

Verbundprojekt: PN-Reduktion

Individueller Schlussbericht gem. Nr. 8.2 NKBF 98

Zuwendungsempfänger:
**Lehrstuhl für technische
Thermodynamik Friedrich-Alexander-Universität Er-
langen-Nürnberg**

Förderkennzeichen:
19117011B

Vorhabenbezeichnung:
Verbundprojekt: PN-Reduktion

Laufzeit des Vorhabens:
01.08.2017 - 31.01.2021

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesminis-
teriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 19117011B gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Ansprechpartner

Hr. Richard Weiß
Lehrstuhl für technische Thermodynamik
Am Weichselgarten 8, 91058 Erlangen
Telefon/Phone: +49 (0) 9131 85-29765
E-Mail: richard.welss@fau.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Erlangen, 04.08.2021

Dieser Bericht wurde erstellt durch den

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

Chris Conrad M. Sc.
Dipl.-Ing Richard Weiß
Dr. Alexander Neubauer
Prof. Dr. Michael Wensing

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	5
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	5
1.1.1	Zielsetzung des Verbundprojektes PN-Reduktion.....	5
1.1.2	Zielsetzung der Teilvorhaben.....	6
1.2	Voraussetzungen des Vorhabens.....	9
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektstart	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
2	Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse	15
2.1	AP 2.1: Beschaffung und Grundvermessung Musterinjektoren.....	15
2.2	AP 2.2: Shadowgraphie Computed Tomographie.....	15
2.3	AP 2.3: Beschaffung Glasdüse und Vermessung	15
2.4	AP 2.4: Konzeption, Bau und Aufbau Spraykammer	15
2.5	AP 3.1: Aufbau Vitesco Glas-Düsen am LTT	24
2.6	AP 3.2: Validierung Glasdüse am LTT	27
2.7	AP 3.3: Shadowgraphy (Mehrloch u. Glas-Düse)	34
2.8	AP 3.4: PDA/LDA (Mehrloch u. Glas-Düse)	40
2.9	AP 3.5: Messungen im Strömungskanal (crossflow).....	43
2.10	AP 3.6: HSV LDM (Mehrloch u. Glas-Düse)	45
2.11	AP 4.1: Verfahrensentwicklung (Röntgensimulation).....	47
2.12	AP 4.2: Detektorentwicklung.....	47
2.13	AP 4.3: Entwicklung des mobilen Messplatzes.....	47
2.14	AP 5.1: Messungen Mehrloch- und Glas-Düse am KIT	48
2.15	AP 5.2: Röntgen-Messungen Spraygeschwindigkeit und -dichte.....	48
2.16	AP 5.3: Spray Röntgen und simultan HSV	48
2.17	AP 5.4: Phasenkontrastmessungen an Glas-Düse.....	48

2.18	AP 6.1: Grundlagen Numerik / Black Box Primärzerfall.....	48
2.19	AP 6.2: Analytische Modellbildung Primärzerfall.....	48
2.20	AP 6.3: Direkte numerische Simulation Primärzerfall	48
2.21	AP 6.4: Designrechnungen (Design vs. Penetration)	48
2.22	AP 3.x - AP 5.x Abgleich mehrerer Arbeitspakete	49
2.23	AP 7.1: Charakterisierung der Injektoren am Einzylinder	49
2.24	AP 7.2: Untersuchungen am Vollmotor	49
2.25	AP 7.3: Untersuchungen am Fahrzeug	49
2.26	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	49
2.27	Ausblick auf Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	49
2.28	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen.....	50
2.29	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	50
3	Referenzen	51

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Zentrales Ziel des Projektes ist es einen umweltfreundlichen Antrieb durch Kombination eines effizienten Ottomotors (CO₂ arm, niedrige Stickoxidemissionen) mit einer Einspritztechnologie zu schaffen, welche die Partikelemissionen bei hohen Motorlasten um 50 % reduziert.

