses Bild besitze im Punkt (x,y) eine Symmetrie. Somit ergibt sich für einen Punkt verschieden von (x,y) folgende Eigenschaft. Ein Punkt in $\vec{G}(x + dx, y + dy)$ besitzt somit einen gespiegelten Punkt mit gleichen Eigenschaften in $-\vec{G}(x - dx, y - dy)$ -wie in Abbildung 10 zu sehen.

$$(x - dx, y - dy)$$

$$\vec{G}' = -\vec{G}$$

$$(x, y)$$

$$\vec{G} = -\vec{G}$$

$$(x + dx, y + dy)$$

Abbildung 10: Gradientenwerte bei Punktsymmetrie [4]

Um der Symmetrie einen Wert zuweisen zu können und somit eine mathematische Handhabbarkeit zu realisieren, kann man zunächst einmal definieren, dass die Gradienten bei einer Symmetrie immer in entgegengesetzter Richtung verlaufen müssen. Dies bewirkt -mathematisch ausgedrückt- dass das Skalarprodukt beider Gradienten negativ ausfällt:

$$\vec{G}(x+dx,y+dy)\cdot\vec{G}(x-dx,y-dy) \stackrel{!}{\leqslant} 0 \tag{1}$$

Dieses Skalarprodukt wird minimal (also betragsmäßig maximal), wenn die Gradienten senkrecht aufeinander stehen. Hierdurch kann ein Maß für die Symmetrie in einem spezifizierten Punkt definiert werden. Der Wert dieses Skalarproduktes kann nun für jede Distanz bis zum Rand des Betrachtungsgebietes berechnet werden. Wie in Abbildung 10 ersichtlich, werden zwei gegenüber liegende Punkte mit in die Betrachtung einbezogen. Ausgehend hiervon wird folgende Formel für die Berechnung einer Symmetriematrix aufgestellt: [4]

$$S(x, y, r) = -\sum_{dy=1}^{r} \sum_{dx=-r}^{r} \left[\vec{G}(x + dx, y + dy) \cdot \vec{G}(x - dx, y - dy) \right] - \sum_{dx=1}^{r} \left[\vec{G}(x + dx, y) \cdot \vec{G}(x - dx, y) \right]$$
(2)

Die dritte Dimension r der Matrix S entspricht hier dem Radius der Symmetrie-Region. Diese kann ausgehend von einem Bild oder Bildbereich natürlich nur bis zum Rand desselben gehen.

Vorbereitung für die Ermittlung der Sprayachse

Deshalb kann r für jeden Bildpixel auch einen individuellen, neu zu berechnenden Wert annehmen, maximal jedoch die Hälfte der kleineren Dimension des betrachteten Bereichs. Die Minuszeichen in der Formel dienen dem Konvertieren zu positiven Werten für S. Somit erhält S größere Werte für stärkere Symmetrie.



Abbildung 11: Visualisierung der Wirkungsweise der Symmetrieformel (2)

In Abbildung 11 sind beispielhaft zwei Punkte (einer liegt im Spraybereich der zweite außerhalb) und deren charakteristischen Gradientenwerte visualisiert. Es wird deutlich, dass die angewendete Vorgehensweise ein paar Vorteile gegenüber einer Formanalyse bietet. Zum einen werden die Gradienten natürlich am Rand des Sprays besonders groß, bei der Analyse der Grauwerte würde der Kern des Sprays sehr große Werte liefern. Bei den Gradienten ist immer der Übergang von Luft zu Spraykern am stärksten gewichtet, welcher auch ein sehr gutes Kriterium für die Symmetrieachse liefert. Zudem hat der Gradient eine Richtung, welche in die Berechnung mit eingeht.

Vergleicht man die in Abbildung 11 sichtbaren Punkte P und Q, ist deutlich zu sehen, dass eine Berechnung der Größe S (GI. 2) in beiden Punkten einen viel größeren Wert bei Q liefern muss. Zum einen sind die Gradienten bei Q sehr viel größer, was auch die Gewichtung von Hintergrundeinflüssen mindert und zum anderen gestalten sich die Gradienten nicht mehr ganz so parallel. Auch ist anzumerken, dass durch die Berücksichtigung von Gradientenstärke und deren Richtung ein scharfkantiges Objekt einen größeren Symmetriewert besitzt als ein Objekt mit weicher Kante, aber gleicher Symmetrie. Dies ist hier bewusst beibehalten worden, da durch die Subtraktion des Hintergrund-Bildes das Spray und dessen Ligamente die Objekte mit größter Kantenschärfe bilden. Dieser Einfluss könnte noch mit einer logarithmischen Umformung des Gradienten behoben werden, liefert hier aber keine besseren Ergebnisse. Die Transformation würde wie folgt gestaltet werden können:

$$\vec{H} = \frac{\vec{G}}{||\vec{G}||} * \log(1 + ||\vec{G}||) [5]$$
(3)

Eine solche Transformation gleicht die ungleiche Gewichtung von scharfen Kanten zu weichen Übergängen aus. Da aber hier die scharfen Kanten vorwiegend im Hintergrund vorkommen und das Spray eher einen weichen Übergang besitzt, wäre diese Vorgehensweise kontraproduktiv. Durch die Subtraktion des Hintergrundes sollte das Spray den größten Gradienten besitzen, wendet man also die Transformation an vergrößert sich der Einfluss von nicht perfekt entfernter Hintergrundobjekte. Es ist ebenfalls anzumerken, dass die Ergebnismatrix S eine dreidimensionale Matrix bildet. Die dritte Dimension liefert hier Aussage über die Größe des Symmetriebereichs, also zu welcher Entfernung ein Punkt innerhalb der Matrix eine Symmetrie besitzt. Umso größer der betrachtete Bildausschnitt bzw. das Bild wird, desto größer wird auch die dritte Dimension der Ergebnismatrix.

Um eine Aussage über die gesamte Symmetrie zu bekommen, muss diese noch vereinfacht werden. Das Spray breitet sich mit zunehmendem zeitlichem Abstand vom Spritzbeginn immer weiter aus und somit werden die Ergebnismatrizen S immer größer (in allen Dimensionen). Dadurch ist nicht bekannt, welche "Tiefe" (r-Koordinate) am aussagekräftigsten für das Spray ist. Auch aus diesem Grund soll die gesamte S-Matrix in die Betrachtung mit einbezogen werden. Durch die Keulenform der Sprays sind die aussagekräftigsten Radien ebenfalls abhängig von der Position auf der x-Achse und können in Sprayrichtung nur bis zur maximalen Spraybreite reichen. An dieser Stelle ist aber die Richtung des Sprays noch unbekannt, weshalb unbedingt der gesamte Bereich einbezogen werden muss.

Da der Übergang vom Spray zum Hintergrund durch die besondere mathematische Herangehensweise sehr stark gewichtet wird und diese ebenfalls die stärkste Gewichtung für die Symmetrie besitzen soll, werden die Symmetriewerte hier aufsummiert. Dadurch haben diejenigen Pixel einen besonders hohen Wert, die auch in großer Entfernung noch hohe Symmetrie besitzen. Die höchsten Werte der Symmetrie ergeben sich also automatisch im Inneren des Sprays.

Ausgehend von dieser aufsummierten Symmetriematrix kann nun ein Curve-Fitting benutzt werden, um die passendste Gerade durch die Punktwolke zu finden. Die Matrix spiegelt hier den Bildbereich wieder, während die Werte innerhalb von S die Gewichtung der Punkte darstellt. Die Kurve des kleinsten Fehlerquadrates wird dann vorläufig zur Symmetrieachse erklärt (Abbildung 12).

5	10	8	7	9	8	7	7	6	2
18	20	4	3	22	98	40	7	12	23
101	150	92	70	47	1	12	54	5	6
62	44	200	511	602	48	55	71	14	15
21	29	105	436	577	822	33	189	2	9
35	35	48	108	97	207	774	898	123	18
16	28	24	33	38	17	18	29	28	34
8	7	5	19	24	21	13	14	8	7

Abbildung 12: Beispiel-Matrix für Symmetriematrix S mit Geraden des kleinsten Fehlers

Hieraus lässt sich die Formel der Achse extrahieren. Diese wird dann noch auf Stimmigkeit überprüft, indem eine Korrelation zur Hauptachse einer Formanalyse vorgenommen wird. Die Formanalyse ergibt eine Achse durch den Flächenschwerpunkt des aus dem Schwellwert generierten Spraybilds und entlang der längsten Objektdiagonalen. Mittels des Winkels dieser zwei Geraden und der Position des Injektor-Mittelpunkts lässt sich eine Plausibilitäts- und Richtungsanalyse durchführen. Auf Basis dieser Überprüfungen wird entschieden, welche der Achsen für die weitere Betrachtung herangezogen werden soll. Da die Hauptachse der Formanalyse immer entlang der längsten Diagonalen liegt, wurde dies als Kriterium festgelegt (abhängig vom Schwellwert). Ist die Symmetrieachse länger als die Hauptachse der Formanalyse, kann davon ausgegangen werden, dass die Symmetrieachse richtig ermittelt wurde.



Abbildung 13: Desachsierung einer ermittelten Sprayachse

Zum Beispiel kann bei kleinen Zeiten nach SOI das Spray in orthogonaler Richtung zur konzentrischen Düsenloch-Achse eine höhere Symmetrie besitzen. Ist dies der Fall, berechnet die Symmetrieberechnung diese Orthogonale als Symmetrieachse, während die Formanalyse eine Achse leicht verschieden zur Düsenlochkonzentrischen liefert. Hierdurch ist die aus der Formanalyse ermittelte Achse mit einem kleineren Fehler behaftet als die berechnete. Ausgehend hiervon und bestätigt durch viele Testläufe der Softwareist diese Plausibilitäts-Prüfung sinnvoll und auch notwendig. Die Berechnung der S-Matrix erfolgt der innerhalb Subroutine "symmetryaxis2.m".

Für die Ermittlung der Fehlstellung der Achse und damit der Auswahl der richtigeren Sprayachse werden die Winkel beziehungsweise die minimale Entfernung zum Injektormittelpunkt überprüft. Je kleiner der Winkel zur koaxialen Achse aus dem Düsenloch, desto kleiner der minimale Abstand der ermittelten Achse zum Iniektormittelpunkt. Auf Basis des Winkels wird also ausgewählt ob die berechnete Symmetrieachse oder die Achse aus der Formanalyse den kleineren Fehler liefert. Es kann allerdings nicht immer gewährleistet werden, dass der Injektormittelpunkt konzentrisch zum Düsenloch liegt. Auch Abnutzungs-

erscheinungen oder werksseitige Abweichungen beim Bau des Injektors können ein Abweichen des Spraywinkels verursachen.

Länge der Sprayachse

Ist erstmal die Sprayachse gefunden, kennt man eigentlich erst die Richtung des Sprays, jedoch nicht seine Ausdehnung. In der Vergangenheit wurde oftmals ein Grenzwert für die Ermittlung der Spraylänge genutzt. Um diesen Schritt genauer zu gestalten, könnte ebenfalls ein lineares Verfahren zur Detektion der Sprayenden erfolgen, jedoch wird hier ein noch genauerer Ansatz verfolgt.

Sehen wir uns zunächst den Verlauf der Grauwerte über eine ermittelte Sprayachse an. Die folgende Abbildung 14 zeigt ein gefundenes Spray bei 40µs nach Spritzbeginn (SOI: Start of Injection). Der originale (rotes Rechteck), der vergrößerte Bereich (magentafarbenes Rechteck), die Sprayachse (rote Linie) und deren Orthogonalen (grüne Linien) sind ebenfalls hervorgehoben. Hier ist sehr deutlich die immense Vergrößerung des Betrachtungsbereichs für die Sprayachse auffällig (rotes Rechteck zu magentafarbenes Rechteck).



Abbildung 14: detektiertes Spray mit Sprayachse und Orthogonalen

Die rote Linie ist hier die bereits vollständig ermittelte Sprayachse. Bevor diese allerdings eingezeichnet werden kann, müssen natürlich die Endpunkte ermittelt werden.

Hierfür wird der Verlauf der Grauwerte über das gesamte Bild mit einbezogen, was sich wie folgt visualisiert:



Abbildung 15: Grauwertverlauf der Sprayachse über das gesamte Bild und gefiltertes Signal

Zunächst fällt auf, dass die Kurve zwei Spraykeulen schneidet. Durch die Berücksichtigung der Position des Flächenschwerpunktes der betrachteten Keule kann der richtige Kurvenabschnitt gewählt werden. Auffällig ist ebenfalls der große Rauschanteil beidseitig der Spraykeulen, die sich ebenfalls in einer gewissen Rauigkeit des Signals im Spraybereich ausschlägt. Dies gilt es auszugleichen bzw. zu glätten, will man eine Signalanalyse höher des ersten Grades durchführen. Nun ist dies zwar ein Grauwert-Verlauf und keine zeitdiskrete Signalkurve, aber es lässt sich dennoch wie eine solche behandeln und analysieren. Definiert man die X-Achse als zeitabhängige Größe und die Y-Achse als Signalwert, bietet es sich an, einen Low-Pass-Filter zu verwenden, um "schnelle" Änderungen -also Sprünge des Grauwertes über wenige Pixel in x-Richtung- zu glätten.



Abbildung 16: Beispiel eines Curve-Fittings ohne Filterung

Abbildung 16 zeigt einen vorherigen Versuch mittels exponentieller Näherung ohne Filterung des Signals. Im Beispiel gelingt die Annäherung ganz gut, nur hat sich gezeigt, dass für einige Fälle extreme Abweichungen vom Originalverlauf auftreten können, sobald sich ein zusätzlicher Wendepunkt oder ein zweites Extremum findet. Aufgrund dessen wurden die Filterung und die Änderung der Kurven-Anpassung vorgenommen.

Als Low-Pass-Filter wurde ein individuell gestalteter Butterworth-Filter verwendet. Um diesen einzustellen. benötigt man zuerst die Filterparameter respektive die Transferfunktionskoeffizienten und hierfür als Parameter eine sogenannte "Filter-Ordnung" und eine Grenz-Frequenz. Diese Parameter richtig einzustellen ist abhängig davon, wie man die Grauwerte in ein zeitdiskretes Signal überführt. Ein Pixel bzw. dessen Grauwert entspricht einem Sample des Signals, man kann aber dennoch verschiedene Zeit-Basen für die Interpretation nutzen. Für die Berechnung der Transferfunktionskoeffizienten wurde eine Ordnung von fünf und eine Grenzfrequenz von 0,1(Hz)³ zugrunde gelegt. Die Grenzfrequenz ist diejenige Frequenz, bei der die Ausgangsgröße den Wert $\frac{1}{\sqrt{2}}$ annimmt. Als Zeitbasis wurde eine Samplefrequenz von 10 Hz gewählt. Das Zusammenspiel von Sample- und Grenzfrequenz legt fest, welcher (Frequenz-) Anteil des Signals gefiltert wird. Die Transferfunktion des Filters gestaltet sich wie folgt:

³ Unterhalb dieser Frequenz findet keine Verstärkung des Signals statt. Der Wert fußt auf der Interpretation des Signals mit 10 Hz (Samplefrequenz). Ein Signal/Frequenzanteil mit der Grenzfrequenz wird auf das 0,7-fache $(\frac{1}{\sqrt{2}})$ abgeschwächt.

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2) * z^{-1} + ... + b(n+1) * z^{-n}}{a(1) + a(2) * z^{-1} + ... + a(n+1) * z^{-n}}$$
(4)



Abbildung 17: Bode-Diagramm eines Standard-Butterworth-Low-Pass-Filters [Sample-Rate:1000Hz, Grenzfrequenz: 0,6pi] [6]

Der Filter zerlegt das Signal in unterschiedliche Frequenzanteile. Hierfür spielt die Samplefrequenz eine große Rolle, wobei hiermit die Zeitbasis für das Signal und somit für die Filterung gelegt ist. Da wir hier kein zeitabhängiges Signal, sondern lediglich Pixelwerte haben, ist es notwendig eine geeignete Zeitbasis zu wählen. Mit der Samplefrequenz von 10 Hz interpretiert der Filter jeden Pixel als einen zeitabhängigen Wert mit einem Abstand von 0,1 Sekunden zum vorherigen Pixelwert.

Durch die Einstellung des Filters basiert die Glättung des Signals auf der Frequenzanalyse innerhalb einer Sekunde. Bei gewählter Samplefrequenz von 10 Hz entspricht diese einer Anzahl von 10 Pixelwerten. Um die Filterung anwenden zu können muss der Filter also erst einmal mindestens 10 Werte "einlesen" um wirken zu können. Hieraus resultiert die nachfolgend erwähnte Verschiebung des Signals um 10 Positionen.

Die Größe der Verschiebung ist also abhängig von der festgelegten Sample-Frequenz und muss abhängig von dieser korrigiert werden. Wählt man eine größere Zeitbasis, verschiebt sich auch das Signal weiter nach rechts und umgekehrt. Auf die Form der Kurve hat diese Verschiebung zunächst keinen Einfluss, denn für die Wirkungsweise des Filters ist die Ordnung und die Grenzfrequenz ausschlaggebend. Bei konstanter Ordnung bleibt das Verhalten des Filters ebenfalls konstant, wenn man die Grenzfrequenz (prozentual zur Samplefrequenz) beibehält. Die Verschiebung an sich hat also keine Auswirkung auf die Wirkungsweise des Filters oder die Analyse des Signals. Sie muss lediglich nachträglich wieder korrigiert werden. Mittels des errechneten Transferfunktionskoeffizienten kann dann ein Filter auf den Grauwertverlauf angewendet werden. Durch die Filterung ergibt sich die rote Kurve in Abbildung 15 und Abbildung 18.



Abbildung 18: Signalverlauf innerhalb des interessanten Gebiets

Die Filterung bewirkt eine Verschiebung des Signals, welche sich aber durch das Beibehalten einer Frequenzbasis von 10Hz leicht herausrechnen lässt. Durch die Basis von 10Hz verschiebt sich das Signal konstant um 10 Pixel nach rechts auf der x-Achse. Betrachtet man nun nur noch das gefilterte Signal, kann man eine Position durch Verschiebung nach links um 10 Positionen dem Originalsignal zuweisen. Bei Verwendung einer anderen Kamera ist es eventuell notwendig den Filter neu einzustellen.

Für eine genauere Analyse des Sprays genügt es nicht, nur die Sprayregion zu betrachten. Da hier eine Kurve zur Bestimmung der Spraylänge verwendet werden soll, ist es notwendig auch Informationen zum Hintergrund zu verwenden. Ist der Rauschanteil sehr groß, muss eine unterschiedliche Grenze für das Sprayende definiert werden. Aus diesem Grund wird aus den Hintergrundbildern ein Mittelwert extrahiert, um diesen bei der Spraylängen-Analyse berücksichtigen zu können (gestrichelte, horizontale Linie in Abbildung 18). Zusätzlich werden Anfang und Ende getrennt voneinander behandelt, da der Kurvenverlauf gänzlich unterschiedlich ist und deshalb ein anderer mathematischer Ansatz für die Kurve von Vorteil ist. Als Unterscheidungskriterium dient hierfür der Maximalwert des Grauwertverlaufs, die Position des Injektormittelpunktes und die Verlaufsform des Grauwertes.