1.1.1 Zielsetzung des Verbundprojektes PN-Reduktion

Dem großen Verbrauchsvorteil im Hubraum reduzierter Ottomotoren mit Direkteinspritzung und Turboaufladung stehen Partikelemissionen gegenüber, die seitens des Gesetzgebers mit der Emissionsvorschrift EURO 6 erstmals für Ottomotoren begrenzt werden – aufgrund der besonderen Häufigkeit kleiner, lungengängiger Partikel in Masse und Anzahl der emittierten Partikel. Zu erwartende weitere Verschärfungen der Emissionsgesetze sind besonders im Hinblick auf die aktuelle Diskussion der Erfassung von Fahrzeugemissionen im realen Fahrbetrieb, d.h. nicht nur in einem sehr schwachlastigen, theoretischen Fahrzyklus, ohne weiteren technischen Fortschritt nicht zu erreichen. Eine gleichzeitige Optimierung von Verbrauch und Emissionen kann nicht allein durch eine noch aufwendigere Abgasnachbehandlung erreicht werden, sondern muss die Entstehung insbesondere von Rußemissionen bereits im Verbrennungsprozess soweit wie möglich reduzieren. Dies ist nicht nur notwendig, um die Kosten der Abgasanlage in realistischen Grenzen zu halten, sondern auch, um das gesetzliche Emissionsniveau über der Fahrzeuglebensdauer sicherzustellen und den Verbrauch gering zu halten.

Mit modernen Entwicklungsmethoden können derzeit sowohl die Ausbreitung von direkteingespritzten Kraftstoffsprays im Brennraum auf Basis einer empirisch gewählten Startbedingung als auch (in Grenzen) die Strömung des Kraftstoffs im Injektor berechnet und optimiert werden. Was fehlt ist das Wissen und die Simulationsmöglichkeit zu dem sich unmittelbar am Austritt aus dem Injektor ausbildenden primären Spray, welches unter verschiedenen Betriebsbedingungen eine geschlossene Optimierung der motorischen Prozesskette ermöglichen würde. Im Bereich direkteinspritzender Ottomotoren ist der Fortschritt aktuell besonders wichtig, weil durch die Anhebung des Einspritzdrucks von 200 bar auf 350 bar größere Wandstärken auch im Düsenbereich notwendig werden. Damit wird durch das größere L/D (Länge-Durchmesser-Verhältnis der Spritzlöcher) eine größere Einspritztiefe generiert, was per se kontraproduktiv für die Reduktion der Partikelanzahl (PN-Anzahl) ist. Die optimale Geometrie zur effizienten Zerstäubung muss gefunden werden, ohne die Lebensdauer der Injektoren durch zu dünne Düsen zu gefährden. Ohne genaue Kenntnisse der zukünftigen Wandstärken muss allerdings die Fertigungstechnik für einen Maximalwert vorgehalten werden, was ein finanzielles Risiko darstellt. Durch Kenntnis des Strahlzerfalls und die daraus resultierende, optimierte Auslegung der Düsen können zuvor genannte Risiken minimiert werden.

Die Messergebnisse der Projektpartner werden für die technische Weiterentwicklung von Injektoren in einer Simulation zusammengefasst. Mit diesen Tools wird noch innerhalb des Projektes ein neuer Injektor entwickelt, mit dem die angestrebte Reduktion der PN-Anzahl um 50 % bei hohen Lasten an einem Demonstrationsmotor und in einem Demonstrationsfahrzeug nachgewiesen wird.

Neben den inhaltlichen Programmzielen ist es ein methodisches Ziel des Projektes, die hochtechnologischen Untersuchungsmöglichkeiten von Spray mit Röntgenstrahlung gezielt für Grundlagenuntersuchungen zu Zerstäubungsprozessen durch eine deutsche und europäische Kompetenz zu erweitern. Die gewinnbaren Erkenntnisse sind nicht auf den primär untersuchten Anwendungsfall der Benzindirekteinspritzung beschränkt, sondern Inhalte und Methoden können auch auf die Diesel- und Saugkanaleinspritzung sowie auf Sprayprozesse in Verfahrenstechnik, Agrartechnik und in der pharmazeutischen Industrie übertragen werden.

1.1.2 Zielsetzung der Teilvorhaben

Teilvorhaben: Injektorentwicklung

Ziel des Teilvorhabens ist die Weiterentwicklung der Einspritztechnik sowie der Nachweis des Fortschritts am Motor und im Fahrzeug.

Hierzu ist das Arbeitsprogramm in 6 technische Punkte unterteilt, wobei in dem Teilvorhaben Injektorentwicklung die Punkte 1., 5. und 6. schwerpunktmäßig bearbeitet werden.

1. Schaffung der speziellen Versuchsträger (mobile Versuchskammer, Glasdüsen und spezielle Injektoren)
2. Untersuchung der Strömung und Sprays mit speziellen optischen Messtechniken
3. Weiterentwicklung der Vorwärtssimulation und Datenprozessierung für die Röntgenbildgebung, der Auswertalgorithmen für schnelle Sprays und von schnellen Röntgendetektoren
4. Untersuchung der Strömung und Sprays mit dieser Röntgentechnik
5. Implementierung der Ergebnisse in die Simulation
6. Weiterentwicklung der Einspritztechnik sowie der Nachweis des Fortschritts am Motor und im Fahrzeug

Ziel des Teilvorhabens ist die aktuell erstmals mögliche Herstellung von Glasdüsen mit realen Düsengeometrien.