Zunächst wird allerdings überprüft, ob der obere Extremwert der Kurve überhaupt oberhalb des aus dem Hintergrund ermittelten Mittelwertes liegt. Ist dies nicht der Fall, wird der Sprayachse eine Länge von einem Pixel zugewiesen. Die Sprayachse liegt dann nur noch auf dem Maximalpunkt der Kurve. Wenn die Werte des Sprays nicht mehr oberhalb des Mittelwertes des Hintergrundes liegen, kann angenommen werden, dass das Spray nicht mehr zu detektieren ist. Im Allgemeinen ist aber damit zu rechnen, dass die Größen deutlich oberhalb dieser Grenze verlaufen.

Sprayachse

Zur Auswertung des Kurvenverlaufs muss berücksichtigt werden, dass zwischen dem "Zentrum" des Sprays und dem Unterschreiten des Grenzwertes eine variable Zahl an Pixeln liegen kann. Hierfür wird die Position des dem Mittelpunkt des Sprays am dichtesten gelegenen Punktes unterhalb des Grenzwertes gemerkt. Ebenfalls wird gespeichert, an welcher Stelle als erstes ein Null-Wert zu finden ist.

Der Abschnitt zwischen Mittelpunkt des Sprays und dem nächsten Nullpunkt (falls nicht vorhanden: Unterschreiten des Mittelwerts des Hintergrunds) wird an eine Unterfunktion übergeben und gewichtet. Die Unterfunktion (fitcurve.m) nimmt das Curve-Fitting vor und übergibt die Ergebnisse zurück. Zuvor wird jedoch definiert, dass die Gewichtung der Kurve wie folgt vonstattengehen soll:

$$w = (G(x) * d)^3 \tag{5}$$

G(x) entspricht hier dem Betrag des Gradienten der Kurve -also deren Steigung, d symbolisiert die Entfernung zum Mittelpunkt des Sprays. Der Koeffizient wurde durch eine Optimierung mit Optislang und ca. 150 Sprays unterschiedlicher Zeitpunkte nach SOI angepasst. Bei vielen Punkten wird dadurch ein sehr gutes Anschmiegen der Kurve bis nach dem Unterschreiten des Grenzwertes erreicht. Auch bei wenigen Punkten wurde durch die Berücksichtigung des Gradienten eine sehr starke Annäherung des Fittings erfüllt.

Subroutine fitcurve.m

Die Unterfunktion nimmt für jeden der zwei Bereiche für jedes Spray ein Curve-Fitting vor. Als Standard-Funktion wird "poly2" verwendet, welche eine Funktion zweiten Grades in die Punktewolke des Grauwertverlaufs legt (6).

Desweiteren wird das Fitting gewichtet und normalisiert vorgenommen. Dies bedeutet, dass jedem Punkt eine sog. Gewichtung zugeordnet wird und er somit stärker oder eben weniger stark berücksichtigt wird.

$$y = p1 * x^2 + p2 * x + p3 \tag{6}$$

Die Normalisierung ersetzt x mit $\frac{x-mean(x_{max} \cdot \cdot x_{min})}{std(x_{max} \cdot \cdot x_{min})}$ also den Wert von x minus dem Mittelwert und dividiert durch die Standardabweichung des gesamten Bereichs. Somit wird die Formel (6) zu:

$$y = p1 * \left[\frac{x - mean(x_{max} \dots x_{min})}{std(x_{max} \dots x_{min})}\right]^{2} + p2 * \left[\frac{x - mean(x_{max} \dots x_{min})}{std(x_{max} \dots x_{min})}\right] + p3$$
(7)

Anschließend wird eine Kurvendiskussion für die angenäherte Funktion durchgeführt. Sind ein oder zwei Nulldurchgänge zu verzeichnen, wird derjenige gewählt, welcher näher am Spraymittelpunkt liegt. Ist kein Nulldurchgang ermittelbar, wird das lokale Minimum verwendet. Zusätzlich wird auch eine Plausibilitäts-Prüfung durchgeführt. Sind die Werte zum Beispiel im negativen, kann die Kurve nicht verwendet werden.

Die Endpunkte des Sprays werden daraufhin an die darüberliegende Routine "symmanalysis.m" zurückgegeben. (Zuerst für die eine Seite des Sprays und über einen erneuten Aufruf der "fitcurve.m" für die andere.) Einer der beiden Punkte entspricht hier immer dem Spraymittelpunkt.



Die Pixel-Koordinaten und die Länge der Sprayachse in Pixel und in mm werden gespeichert.

Abbildung 19: Beispiel Sprayachse und zugehöriger Intensitätsverlauf

Resultierend ergibt sich aus dem Intensitätsverlauf die in Abbildung 19 dargestellte Sprayachse. Diese ist näher an der Realität als eine Geraden-Annäherung an der Flanke.

10. Orthogonalenbildung

Da die Steigung der Symmetrieachse des Sprays bekannt ist, lässt sich durch $-\frac{1}{m_{Spray}}$ die Steigung der Orthogonalen ermitteln. Hierdurch können an allen Positionen der Sprayachse die Verläufe der Grauwerte über die Breite des Sprays ermittelt werden. Die Gleichung dieser Orthogonalen werden im Analyseprogramm alle 10 Pixel (variabel) auf der Symmetrieachse gelöst und der Grauwertverlauf dieser Geraden analysiert. Für diese Analyse wird wieder eine Subroutine namens "axisanalysis.m" verwendet –welche im nachfolgenden Kapitel erörtert wird.

Subroutine axisanalysis.m

Erster Arbeitsschritt innerhalb des Codes ist die Bestimmung des Schnittpunktes der Senkrechten (Orthogonalen) und der Sprayachse, um den Mittelpunkt des Sprays zu definieren. Da bei Auflösung der Geradengleichungen exakte Lösungen zu finden sind, das Bild aber kameraabhängig pixeldiskret unterteilt ist, muss das Pixel mit dem kleinsten Abstand zum Schnittpunkt ermittelt werden. Bei nicht eindeutiger Zuordnung (z.B. zwei Pixel haben exakt denselben Abstand zum Schnittpunkt) wird eine Fehlermeldung ausgegeben und der erste gefundene Punkt mit minimalen Abstand gewählt. Wie bereits zuvor werden die Grauwerte wieder als zeitdiskretes Signal interpretiert und ebenfalls mittels eines Butterworth-Filters geglättet. Ebenfalls wird die Breite auf ein einzelnes Pixel gesetzt, sollte der Wert am Schnittpunkt der beiden Geraden unterhalb des Mittelwertes des Hintergrundbildes liegen. Andernfalls werden wieder die Positionen des Unterschreitens des Mittelwertes und das erste Erreichen des Wertes Null beidseitig der Symmetrieachse berechnet. Das Vorgehen ist dasselbe wie im Kapitel Länge der Sprayachse erklärt.

Als erstes wird –für die angehende Spraybreiten-Betrachtung– der Bereich mehr eingeschränkt als bei der Berechnung der Symmetrieachse. Durch die Verwendung einer hochauflösenden Kamera und der Möglichkeit mehrere Sprays in einem breiten Zeitbereich untersuchen zu können, ergibt sich ein möglicherweise sehr hoher Rechenaufwand, weshalb die Punktanzahl für die Kurvenanpassung möglichst klein gehalten werden sollte.

Aus diesem Grund wird der Betrachtungsbereich in Abhängigkeit der Spray-Breite variabel gestaltet. Erhalten bleiben muss definitiv die Region zwischen Unterschreitung des Mittelwertes und Erreichen des Null-Wertes. Additiv benötigt man aber für das korrekte Anlegen einer Funktion noch mehr Punkte, weshalb der Kompromiss getroffen wurde noch die Hälfte der Region zwischen Grenzwert-Schnittpunkt und Mittelpunkt des Sprays zu verwenden.

Genau wie bei der Spraylänge hat sich auch hier eine Gewichtung von $w = (G(x) * d)^3$ (5) als bestmögliche Lösung erwiesen. Die Entwicklung und Analyse der Fit-Funktion übernimmt wieder die Subroutine fitcurve.m. Ist dies für die gesamte Sprayachse erledigt, lässt sich folgendes Diagramm für jedes Spray anfertigen.



Abbildung 20: Breitenverlauf eines Sprays bei 40µs nach SOI

Für die spätere Betrachtung werden die Koordinaten der Endpunkte, die Abstände zur Symmetrieachse, der Grauwertverlauf und die Mittelwerte der Breite gespeichert.

Die Mittelung der Breite wird nicht über die Spraylänge, sondern individuell für jede Achsposition festgelegt. Es werden also nur beide Seiten der Spraymittelachse miteinander

verrechnet und ein Mittelwert gebildet. Dies hat den Vorteil, dass man nun einen symmetrischen Verlauf für jedes Spray bilden kann.



Abbildung 21: Wirkungsweise der Mittelung der Spraybreite

Wie in Abbildung 21 ersichtlich, werden die Breiten beidseitig der Sprayachse angepasst. Der breitere Teil wird gekürzt, der schmälere erweitert. Dies birgt sicherlich einen gewissen Fehler, jedoch ist durch die kleinen Dichten im äußeren Bereich des Sprays ein großer Einfluss auf die Massenberechnung vermieden. Durch die inkrementelle Betrachtung des Sprays wird ebenfalls der Einfluss gedämpft. Umso kleiner die betrachteten Scheibchen, desto kleiner der Volumenanteil.

Aus den bisher ermittelten Daten soll ein 3-D Modell für die Spraystruktur erstellt werden, welche Informationen über Volumen und sichtbare Spraymasse liefern soll. Diese Betrachtung wird in einem unabhängigen Matlab-Skript umgesetzt.

11. Sprayvolumina

Zur Bildung eines sinnvollen 3-D-Modells ist es unablässig ein rotationssymmetrisches Spray anzusetzen. Sieht man sich aber Abbildung 20 genau an, fällt auf, dass das Spray mitnichten perfekte Symmetrie aufweist. Dennoch liegt die Symmetrieachse für das gesamte Spray betrachtet sehr zentral und bestmöglich innerhalb der Sprayregion. Deshalb wird zunächst für jede vermessene Sprayachsenposition eine mittlere Spraybreite bestimmt. Mit dieser wird dann weitergearbeitet. Es wird auch der lokale Spraywinkel errechnet (gemeint ist der halbe Spraykegelwinkel bezüglich der gerade betrachteten x-Position). Danach beginnt die Modellbildung für die Volumen- und Masseberechnung.



Abbildung 22: Inkrementelle Betrachtung für die Modellbildung

Betrachtet wird inkrementell entlang der Sprayachse. Für eine korrekte Massenberechnung muss auch die Volumenbestimmung möglichst genau durchgeführt werden. Die inkrementelle Betrachtung wird jeher in der Mathematik für solche Betrachtungen verwendet. Man zerteilt hier das Sprayvolumen in sehr viele kleine Volumenanteile und berechnet dann diese kleinen Volumina, um sie nachfolgend aufzusummieren. Der inkrementelle Ansatz bietet ebenfalls den Vorteil, dass er für die Masseberechnung nur etwas

erweitert werden muss. Bekannt sein muss dann allerdings entweder eine Kontinuität der Dichte oder deren Verlaufskurve über die drei Dimensionen des Volumens.

Sieht man sich eine Scheibe des rotationssymmetrischen Sprays an, gestaltet sie sich wie in Abbildung 23 dargestellt.



Abbildung 23: Schnitt durch ein perfekt rotationssymmetrisches Spray

Erweitert man diese Betrachtung in die dritte Dimension ergibt sich für eine Scheibe des Sprays ein Kegelstumpf.



Abbildung 24: Kegelstumpf zwischen zwei Spraybreiten-Abtastungen

Für die z-Koordinate der Außenfläche kann zwischen R_I und R_h eine Geradengleichung aufgestellt werden.

$$R(x) = \frac{R_l - R_h}{L} * x + R_l \tag{8}$$

Das inkrementelle Volumen ergibt sich durch:

$$dV = rd\Phi drdx \tag{9}$$

Der Radius innerhalb des Kegelstumpfes ist abhängig von der Position in x-Richtung, weshalb diese Koordinate normiert werden kann und somit ersetzt wird durch:

$$r = r * R(x) \tag{10}$$

$$R(x) = \left(\frac{(R_h - R_l)}{L} * x + R_l\right)$$
(11)
Peter Weigand

Hieraus ergibt sich folglich:

$$dV = R(x)rd\Phi drdx \tag{12}$$

Durch setzen des Integrals über alle drei Koordinaten folgt:

$$V = \int_0^L \int_0^1 \int_0^{2\pi} R(x) * r \, d\Phi dr dx \tag{13}$$

Da r normiert wurde und dadurch nur noch eine x-Abhängigkeit von R besteht, können die inneren zwei Integrale aufgelöst werden. Es wird für Φ von 0 bis 2 π Integriert und für r von 0 bis 1.

Anders geschrieben, muss sich das Volumen aus dem Integral von infinitesimal kleinen Kreisscheiben ergeben, also:

$$V = A(x) * dx \tag{14}$$

Wobei A(x) allgemein gültig ausgedrückt werden kann durch:

$$A(x) = \pi * R(x)^2 \tag{15}$$

Und somit wird V zu:

$$V = \pi * \int_0^L R(x)^2 dx$$
 (16)

Mit Berücksichtigung von (11) ergib sich daraus:

$$V = \pi \int_{0}^{L} \left(\frac{R_{l} - R_{h}}{L} * x + R_{l} \right)^{2} dx$$
 (17)

Mittels dieses Integrals kann bereits für jeden Anteil des Sprays zwischen zwei Stützstellen das Volumen berechnet werden. Für die Masse allerdings fehlt noch die Funktion für die Dichte g. Denn diese ist bei einem Spray -welches letztendlich den Kraftstoff ja möglichst fein verteilen soll- von vielen Parametern abhängig. Dazu gehören die axiale und radiale Position innerhalb des Sprays, die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Medium, Dichte, relative Geschwindigkeit sowie thermodynamische Größen, wie Strömungsbedingungen, Wärmeübergang und viele mehr. All diese Einflussgrößen bewirken und begünstigen eine nicht konstante Dichteverteilung. Für die Berechnung von

$$dm = dV * d\varrho \tag{18}$$

muss also die Varianz der Dichte als mathematische Funktion mit Abhängigkeit von mehreren Dimensionen berücksichtigt werden. Setzt man voraus, dass die Zerfallsmechanismen annähernd ähnliche Auswirkungen auf das Spray über der Zeit besitzen, könnte eine Normalisierung von <code>@</code> möglich sein. Hierdurch würde sich die Dimensions-Abhängigkeit auf eine Größe vereinfachen. In diesem Fall auf r. Somit würde das Massenintegral wie folgt aussehen:

$$M = \pi \int_0^L \left(\frac{R_l - R_h}{L} * x + R_l\right)^2 dx * \int_0^1 \varrho(r) dr$$
(19)

Hierfür muss aber noch überprüft werden, ob die Normalisierung angewendet werden darf. Da der Dichteverlauf nicht bekannt und auch nicht direkt aus dem Spraybild extrahiert werden kann, soll eine Übertragungsfunktion zwischen Intensitäts- und Dichteverlauf gefunden werden. Hierfür muss zunächst auch der Verlauf der Intensitätswerte genauer betrachtet werden.

Intensitätsverlauf

Unter der Voraussetzung, dass ein radialsymmetrisches Spray angenommen werden kann, muss auch die Intensitätsverteilung eine radialsymmetrische Form besitzen. Stellt man sich ein idealisiertes Spray vor, welches eine radiale Dichteabhängigkeit besitzt, muss ein durchdringender Lichtstrahl -je nach dem wo er das Spray penetriert- unterschiedliche Dichteregionen passieren. Tritt dieser wieder aus dem Spray aus und fällt auf den Kamerachip, kann dieser Position ein definierter Intensitätswert zugewiesen werden.



Abbildung 25: Passieren eines Lichtstrahls durch ein Spray

Für die Verwendung der bisherigen Auswertung musste das Komplement der mittels Hintergrundbeleuchtung akquirierten Bilddaten verwendet werden. Normiert man für dieses Komplement die Intensitätsverteilung, ergibt sich in etwa ein Verlauf, welcher in Abbildung 25 dargestellt ist. Über den Weg D(w) wird der Lichtstrahl um einen gewissen Betrag abgeschwächt, da er im dichteren Medium Divinol⁴ (oder Diesel) Reflektion, Absorption und Transmission erfährt. Nur der transmittierte -und in Ausnahmefällen auch der reflektierte- Teil des Lichtstrahls kann auf den Kamerachip fallen, nicht aber der absorbierte. Setzt man ein echtes radialsymmetrisches Verhalten voraus, ist diese Abschwächung des Lichtstrahls unabhängig vom Betrachtungswinkel des Sprays, nur vom Abstand zum Spray-Kern (Variable w).

Daraus lässt sich ein 3-dimensionaler Intensitätsverlauf reproduzieren. Unter Verwendung des Intensitätswerts in der Mitte des Sprays wird eine Normalisierung vorgenommen. Hierdurch ergibt sich folgendes Diagramm:



Intensity distribution with assumption of radial symmetric spray

Abbildung 26: 3-dimensionale Intensitätsverteilung für ein rotationssymmetrisches Spray

⁴ Das verwendete Prüföl: Ersatzstoff für Diesel, gleiche physikalische Eigenschaften aber nicht brennbar

Als Basis für diese Betrachtung wurde die Analogie zur Technik des Röntgens herangezogen. Auch in der medizinischen Bildverarbeitung (z.B. im CT) passiert ein Strahl bekannter Start-Intensität ein unbekanntes Objekt oder einen Körper. Beim Röntgen ist der Intensitätsverlust direkt abhängig vom Dichteverlauf innerhalb des Körpers. Es gilt:

$$dI = -\varrho(s) * I * ds \tag{20}$$

Die gemessene Intensität am Sensorkopf entspricht der Start-Intensität minus die durch den Körper verursachte Abschwächung. Diese Verringerung der Strahlungsleistung lässt sich durch Integration über die Körpergrenzen berechnen.

$$\stackrel{!}{\Rightarrow} \int_{I_0}^{I_1} \frac{1}{I} \, dI = \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = -\int_{-0.5 * D(w)}^{0.5 * D(w)} \varrho(s) \, ds \tag{21}$$

Beim CT kann durch die Auswertung vieler Aufnahmen unter unterschiedlichen Winkeln der Dichteverlauf 3-dimensional rekonstruiert werden. Bei rotationssymmetrischen Objekten ist bei diesem Vorgehen grundsätzlich nur eine Aufnahme notwendig. Durch eine Aufnahme kann der gesamte Körper rekonstruiert werden. Dieser Vorteil ist auch in den Spraybildern anwendbar. Die Analogie zur Anwendung in der medizinischen Bildverarbeitung ist offensichtlich und soll nun an Aufnahmen mit sichtbaren Licht angepasst werden.

Um dies gewährleisten zu können, muss es eine Übertragungsfunktion bzw. einen Zusammenhang zwischen Intensitätswert und der Dichte geben.



Abbildung 27: möglicher Zusammenhang zwischen Dichte- und Intensitätsverlauf

Die Frage ist also, ob eine bestimmte Intensitätsreduktion genau durch einen definierten Dichteverlauf durch das Spray verursacht werden kann. Hierdurch muss eine Dichtefunktion einen ähnlichen Verlauf wie die Intensität aufweisen. In Abbildung 27 ist beispielhaft dargestellt, dass ein Schnitt durch das Spray immer einen Verlauf von der Dichte der Luft über eine bestimmte Maximaldichte an der Position w und wieder zur Dichte der Luft aufweisen muss. Die Symmetriebedingung ist durchaus durch die Zerfallsmechanismen des Sprays gegeben. Anzumerken ist hier, dass (nicht nur) im äußeren Spraybereich für die tatsächliche Dichtefunktion große Sprünge vorzufinden sind. Dies beruht darauf, dass der eingespritzte Kraftstoff nicht einfach immer dünner wird, sondern atomisiert. Die Zerfallsmechanismen, die in großen Teilen von der relativen Geschwindigkeit des Sprays zur umgebenden Luft und den Strömungsbedingungen sowie thermodynamischen Einflussgrößen abhängig sind, bewirken, dass sich unterschiedlich große Tröpfchen und Ligamente bilden. Im echten Verlauf finden sich also viele hunderte oder sogar tausende Dichteübergänge von Luft zu Kraftstoff -immer an den Tröpfchengrenzen. Im Diagramm ist allerdings die wirksame oder mittlere Dichte visualisiert. Betrachtet man einen Volumenanteil innerhalb des Sprays, hat ein weit innen liegendes Volumen-Inkrement eine weit höhere Dichte als ein weiter außenliegendes. zurückzuführen ist dies hauptsächlich auf die Anzahl und Größe der Ligamente und Tröpfchen. Befindet sich mehr "leerer Raum", also Luft, zwischen den Tröpfchen, senkt dies die durchschnittliche Dichte des betrachteten Raums.

Unter der Annahme, dass der Intensitätsverlauf irgendeinen Zusammenhang zur effektiven Dichte des Sprays besitzt, muss für diesen eine Übertragungsfunktion gebildet werden. Als Basis für die Findung einer solchen ist aus der Geometrie der Weg D_w bekannt. Auch der aus der Transmission eines Lichtstrahls resultierende Intensitätswert ist gegeben und direkt mit D_w gekoppelt. Sei die in Abbildung 26 zu sehende Glocke die Dichteverteilung eines beliebigen Sprays an einer beliebigen Stelle x zum Zeitpunkt t, so ergibt sich für einen Lichtstrahl an der Stelle w ein definierter Weg D_w und der magenta-farbene Dichteverlauf. Die resultierende Intensität I_1 entspricht dann dem integrierten Einfluss des Dichteverlaufs. Substituiert man nun D_w durch die Koordinaten-Variable s, so ergibt sich für die normalisierte Intensität an einer beliebigen Position W für ein rotationsymmetrisches Spray folgende Formulierung:

$$I_{eff_{Dia}}(w,s) = 1 - \frac{2.8 * \sqrt{w^2 + s^2}}{\left(2.2 * \sqrt{w^2 * s^2}\right)^4 + 1}$$
(22)

Somit ist die Intensitäts-Reduktion über den Weg s an der Stelle w bekannt. Will man eine Übertragungsfunktion zwischen der Intensität und der Dichte herstellen, muss zumindest die Bedingung der radialen Abhängigkeit für beide Größen erfüllt sein. Diese ist auch für die Dichteverteilung aus vielen Fachbüchern und Publikationen im Bereich der Sprayanalyse zu entnehmen [7], [8], [2], [9]. Die am Kamerachip zu verzeichnende normierte Intensität ergibt sich zu

$$5 - 1 - 2,8 * w^3$$

$$I_w = 1 - \frac{1}{2,2 * w^4 + 1} \tag{23}$$

Der gesamte Intensitätsverlust an der Stelle w kann also durch den Bruch der Formel (23) ausgedrückt werden. Und ist somit durch die Abhängigkeit w's ebenfalls mit dem Radius verknüpft. Eine physikalische Bedeutung ist den Koeffizienten hier nicht gegeben. Sie ergeben sich aufgrund einer Anpassung mit minimalen Fehlerquadraten durch Betrachtung von allen Intensitätsverläufen eines aufgenommenen Zeitpunktes des Sprays. Für die Überprüfung der

⁵ Gerundete Zahlenwerte der Parameter

Robustheit des Fittings wurden einige Spraypositionen bei verschiedenen Aufnahme-Zeitpunkten überprüft. Gerade am Beginn des Einspritz-Events besteht die Gefahr größerer Abweichungen. Nach Erreichen des stationären Sprayverhaltens sollten die Fehlerquadrate nahezu konstant sein. Diese Annahme bestätigte sich bei den Überprüfungen. Als Positiv wurde auch die Abweichung im ballistischen Bereich des Injektors eingeschätzt. Auch hier lagen die Abweichungen im Bereich von lediglich 5% (: siehe Abbildung 63). Zu finden ist diese unter RMSE (*Root Mean Squared Error*), welcher das mittlere Fehlerquadrat angibt. Auch bei späteren Zeitpunkten konnten keine größeren Abweichungen gefunden werden. Hierzu ist allerdings zu erwähnen, dass die Überprüfung Stichprobenartig durchgeführt wurde und es letztlich keine Garantie für das Ausbleiben größerer Abweichungen gegeben ist.

Letztlich empfiehlt es sich hieraus nachträglich noch die Qualität des Curve-Fittings mit in die Ergebnisdatei mit aufzunehmen. Aus Zeitgründen ist dies hier nicht mehr geschehen, sollte aber auf jeden Fall nachgeholt werden um eine Aussage für die Qualität der Auswertung zu bekommen.

Lichtinteraktion mit Aerosolen

Eine unter hohem Druck durch eine Düse geleitete Flüssigkeit wird hauptsächlich durch die Zerfallsprozesse der Atomisierung beeinflusst. Hier spielen aerodynamische Kräfte eine tragende Rolle für die Bildung immer kleiner werdender Tropfen. Da bei diesen Experimenten bei Umgebungsbedingungen gearbeitet wurde, bei denen keine Verdampfung gegeben ist, wird hier auch nicht näher auf die Verdampfungsprozesse eingegangen.

Ab einer bestimmten Tröpfchengröße mit beteiligter Vermischung mit Umgebungsluft spricht man oftmals von einem Aerosol. Auch die Einspritzung von Kraftstoffen führt zu Aerosolbildung. Die optischen Eigenschaften eines Aerosols entsprechen weder denen der reinen Flüssigkeit noch denen eines Flüssigkeitsdampfes.

Unter Huygens ist die Reflektion von Licht durch die Betrachtung als Welle erklärt. Die Wellenausbreitung in homogenen Medien kann man sich so vorstellen: In jedem Punkt einer Wellenfront sitzt ein sogenanntes Streuzentrum, von dem wieder eine Kugelwelle ausgeht. Überlagern sich all diese Kugelwellen, bildet sich eine neue Wellenfront. [10] Steht einer Lichtwelle ein Hindernis im Weg, kommt es zu Reflexion, Beugung, Brechung und anderen Mechanismen. Das Huygens-Prinzip führt alle diese Erscheinungen auf Streuung und Interferenz zurück, wobei man mit Fresnel die Phasenverhältnisse der überlagerten Teilwellen beachten muss [10].



Abbildung 28: Reflexionsgesetz erklärt durch Wellenverhalten des Lichts [11]

In Abbildung 28 ist der Vorgang einer Totalreflexion, also das Reflexionsgesetz sehr einfach anhand einer einzelnen Wellenfront visualisiert. Der Einfallswinkel entspricht dem Ausfallswinkel. Auch die Brechung kann durch einen Wellenansatz erklärt werden. Geht eine Lichtwelle in ein anderes Medium über, so wird der transmittierte Teil "gebrochen" genannt.



Abbildung 29: Brechung einer Lichtwelle [10]

In Abbildung 29 ist das Vorgehen der Brechung dargestellt. Die Welle besitzt in unterschiedlichen Medien eine Varianz der Laufgeschwindigkeit und besitzt dadurch einen unterschiedlichen Winkel nach dem Übergang in das zweite Medium. Ebenfalls wird so der Unterschied im Abstand der Wellenfronten erklärt. All dies gilt natürlich nur bei einem Einfallswinkel unterhalb des kritischen Winkels für die Totalreflexion. Fällt ein Lichtstrahl zu flach auf eine

Oberfläche eines anderen Mediums, kann dies -abhängig von den Brechzahlen der Medienzu einer Totalreflexion führen.

Entscheidend hierfür sind das Brechungsindex-Verhältnis sowie der Einfallswinkel zur Flächennormalen des Eintritts-Mediums. Unter den meisten Bedingungen findet sowohl Reflexion als auch partielle Transmission statt.

In Abbildung 30 sind die ausschlaggebenden Einflüsse das Brechungsgesetz dargestellt. Fällt



ein Lichtstrahl unter dem Winkel θ_1 auf eine Grenzfläche zu einem anderen Medium unterschiedlichen Brechungsindex ($n_1 \neq n_2$), so wird ein Teil des Strahls reflektiert und ein anderer Teil durch das zweite Medium hindurch transmittiert. Der Winkel des reflektierten Stahlteils ist gleich dem Einfallswinkel, während der Winkel des transmittierten Teils abhängig vom Verhältnis der Brechungsindizes ist. Es gilt hier das sogenannte Snelliusgesetz, welches besagt:

Abbildung 30: Brechungsgesetz [13]

$$n_1 * \sin(\theta_1) = n_2 * \sin(\theta_2) \tag{24}$$

Für unseren Fall gilt der Wechsel von Luft zu Dieselkraftstoff (bzw. Divinol). Wobei die Zahlenwerte der Brechungsindizes auch wiederum von physikalischen Faktoren wie zum Beispiel der Temperatur abhängig sind. Für Luft finden sich bei atmosphärischen Bedingungen Werte zwischen 1,00002 bis 1,00005 -näherungsweise 1. Für Diesel wird ein Wert von 1,4570 angesetzt [12].

Der kritische Winkel θ_c ergibt sich aus folgender Gleichung

$$\theta < \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$
 (25)

zu 43,34°, aber nur für aus einem Tropfen austretende Strahlen. Für eintretende Strahlen gibt es keine Totalreflexion. Es wird also immer ein Teil des Lichts in ein Kraftstofftröpfchen eintreten, egal unter welchem Winkel dieses auftrifft.

Die Grenzfläche des kritischen Winkels θ_c für die Totalreflexion ist jedoch nicht gleich der physikalischen Oberfläche. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Licht durch seine Wellencharakteristik die Oberfläche noch zu ca. einer Wellenlänge des Lichts "übertritt". Dies nennt man die evaleszente Welle [13]. Da diese den mess- oder sichtbaren Tröpfchen-Durchmesser allerdings nur minimal reduziert, kann sie vernachlässigt werden.

Betrachtet man mit dieser Basis den Lichtdurchtritt eines einzelnen Lichtstrahls durch einen



Abbildung 31: Lichtdurchtritt an einem einzelnen Tropfen

Tropfen -unter der Voraussetzung, dass sich die Flüssigkeit einer perfekten Kugel zu zusammenfügt, die Oberfläche dieser Kugel perfekt glatt ist, keine Dampfanteile des Kraftstoffs innerhalb der Luft zu finden sind und beide Medien perfekt homogen sind- lässt sich auch ein kritischer Winkel θ_c beziehungsweise ein kritischer Abstand d_s berechnen. Für den Austritt liegt der bekannte Grenzwinkel θ_c von 43,34° vor. Dieser entspricht im Grenzfall θ_3 . Da das Dreieck für θ_2 und θ_3 gleichschenklig ist, ergibt sich für θ_2 der gleiche Winkel. Mittels der Brechungsindizes kann auf einen kritischen Eintrittswinkel zurückgerechnet werden. Für die bekannten Zahlenwerte ergibt sich ein Winkel von 89,47° für θ_1 also einen fast waagerechten Einfall bezogen auf die Oberfläche des Tröpfchens Somit ergibt sich ein optischer Wirkdurchmesser des Tröpfchens, der ein bisschen kleiner ist als der Durchmesser des Tropfens. Der optische Wirkdurchmesser entspricht hier 99,9957% des physikalischen Durchmessers. Rechnet man alle Winkel aus, ergibt sich auch für θ_4 der Winkel von 89,47°. Durch die bekannte Richtung des Winkels θ_1 ergibt sich im Grenzfall ein fast waagerechter Strahlengang bei Austritt aus dem Tropfen. Unter Berücksichtigung der geometrischen Anordnung zum Kamerachip kann eventuell ein weit außen

transmittierender Lichtstrahl nicht mehr auf den Chip treffen, was einer totalen Abschattung entspräche.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei einem Aerosol aber nicht nur um einen, sondern um Tausende Tröpfchen. Durch die unbekannte und ebenfalls variierende Position, Anzahl und auch durch Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Ligamenten muss ebenfalls in Betracht gezogen werden, dass eine konkrete Aussage darüber, welcher Strahl auf den Kamera-Chip fällt, unmöglich ist.

Betrachten wir hierzu einen Lichtstrahl nahe dem kritischen Einfallswinkel. Das Licht fällt nahe dem äußeren Rand in das Tröpfchen hinein, wird hier gebrochen und tritt letztendlich wieder unter dem gleichen Winkel aus. Nehmen wir deshalb an, dass der Strahlengang nun nahezu horizontal verläuft. Nach diesem Austritt aus einem Tröpfchen können mehrere Dinge geschehen:

- Der Strahl trifft auf kein weiteres Kraftstoffligament und läuft somit irgendwann einfach aus dem Beobachtungsgebiet, wo er mit der umliegenden Umgebung wechselwirkt. Wir nehmen an, dass er dann nicht mehr die Kamera erreicht und deshalb für die Kamera nicht mehr messbar ist.
- 2. Das Licht hat keine Wechselwirkung mit weiteren Kraftstoffanteilen, wird jedoch durch eine Interaktion mit der Umgebung dennoch wieder auf das Objektiv und somit zumindest teilweise auf den Chip geleitet. Hier muss der Strahl als Fremdlicht behandelt werden. Durch die Bauweise des Prüfstands und das Kamera-Setup sollte die Intensität dieses Strahls keine Verfälschung der Pixelwerte liefern und fällt auch so aus der Betrachtung heraus.
- 3. Der Strahl trifft erneut auf ein kugelförmiges Tröpfchen und tritt knapp unterhalb des obersten Randes in dieses ein. Es erfolgen wieder eine Brechung und ein erneuter Austritt desselben Strahls aus diesem Tröpfchen unter dem gleichen Winkel. Nimmt man wieder einen Aus- und Eintritt nahe des kritischen Winkels an, so verläuft der Strahlengang wieder fast vertikal in Richtung des Kamera-Objektivs. Der Strahl kann also trotz einmaligen horizontalen Verlaufs wieder am Chip wirksam werden, jedoch möglicherweise an einer anderen Pixel-Position.
- 4. Nach horizontalen Austritt aus dem ersten Tropfen trifft das Licht erneut auf ein kugelförmiges Tröpfchen, allerdings am unteren Ende. Es findet natürlich auch hier wieder eine Brechung statt und das Licht tritt ebenfalls wieder nahezu vertikal aus dem Tropfen aus, nur diesmal in Richtung der Lichtquelle und geht deshalb aus Sicht der Kamera verloren.
- 5. Der Strahlengang kreuzt ein unförmiges Kraftstoffligament, tritt dort ein und wird bei Austritt aus diesem Ligament in eine unbekannte Richtung gebrochen.

Nun sind die Voraussetzungen für ein perfekt kugelförmiges Kraftstofftröpfchen eine homogene Oberflächenspannung und keinerlei Störkräfte. Diese Voraussetzungen für die Bildung solcher Tröpfchen sind in nahezu keinem Bereich des Sprays gegeben. Die sehr großen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Kraftstoffteilchen und Luft ergeben aerodynamische Wechselwirkungs-Kräfte die sehr viel größer sind als die Kräfte aus der Oberflächenspannung der Flüssigkeit und bilden dadurch meist keine Kugelform. Zudem tritt der Kraftstoff zunächst als Strahl oder eventuell als eine Art Schaum infolge von Bläschenbildung durch Kavitation innerhalb des Injektors aus dem Düsenloch aus. Dies hat zur Folge, dass innerhalb eines -sagen wir- Kraftstoffelements ebenfalls ein zweiter Aus- und Eintritt erfolgen kann.

Berücksichtigt man ebenfalls noch, dass Diesel kein Reinstoff, sondern ein Stoffgemisch unterschiedlich langer Kohlenstoffmoleküle ist, ergibt sich ebenfalls eine variierende Oberflächenspannung (und Brechungsindizes) entlang der Kraftstoff-Luft-Grenze, was wiederum die Bildung von "nicht perfekt runden" Ligamenten begünstigt.

Der weiter oben genannte Aspekt der Kavitationsbläschen besitzt zudem noch einen zweiten Einfluss. Erfährt eine Flüssigkeit große Druckunterschiede bilden sich diese Kavitationsbläschen. Diese bestehen nicht aus Umgebungsluft, sondern entstehen direkt aus der Flüssigkeit, die in dieser Situation den kritischen Punkt unterschreitet und in den Dampfzustand übergeht. Hierdurch besitzen die Bläschen einen deutlich anderen Brechungsindex als Luft und ebenfalls einen anderen als dasselbe Medium im flüssigen Zustand. Innerhalb der Kavitationsblasen liegen unter Umständen auch variable Dichten durch lokale Druckunterschiede und der schon erwähnten Zusammensetzung des Kraftstoffes vor. Ein Stoffgemisch besitzt ebenfalls keinen Siedepunkt, sondern einen Siedebereich, weshalb sich die einzelnen Kavitationsbläschen untereinander schon unterscheiden können -in Dichte, Zusammensetzung, Brechungsindex und Temperatur.

Dies alles hat einen Einfluss auf den Verlaufsweg oder die Verlaufswege des Lichts innerhalb des Spraybereichs. Da die Tröpfchen auch noch sehr klein sind und unterschiedlich dicht beieinanderliegen, ist es sehr wahrscheinlich, dass ein Lichtstrahl auf seinem Weg mit mehreren hunderten Transmissionen und ebenso vielen Brechungen beeinflusst wird. Schon bei zwei Tröpfchen lassen sich unendlich viele Szenarien des Strahlenganges bilden. Bei mehr als zwei interagierenden Partnern ergeben sich natürlich nochmal exponentiell mehr Strahlengänge. Den Verlauf eines bestimmten Strahlengangs zu reproduzieren ist bei unbekannter Interaktionszahl, Tröpfchenform, -größe und Oberflächenstruktur unmöglich.

Verfolgt man einen beliebigen Weg eines Lichtstrahls durch ein Spray und berücksichtigt die Brechungen, muss ein weiterer Aspekt im Hinterkopf bleiben: bei jedem Übergang in ein anderes Medium finden immer alle drei Mechanismen statt: Reflexion, Transmission und Absorption -solange man sich innerhalb der Grenzen zur Totalreflexion befindet. Das bedeutet wiederum, dass ein Strahl der mehr Weg innerhalb des Mediums Kraftstoff zurücklegt automatisch auch eine geringere Intensität eines Pixels des Chips bewirkt.

Auf dem Weg erfährt der Strahl eine kontinuierliche Schwächung aufgrund der Absorption. Diese Absorption ist wiederum abhängig von der lokalen Zusammensetzung des Kraftstoffgemisches. Laufen also zwei Strahlen parallel innerhalb eines aus Kraftstoff bestehenden Tröpfchens, kann nach Austritt aus diesem durchaus auch eine Differenz der Intensität des Lichts existieren. Der Einfluss ist marginal, kann aber bei vielen hundert Transmissionen durchaus einen merklichen Effekt haben. Erst recht, wenn man berücksichtigt, dass bei jedem Übertritt von Luft zu Kraftstoff und von Kraftstoff zu Luft ein Teil der Intensität ebenfalls durch Reflexion abhandenkommt.