- Glasdüsen stellen die Möglichkeit dar sich ein Bild vom Strömungszustand innerhalb der Düse zu verschaffen. Üblicher Weise werden größenskalierte Modelle genutzt, da es sehr schwierig ist originalgetreue Düsen in Glas herzustellen und die Haltbarkeit der Düsen in Bezug auf Druck und auf mechanische Belastung sehr limitiert ist. Größenskalierte Düsen haben aber den Nachteil, dass die Kavitationsbedingung nicht auf die Originaldüsen übertragen werden kann. Seit neuestem gibt es aber Dank der Femtosekundenlaser die Möglichkeit verschiedenste Lochgeometrien formgetreu herzustellen. Dies soll genutzt werden, um die Korrelation von Innenströmung mit primärem Strahlaufbruch herzustellen

Ziel des Teilvorhabens ist eine Simulationstechnik, welche die komplexe Injektorinnenströmung abbilden kann.

Nach aktuellem Stand der Technik existieren bei Vitesco bereits CFD-Algorithmen für Strömungs- und Aufbruchsimulationen, welche die makroskopischen Sprayeigenschaften aus Experimenten jedoch nur begrenzt abbilden können. Um die Überein-

stimmung der CFD-Simulation mit dem Experiment zu verbessern, sollen im Rahmen dieses Projektes die Eingangsparameter für die Simulationen experimentell (z.B. über Röntgenmessungen) verfeinert und ggf. zusätzliche Aufbruchmechanismen programmiert werden. Das Arbeitsziel hier ist es konkret, eine validierte und akkurate Simulationsmethode bereitzustellen, die zur Berechnung der Injektorinnenströmung und Vorhersage des Sprays für die Entwicklung zukünftiger Einspritzsysteme mit reduzierten PN Emissionen verwendet werden kann. Die Innovation hierbei ist, die bisherigen Simulationsmethoden so zu verbessern, dass aufgrund aussagekräftiger Ergebnisse Entwicklungszyklen deutlich verkürzt werden. Durch die neu entwickelten Methoden lassen sich die komplexen Wechselwirkungen zwischen Düseninnenströmung und Sprayzerfall deutlich besser untersuchen wie dies aufgrund der extrem kleinen Abmessungen im Experiment möglich ist. Der ausführliche Lösungsansatz wird in den Arbeitspunkten AP6.1 - AP6.4 beschrieben. Zusammengefasst lassen sich diese Punkte wie folgt darstellen. Zuerst muss das CFD-Setup überprüft und mit Experimenten validiert werden. Mit diesem Setup lassen sich die Strömungsphänomene genauer untersuchen und ein genaueres Verständnis kann erlangt werden. Diese Erkenntnisse werden abschließend in ein Standardmodell übertragen was im industriellen Entwicklungsprozess standardmäßig verwendet werden kann.

Teilvorhaben: Optische Messungen

Ziel des Teilvorhabens ist die Schaffung einer mobilen Versuchskammer, welche Röntgenuntersuchungen und simultane optische Untersuchungen unter realen Bedingungen an verschiedenen Standorten erlaubt.

Seitens des LTT Erlangen besteht das erste Projektziel in der Entwicklung und Bereitstellung einer mobilen Spraykammer welche Untersuchungen der Hochdrucksprays unter realitätsnahen Bedingungen sowohl mit der Röntgentechnik als auch mit optischen Messtechniken erlaubt. Diese Untersuchungen sollen auch simultan durchgeführt werden können. Die Versuchskammer soll in Karlsruhe und in Erlangen als auch in Grenoble eingesetzt werden. Lösungsansatz ist eine portable, modular aufgebaute Einspritzkammer auf Basis einer vorhandenen Konstruktion des LTT Erlangen. Um eine tomographische Erfassung der dreidimensionalen Spraystruktur zu ermöglichen, muss der Injektor in der Versuchskammer drehbar sein.

Zweites Ziel am LTT Erlangen ist die Erfassung der Mehrphasenströmung im Injektor sowie die Untersuchung des dichten Spraybereichs in der unmittelbaren Umgebung des Düsenaustritts. Lösungsansatz sind hier transparente Forschungsinjektoren (mit Glaseinsätzen, welche die eigentliche Düsengeometrie abbilden). Diese „Glasdüsen“ können wie in obigem Punkt beschrieben erstmals in anwendungsrelevanten komplexen Geometrien und Realgröße gefertigt werden und haben in Voruntersuchungen so gute Ergebnisse gezeigt, dass die gleichen Düsen auch für Untersuchungen der voll ausgebildeten Sprays, die bei unterschiedlichen Düsengeometrien und Einspritzbedingungen entstehen, eingesetzt werden sollen.