Der durch die Reflexion an der Oberfläche zurück geworfene Teil des Lichts beschreitet einen neuen Weg im Spray und kann ebenfalls wieder die oben genannten Wechselwirkungen erfahren. Bei jedem Übertritt in das andere Medium wird auch dieser Teil wieder durch Reflexion, Transmission und Absorption geschwächt und geteilt.

Die nachvollziehbaren Wege eines jeden Strahls und dessen anteilig reflektierte Sekundärstrahlen wachsen ins Unermessliche. Dennoch kann man durch die Einstellung der Kamera annehmen, dass ein Sekundärstrahl nach einigen Wechselwirkungen nicht mehr genug Intensität besitzt, um den Grauwert eines Pixels zu beeinflussen. Treffen allerdings sehr viele der Sekundär-Strahlen auf eine Region des Kamerachips, kann dennoch eine Beeinflussung stattfinden.

Durch die häufigen Wechselwirkungen ergibt sich so etwas wie ein diffuses Streuungsbild, jedoch sollte hier erwähnt werden, dass prinzipiell der Anteil des Lichts, der durch das komplette Spray transmittiert den größten Part am Grauwert besitzen muss, da hier erstens die Abschwächung am geringsten ist, also die größte Intensität am Chip ankommt, und zweitens die Wahrscheinlichkeit des Auftreffens und der Anteil der Intensität der Sekundärstrahlen durch die häufige Interaktion mit Kraftstoffteilen sehr klein ausfallen muss. (mehr Informationen in [14])

Spraystruktur

Viele Wissenschaftler streiten sich noch über den genauen Aufbau eines Kraftstoffsprays. Weithin wird jedoch angenommen, dass ein Spray zumindest im ersten Teil der Struktur noch einen flüssigen Kern besitzt. Doch was genau ist ein "flüssiger Spraykern"? Zunächst kann man definieren, dass dieser einem Gebiet reinen Kraftstoffs entspricht. Setzt man allerdings an, dass schon vor dem Austritt aus dem Düsenloch ein Kavitationseinfluss und dadurch auch Bläschen innerhalb des Kraftstoffstrahls vorhanden sind, ergibt sich eher das Bild eines Schaums. Somit besitzt der austretende Kraftstoff schon zwei physikalische Phasen: teilweise der einer Flüssigkeit und teilweise eines Dampfes.

Dieser "Schaum" bricht dann durch den primären und sekundären Strahlzerfall in viele, sehr kleine Tröpfchen auf, die sich vom Düsenloch entfernen, weiter zerfallen und unter den richtigen Bedingungen sogar verdampfen. Diese aerodynamische und thermodynamische Wechselwirkung wird auch "jet breakup" genannt. Für die Aufbruchsmechanismen sowie für die Beteiligung von Kavitation sind die Geometrie, der Druck, die Umgebungsbedingungen sowie die Relativgeschwindigkeit des Sprays verantwortlich. Kraftstoffstrahlen befinden sich überwiegend im Atomisierungsgebiet.

Durch die Wechselwirkung zwischen Kraftstoff und Umgebungsluft werden am Kraftstofftröpfchen mechanische Wellen induziert. Diese sogenannten Oberflächenwellen beeinflussen den Zerfall der Tropfen. Nach G.I. Taylor [7], [15], [16], [17], [18] richtet sich der durchschnittliche Tröpfchen-Durchmesser proportional nach der Länge der instabilsten Oberflächen-Wellen: [7]

$$\overline{D}_d = C * \frac{2\pi\sigma}{2\pi\sigma} * \lambda^*$$
^[7]

$$_{d} = C * \frac{1}{\rho_{g} v_{r}^{2}} * \lambda^{*}$$
⁽²⁶⁾

Wobei hier ρ_g für die Gasdichte des umgebenden Gases, v_r^2 die relative Geschwindigkeit zwischen Kraftstoff und Luft beschreibt. C bildet eine Formel-Konstante und λ^* eine dimensionslose Wellenlänge der am schnellsten wachsenden Oberflächenwelle und ist definiert durch:

$$\lambda^* = f\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} * \left[\frac{Re_j}{We_j}\right]^2\right) \tag{27}$$

Mit den dimensionslosen Kennzahlen der Raynoldszahl:

$$[7]$$

$$Re_j = \rho_l v_j \frac{u_n}{\mu_l} \tag{28}$$

Und der Weberzahl:

$$We_j = \rho_l v_j^2 \frac{d_n}{\sigma} \tag{29}$$

[7]

Durch die gegebenen Gleichungen lassen sich grundsätzliche Aussagen über die zu erwartenden Größen der Tropfen treffen. Allerdings tauchen in der Realität natürlich immer auch Abweichungen zu den Modellen auf. Ebenfalls muss in der Regel von einer Gauß'schen Glockenverteilung der Tropfendurchmesser ausgegangen werden. Je nach Umgebungsbedingungen kann sich die Verteilung verschieben, skalieren oder verformen.

Da der Fokus dieser Arbeit hauptsächlich auf der experimentellen Datenauswertung, sowie der phänomenologischen Modellbeschreibung des Sprays liegt, wird hier auf eine nähere Betrachtung der unterschiedlichen Modellansätze verzichtet und auf die entsprechenden Literaturquellen verwiesen. [7], [19], [16], [20], [21], [22]

Dennoch ist dieses Modell ein guter Anhaltspunkt, um den mittleren Tropfendurchmesser zu ermitteln.

Durch die oben erwähnten Formeln lässt sich die durchschnittliche Tropfengröße eines Sprays errechnen. Die Größenverteilung eines Sprays stellt sich dann in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Durchmesser und der Wellenfrequenz in etwa so dar:



Abbildung 32: Verteilung der Tröpfchengröße innerhalb eines Dieselsprays eingespritzt in eine Umgebung bei 20°C und 11 bar in verschiedenen Abständen von der Sprayachse [7]

Ebenfalls ist die Spraystruktur bzw. die Größenverteilung der Tröpfchen nicht nur abhängig von der axialen Position, sondern ebenfalls vom radialen Betrachtungspunkt. Dies erschließt sich wie folgt. Stellen wir uns ein Spray vor, welches wir nahe der Austrittsöffnung schneiden, sodass noch ein flüssiger Spraykern (bzw. ein zusammenhängender "Schaum") zu verzeichnen ist. Verinnerlichen wir, dass eine hohe Relativgeschwindigkeit bezüglich der umgebenden Luft vorhanden ist und deshalb auch schon "air entrainment" und Sprayzerfall aufgetreten ist. Air entrainment bedeutet, dass durch die Mechanismen des Sprayzerfalls eine Art Wirbel entsteht, welche Umgebungsluft in das Innere des Sprays befördert. Man kann also davon ausgehen, dass die Dichte nach außen hin immer weiter abnimmt. Auch die

Tröpfchengröße nimmt mit steigendem Betrachtungsradius immer weiter ab, da sich zunächst Tropfen vom Spraykern lösen und nach außen driften. Während dieser Bewegung zerfallen die Tropen immer weiter und werden dadurch kleiner. In einer radialen Betrachtung gestaltet sich also die Verteilung der Durchmesser wie in Abbildung 33 ersichtlich.

Schneidet man das Spray gedanklich weiter entfernt vom Düsenloch, kann es geschehen, dass in diesem Bereich bereits kein zusammenhängender Spraykern mehr vorhanden ist und man nur noch Ligamente und Tröpfchen detektieren kann. Aber auch hier gilt grundsätzlich eine Abhängigkeit von Tröpfchengröße und Radius.



Abbildung 33: Schaubild Sprayregion und radiale Tröpfchengrößen-Verteilung

Die aerodynamischen Kräfte wirken immer entgegen der Bewegungsrichtung. Nehmen wir beispielhaft an, dass sich nun eine Menge an unterschiedlich großen Ligamenten in Sprayachsenrichtung fortbewegt. Beginnen wir in der Mitte des Sprays, wo in kleiner Entfernung zur Betrachtungsebene noch ein zusammenhängender Spraykern vorhanden war. Wir haben hier größere Ligamente, auf die aerodynamische Kräfte einwirken. Führen diese zum Zerfall des Ligamentes, ergeben sich unter anderem Scherkräfte, welche die Sekundärligamente voneinander wegtreiben. Ein Impuls nach außen ist gegeben. Die kleineren Ligamente sind -natürlich abhängig von der Form- durch die aerodynamischen Kräfte leichter zu beeinflussen, werden schneller abgebremst und zerfallen immer weiter, wobei sie weiter nach außen driften. Dadurch ergeben sich nach wie vor radiusabhängige Größenverteilungen für die Tröpfchendurchmesser –auch wenn kein zusammenhängender Spraykern mehr vorhanden ist. Hiermit besteht die Basis für eine Übertragungsfunktion zwischen Intensitäts- und Dichteverteilung, denn beide Größen besitzen nachgewiesenermaßen eine Radius-Abhängigkeit. Prinzipiell sollte dann eine mathematische Formulierung zu finden sein, die eine Größe in die andere überführen kann.

Für eine vollständige Beschreibbarkeit des Sprayverhaltens muss allerdings ebenfalls eine Übereinstimmung auf der Sprayachse bestehen. Da hier jeweils eine "self-similarity" zugrunde gelegt wird, muss auf jeden Fall ein Abgleich der Werte auf der Sprayachse stattfinden. Durch die Normierung der Werte und den Bezug auf die Sprayachse ist es unausweichlich hier ebenfalls eine Übereinstimmung zu finden.

Die "self-similarity" wurde überprüft, der Abgleich der Sprayachsen-Werte konnte aus Zeitgründen nicht mehr umgesetzt werden, weshalb ein entscheidender Teil zur Übertragungsfunktion fehlt.

In einer nachfolgenden Arbeit kann aber bestimmt eine Überprüfung zu den Sprayachsen-Werten getätigt werden. Ist dies geschehen, kann mittels einer nachfolgend beschriebenen Kalibrierung (Kapitel 12) eine Übertragungsfunktion gebildet werden.

Diese Übertragungsfunktion ist in erster Linie abhängig vom Setup des Kamera-Chips sowie der Belichtung am jeweiligen Prüfstand. Die Injektor- und Umgebungsparameter werden vom Spraymodell abgebildet, während die Helligkeitswerte des Sprays / der Pixel extrem vom Messaufbau abhängig sind.

Dabei ist zu beachten, dass der Chip der Kamera möglichst nicht übersteuert werden darf, da sonst die Verteilung der Grauwerte extrem verfälscht werden kann⁶. Durch Übersteuerung wird sowohl die "self-similarity", die Symmetrieanalyse und die Grauwert-Verlaufsanalyse gestört.

Ebenfalls ist eine Hintergrundbeleuchtung zu bevorzugen, da diese prinzipiell schon Übersteuerung ausschließt. Zu beachten ist aber hier ebenfalls ein ähnlicher Effekt: Untersteuerung. Vergleicht man beide Phänomene miteinander, ist bei Übersteuerung eine Art Aura erkennbar. Diese bewirkt, dass auch nebenliegende Pixel einen höheren Wert annehmen, als ohne Übersteuerung des Chips. Dieser Mechanismus fußt auf der Funktionsweise des Kamera-Chips. Bei Untersteuerung ist ein solcher Effekt komplett auszuschließen.

⁶ Eine Übersteuerung resultiert meist in großen Gebieten maximalen Helligkeitswerts. Somit ist innerhalb dieser Gebiete keine Verlaufsanalyse mehr möglich.

12. Spraymasse

Um die Spraymasse verlässlich berechnen zu können, muss bei jedem vermessenen Messpunkt eine Kalibrierung stattfinden. Findet diese nicht statt oder ist diese fehlerhaft, kann keine Spraymasse ermittelt werden bzw. der Wert der ermittelten Masse hat keinen Bezug zum realen Wert.

Grundüberlegungen zur Kalibrierung

Für die Kalibrierung der Auswertesoftware müssen zwei Punkte zweier Messkurven korreliert werden. Für die Auswahl der richtigen Kurven wurden folgende Grundüberlegungen angestellt.

Allgemein ist bekannt, dass Kraftstoffstrahlen bei Wiederholung des Einspritzvorgangs immer ähnliche Geometrien annehmen. Die Form ist nahezu konstant, je nach Umgebungsbedingungen kann die Form jedoch beeinflusst werden. Einige Parameter wie Eindringtiefe, Spraywinkel, Tröpfchengröße oder Querschnittsfläche können verändert werden. Dennoch bleibt die grundsätzliche Form des Sprays gegeben.

Aus dem Aufbau der Spraystruktur ergab sich folgender Gedankengang. Wir betrachten wieder einen Teil der gesamt eingespritzten Kraftstoffmenge: die Kraftstoffmasse tritt aus dem Düsenloch aus und erfährt erstmalig den primären und anschließend sekundären Sprayzerfall. Die Tröpfchen werden immer kleiner und interagieren mit der umgebenden Luft. Bei Ausschluss einer Verdampfung durch die gegebenen Umgebungsbedingungen verteilen sich die Tröpfchen gemäß ihrem Impuls innerhalb der Sprayregion. Außerhalb der erfassten Sprayregion sind diese dennoch (zeit- und ortsabhängig) vorhanden, ergeben aber durch ihren sehr kleinen Durchmesser und den großen Abstand der Tröpfchen kein erfassbares Signal mehr auf dem Kamerachip.

Betrachtet man viele Einspritzungen hintereinander mit gleich eingestellten Einspritzparametern ergibt sich immer eine sehr ähnliche Sprayform und ebenfalls eine korrelierende Spraylänge. Verlängert man den Parameter der Ansteuerdauer, so resultiert hieraus in der Regel keine Expansion der Eindringtiefe (nach Erreichen der maximalen LOP).

Diese Beobachtung ergibt sich ebenfalls bei bestehender Verdampfung nach Austritt aus der Düse. Die Tropfen besitzen eine durch den Raildruck geprägte Geschwindigkeit und benötigen durch die thermodynamische Wechselwirkung eine gewisse Zeit um zu verdampfen. In dieser Zeit legen sie durch die Anfangsgeschwindigkeit und abgebremst durch die aerodynamischen Interaktionen und den Sprayzerfall einen individuellen, aber nahezu gleichen Weg zurück.

Bekannt ist, dass ein Injektor durch den Öffnungsvorgang einen sogenannten "ballistischen Bereich" besitzt. Dieser besitzt -gegeben durch die physikalischen und mechanischen Gegebenheiten- einen instationären Verlauf des Massenstroms. Innerhalb dieses Bereichs ergibt sich durch Ansteuerung des Piezo- oder Magnet-Aktuators ein Öffnen des Steuerventils (bei den gängigen Injektortypen) und somit einen Druckunterschied zwischen den Steuerräumen unterhalb und oberhalb des Nadel-Körpers. Durch diesen Druckunterschied wirkt eine Kraft und somit eine Beschleunigung auf die Nadel des Injektors, welche die Öffnung des Injektors einleitet. Die Nadel befindet sich in der Aufwärtsbewegung und gibt nach und nach die Düsenöffnung frei, wobei erstmals ein Kraftstofffluss aus dem Injektor gegeben ist. Während der Aufwärtsbewegung der Nadel wird immer mehr des Düsenlochs für die beginnende Einspritzung wirksam und die Strömungsverluste im Inneren des Injektors verändern sich weiter. Ist die Nadel an ihrem oberen Anschlag angekommen, stoppt sie nicht abrupt, sondern federt meist etwas zurück, was einer kurzen Erhöhung der Strömungsverluste und somit ein kurzes Absenken des Massenstroms entspricht. Nach Stillstand der Nadel befindet sich der Injektor im stationären Bereich der Einspritzung. Verändert sich nichts an der Strömungsstruktur oder am Weg des Fluides (Kraftstoff), so ergeben sich konstante Strömungsverluste, welche sich in einem konstanten Massenstrom aus dem Injektor vergegenwärtigen. Nachdem der Öffnungsvorgang also abgeschlossen ist, strömt pro Zeiteinheit ein konstanter Strom an Kraftstoffmasse aus den Injektoröffnungen. Hat sich dann noch die Spraystruktur außerhalb des Injektors entwickelt, besitzt das Spray eine nahezu konstante Eindringtiefe -selbst wenn man den Injektor immer weiter ansteuert.

Auf dieser Basis beruht die Überlegung, dass beim voll geöffneten Injektoreine konstante Volumenänderung auftreten sollte. Nimmt man nämlich an, dass ein jedes (nach vollständiger Öffnung des Injektors) eingespritztes Masseelement nahezu die aleichen Zerfallsmechanismen erfährt und dadurch eine zumindest sehr ähnliche Entwicklung durchmacht bis es schließlich für die Kamera nicht mehr wahrnehmbar ist. Somit ergibt sich ebenfalls für jedes betrachtete Masseelement ein festgelegtes, zeitlich abhängiges Verhalten. So ist dieses kurz nach Austritt aus dem Injektor noch vollständig zusammenhängend, während es nach einer definierten zeitlichen Interaktion mit der Umgebungsluft eine bestimmte Anzahl an Ligamenten ergibt, die wiederum eine von der Zeit abhängige Größenverteilung besitzen. Demnach ist anzunehmen, dass jedes nachfolgende Masseinkrement eine sehr ähnliche Volumenentwicklung (und auch einen ähnlichen Verlauf für die mittlere Dichte innerhalb dieses Volumens) erfährt. Bei der Ausbildung der Spraystruktur ist also bei konstantem Massenfluss vermutlich ebenfalls ein konstanter Volumenanstieg zu erwarten.

Kurz zusammengefasst: Jeder infinitesimal kleiner Masseanteil der Einspritzung macht eine ähnliche Entwicklung durch. Vom Austritt aus dem Düsenloch über Ablösung vom Kern des Sprays bis hin zu Atomisierung -allerdings unter dem Gesichtspunkt, dass keine Verdampfung stattfindet.

Wird dies als Basis genommen, muss die Kurve der Volumenänderung über der Zeit – ganz ähnlich zum Verlauf des Massenstroms – ein Plateau besitzen. Innerhalb dieses Plateaus nimmt jeder, nachströmende Massenanteil die gleichen Volumina ein, der Massenstrom ist konstant.



Abbildung 34: Verlauf des aufsummierten berechneten Sprayvolumens und deren Curve-Fitting

Abbildung 34 zeigt den Verlauf des nach Kapitel 11 berechneten Sprayvolumens. Die originalen Zahlenwerte ergeben keine schöne glatte Kurve. Dies ist auf mehrere Aspekte der Ermittlung zurückzuführen. Die Kamera besitzt zwar ein sehr hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, dennoch sollte dieser Einfluss hier erwähnt werden. Einen weitaus größeren Einfluss hat allerdings die vorgenommene Kurvenannäherung. Zunächst ist festzustellen, dass kleinste Abweichungen der errechneten Symmetrieachse zur realen Sprayachse bemerkbar machen. Auf dieser Basis werden die Orthogonalenbildung, ein weiteres Curve-Fitting und schließlich die Volumenberechnung angestellt. Eine kleine Abweichung in der Symmetrieachse kann schon Auswirkung bei der Breitenbestimmung haben und wirkt sich ungemein größer in der Volumenberechnung aus –glücklicherweise gleicht sich durch die Mittelung der Spraybreiten dieser Effekt etwas aus. Zusätzlich setzt sich der Verlauf aus der Aufnahme vieler Einspritzungen zusammen, nicht auf Highspeedaufnahmen eines einzelnen Einspritz-Events. Aufgrund dessen ist der etwas zappelige Verlauf der Kurve erklärbar. Dennoch ist in der Kurve ein Trend erkennbar.

Mittels Curve-Fitting ist aber auch hier eine glatte Kurve mit sehr kleinen Abweichungen vom originalen Verlauf zu finden. Diese ist ebenfalls in Abbildung 34, allerdings in blau eingezeichnet. Auf dieser Näherung der Volumenentwicklung werden weitere Betrachtungen angestellt.

Leitet man die angenäherte Kurve ab, so ergibt sich der Verlauf der Volumenänderung über der Zeit. Diese Verlaufskurve kann die vorangegangene Vermutung stützen und erlaubt somit eine Betrachtung unter Nutzung dieser Hypothese.



Abbildung 35: Verlauf der Volumenänderung über der Zeit

Abbildung 35 spiegelt das Plateau des Massenstroms wieder. Ab ca. 300µs nach SOI kann von einer konstanten Volumenzunahme des Sprays ausgegangen werden. Die Kurve des Massenstroms verläuft von der Charakteristik sehr ähnlich zur errechneten Volumenänderung.

Volumen-Masse-Korrelation

Aus der vorausgehenden Betrachtung ist bekannt, welches Volumen ein nachströmender Masseanteil im stationären Bereich der Einspritzung einnehmen wird. Visualisiert also wie folgt:



Abbildung 36: projizierte Volumenänderung aus einem Zeitschritt im stationären Einspritzbereich

Das Volumen des Sprays spiegelt sich projiziert in den Spraybildern wieder. Daraus ist bekannt, welche Form das Spray in jedem akquirierten Punkt besitzt. Legt man also die Spraybilder zweier aufeinander folgenden Aufnahmen übereinander, wird ersichtlich, in welchen Bereichen das Spray an Volumen gewonnen hat (Abbildung 36). Jedoch ist sehr wichtig im Hinterkopf zu behalten, dass dadurch noch kein Dichteverlauf bekannt ist. Daraus lässt sich lediglich ermitteln, wie viel Kraftstoff sich innerhalb der blau gefärbten Fläche befindet. Möchte man hieraus eine Dichtefunktion ermitteln ist eine weitere Annahme entscheidend und nötig -die der "self-similarity".

Self-Similarity

Die sogenannte self-similarity ist eine sehr nützliche Eigenschaft der Sprays, sie wurde unter anderem von Rajaratnam [23] oder Lefèbvre [19] veröffentlicht. Sie gilt für jeden Abschnitt des voll entwickelten Sprays. Dividiert man nämlich die Spray-Geschwindigkeit an jeder radialen Position durch die Geschwindigkeit der Spraymitte und trägt diese dann über einem normalisierten Radius $\left(\frac{r}{R}\right)$ auf, ergibt sich eine einzigartige Formulierung. Das Ergebnis kann ausgedrückt werden durch:

$$U(x,r) = U(x,0) * f\left(\frac{r}{r}\right)$$
^[24]

$$U(x,r) = U(x,0) * f\left(\frac{1}{R}\right)$$
(30)

Die Funktion f steht hier für das radiale Profil von U. Laut Dantes [24] kann diese Formulierung ebenfalls für die Kraftstoffkonzentration angesetzt werden:

$$C(x,r) = C(x,0) * \left[f\left(\frac{r}{R}\right) \right]^{Sc}$$
^[24]
⁽³¹⁾

Sc ist hier die Schmidt-Zahl, welche dem Verhältnis der effektiven Impulsdiffusivität (Impulsstreuung) zur effektiven Massenstreuung (Ficksches-Gesetz) entspricht.

$$Sc = \overline{D}$$
 (32)

v entspricht der Viskosität und D (Diffusionskoeffizient) der Massenstreuung.

Spraymasse

Somit ist die self-similarity sowohl auf die Geschwindigkeit, als auch auf die Kraftstoffkonzentration anwendbar. Durch den Zusammenhang von Geschwindigkeit und Tröpfchengröße durch die Impulserhaltung und den Einfluss der aerodynamischen Kräfte kann hier eine Verbindung geknüpft werden. Auch die Kraftstoffkonzentration besitzt einen Zusammenhang zur Dichte: Je mehr Kraftstoff innerhalb eines Volumens liegt, desto höher ist die Kraftstoffkonzentration und ebenfalls die mittlere Dichte des betrachteten Volumens.

Die self-similarity gründet für die weitere Betrachtung ein zentrales Element, mit der das gesamte Spray beschrieben werden kann. Hierdurch kann für die gesamte Spraylänge eine Formulierung für physikalische Parameter wie der Dichte gebildet werden.

Erste Korrelation

Aus der Differenz zweier Spraybilder aufeinanderfolgender Zeiten wurde der erste Ansatz für eine Korrelation zwischen Dichte und Intensität bzw. Volumen gebildet.



Abbildung 37:Differenz zweier Spraybilder und Anzahl normierter Breitenanteile

Die blau eingefärbte Fläche entspricht dem Zugewinn an Volumen und muss den Mehranteil an im differierenden Zeitbereich eingespritzten Massenäquivalent enthalten. Die Kurve in Rot soll die Anzahl an vorhandenen Pixeln –die dem Volumenzuwachs dienen– visualisieren, hier allerdings in einem normierten Kontext der Breite. Dies bedeutet, dass am äußeren Bereich des orangenen Bereichs ein anteilig großer Zuwachs zu verzeichnen ist, während die Pixelanteile nahe der Sprayachse nur im vordersten Teil zur Volumen-Erweiterung beitragen.

Die Pixelbilanz muss ergeben:

$$\sum_{0}^{L} n_{Pixel}(w) * \rho(w) * dV = dm$$
(33)

Die Summe aller Pixel multipliziert mit der -noch unbekannten- normierten Dichtefunktion und dem Volumeninkrement muss die Differenz der Masse ergeben.

Aus dieser Überlegung heraus soll eine charakterisierende, inkrementelle und normierte Sprayscheibe gebildet werden, welche mit bekannter Ergebnismasse und ermittelter Gewichtung eine Berechnung der Dichtefunktion zulässt. Die Gewichtung entspricht hier dann der Pixelzahl an normierter Position, die zu einer Volumenerweiterung beitragen.



Abbildung 38: Gewichtungsverlauf für eine charakterisierende Sprayscheibe

Durch die Aufsummierung der Differenzpixel über den Radius (w) wird eine Gewichtung der Dichteanteile bekannt. Somit kann man eine referenzierte "Sprayscheibe" erzeugen, welche dV nachempfunden ist. Gewichtet man nun eine radiusabhängige Dichtefunktion mit der Anzahl an normierten Pixelpositionen, muss dies infolgedessen die Massedifferenz ergeben.

Die Gewichtung muss aber immer auf die maximale Spraybreite bezogen sein. Somit ergibt sich für jede Stelle x eine eigene, normierte Gewichtungskurve, welche dann aufsummiert werden muss.

Ein jeder Volumenanteil des gesamten Sprays soll also durch nur eine einzige Scheibe repräsentiert werden können. Setzt man voraus, dass eine normierte Dichtefunktion in jeder Position gültig sein muss, erlaubt dies die Aufsummierung der Volumenanteile für die Gewichtung dieser. Die Dimension der Scheiben variiert, was eine Normalisierung voraussetzt. Eine Alternative könnte sein, die Varianz der Intensität als Basis zu verwenden und nicht die normierte Position, sondern eben gleiche Intensitäts-Abschwächungen aufzusummieren.

Die blaue Fläche entspricht demnach der Projektion der Volumenänderung, welche den bekannten Massenzufluss beinhalten muss. Ausgehend davon hat man viele kleine, konische Ring- oder Kegelstumpf-Volumina, welche in Summe die nachkommende Masse zwischen t0 und t1 beinhalten.

Nun ist es wichtig den richtigen Ansatz für die Gewichtung zu finden. Einerseits kann man alle Pixel ihrer normierten Position innerhalb des Sprays zuweisen, also Randpixel an Stelle 1, Kernpixel Stelle 0. Andererseits ergibt sich die Möglichkeit jeden Pixel auf seinen Differenzwert der Intensität zu untersuchen (hier schon durch Subtraktion der Hintergrundbilder passiert). Also jeden Pixel gleichen Intensitätswertes zu zählen und so die Gewichtung festzustellen.

Dazu muss allerdings auch die Intensität gemittelt werden (so wie die Spraybreite!) was eine gewisse Ungenauigkeit birgt. Deshalb wird dieser einfachere, aber ungenaue Ansatz nicht

weiterverfolgt. Zusätzlich birgt dieses Vorgehen eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Masseverteilung, des Vorgehens für die Gewichtung und die Ungenauigkeiten der Zeit-, Intensitäts- und Geometriemessung.



Abbildung 39: Volumenberechnung an verschiedenen axialen Positionen und Dichte-/Intensitätsverläufe am Spray

Für das Volumen bzw. den Dichteverlauf wurde immer eine Abhängigkeit vom Radius vorausgesetzt, weshalb eine Gewichtung der Volumenanteile wie folgt aussehen könnte: Der Radiusbereich wird anfänglich mit einer Wertung von 1 versehen, die Funktion der Dichte wird zunächst unberücksichtigt gelassen. Allerdings gilt,

$$dM = dV * d\rho \tag{34}$$

Sowohl für das Volumen als auch die Dichte gilt eine Radiusabhängigkeit. Somit kann der Radiusbereich für jedes Stück des Sprays positiv (oder negativ) mit dem Volumendifferenzanteil gewichtet werden.

Die Gewichtung setzt sich also zusammen aus Vorzeichen und Anteil des Volumeninkrements am Unterschied des Gesamtvolumens (zwischen t1 und t2) im Radiusbereich von Rmax(t1,x)/Rmax(t2,x) bis 1 (oder von 0 bis 1) an der Stelle x.

Die Gewichtung setzt sich also aus dem Volumenanteil zusammen, der aus dem Flächenunterschied (orange zu blau, Abbildung 39) zwischen zwei Messpunkten resultiert.

Aufsummiert müsste sich so eine Gesamtgewichtung für die Dichtefunktion (ρ) ergeben, deren Integral für alle aufeinanderfolgenden Zeitpunkte bei voll geöffneten Injektor einen (nahezu) konstanten Masseanteil ergibt.

Daraus ergeben sich n Funktionen für die Gewichtung der Funktion für die Dichte ρ (bei voll geöffneten Injektor). Für all die Kombinationen aus Volumenänderung, Gewichtungsfunktion und der Funktion für ρ wird die bestmögliche Kurve gesucht.

Hieraus ergeben sich nachfolgende Gleichungen:

f(r) entspricht hier der (normierten) Dichte-Funktion, g(r) deren ermittelte Gewichtung. F(r) ist die Stammfunktion von f und G(r) die Stammfunktion von g. Da g(r) nicht vollständig, aber bereichsweise stetig ist, kann hier numerisch integriert werden. Somit ist G(r) bekannt und es kann folgende DGL aufgestellt werden:

$$\int_{0}^{1} f(r) * g(r) dr \sim \Delta V(t_1 \longrightarrow t_2)$$
(35)

Wobei

$$\Delta V(x, y, z)(t_1 \to t_2) \sim \Delta M(\rho(x, \sqrt{y^2 + z^2}))(t_1 \to t_2)$$
(36)

erfüllt bleiben muss. Daraus folgt:

$$\Leftrightarrow [F(r) * g(r)]_0^1 - [f(r) * G(r)]_0^1 = \Delta M$$
(37)

Und:

$$\Leftrightarrow (F(1) * g(1) - F(0) * g(0)) - (F'(1) * G(1) - F'(0) * G(0)) = \Delta M$$
(38)

All dies unter folgenden Randbedingungen:

$$\xrightarrow{1.Randbed.} f(r=0) \stackrel{!}{=} 1$$

$$\xrightarrow{2.Randbed.} f(r=1) \stackrel{!}{=} 0$$

$$\xrightarrow{3.Randbed.} f'(r=0) \stackrel{!}{=} 0$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung und damit die Ermittlung der Dichtefunktion ist möglich, müsste aber über viele axiale Positionen aufwändig an das Optimum für alle Positionen und Zeiten des untersuchten Versuchs angepasst werden –was eine immense Rechenzeit beansprucht und nicht allgemein, sondern nur im jeweiligen Fall gültig wäre.

Aus diesem Grund wurde eine weitere Möglichkeit als aussichtsreicher betrachtet.

Kalibrierung mittels experimenteller Daten

Unter Kastengren et al. (2012) [25] und Pickett et al. (2014) [25] wurde die projizierte Kraftstoffmasse, deren Dichteverteilung und Flüssigkeitsanteil untersucht. Hierzu wurde ein Spray, welches in eine 303°K, also 30°C warme Umgebung eingespritzt wurde, mit einem dünnen (5-6µm) Röntgenstrahl durchleuchtet, um die Kraftstoffmasse auf dessen Pfad zu vermessen. Hierzu wurde eine 2D-Rasterabtastung mit vier verschiedenen Injektordrehungen durchgeführt. Zeitaufgelöste Daten aus vielen Einspritzungen werden dann genutzt, um die Kraftstoffverteilung zu erfassen. Natürlich in Bezug auf die Zeit sowie im Durchschnitt für einen stationären Zustand. Dies alles an vielen radialen und axialen Positionen. Um lokale (3D) Aussagen über die Verteilung zu erhalten –statt nur Höhenlinien oder Projektionen der tatsächlichen Daten– wurden Rechenmodelle der Tomografie angewendet⁷. [25]

Die Bedingungen für die hier angewendete Vermessung entsprechen nahezu denjenigen, die bei den für diese Arbeit zugrundeliegenden Experimenten angewendet wurden. Glücklicherweise sind die Abweichungen klein genug, um die Untersuchungen für unsere Zwecke zu verwenden. Zumal sollte die grundsätzliche Verteilung des Kraftstoffs auch durch noch größere Unterschiede in den Versuchsparametern dennoch für ein Modell der Dichteverteilung verwendbar bleiben. (Für eine genaue Betrachtung der Vergleichbarkeit fehlen jedoch ein paar Parameter für diese Experimental-Daten)

⁷ Frei aus dem Englischen übersetzt

Um die Daten allerdings für unser Modell verwenden zu können, sind noch einige Vorbereitungen von Nöten. Zunächst betrachten wir uns die Rohdaten:

Erwähnt werden muss hier, dass hier jeweils die Daten des "liquid volume fraction" verwendet wurden, also die Werte des Anteils an flüssigen Kraftstoff im jeweiligen Messpunkt. Und zwar diejenigen Datenpakete, welche über die Annahme einer Achsensymmetrie über die Sprayachse gemittelt wurden.



Abbildung 40: Rohdaten Röntgenuntersuchung Spray A ECN [25]



Abbildung 41: Rohdaten x-y-Ansicht Röntgenuntersuchung Spray A ECN [11]

Schon hier fällt auf, dass die Untersuchungen nicht ganz lückenlos durchgeführt wurden. Der Grund hierfür ist nicht auf der Website zu finden, deshalb kann hierüber nur spekuliert werden. Laut der Quelle wurden die Daten im Zeitbereich von 0,4 bis 1,2 ms nach elektronischem Start

Spraymasse

der Einspritzung aufgenommen (wie die Zeitabhängigkeit verarbeitet wurde ist nicht ersichtlich). Ebenfalls sind für die Datenpakete Koordinatenbereiche angegeben. Natürlich ist es unter Umständen sinnvoll die Messungen segmentiert anzubieten. In den hier dargestellten Daten wurden allerdings Unstimmigkeiten gefunden, welche zu den ersichtlichen Lücken innerhalb der Darstellung führen.



Abbildung 42: Rohdaten x-z-Ansicht Röntgenuntersuchung Spray A ECN [11]



Abbildung 43: Rohdaten y-z-Ansicht Röntgenuntersuchung Spray A ECN [11]

So sind für die jeweiligen Datenpakete Koordinatenbereiche von 0,1 bis 3,0 mm, 3,0 bis 6,0 mm und 6,0 bis 12,0 mm [25] für die axiale Distanz angegeben. Diese können allerdings mit den zur Verfügung gestellten Datenpaketen nicht gänzlich ausgefüllt werden. Teilweise stimmen die Bereiche (bzw. die Dimensionen der Messdaten und die Achsangaben) also nicht überein. Die Struktur der Daten beinhaltet ebenfalls die Koordinaten der Messpunkte. Hierdurch konnte festgestellt werden, dass zum Beispiel das erste Datenpaket nicht nur bis 3 mm sondern bis 3,2 mm Abstand zum Injektor Daten enthalten muss. Die zweite Datei überlagert allerdings diesen Endpunkt mit eigenen Werten, was einer Überschneidung

Master Thesis

entspricht (laut Koordinatenangaben). Zur letzten Wertesammlung besitzen die Daten allerdings einen Abstand von 0,5 mm die in den vorherigen Abbildungen Abbildung 41 und Abbildung 42 gut erkennbar sind.

Allerdings passen die Koordinateneinträge ebenfalls nicht ganz zu den vorhandenen LVF-Werten, weshalb ebenfalls eine Lücke zwischen dem ersten und zweiten Datenbereich entsteht. Die Daten für die y-Werte passen in jedem Fall zu den LVF-Daten, nur in den x-Werten lassen sich Ungereimtheiten finden. Diese wurden mittels des Abgleichs mit den ebenfalls auf der Website abrufbaren- Falschfarben-Bildern der Daten und visuellen Kriterien arrangiert. Es wurde der visuell glatteste Übergang gesucht, der durch die kleine Verschiebbarkeit der Datenpakete erreicht werden konnte. Hat man nämlich mehr Koordinatenpunkte als Daten, ist eine eindeutige Zuordnung der Punkte zu einem Koordinatenwert schwierig. Bei den Daten ergab sich eine maximale Verschiebbarkeit von einer Koordinatenposition. Es wurde die sinnvollste Position für jedes Paket angewendet.

Die Verlaufsform der Dichteverteilung hat große Ähnlichkeit zum Bild der Intensität bei Verwendung der Hintergrundbeleuchtung, was auf eine mögliche Übertragungsfunktion hinweist. Sollte aus den Daten nicht direkt eine Übertragungsfunktion extrahiert werden können, besteht zumindest die Möglichkeit ein modelliertes Verlaufsverhalten für die Dichtefunktion für die Berechnung der Masse zu bilden.

Beim Versuch eines mathematischen, durch stetige differenzierbare Funktionen beschreibbaren Flächen-Fittings mit wenigen Parametern und kurzer Rechenzeit, wurden einige Unregelmäßigkeiten gefunden, auf die nun näher eingegangen werden soll:



Abbildung 44: mathematische Fläche für die Werte des LVF mit unterschiedlicher x- und y-Skalierung



Abbildung 45: mathematische Fläche für die Werte des LVF in x-y-Ansicht und unterschiedlicher x- und y-Skalierung



Abbildung 46: mathematische Fläche für die Werte des LVF in x-z-Ansicht und unterschiedlicher x- und y-Skalierung

Als erstes fallen die Unregelmäßigkeiten nahe dem Nullpunkt auf. Diese sind teilweise auf die Originaldaten und teilweise auf die mathematisch gesetzten Randbedingungen, wie den Grad der mathematischen Formulierung, zurückzuführen. Die Daten beginnen bei einem Abstand von 0,1 mm von der Austrittsöffnung, womit keinerlei Daten zum direkten Austritt vorliegen. Zusätzlich besitzen die Daten vielleicht eine ganz leichte desaxiale Positionierung der Symmetrieachse.