Die genaue Untersuchung dieser resultierenden Sprayeigenschaften ist das dritte Ziel der Arbeiten des LTT Erlangen. Für diese Untersuchungen sollen in den letzten Jahren am LTT entwickelte Hochgeschwindigkeits-Messtechniken (Schattentechnik, Laser-Scanning und hochaufgelöste Aufnahmen mit Hilfe von Long-Distance-Mikroskopen) eingesetzt werden. Insbesondere die optischen Untersuchungen der Spraystrukturen

im Düsennahbereich sollen auch in Karlsruhe simultan zu den Röntgenuntersuchungen durchgeführt werden, um einen direkten Abgleich und eine Ergänzung unter absolut gleichen Bedingungen zu ermöglichen. Die simultane Erfassung ist notwendig aufgrund des stark stochastischen Charakters der Sprays, die aus den hochoberflächigen Mehrphasenströmungen im Injektor entstehen.

Teilvorhaben: Röntgentechnologie

Ziel des Vorhabens ist es durch einen innovativen messtechnischen Ansatz eine physikalische Beschreibung des Übergangs von der Injektor-Innenströmung zum Spray, das sich am Injektor-Austritt formt und die nachfolgende Gemischbildung und Verbrennung prägt, zu schaffen. Dazu soll die Sprayentwicklung mittels schneller Röntgenradiographie, teils gekoppelt mit Shadowgraphy, von der Injektorinnenströmung über das primäre Spray am Düsenaustritt bis hin zum entwickelten Spray hin zeitaufgelöst in Projektion untersucht werden. Aus den Messdaten sollen für verschiedene Einspritzszenarien die mittlere Spraydichte und die mittlere lokale Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zum Injektor-Austritt bestimmt werden.

Dazu sind vonnöten:

- Eine Röntgen-Zeitstruktur mit genügend integralem Photonenfluss zur Reduktion der effektiven Belichtungszeit während der Sprayausbreitung auf einen Bruchteil der (technologisch limitierten) minimalen Detektorbelichtungszeit
- Partiiell kohärente Beleuchtung, Fresnelbeugung und Wellenfeldpropagation über mehrere Meter zur Erhöhung des Bildkontrastes bei den reduzierten Intensitäten aufgrund der ultrakurzen Belichtungen
- Ein schnelles, indirekt konvertierendes 2D-Detektorsystem mit genügend raumzeitlicher Auflösung und Effizienz zur Spraydifferenzierung
- Ein direkt konvertierendes, energiedispersives 2D-Detektorsystem zur Bestimmung der mittleren Spraydichte
- Entwicklung von Einfach- und (stroboskopartigen) Mehrfach-Belichtungsstrategien sowie zugehörigen Auswertalgorithmen zur Bestimmung der lokalen Spraygeschwindigkeit

Durch die Bindung an Großforschungsanlagen ist Synchrotron-Messzeit knapp und teuer. Daher muss die zur Verfügung stehende Strahlzeit effizient ausgenutzt werden. Röntgensimulationen sollen erarbeitet und genutzt werden, um die zur Verfügung stehende Experimentierzeit effizient und mit vorab optimiertem Ergebnis zu planen und durchzuführen. Aufbauend auf nicht-optimierten Code-Modulen aus bestehenden Projekten soll eine robuste Plattform für ein virtuelles Röntgenlabor aufgesetzt werden, das es erlaubt für die nun zu nutzende Instrumentierung (Quell- und Beamlineeigenschaften) verschiedene Belichtungsstrategien zur Bestimmung der lokalen Spraygeschwindigkeit zu erarbeiten und mit im Projektverlauf anzupassenden Methoden des „Optischen Flusses“ bewerten zu können.

Ziel des Teilvorhabens ist die Weiterentwicklung der zeit- und orts aufgelösten Röntgenmesstechnik unter Zuhilfenahme von zeitlich strukturierter Synchrotronstrahlung.