Abbildung 47: Interpolierte Fläche für die Werte des LVF in y-z-Ansicht und unterschiedlicher x- und y-Skalierung

Diese Fehlplatzierung wird aufgrund der in Abbildung 46 und Abbildung 47 zu sehenden Einkerbung/Vertiefung direkt auf der Symmetrieachse und nahe der ersten Daten (bei kleinen x-Koordinaten) vermutet. Ein höherer Wert weiter außen (bei größeren y-Werten) ergibt zwei Gipfel deren Werte höher als 1 sind.

Nun ist in den Unterlagen ersichtlich, dass die Werte des LVF grundsätzlich auf Diesel und nicht auf die Werte auf der Symmetrieachse bezogen werden, weshalb alle Werte definitiv unterhalb 1 liegen müssten. Da die Vertiefung allerdings ebenfalls in den Originaldaten auftritt, muss hier eine Kombination von Originaldaten und der mathematischen Formulierung zu diesen Spitzen führen.

Auch sind Spitzen in negative Richtung zu finden, welche eine Überführung in ein sinnvolles Modell ausschließen.

Um ein schlüssiges Modell zu erhalten, welches auch vertretbare Rechenzeiten für einen Wert besitzt, kann auch eine interpolierte Fläche eingesetzt werden.

Hierfür muss allerdings ein stetiger und geschlossener Flächenverlauf für die Verteilung des LVF zur Verfügung stehen. Dies wurde durch folgende Schritte in Matlab realisiert:

- 1. Bildung eines Koordinatengitters über die maximalen Ausdehnungskoordinaten der Datenpakete und der kleinsten Auflösung aller Koordinatenrichtungen
- 2. Erschaffung einer gleich gerasterten Matrix als Basis für die Koordinatenpunkte und Füllung dieser mit NaN-Werten
- 3. Füllen bzw. Ersetzen der NaN-Werte der Matrix mit den vorhandenen Daten
- 4. 2D-Interpolation unter Berücksichtigung der Zahlen- und ignorieren der NaN-Werte
- 5. Bildung einer neuen Matrix gleicher Größe und Eintragen der interpolierten Zahlenwerte

Daraus ergibt sich eine interpolierte Matrix, die in jedem Koordinatenpunkt einen verwertbaren Zahlenwert liefern kann. Daraus allein kann man aber noch nicht die Daten für das Volumenund Massenberechnungsprogramm ziehen. Hierfür besitzen die Daten noch einen

12

Koordinaten- und Zeitbezug, der für das Modell ausgeschlossen werden muss. Dies kann nur auf Basis der self-similarity realisiert werden.

Zunächst muss jedoch auch hier eine eigene Spraybetrachtung angestellt werden, um die Grenzen und die zugehörigen Werte des LVF zu finden und später in das Modell überführen zu können.

In Abbildung 48 sind drei ausgewählte Dichten als Höhenlinien innerhalb der interpolierten Fläche gekennzeichnet (überführt aus den LVF-Werten). Gewünscht war zunächst die Grenze für das Spray aufgrund physikalischer Größen ziehen zu können. Deshalb auch die blau eingezeichnete Linie, welche die Abgrenzung zur Dichte von Luft (prozentual auf den Diesel bezogen) symbolisiert. Wie ebenfalls erkennbar ist, reichen die Daten nicht aus um daraus eine geschlossene Grenzlinie zu definieren.

Allgemein gilt natürlich: "so niedrig wie möglich, so hoch wie nötig" für die Limitation und damit der Festlegung der Grenze zwischen Spray und Umgebung.



Abbildung 48: Höhenlinien der interpolierten LVF-Daten an ausgewählten Punkten

Auch die Linie für 0,5 Prozent der Dichte von Diesel besitzt noch keinen geschlossenen Kurvenzug, weshalb auf die Ein-Prozent-Linie zurückgegriffen werden muss. Hier ergibt sich ein geschlossener Kurvenzug, zusätzlich ist der Wert nicht unvertretbar hoch und bildet eine vertraute Sprayform.⁸

Nun, da die Grenze des Sprays gefunden ist, kann auf andere Charakteristika der Interpolationsfläche eingegangen werden.

⁸ Mehr dazu im Anhang a und b





Abbildung 50: Interpolierte Fläche des LVF in x-y-Ansicht und unterschiedlicher x- und y-Skalierung



Abbildung 51: Interpolierte Fläche des LVF in x-z-Ansicht und unterschiedlicher x- und y-Skalierung



Abbildung 52: Interpolierte Fläche des LVF in y-z-Ansicht und unterschiedlicher x- und y-Skalierung

Betrachtet man Abbildung 49 bis Abbildung 52 in Vergleich zu Abbildung 44 bis Abbildung 47, ist eine deutlich nähere Anpassung an die originalen Daten sofort ersichtlich. Die Interpolation erzeugt keinerlei Überschwinger oder Ausreißer zwischen zwei Stützstellen, wie es bei einer einfachen mathematischen Anpassung der Fall sein kann. Hierzu ein kleiner Einschub: Während der Volumen- und Masseberechnung muss für jedes Spray und hierin ebenfalls für jedes der Messintervalle auf viele Werte der Dichteverteilung zugegriffen werden. Eine geringe Erhöhung der Ermittlungszeit für einen Dichtewert hat also eine große Auswirkung auf die gesamte Rechenzeit. Es ist deshalb von entscheidender Bedeutung, dass das für die Dichte angewendete Modell so einfach und schnell wie möglich zu halten, ohne hohe Einbuße der Ungenauigkeit zu erleiden.

Diese interpolierten Daten für den LVF wurden zunächst so in die Analyse eingebettet, dass eine Abstimmung der Sprayumrandung stattfand. Hierzu wurde die Ein-Prozent-Umrandung auf die in den Spraybildern ermittelte Umrandung skaliert (Abbildung 48). Allerdings ergibt sich hier ein vermutlich großer Fehler, da diese Dichtegrenze noch weit oberhalb derer von Luft liegt und nicht die Sichtbarkeitsgrenze des Sprays darstellt –deshalb fällt die Umrandung für die Sandia-Daten deutlich zu klein aus, was eine zu große Masse in der Berechnung ergibt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde noch einmal der Versuch unternommen, dennoch plausible Werte mithilfe dieser Daten zu ermitteln, indem der Schwellwert für die Umrandung nicht bei einem Prozent angesetzt wird, sondern auf die Dichte von Luft hin verschoben wird (mittels Extrapolation der Verlaufskurve). Dazu ist zu erwähnen, dass diese Kurve dann dennoch –durch die Normierung- nur auf das Volumen der experimentell aufgenommenen Spraybilder bezogen wird. Allerdings ergab auch diese Vorgehensweise noch eine viel zu große Spraymasse. Gründe hierfür können sein:

- Die variable Skalierung des Dichteverlaufs, da das Fitting nur ein mathematisches Polynom-Abbild ist und keinen physikalischen Bezug aufweist
- Die Abweichung von nicht angegebenen Umgebungs- oder Versuchsbedingungen, sodass die Sandia-Daten mit den von mir gemessenen Punkten nicht perfekt übereinstimmen.
- Die Lücken innerhalb der Sandia-Daten und somit Ungenauigkeiten sowohl in der Positionierung als auch in der Interpolation der benutzten Daten
- Die Unsicherheit des Skalierens: Die Grenzdichte, bei der man das Spray noch sehen kann, ist nicht eindeutig definierbar, da die Sichtbarkeit nicht ausschließlich von der Dichte des Gemisches abhängig ist. Großen Einfluss haben auch Tröpfchengröße, Größenverteilung und Art der Belichtung.
- Der Zeitpunkt der Sandia-Daten: Hier ist kein Zeitverlauf gegeben, sondern lediglich ein einzelner Datensatz. Der fehlende Zeitbezug kann einen großen Einfluss haben, da sehr viele Zeiten meiner Messungen auf einen einzelnen Datenpunkt von Sandia bezogen werden. Zwar ist die "self-similarity" gegeben, jedoch multipliziert sich ein Fehler in den Sandia-Daten mit der Anzahl an Iterationen aus der inkrementellen Berechnung.

Kalibrierung über Spraymodelle

Über die Jahre, in denen Sprays nun erforscht wurden, haben sich einige Modelle in unterschiedlichen Komplexitäts-Graden etabliert. Eines davon ist das Siebers-Modell [26], welches unzählige Male referenziert und validiert wurde.

Naber-Siebers

Das Siebers-Modell wurde ursprünglich für Dieselsprays in nicht verdampfender Umgebung gebildet [26], hat sich aber auch für -verdampfende Sprays bewährt. In einer weiteren Entwicklung, dem so genannten "Scaling Law" werden die Stoffeigenschaften der Kraftstoffe und thermodynamische Bedingungen im Zylinder in Bezug auf die maximale flüssige Eindringtiefe berücksichtigt [27]. (in diesem Model wird auch das Phasengleichgewicht beschrieben und reales Gasverhalten (Berechnung des Kompressibilitätsfaktors Z) mit einer kubischen Zustandsgleichung berücksichtigt).

Im Nachfolgenden soll erklärt werden, wie genau der Ansatz und die Ausarbeitung des Siebers-Modells aussieht. Hierfür wird der Kern der Veröffentlichung [26] und deren Gleichungen zitiert um ein Verständnis für die Vorgehensweise zu schaffen und die Zusammenhänge herzustellen. Das im nachfolgenden Kapitel beschriebene Modell nutzt das Vorgehen von Naber-Siebers. Aus diesem Grund werden die Kernaspekte des Modells hier nochmal erläutert. Das vollständige Vorgehen kann in [26] nachgelesen werden. Darüber hinaus wird die maximale Eindringtiefe unter verdampfenden Bedingungen mit Hilfe des "Scaling Law" berechnet. Für die Details der Modelentwicklung wird auf [27] verwiesen. Das Model wurde am IFZN TH-Nürnberg implementiert und ist verfügbar auf Anfrage.

Die Verteilung des Sprays folgt hier der Eindringtiefen-Analyse von Wakuri und Konsorten [28] und Hays [29] allerdings –wie schon erwähnt- mit Modifikationen:

- Dimensionslose Analyse um das Vorgehen zu vereinfachen, die Dichteeffekte des Umgebungsmediums und des Kraftstoffes miteinzubeziehen und eine Variabilität in Bezug auf den Düsenlochdurchmesser zu gewährleisten.
- eine Annahme für die Konstante, die in der Penetrationskorrelation erscheint, basierend auf Brennstoffkonzentrations- und Geschwindigkeitsprofilen für turbulente zweiphasige Jets
- die Entwicklung eines inversen Zusammenhangs (Eindringtiefe-Zeit) für die Zeit- zu Eindringtiefen-Beziehung, welche aus der Analyse resultiert.
- Zusammenhang des mittleren Gleichgewichtswertes und der axialen Entfernung zum Sprayursprung [26]⁹

Die angewendete Methode benutzt integrierende Techniken für isotherme, inkompressible Jets und Sprays, welche unabhängig von den eingesetzten Medien sind. Diese Entwicklung nutzt zwei Schritte: Aufstellung einer Relation für die Geschwindigkeit an der Sprayspitze und Integration dieser Geschwindigkeits-Gleichung zur Korrelation zwischen der Zeit, welche zum Erreichen der Eindringtiefe benötigt wird, und der Eindringtiefe.

64 von 83

⁹ Frei aus dem Englischen übersetzt



Abbildung 53: Schema des Spray-Modells für die Eindringtiefe [26]

Wie in Abbildung 53 ersichtlich, nutzt das Modell die Annahme einer uniformen Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Kegelwinkel des Sprays, jedoch unter der Bedingung, dass Massen- und Momentengleichgewicht herrscht und identisch zu denen des realen Sprays sind.

Es lassen sich also folgende Gleichungen aufstellen:

$$\rho_f * A_f(0) * U_f = \rho_f * A_f(x) * U(x)$$
(39)

$$\rho_f * A_f(0) * U_f^2 = \rho_f * A_f(x) * U(x)^2 + \rho_a * A_a(x) * U(x)^2$$
(40)

Wobei der Index f für die Parameter des Kraftstoffs und der Index a für die Parameter der Umgebung verwendet werden. Die Variablen A_f und A_a spiegeln die sog. cross-sectional Fläche, also die Querschnittsfläche des Kraftstoffs respektive der Luft wieder. Mit der gesamten Querschnittsfläche des Jets lässt sich daraus folgende Gleichung bilden:

$$A_a(x) = A(x) - m * A_f(x)$$
⁽⁴¹⁾

Einsetzen der Auflösung der Gleichung nach A_f und A_a ergibt für die Geschwindigkeit U(x):

$$U(x) = \frac{U_f}{2} * \frac{A_f(0)}{A(x)} * \left(\frac{\rho_f}{\rho_a} - m\right) * \left(\sqrt{1 + 4 * \frac{\frac{A(x)}{A_f(0)} * \frac{\rho_f}{\rho_a}}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_a} - m\right)^2} - 1}\right)$$
(42)

Diese Gleichung für die Geschwindigkeit des Sprays ist für alle x-Positionen des Sprays anwendbar (wobei die x-Achse der Sprayachse entspricht). [26]

Im Modell selbst werden nun noch einige Substitutionen und eine Umwandlung in dimensionslose Größen vorgenommen um auf eine simplere Formulierung hinzuarbeiten. Auf diese soll aber hier nicht näher eingegangen werden. Als Formulierung des Zusammenhanges zwischen Zeit und Eindringtiefen ergibt sich schließlich:

$$\tilde{t} = \frac{\tilde{S}}{2} + \frac{\tilde{S}}{4} * \sqrt{1 + 6 * \tilde{S}^2} + \frac{1}{16} * \ln\left(4 * \tilde{S} + \sqrt{1 + 16 * \tilde{S}^2}\right)$$
(43)

Und daraus schließlich der dimensionslose Zusammenhang:



Abbildung 54: dimensionsloser Eindringtiefen-Zusammenhang und invertierter Zusammenhang [26]

Das Siebers-Modell bietet hier den Vorteil der Massen- und Momentenerhaltung, wodurch eine Kontinuität gegeben und eine zeit- und positionsaufgelöste Beschreibung des Sprayverhaltens gegeben ist.

Aus dem Ansatz der uniformen Geschwindigkeitsverteilung heraus kann aber keine Beschreibung der radialen Struktur eines realen Sprays gezogen werden. Das Modell kann die Eindringtiefen und das "cross-sectional-average", den radialen Durchschnittswert ermitteln, liefert aber leider keine Werte in Bezug auf die Kraftstoffverteilung in radialer Richtung.

Diese Ungenauigkeit kann durch eine weitere Anpassung des Modells aufgehoben werden, wodurch auch eine radiale Beschreibung des realen Sprays besteht.

Musculus-Kattke

Wie schon zuvor erwähnt, nutzt das eindimensionale Modell von Naber und Siebers einen konstanten Spraykegelwinkel, keinen Geschwindigkeitsunterschied zwischen eindringender Umgebungsluft und Kraftstoff und eine konstante Austrittsgeschwindigkeit des Kraftstoffs mit uniformer radialer Geschwindigkeit [26]. Hierdurch kann weder die Sprayentwicklung, noch die Dynamik eines Sprays mit variabler Einspritzrate (z.B. aus dem Öffnungs- und Schließvorgang des Injektors) beschrieben werden.

Wie im Kapitel zuvor soll auch hier auf die grundsätzliche Vorgehensweise des Modells eingegangen werden. Hierfür werden die Kernaspekte aus [8] (übersetzt und teilweise zusammengefasst) erläutert und die Hauptgleichungen des Vorgehens zitiert.

Eine Koppelung der radialen Position und der Geschwindigkeit auf der Sprayachse korreliert mit einer Gauß'schen Verteilung bis zu einem Wert von 3% des Wertes auf der Sprayachse. [8]

Für die Einbindung der Gleichungen für die radialen Masse- und Momentenverhältnisse müssen sieben Vereinfachungen angewendet werden:

- 1. Der Jet unterliegt keinerlei Verdampfung. Die Einflüsse der Verdampfung, wie Verdunstungskälte oder Phasenänderung sind zu komplex, als dass sie hier eingebunden werden könnten. Der Kraftstoff wird universal als Flüssigkeit gehandhabt.
- 2. Die Strömung ist inkompressibel.
- 3. Turbulente (und molekulare) Reibungskräfte, innerhalb jedes Kontrollvolumens werden vernachlässigt.
- 4. Axiale Mischung des Impulses durch molekulare und turbulente Diffusion wird vernachlässigt.
- 5. Die resultierende Kraft aufgrund axialer Druckgradienten wird als vernachlässigbar angenommen.
- 6. Der Strahlwinkel wird als konstant betrachtet. Auch während und nach dem Übergang zum Ende der Einspritzung.
- 7. Das (normalisierte) radiale Profil der mittleren axialen Geschwindigkeit wird nicht durch das Ende der Einspritzung beeinflusst.



Abbildung 55: Eindimensionales diskretes Kontrollvolumen des Musculus-Kattke-Modells [8]

Da dieses Spraymodell zur Kalkulation der Masseverteilung und der Gesamtmasse des Sprays auch unter motornahen Betriebsbedingungen (d.h. auch bei verdampften Sprays) verwendet wurde, wird hier etwas näher auf die Berechnungen und Vorgehensweisen eingegangen.

Zunächst werden die Basisformeln für den Massen- und Impulserhalt hergeleitet:

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_{f,in} - \dot{m}_{f,out} \tag{44}$$

$$\frac{dM}{dt} = \dot{M}_{in} - \dot{M}_{out} \tag{45}$$

Hieraus kann das Integral des Massenstroms und des Impulsflusses aufgestellt werden.

$$\dot{m}_f = \rho_f * \int \bar{X}_f \bar{u} dA \tag{46}$$

$$\dot{M} = \int \bar{\rho} * (\bar{u})^2 dA \tag{47}$$

Wobei ρ_f die Dichte des flüssigen Kraftstoffs, und $\bar{u}, \bar{\rho} und \bar{X}_f$ die turbulente Durchschnittsgeschwindigkeit, Dichte respektive Volumenanteil des Kraftstoffs entspricht. Wie auch in Abbildung 55 ersichtlich, entspricht die Querschnittsfläche $A = \pi * \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) * z' \right)^2$ einer Funktion der Distanz z'.

Master Thesis

Kalibrierung über Spraymodelle
Spraymasse

In realen Jets entspricht sowohl \bar{X}_f als auch \bar{u} einer nicht stetigen Funktion über der Querschnittsfläche. Allerdings kann das Integral über angenäherte Profile für beide Variablen über Abramovich für Gas-Jets als auch für zweiphasige Jets beschrieben werden [30].

$$\frac{\bar{X}_{f}}{\bar{X}_{f,c}} = (1 - \xi^{\alpha})^{2}$$
(48)

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_c} = (1 - \xi^{\alpha})^2 \tag{49}$$

Der Index c kennzeichnet hier die Werte auf der Sprayachse und $\xi = r/R$ das Verhältnis der Koordinate r zur Spraybreite $R = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * z'$ wie in Abbildung 55 dargestellt. Der Exponent α entspricht einem justierbaren Parameter der die Entwicklung von der "top-hat"-Form ($\alpha = \infty$) zum voll entwickelten Spray ($\alpha = 1,5$) beschreibt.

Mittels der Beziehung $dA = 2 * \pi * R^2 * \xi * d\xi$ können die Werte an der Mittelachse zu Durchschnittswerten für die Querschnittsfläche relativiert werden. Diese werden ausgedrückt durch:

$$\bar{\bar{X}}_{f} = \frac{\int \bar{X}_{f} dA}{\int dA} = 2 * X_{f,c} * \int_{0}^{1} (\xi - 2 * \xi^{\alpha + 1} + \xi^{2\alpha + 1}) d\xi$$
$$= \frac{\alpha^{2}}{(\alpha + 1) * (\alpha + 2)} * \bar{X}_{f,c}$$
(50)

Und

$$\bar{u} = \frac{\int \bar{u} dA}{\int dA} = \frac{\alpha^2}{(\alpha+1)*(\alpha+2)} * \bar{u}_c$$
(51)

Die doppelten Querbalken in den Gleichungen kennzeichnen einen Querschnittswert über die Querschnittsfläche des Sprays.

Spraymasse

$$\beta = \frac{6(\alpha + 1)(\alpha + 2)}{(3\alpha + 2)(2\alpha + 1)}$$
(52)

Der Faktor β beschreibt die Form des Volumenanteils und das Geschwindigkeitsprofil. Vereinfachen lässt sich die Mathematik hier noch durch Ersetzen des Dichteverlaufs durch einen Querschnittswert.

$$\dot{M} = \bar{\rho}\beta(\bar{u})^2 A \tag{53}$$

Hierbei ist der Durchschnittswert für die Dichte ρ eine Funktion der Kraftstoffdichte und der Dichte des Umgebungsgases:

$$\bar{\rho} = \rho_f * \bar{\bar{X}}_f + \rho_a * \left(1 - \bar{\bar{X}}_f\right) \tag{54}$$

Für jedes Kontrollvolumen gilt demnach:

$$\bar{X}_f = \frac{m_f / \rho_f}{A * \Delta z} \tag{55}$$

Für die Geschwindigkeit:

$$\bar{\bar{u}} = \frac{M}{\bar{\bar{\rho}} * A * \Delta z} \tag{56}$$

Mit der Diskretisierung ergibt sich in jedem Kontrollvolumen also:

$$m_{f,i}^{t+1} = m_{f,i}^{t} + \rho_{f} * \left[\left(\beta * \overline{\overline{X_{f}}} * \overline{\overline{u}} * A \right)_{i-1}^{t} - \left(\beta * \overline{\overline{X_{f}}} * \overline{\overline{u}} * A \right)_{i}^{t} \right] * \Delta t$$
(57)

Und

$$M_{i}^{t+1} = M_{i}^{t} + \left[(\bar{\rho} * \beta * (\bar{\bar{u}})^{2} * A)_{i-1}^{t} - (\bar{\rho} * \beta * (\bar{\bar{u}})^{2} * A)_{i}^{t} \right] * \Delta t$$
(58)

Aus diesen Beziehungen lassen sich nun Werte für den Verlauf der Kraftstoffverteilung und somit die Durchmischung mit Luft und letztendlich auch der Verlauf der Dichte beschreiben.

Einzig die Werte für β und somit auch für α müssen numerisch ermittelt werden, was eine iterative Berechnung voraussetzt. Als Randbedingung wird festgelegt, dass die Geschwindigkeitswerte auf der Mittellinie nicht die maximale Austrittsgeschwindigkeit überschreiten.

Der Wert α beeinflusst die Profile der Berechnungen mit radialer Abhängigkeit. Bei voll entwickeltem Spray (α =1,5) ist er ähnlich einer Gauß'schen Fehlerfunktion. Während der Ausprägung des Sprays sind die Profile flacher, was durch die Werte von α korrigiert werden muss, um die realitätsgetreue Abbildung des Sprayverhaltens zu gewährleisten. Deshalb wird

in diesen Gebieten α so gewählt, dass die Geschwindigkeit im Zentrum des Sprays nicht die Austrittsgeschwindigkeit überschreitet. Also gilt:

$$\bar{u}_c = \bar{\bar{u}}_0 \tag{59}$$

Wenn man feststellt, dass der Impulsfluss im stationären Jet konstant ist, muss dieser Impulsfluss auch an jeder beliebigen axialen Position gegeben, also gleich dem Impulsfluss an der Düse sein. Daraus folgt:

$$\dot{M} = \dot{M}_0 \tag{60}$$

Eingesetzt in die Momentenerhaltung ergibt sich:

$$\bar{\rho} * \beta * (\bar{u})^2 * A = \rho_f * (u_0)^2 * A_0 \tag{61}$$

Einsetzen der Formulierungen für $\overline{\rho}$, \overline{X}_f , β und \overline{u} auf der linken Seite kann obere Gleichung geschrieben werden als:

$$\frac{6(\alpha+1)(\alpha+2)}{(3\alpha+2)(2\alpha+1)} * \rho_a * A * \left(\frac{\alpha^2}{(\alpha+1)(\alpha+2)} * \bar{\bar{u}}_0\right)^2 + \rho_f * A_0 * \bar{\bar{u}}_0 * \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_f}\right) \\ * \frac{\alpha^2}{(\alpha+1)(\alpha+2)} * \bar{\bar{u}}_0 - \rho_f * A_0 * (\bar{\bar{u}}_0)^2 = 0$$
(62)

Und vereinfacht daraus:

$$6\left(\frac{A}{A_0} - 1\right) * \alpha^4 - \left(7 + 18 * \frac{\rho_f}{\rho_a}\right) * \alpha^3 - \left(2 + 33 * \frac{\rho_f}{\rho_a}\right) * \alpha^2 - 20 * \rho_f / \rho = 0$$
(63)

Mittels eines numerischen Solvers (Lösers) wird die einzige positive Lösung für α ermittelt und für die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit und des mittleren Kraftstoffanteils innerhalb des Übergangsbereichs (hin zum voll entwickeltem Spray) genutzt.

Wird der Wert für α niedriger als 1,5 ist dies ein Indiz für ein voll entwickeltes Spray und α wird ab dieser Position stromabwärts auf 1,5 fixiert.

Aus dem Musculus-Kattke-Modell wird die radiale Verteilung der Masse ermittelt. Hierfür ist ein Abgleich der flüssigen Eindringtiefe notwendig.



Abbildung 56: Beispiel eines Ergebnisplots aus dem Musculus-Kattke-Modell mit bereits implementierten Geschwindigkeitsprofil und Abgleich der flüssigen Eindringtiefe

Für die Diagramme (ähnlich Abbildung 56) wird eine iterative Berechnung durchgeführt. In Abbildung 56 ersichtlich ist die Spray-Charakterisierung bei 460µs nach SOI. Zu sehen sind vier teilweise voneinander abhängige Graphen:

- Durchschnittliche Geschwindigkeit (oben links): Die rote Linie zeigt den Verlauf der gemittelten Spraygeschwindigkeit über die Eindringtiefe. Der graue Balken resultiert aus der Änderung der Austrittsgeschwindigkeit. Durch den Verlauf der Austrittsgeschwindigkeit ergibt sich eine zeitlich variierende mittlere Geschwindigkeit. Die grauen Linien visualisieren die maximal mögliche Eindringtiefe, welche mit jeder Austrittsgeschwindigkeit in diesem Zeitpunkt erreicht werden kann. Diejenige graue Linie, die fast gleich zur roten verläuft, visualisiert das Verhalten eines stationären Sprays.
- Mittleres Brennstoffverhältnis (φ=1/λ; λ:Luftverhältnis): (oben rechts): Hier spiegelt die rote Linie das mittlere Brennstoffverhältnis wieder. Diese ist überführbar in den Flüssigkeitsanteil und somit in eine Dichte. Abhängig von der Distanz zur Düse spiegelt dieses Diagramm den Verlauf des Kraftstoffanteils auf der Sprayachse wieder. Ähnlich zu vorheriger Beschreibung geben hier auch wieder graue Linien die maximal mögliche Eindringtiefe aus der Geschwindigkeit und den Verlauf bei stationärem Verhalten an. Als zweite Größe wird hier die relative Eindringrate an einer zusätzlichen y-Achse aufgeführt. Diese gibt einmal die Durchmischung mit Luft bezogen auf das Spray und einmal (gestrichelt) die Durchmischung mit Luft pro Kraftstoffanteil an.

- Eindringtiefe (unten links): Auch hier spiegelt die graue Linie ein voll entwickeltes, stationäres Spray wieder. Durch den instationären Bereich der Sprayentwicklung weicht die Berechnete Eindringtiefe deshalb stark vom stationären Kurvenverlauf ab. Die errechnete Eindringtiefe ist hier in blau dargestellt. Basis der Eindringtiefen-Berechnung ist Massen- und Impulserhaltung sowie das Siebers-Modell von 1999 [27] und der als Eingangsgröße deklarierte Geschwindigkeitsverlauf. Dieser ist hier in rot dargestellt und bezieht sich auf die zweite y-Achse. Ist der Injektor vollständig geöffnet bleibt die Austrittsgeschwindigkeit konstant. Die flüssige Eindringtiefe ergibt sich aus dem Phasengleichgewicht an der Sprayspitze [27].
- Brennstoffverhältnis (unten rechts): Hier sind verschiedene Höhenlinien des Flüssigkeitsanteils in orthogonaler Richtung zur Sprayachse dargestellt. Sofort ist ersichtlich, dass ein konstanter Spraykegelwinkel verwendet wird. Aus den Daten für diese Darstellung wurden die Verläufe der Dichtekurven in radialer Richtung entnommen. Auch hier ist eine "self-similarity" Grundlage zur Formulierung der Dichteverläufe.

Integration des Musculus-Kattke-Modells

Um das zuvor beschriebene Spraymodell in die Berechnung einzubinden, werden die Basisparameter und einige Eingangsgrößen in die Funktion des Modells übergeben. Hierzu gehören die Dichte der Umgebung, Temperatur der Umgebung, stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis, Abgasrückführungsrate, Düsenlochdurchmesser, der Spraykegelwinkel und der Austrittsgeschwindigkeitsverlauf.

Um den Geschwindigkeitsverlauf zu ermitteln wurden die Überlegungen aus Grundüberlegungen zur Kalibrierung angewendet. Der Volumenzuwachs wird als proportional zum Massenstrom angenommen. Der Maximalwert der Austrittsgeschwindigkeit wird durch Bernoulli berechnet,

$$u = \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \tag{64}$$

während die Verluste aus Drosselung und Innenströmung innerhalb des Injektors zunächst vernachlässigt werden. Wichtig ist hier vor allem der Verlauf des Anstiegs, welcher sich aus dem Volumenzuwachs ergibt.

Mit dem ermittelten Geschwindigkeitsprofil ergibt sich nachfolgender Verlauf für die flüssige Eindringtiefe.



Abbildung 57: Vergleich der gemessenen und berechneten flüssigen Eindringtiefe

Es ist ein deutlicher Abstand zwischen den beiden Kurven ersichtlich. Dieser kann durch zwei Größen beeinflusst werden. Zum einen gilt für den Injektor eine gewisse Totzeit. Gibt das Injektorsteuergerät ein Signal aus, besteht eine gewisse Trägheit des Systems durch den Aufbau des Magnetfeldes am Aktuator, der Massenträgheit des Steuerventils und der Nadel sowie durch die Füllung des Düsenlochvolumens (beschrieben in Timing). Ist diese Totzeit z.B. um 100µs größer (zum Beispiel durch niedrigeren Raildruck, anderen Injektor, ...) verschiebt sich die schwarze Kurve nach rechts. Selbiges gilt für die Totzeit aus der Messung: bei idealen Messbedingungen erfasst man das Spray direkt nach Austritt aus dem Injektor. Durch den zugrundeliegenden Messaufbau und der Notwendiakeit der Hintergrundbeleuchtung ergab sich im vorliegenden Fall ebenfalls eine Totzeit. Diese ist zurückzuführen auf die (aufbaubedingte) Verschiebung des Messgebietes in Strömungsrichtung des Sprays um wenige Millimeter.

Berücksichtigt man nun, dass das Spray natürlich eine gewisse Zeit braucht, um diese Distanz zum Messgebiet zu überbrücken, ergibt sich ebenfalls eine Verschiebung der Kurve.

12

Beide Kurven müssen aber aufeinanderliegen. Hieraus wird geschlossen, dass die Zeitdifferenz zwischen beiden Kurven aus den zuvor erklärten Ursachen resultiert und die berechnete Kurve auf die gemessene verschoben werden darf.



measured and calculated liquid length

Abbildung 58: Vergleich der gemessen und berechneten flüssigen Eindringtiefe mit einbezogener Zeitverschiebung der berechneten Kurve

Die Größe der Totzeit wird aus dem Kurvenverlauf der Volumenänderung gezogen. Durch die Kurvenannäherung ergibt sich bis zu einem gewissen Punkt eine leicht negative Volumenänderung (siehe Abbildung 35). Dies wird als Basis für die Zeitverschiebung verwendet.

Hieraus ergibt sich –wie in Abbildung 58 ersichtlich- eine gute Annäherung zwischen gemessener und berechneter flüssiger Eindringtiefe.

Einen weiteren Knackpunkt des Modells finden wir innerhalb des Codes bei der Definition der flüssigen Eindringtiefe. Das Modell benötigt für die Kalkulation dieses Wertes einen Grenzwert für Fuel/Air. Dieser ist von mehreren Faktoren abhängig. Zunächst ist entscheidend, welcher Kraftstoff eingesetzt wird, da dessen Verhalten ausschlaggebend für die Verdampfung und schließlich für dessen Eindringtiefe ist. Im Modell sind mehrere Standardtabellen referenziert, jedoch nur eine implementiert. Glücklicherweise ist die implementierte (für C17) diejenige, welche am nähesten an das reale Verhalten von Dieselkraftstoff heranreicht. Weitere Einflussgrößen sind Umgebungsparameter wie Dichte und Temperatur, die direkt die Verdampfung, die Wechselwirkungskräfte zwischen Umgebung und Kraftstoffspray und das daraus resultierende "Air-Entrainment" beeinflussen.



Abbildung 59: Visualisierung des Lookuptables für den Grenzwert des Kraftstoff-Luftverhältnisses am Punkt der flüssigen Eindringtiefe

Da reale Kraftstoffe in der Regel Stoffgemische sind, wären hier mehrere Schwellwerte nötig –für jeden Stoffanteil ein Grenzwert. Hieraus würden sich auch mehrere Eindringtiefen in Abhängigkeit des betrachteten Kraftstoffanteils ergeben. Sinnvoll ist es also, den am weitest eindringenden Anteil zu betrachten. Dies wollen wir hier nicht weiter vertiefen. Die Genauigkeit aus der vorliegenden Tabelle wird als akzeptabel erachtet und deshalb weiterverwendet. Eine genauere, besser zum realen Verhalten passende Tabelle wird gewünscht, kann aber aus Zeitgründen hier nicht entwickelt werden.

Ausgehend von dem aus dieser Tabelle ermittelten Schwellwert wird im Modell die Eindringtiefe errechnet und die Kraftstoffverteilung beschrieben. Die zugehörige radiale Abnahmefunktion ist ersichtlich in Abbildung 60. Abhängig vom Entwicklungsstadium des Sprays verändert sich der Verlauf durch die Variation von α . Ist das Spray voll entwickelt, so besitzt α den Wert von 1,5 und der Verlauf bleibt konstant.

Vergleicht man die Kurve aus Abbildung 60 mit dem Intensitätsverlauf aus Abbildung 26, so fällt sofort die Ähnlichkeit auf. Es liegt also nahe anzunehmen, für diese zwei Verläufe eine Übertragungsfunktion finden zu können.

Auch die physikalischen Zusammenhänge passen zusammen, da eine Abnahme der Intensität einer Zunahme der optischen Dichte entspricht und somit ebenfalls an die Kraftstoffverteilung gekoppelt sein muss.

Dennoch wird nachfolgend (noch) nicht mit einer Übertragungsfunktion zwischen Intensitätsund Dichteverteilung gerechnet, sondern vorerst ausschließlich mit der aus dem Spraymodell ermittelten Dichteverteilung. Ob eine Übertragungsfunktion ausreichend robust anwendbar ist, muss mittels einer zukünftigen Validierung einer solchen geprüft werden.

Vorerst ist es definitiv ausreichend, die errechnete Dichtefunktion als Basis für die Masseberechnung heranzuziehen. Voraussetzung hierfür ist der bereits erwähnte Abgleich der Eindringtiefen. Nur wenn diese nicht zu stark voneinander abweichen, ist die Dichtefunktion verwendungsfähig.



Abbildung 60: normierte Radiale Funktion für Xf

Berechnung der Spraymasse

Für die Berechnung der Spraymasse wurde die diskrete Formulierung für

$$M = \iint_{0}^{L/1} dV \, d\rho \tag{65}$$

so entkoppelt, dass eine Eingabe des Dichteverlaufs getrennt vom Volumen erfolgen kann. dV läuft also von 0 bis L während die Dichtekurve dp normiert von 0 bis 1 integriert werden muss. Die einzelnen Volumenscheiben des Sprays werden mit dem ermittelten Dichteverlauf aufintegriert um die Gesamtmasse des Sprays zu ermitteln.

$$dm(x, y) = \pi * \left(\frac{R_h - R_l}{L} * x + R_l\right)^2 * \tau^3 * \rho(y) * \rho_l$$
(66)

 τ steht hier für den Pixelmaßstab, R_h und R_l , sowie L entsprechen den Kegelstumpfabmessungen (siehe Sprayvolumina). Somit ist das Volumen nur von der axialen Position (hier x) abhängig und der Verlauf der Dichte nur vom Radius (hier y).

Mittels der Integration kann die Masse des betrachteten Sprayabschnitts berechnet werden, wobei die Dichtefunktion austauschbar bleibt.

13. Ergebnisse

Zur Abschätzung der Größenordnung und zur Referenzierung der Ergebnisse wird zunächst eine Überschlagsberechnung durchgeführt.

$$m_f = C_d * A * c \tag{67}$$

 C_d steht hier für den sogenannten discharge coefficient, (Durchflussbeiwert) welcher die Druckverluste innerhalb des Injektors zusammenfasst, A ist die Fläche des Austrittsquerschnittes und c ist die Austrittsgeschwindigkeit.

Daraus ergibt sich ein maximaler Massenstrom von:

$$m_{fmax} = 1 * 0.0165 \ mm^2 * 534 \frac{m}{s} = 0.0074 \ kg/s \tag{68}$$

Aus den Betrachtungen der Volumenänderung (siehe Spraymasse) wird die Entwicklung des Massenstroms über der Zeit abgeleitet. Als absolutes Maximum wird eine Rampenfunktion angesetzt.

So ergibt sich aus der Berechnung ohne Berücksichtigung des Zeitverzugs (aus dem Volumenzuwachs) der folgende Kurvenverlauf.



Abbildung 61: Errechnete Spraymassen und absolutes physikalisches Maximum der Spraymasse

Ergebnisse

Der Kurvenverlauf wurde mittels zwei unterschiedlicher Vorgehen berechnet. Basis bildet hier immer die aus den Bildern ermittelte Geometrie des Sprays. Das Volumen wird aufgrund der bereits erwähnten rotationssymmetrischen Annahme definiert.

Die schwarze Kurve wurde mit dem Dichteverlauf aus dem Musculus-Kattke-Modell kalkuliert. Hierin wird ein konstanter Öffnungswinkel mit der Position auf der Sprayachse als Spraygeometrie angesetzt. Es ergibt sich ein immer weiter öffnender Kegel, das Spray verengt sich aber circa ab der Mitte wieder bis hin zur Spitze des Sprays. Um diesen Unterschied zu berücksichtigen, werden die radial-koordinatenabhängigen Verläufe des LVF's beziehungsweise die Dichteverläufe auf die Geometrie des Sprays angepasst (Abbildung 62).