Um die Erfolgsaussichten für die nur begrenzt zur Verfügung stehenden Synchrotronexperimente (Röntgenmessungen) signifikant zu steigern, sollen im Vorfeld bereits vorhandene CFD-Simulationen (Vitesco) genutzt werden, um daraus ein zeitaufgelöstes 3D-Modell der Sprayausbreitung auf Makro-, Meso- und Mikro-Skala zu berechnen. Darauf aufbauend werden am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Röntgensimulationen ausgeführt. Diese setzen die zeitaufgelösten 3D-Modelle der CFD-Simulation als Eingangsparameter (Grundlage) ein, um daraus Projektionsbilder („Röntgenbilder“) zu generieren. Hierbei soll unter Variation der simulierten Eigenschaften der Röntgenquelle und der Detektoren eine optimale Strategie für die geplanten Messungen ausgearbeitet werden. Wenn dies gelingt, können weitere Mechanismen der Sprayausbreitung in das Modell der Röntgensimulation übernommen und dadurch Parameter sowie Randbedingungen weiter verfeinert werden. Über diesen Ansatz kann in weiteren Iterationsschritten die Abbildung des Sprays in der Röntgenmessung bestmöglich realisiert werden. Darauf basierend ergibt sich somit auch die Möglichkeit neue, tieferegehende Aufschlüsse über das Sprayausbreitungsverhalten selbst zu erlangen.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

Mit Vitesco einem der großen Zulieferer für Einspritzsysteme, dem LTT Erlangen einer bekannten Größe auf dem Gebiet Spraymesstechnik und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) einem wissenschaftlich führenden deutschen bzw. europäischen Institut für Röntgenmesstechnik sind die drei Projektpartner hervorragend positioniert sich zu ergänzen sowie hochwertige und neue Ergebnisse auf ihren Teilgebieten zu liefern.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Umfang der Teilprojekte sowie die anvisierte Ergebnisausbeute erwiesen sich als weitgehend realistisch.

Aufgrund der temporären Schließung der europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble, Frankreich, vom Dezember 2018 bis Sommer 2020 zwecks umfassender Modernisierungs- und Ausbaurbeiten wurde das Fördervorhaben um 6 Monate verlängert.

Auf die in jedem Arbeitspaket bis Projektende erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 2 ausführlich eingegangen. Bereits an dieser Stelle sei zusammenfassend erwähnt, dass Vitesco alle erwarteten Ergebnisse in vollem Umfang erreicht hat.

1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektstart

Durch Downsizing und Benzindirekteinspritzung konnten Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emission von Personenkraftwagen mit Ottomotoren im letzten Jahrzehnt erheblich gesenkt werden. Für alle PKW-Antriebe wurde summarisch im Zeitraum von 1995 bis 2013 eine Reduktion der je Verkehrsaufwand (Personenkilometer) emittierten CO₂-Menge um 12% [i] erreicht. Betrachtet man einzelne Benzinantriebe sind deutlich höhere Reduktionen von etwa 30% erzielbar bzw. teilweise umgesetzt worden. Hinzu kommt, dass Stickoxidemissionen im gleichen Zeitraum (summarisch für alle PKW,

bezogen auf den Verkehrsaufwand) um 60% reduziert werden konnten, wobei die Reduktion praktisch ausschließlich durch die Verbesserung der Benzinantriebe (3-Wege-Katalysator) erreicht wurde. Auch bei der Feinstaubemission konnten mit einer Reduktion um sogar etwas mehr als zwei Drittel des Wertes von 1995 erhebliche Fortschritte erzielt werden, wobei in diesem Fall die Verbesserung durch Einführung des Partikelfilters auf der Seite der Dieselantriebe erreicht wurde. Im Bereich der Benzinantriebe ergibt sich durch den Übergang auf die Direkteinspritzung eine erheblich reduzierte Gemischbildungszeit mit der Folge einer Partikelemissionsproblematik. Zwar entsteht in der Ottomotorischen Verbrennung im Vergleich zu Dieselmotoren eine erheblich geringere Partikelmasse, allerdings entstehen besonders viele feine, lungengängige Partikel. Dies führte dazu, dass im Rahmen der europäischen Emissionsgesetzgebung EURO6 erstmals Partikelemissionen von Ottomotoren in Masse und Partikelanzahl limitiert werden. Aktuell in Diskussion ist zusätzlich eine Verschärfung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionstests mit dem Ziel, die Emissionen im realen Fahrbetrieb (Real-Driving-Emission RDE) besser zu erfassen. Dies schließt insbesondere höhere Leistungen und Motorlasten ein, als dies im bisherigen Standard (NEDC) der Fall war. Im Betrieb bei höheren Lasten (hohes Motormoment, hohe Kraftstoffmasse je Verbrennungsvorgang) und hohen Leistungen (zusätzlich hohe Drehzahl, kurze Zeit) sind Partikelemissionen von Ottomotoren besonders problematisch, da mit steigender Einspritzmenge und Verkürzung der für die Gemischbildung zur Verfügung stehenden Zeit:

- a. der Wandbelag, sprich die Benetzung der Brennraumoberflächen mit Kraftstoff, ansteigt,
- b. die Homogenisierung der Brennraumladung verschlechtert wird und damit auch kraftstoffreiche, schlecht aufbereitete Zonen entstehen.

Dieser Problematik soll durch eine grundsätzliche Weiterentwicklung der in der Benzindirekteinspritzung eingesetzten Technik begegnet werden. Erreicht werden soll innerhalb des vorgeschlagenen Programms eine Halbierung der Partikelemissionen bei hohen Lasten. Dieses soll an einem Demonstrations-Motor mit verbesserter Einspritztechnik auf dem Motorprüfstand und in einem Demonstrations-Fahrzeug im realen Fahrbetrieb nachgewiesen werden. Abbildung 1.4.1 zeigt diese Problematik am Beispiel des Ford Fox 1,0L-3-Zylindermotors für aktuelle Einspritzsysteme der Fa. Vitesco. Obwohl mit 350 bar der Grenzwert für $CF=1,0$ unterschritten werden kann ist die Qualität für die Motorlebensdauer nicht ausreichend; notwendig im Neufahrzeug sind ca. $4 \cdot 10^{11}$ Partikel / km.

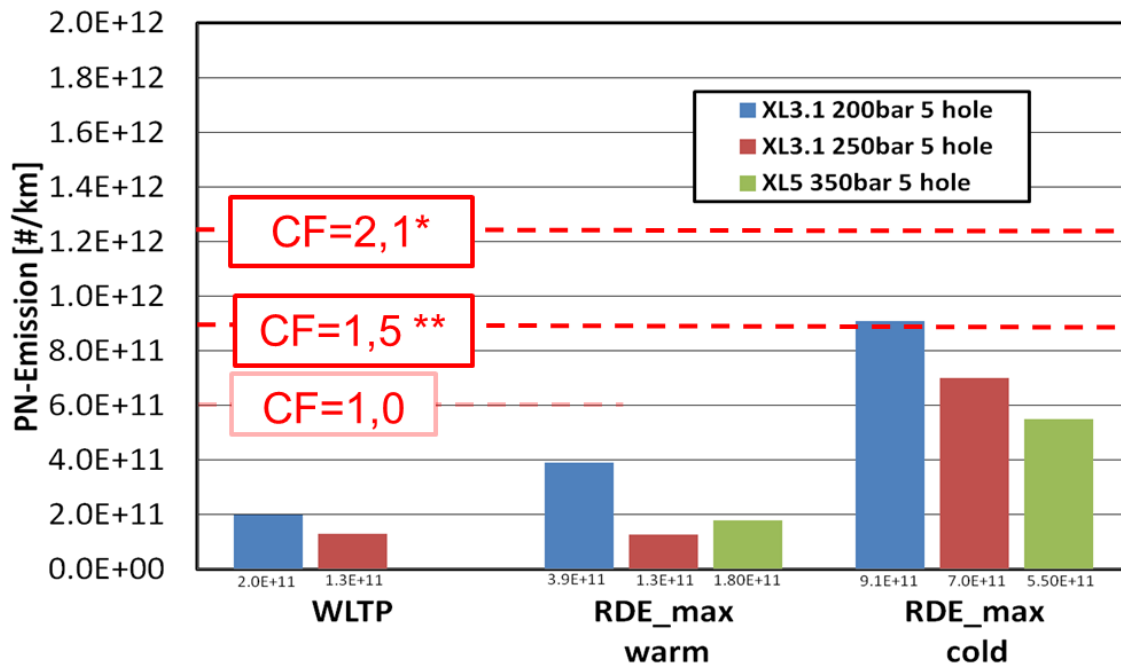


Abbildung 1.4.1: Partikelemissionen eines modernen direkteinspritzenden Ottomotors im Zyklus und im realen Fahrbetrieb (Ford Fox 1,0L-3-Zylinder, 92 kW, Fahrzeugmasse:1250kg); CF: Conformity Factor: * 2017, ** 2020