Abbildung 62: Anpassung des LVF-Verlaufs an die Spraygeometrie

Anstelle des vollen Kurvenverlaufs wird also nur der Bereich der Dichtekurve mit einbezogen, welcher tatsächlich noch im sichtbaren Bereich liegt. Kraftstoffanteile, die schon verdampft sind, bewirken keine messbare Veränderung des Hintergrundlichts. Auch Tröpfchen, die schon zu fein atomisiert wurden, werden nicht erfasst. Somit begrenzt man die Berechnung auf die noch erfassbaren, sprich im Bild sichtbaren Kraftstoffanteile.

Als zweiten Weg der Berechnung wurde die Methodik auf den Durchschnittswert angepasst. Das Spraymodell von Musculus-Kattke gibt einen Mittelwert über die Fläche des gesamten Spraywinkels aus. Dieser wurde in eine mittlere Dichte umgerechnet und auf das jeweilige Volumenelement projiziert.

Vergleich

Es fällt auf, dass die mit dem Durchschnittswert ermittelte Spraymasse geringer ausfällt als die aus der Verlaufskurve berechnete. Dies ist dadurch zu erklären, dass besonders im äußeren Bereich des Sprays sehr geringe Dichtewerte respektive Flüssigkeitsanteile zu finden sind. Dadurch, dass beim ersten Weg (Dichteverlauf) nur bis zur Spraygeometrie gerechnet wurde, ergibt sich ein höherer Mittelwert innerhalb dieser Grenzen als bei der Mittelung über den gesamten Spraywinkel (cross sectional average). Hierdurch muss beim Verwenden des Kurvenverlaufs ein höherer Massewert resultieren.

Insoweit ist die Abweichung zwischen beiden Kurven –betrachtet man die Positionierung der Verläufe– plausibel. Würde man die Berechnung zusätzlich dazu noch für den vollen Spraywinkel durchführen, ergäbe sich ein Kurvenverlauf oberhalb der schwarzen Kurve (Dichteverlauf). Dieser würde allerdings dann die Gesamtmasse des Sprays wiedergeben, nicht die des sichtbaren Masseanteils.

Es wurden mehrere Vergleichsrechnungen ohne die Projektion auf die Spraygeometrie durchgeführt. Diese ergaben nahezu identische Werte für Verwendung des Mittelwertes und für Verwendung des Funktionsverlaufs. Eine solche Betrachtung belegt die Überführbarkeit vom cross sectional average in den radialen Dichteverlauf und umgekehrt¹⁰. Dennoch sollte hier der Berechnungsweg mit Berücksichtigung des radialen Verlaufs bevorzugt werden, da dieser näher an der Realität liegt und die Eingrenzung der tatsächlich sichtbaren Masse unterstützt.

Auch die durch die Massenerhaltung schon im Musculus-Kattke-Modell integrierte Bilanz ergibt eine korrelierende Masse. Durch die vorher durchgeführte abschätzende Überschlagsrechnung konnte auch die Größenordnung der Daten bestätigt werden.

Wie in Abbildung 61 ersichtlich überschreitet die berechnete Spraymasse zu keinem Zeitpunkt der Messung die physikalische Grenze –markiert durch die rote Linie.

Auch ist die self-similarity durch den Intensitätsverlauf und die Sandia-Daten nochmals verifiziert, was das prinzipielle Vorgehen dieser Arbeit stark stützt. Die Charakteristik der Intensitätsverläufe ist eindeutig physikalischen Mechanismen zuzuordnen und kann mit den getroffenen Annahmen und Formulierungen beschrieben werden. Dies wird ebenfalls klar, wenn man Abbildung 63 betrachtet. Hier wurden vier zufällig ausgewählte, normierte Intensitätsverläufe mit einer einfachen gebrochen-rationalen Funktion vierten Grades korreliert. Selbst bei einer nicht genau angepassten Funktion ergibt sich für zufällig ausgewählte Positionen des Sprays eine Vertrauensbasis von über 97%. Allein dieser Wert gibt schon Vertrauen für die tatsächlich verwendeten Kurvenverläufe.

¹⁰ Siehe Anhang c



Abbildung 63: curve-fitting-tool: Test einiger Intensitätsverläufe auf charakteristische Ähnlichkeit

14. Fazit

Die extrem schnellen und komplexen Vorgänge der Einspritz- und auch der Motorentechnik allgemein bieten sehr breite Angriffsflächen für Unsicherheiten. Deshalb ist es enorm wichtig wissenschaftlich zu arbeiten und viel zu dokumentieren und zu überprüfen. Diese Vorgehensweise wurde nach bestem Wissen und Gewissen durchgeführt.

Durch die detaillierten Betrachtungen in Kapitel 12 konnte eine Abhängigkeit zwischen Dichteund Intensitätsverlauf hergestellt werden. Gemeinsame Basis bildet hier die "self-similarity", welche im Vergleich zwischen Röntgenuntersuchungen und Spraybildanalyse bestätigt werden konnte. Der Einbezug des Musculus-Kattke-Modells und die Berücksichtigung der Sichtbarkeitsgrenze resultiert hier in einer Berechenbarkeit der sichtbaren Spraymasse.

Vorgehen

Die Schritte hin zur Masseberechnung gliedern sich in die folgenden sechs Hauptschritte:

- 1. Ermittlung der Sprayachse
- 2. Detektion der Spraylänge und Spraybreite
- 3. Volumenberechnung
- 4. Kalkulation des Musculus-Kattke-Modells
- 5. Kalibrierung von Mess- und Modell-Daten
- 6. Berechnung der sichtbaren Spraymasse

Highlights

Durch die Berücksichtigung dieser Vorgehensweise, der Spraygrenzen und der aus dem Musculus-Kattke-Modell errechneten Größen können folgende Vorteile gezogen werden:

- 1. Sehr genaue Detektion der Spraygeometrie durch Berücksichtigung der Symmetrie, Grauwertverläufe, Grauwertgradienten und Hintergrundeigenschaften
- 2. Korrelation zwischen Intensitäts- und Dichteverlauf
- 3. Ermittlung der sichtbaren -und damit flüssigen- Kraftstoffmasse
- 4. Möglichkeit der Berechnung des resultierenden Dampfanteils des Kraftstoffs (bei verdampfenden Umgebungsbedingunen)
- 5. Beschreibung der effektiven radialen Lambda-Verteilung

Aussichten

Aus der angewendeten Vorgehensweise kann für jeden Injektor (nach korrekter Kalibrierung) ein valides, prädiktives Spraymodell entwickelt werden, welches die lokale Lambda-Verteilung ermitteln kann. Dies bietet immense Möglichkeiten Informationen im Hinblick auf Motor-Regelung zu nutzen, sei es nun die Ausbreitung des Sprays (für z.B. Kolbenbenetzung mit Kraftstoff), der Anteil der Dampfphase (z.B. Verbrennungsanalyse) oder die radiale Verteilung der Lambda-Verteilung (z.B. prädiktive Brennverlaufsanalyse, Emissionsberechnung). Der Charme der Lösung liegt darin, ein physikalisch basiertes, prädiktives Spraymodell zu erschaffen, welchen lediglich mithilfe von Spraybildern kalibriert werden kann. Hieraus ergibt sich zum Beispiel die Möglichkeit, Emissions-Modelle für CO oder NO_x einzubetten und daraus Schadstoff-Mengen vorherzusagen. Sicherlich bedarf es hier ebenfalls einer Kalibrierung der Emissions-Modelle, dennoch ist dadurch ein enormer Mehrwert gewonnen.

Denn schnell laufende, physikalisch basierte, prädiktive Modelle zur Gemischaufbereitung oder gar Emissionsbildung sind bis dato kaum vorhanden.

Durch breite Überprüfung mit mehreren Spray-Daten wurde Vertrauen in die verwendeten Vorgehensweisen geschaffen. Sowohl das Finden der Sprayachse, als auch die Analyse der Intensitätsverläufe waren bei allen Überprüfungen robust und verlässlich. Ebenfalls sind im Code noch Sicherheitsnetze durch Plausibilitätsprüfungen der ermittelten Daten vorhanden,

was die Vertrauensbasis noch erweitert. Bei keiner der bisherigen Validierungen zum Erfassen der Spraygeometrie konnten Fehler oder größere Ausreißer beobachtet werden.

Die hier verwendeten Sandia-Daten und das Modell von Siebers sowie von Musculus-Kattke bilden eine sehr gute Basis, da sie oft validiert und von unabhängigen Institutionen überprüft, als zuverlässig und robust befunden und schließlich verwendet wurden.

Auch die Kombination von Volumen- und Dichtemodell bietet deshalb eine gute Vertrauensbasis. Erst recht unter der Betrachtung der Ergebnisse, da keine physikalischen Grenzen überschritten und die Resultate als plausibel betrachtet werden.

15. Ausblick

Die Kombination von optischer Messtechnik mit Spraymodellen bildet –meiner Ansicht nachein extrem starkes und nützliches Werkzeug. Mit solchen "virtuellen Sensoren" wird es möglich extrem teure Messtechnik nach und nach zu ergänzen oder eventuell sogar gänzlich zu ersetzen. Den Charme dieser Modellierung bildet zum einen die (im Vergleich zu ähnlichen Daten aus Messungen) extrem günstige Umsetzung, zum anderen auch die Skalierbarkeit auf vielfältige Umgebungs- und Prüfstandsbedingungen sowie die Adaptierbarkeit auf andere Kraftstoffsorten. Die Berechnungen sind ebenfalls auf heiße Umgebungsbedingungen anwendbar, bei denen manche Messtechnik schon nicht mehr verwendbar ist und vom Prüfstandsaufbau entkoppelt.

Ebenfalls können mannigfaltige Kraftstoffe, Reinstoffe oder allgemein gesagt jegliches Fluid in das Modell implementiert werden –denn auch Gasjets sind grundsätzlich nicht ausgeschlossen.

Ein vielversprechender Weg ist die Implementierung eines Benzin-Verhaltens im Musculus-Kattke-Modell sowie die Validierung der Vorgehensweise bei Umgebungsbedingungen, welche eine Verdampfung gewährleisten. Prinzipiell spricht nichts gegen eine Verwendung unter Bedingungen mit Phasenwechsel. Im Gegenteil: hiermit wäre die Grundlage gegeben die Messung dementsprechend so zu erweitern, dass eine Unterscheidung in verdampfte und flüssige Kraftstoffmasse möglich ist.

Dies kann z.B. durch einen Schlierenaufbau oder über andere spezielle Messmethoden realisiert werden, welche den gasförmigen Kraftstoffanteil erfassen können.

Schließen möchte ich hier mit zwei Zitaten, die für mich sehr viel Wahrheit beinhalten:

"Education is the most powerful weapon which you can use to change the world" [31]

"As engineers, we were going to be in a position to change the world – not just study it° [32]

16. Abkürzungsverzeichnis

Cd	discharge coefficient
EOI	End of Injection
IFZN	Institut für Fahrzeugtechnik
LVF	liquid volume fraction
NaN	Not a Number
RMSE	Root Mean Sauared Error
SOI	Start of Injection
	5 5

17. Verweise

- [1] F. Louis, *Bachelorarbeit*, Nürnberg, 2015.
- [2] C. A. Chasos, C. N. Christodoulou und G. N. Karagiorgis, *CFD simulations of multi-hole Diesel Injector nozzle flow and sprays for various biodiesel blends*, Heidelberg: ICLASS, 2012.
- [3] H. J. Wang, T. Xie und X. Lai, *Dynamics of Multiple-Injektion Fuel Sprays in a Small-bore HSDI Diesel Engine,* SAE International, 2000.
- [4] P. D. C. Dalitz, "Hochschule Niederrhein," 2013. [Online]. Available: informatik.hsnr.de/~dalitz/data/visapp13/. [Zugriff am 09 05 2017].
- [5] D. W. H. a. Y. Y. Reisfeld, "The generalized symmetry transform," *International Journal of Computer Vision*, Nr. 14, pp. 119-130, 1995.
- [6] Mathworks, "Matlab Help Butterworth-Filter [butter, lowpass]," 2017.
- [7] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York: McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [8] M. P. Musculus und K. Kattke, "Entrainment Waves in Diesel Jets," *SAE International,* Nr. 2009-01-1355, 2009.
- [9] H. Tschöke, Diesel- und Benzindirekteinspritzung V, Renningen: expert verlag, 2009.
- [10] D. Meschede und D. Gerthsen, Gerthsen Physik, Berlin: Springer, 2006.
- [11] F. Graham Smith, T. A. King und D. Wilkins, Optics and Photonics: An Introduction, John Wiley & Sons, 2007.
- [12] "Physikerboard.de," 2006. [Online]. Available: https://www.physikerboard.de/topic,4345,temperaturabhaengigkeit-des-brechungsindex.html. [Zugriff am 2017].
- [13] D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.
- [14] C. F. Bohren und D. R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- [15] F. V. Bracco, "Modeling of Engine Sprays," SAE paper, Nr. 850394, 1985.
- [16] R. D. Reitz und F. V. Bracco, "Mechanism of Atomization of a Liquid Jet," Phys. Fluid, Bd. 25, Nr. 10, pp. 1730-1742, 1982.
- [17] R. D. Reitz und F. V. Bracco, "On the Dependence of Spray Angle and Other Spray Parameters on Nozzle Design and Operating Conditions," *SAE paper*, Nr. 79049, 1979.
- [18] K. J. Wu, C. C. Su, R. L. Steinberger, D. A. Santavicca und F. V. Bracco, "Measurements of the Spray Angle of Atomizing Jets," *Fluids Engng*, Bd. 105, pp. 406-413, 1983.
- [19] A. H. Lefèbvre, "Atomisation and sprays," Hemisphere Publishing Cooperation, 1989.

- [20] C. H. Lee und R. D. Reitz, "An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream," *International Journal of Multiphase Flow,* Bd. 26, Nr. 2, pp. 229-244, 2000.
- [21] J. Shinjo und A. Umemura, "Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation," *International Journal of Multiphase Flow*, Bd. 36, Nr. 7, pp. 513-532, 2010.
- [22] A. H. Lefebvre und V. G. McDonell, Atomization and Sprays, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2017.
- [23] N. Rajaratnam, "Turbulent jets," *Elsevier Scientific Pubishing*, 1976.
- [24] J. M. Desantes, R. Payri, J. M. Garcia und F. J. Salvador, "A contribution to the understanding of isothermal diesel spray dynamics," *Elsevier*, 2007.
- [25] A. L. Kastengren, F. Tilocco, C. F. Zak Powell, J. Manin, L. M. Pickett, R. Payri und T. Bazyn, "Engine Combustion Network," Sandia National Laboratories, 2012. [Online]. Available: https://ecn.sandia.gov/rad675/. [Zugriff am 2017].
- [26] J. D. Naber und D. L. Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays," SAE International, Detroit, Michigan, 1996.
- [27] D. L. Siebers, "Scaling Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays Based on Mixing-Limited Vaporization," *SAE-Paper*, Nr. 1999-01-0528, 1999.
- [28] Y. Wakuri, M. Fujii, T. Amitani und R. Tsuneya, "Studies of the Penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine," *Bulletin of JSME*, Bd. Vol. 3, Nr. No. 9, 1960.
- [29] W. J. Hays, "Personal Communication," 1995.
- [30] G. N. Abramovich, "Chapter 5: Jet of an Incompressible Fluid in a Coflowing External Stream," *The MIT Press,* Nr. The Theory of Turbulent Jets, 1963.
- [31] N. Mandela, Interviewee, [Interview].
- [32] H. Petroski, Interviewee, [Interview].
- [33] "Engine Combustion Network," Sandia, [Online]. Available: https://ecn.sandia.gov/rad675/. [Zugriff am 2017].

17

18. Appendix

a. Problematik der Röntgen-Daten - Dichte

Aus Abbildung 48 wird eine entscheidende Problemstelle ersichtlich: trifft die Wahl der "Grenzdichte" tatsächlich die Linie der Sichtbarkeit?

Zwar ist durch die Interaktion zwischen Tröpfchen und Licht prinzipiell ein Zusammenhang zwischen Intensität und Dichte gegeben, jedoch können hier mehrere Mechanismen die Differenz der Grenzen verschieben:

- Sind die Tropfen des Sprays kleiner als die Wellenlänge des Lichts, so beeinflussen sie die Strahlen nicht mehr wie bei größeren Durchmessern. Die Tropfen sind für die Kamera nicht mehr detektierbar. Die wirksame Dichte für einen Röntgenstrahl wird dadurch quasi nicht beeinflusst. Hierdurch ergibt sich eine Verschiebung der Sichtbarkeitsgrenze hin zu größeren Tröpfchendurchmessern.
- Verdampft der Kraftstoff befindet er sich in der Dampfphase. Dies bewirkt ebenfalls eine Veränderung in der Wechselwirkung mit dem Licht. Der Dampf ist nicht sichtbar. Betrachtet man hierzu den Einfluss auf die Röntgenuntersuchungen ist immer noch eine Detektierbarkeit gegeben. Zwar ist der Dampf deutlich dünner als die flüssige Phase, eine geringe Variation der Strahlintensität ist bei Röntgenuntersuchungen dennoch zu verzeichnen. Diese ist zusätzlich abhängig von den Umgebungsbedingungen.

Allgemein gilt, dass die Sichtbarkeit für die Kamera abhängig ist von Tröpfchenanzahl, Tröpfchengröße und örtliche Verteilung der Tropfen. Für die Röntgenuntersuchung ist jedoch nur die tatsächliche Dichteverteilung ausschlaggebend. Die Tropfenanzahl, deren Größe oder die räumliche Verteilung spielt bei dieser Messmethode keine Rolle.

Hieraus ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Sichtbarkeitsgrenze und einem bestimmten Dichtewert. Dies birgt ein Problem für die Deklaration des "richtigen" Dichtewertes.

Infolgedessen wurden die Messdaten der Röntgenuntersuchungen lediglich zur Validierung der Annahme der "self-similarity" und der geometrischen Größen des Spray-Winkels und der Spray-Form genutzt.

b. Problematik der Röntgen-Daten – Zeitpunkt

Die hier einbezogenen Bild-Messdaten zeigen die Sprayentwicklung bis 450µs nach SOI was nahezu ausschließlich dem instationären Bereich des Sprays entspricht. Dagegen wird bei den -von Sanida bezogenen [33]- Daten von einem stationären Spray ausgegangen und die Mittelung über einem weiten Zeitbereich (0,4-1,2 ms nach SOI [33]) vorgenommen. Für einen Vergleich mit einem (noch) instationären Jet sind die Daten also nicht geeignet.

18

c. Projektion der Dichteverläufe

Die Abnahme der Dichte innerhalb des Musculus-Kattke-Modells stützt sich auf die "selfsimilarity". Hieraus resultiert ein immer gleicher Kurvenverlauf, welcher mit dem Wert auf der Sprayachse skaliert wird. Dieser Verlauf wird ausgedrückt durch:

$$\frac{X_f}{X_{fc}} = \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{\alpha}\right)^2 \tag{69}$$

Durch die normierte Darstellung, welche sich aus $\frac{r}{R}$ ergibt, erhält man eine Kurve, die dimensionslos ist. Integriert man diesen Verlauf, ergibt sich als Fläche unter der Kurve der Mittelwert. Hierdurch spielt es bei Einbeziehung des vollen Spraykegelwinkels aus dem Modell keine Rolle ob man für die Massenberechnung nun die Verlaufskurve oder den Mittelwert nutzt. Da im gesamten Modell die Massenerhaltung zugrunde liegt, müssen beide Rechenwege dasselbe Ergebnis liefern.