Um die genannten Ziele zu erreichen, muss eine schnelle und vollständige Erfassung der Frischluft im Brennraum durch das direkt eingespritzte Kraftstoffspray erfolgen, bei gleichzeitiger Minimierung von Kraftstoffwandaufrägen auf Brennraumwände. Angestrebt wird eine sehr gute Zerstäubung bei Begrenzung der Eindringtiefe der eingebrachten Kraftstoffstrahlen. Aufgrund der zahlreichen Einflussparameter und deren komplexen Wechselwirkung ist die angestrebte deutliche Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik nur mit massiver Unterstützung durch die Simulation zu erreichen. Dabei können wesentliche Teile der Kraftstoffströmung im Injektor, des sich im Brennraum ausbildenden Sprays, der Durchmischung mit der Brennraumluft und die anschließende Verbrennung heute mit ausreichender Genauigkeit simuliert werden. Es fehlt jedoch als ein entscheidender Verbindungsschritt eine physikalische Modellierung des Übergangs von der Injektor-Innenströmung zum Spray, das sich am Injektor-Austritt initial formt (Primärspray). Das Primärspray stellt die Startbedingung für Gemischbildung und Verbrennung in direkteinspritzenden Motoren dar. Diese Lücke soll durch koordinierte Untersuchung von Kraftstoffsprays im Düsenbereich mit Röntgenstrahlen (Synchrotronstrahlung) und optischen Untersuchungen der sich aus den primären Strukturen entwickelnden Sprays geschlossen werden.

Der Programmvorschlag ordnet sich in das Themenfeld innovative Antriebe und Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten ein. Zentrales Ziel ist es, einen umweltfreundlichen Antrieb zu schaffen durch Kombination eines effizienten (CO₂-armen) Ottomotors mit niedrigen Stickoxidemissionen mit einer Einspritztechnologie, die Partikelemissionen auch bei hohen Motorlasten vermeidet. Dazu müssen die Simulationsmöglichkeiten von Kraftstoffsprays entscheidend verbessert werden, um so die Einspritztechnologie derart zu optimieren, dass bereits innerhalb des Programms eine Reduktion umweltschädlicher Partikelemissionen bei hohen Lasten, siehe Abbildung 1.4.2, wie sie im realen Fahrbetrieb auftreten, um 50% erreicht wird.

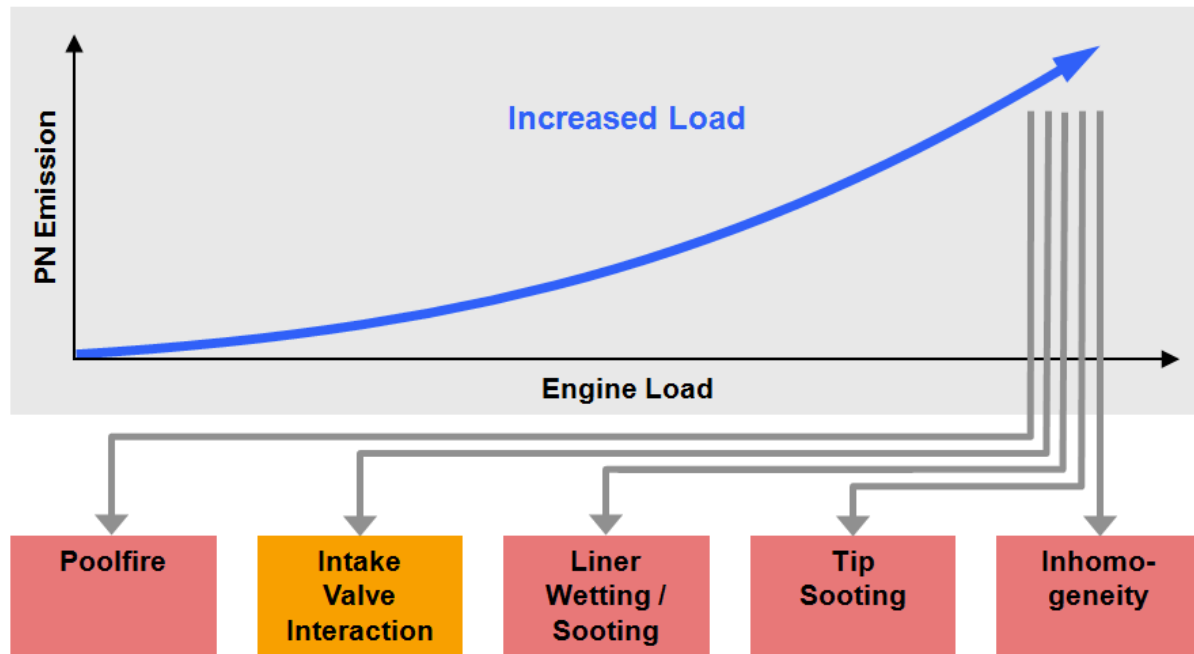


Abbildung 1.4.2: Rußemission von DI-Ottomotoren über der Last [ii]

Teilvorhaben: optische Messtechnik

Das beantragte Vorhaben setzt sich in der Fokussierung auf die Benzindirekteinspritzung klar von anderen Forschungsvorhaben [vii, viii] und zahlreichen früheren Untersuchungen zur Grundlagen von Dieseleinspritzungen [iii, iv, v] ab. In der Benzindirekteinspritzung wird mit etwa einem Zehntel des Einspritzdrucks der Dieseleinspritzung (250 bar gegenüber 2500 bar) eine ähnliche Zerstäubungswirkung erzielt. Ein Vergleich der Düsenlochgeometrien in Abbildung 1.4.3 (Benzindirekteinspritzung) zu Abbildung 1.4.4 (Dieseldirekteinspritzung) zeigt die stark unterschiedliche Auslegung mit im Verhältnis zum Lochdurchmesser kurzen Düsenlöchern in der Benzindirekteinspritzung.

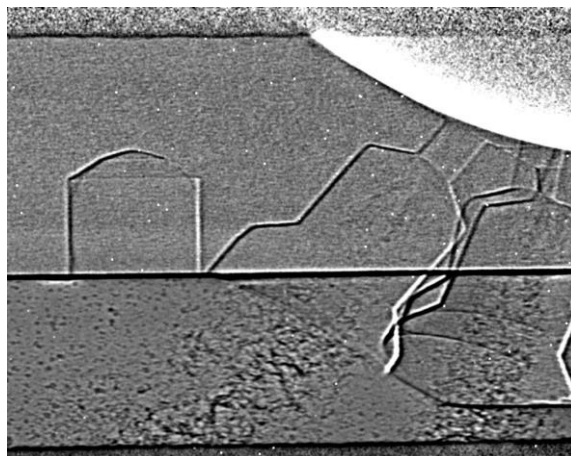


Abbildung 1.4.3: Röntgenradiographie-Untersuchung an einem Injektor aus der Benzindirekteinspritzung [priv.com. Ref. J. Wang, Argonne National Labs, USA]

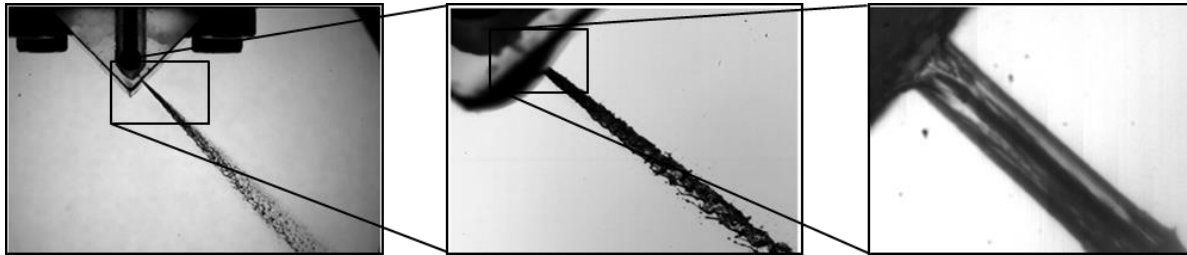


Abbildung 1.4.4: Sprayuntersuchungen an einer Glasdüse (Prinzipgeometrie) [vi]

Zur Förderung der Zerstäubung wird in der Benzindirekteinspritzung eine sehr viel stärkere Kavitation in der Düse zugelassen als in der Dieseleinspritzung, bei deren extrem hohen Drücken eine starke Kavitation das Material schädigen würde. Die sich in der Benzindirekteinspritzung einstellende stark kavitierende Düseninnenströmung ist bisher nicht hinreichend verstanden. Bekannt ist, dass die Düseninnenströmung eine hochturbulente Zweiphasenströmung darstellt. Durch das Absinken des statischen Drucks in der Düse kommt es lokal zur Unterschreitung des Dampfdrucks des Kraftstoffes und damit zur Kavitation. Als klassischer Kavitationsmechanismus gilt hierbei die geometrische Kavitation [vii], das heißt die Kavitation tritt auf, wenn die Trägheitskräfte des strömenden Fluids an einer geometrischen Drosselstelle die maximale Zugspannung des Fluids überschreiten. Weitere Kavitationsmechanismen wie etwa die String- bzw. Vortex-Kavitation sind dagegen physikalisch noch nicht vollständig beschrieben und stellen nach wie vor ein aktuelles Forschungsthema dar [viii, ix]. Dieser Kavitationsmechanismus tritt bevorzugt bei der Strömungsseparation an der Injektor-nadel in Regionen mit starker radialer Wirbelbildung auf [vii]. In Abbildung 1.4.5 ist Stringkavitation (roter Pfeil) in einer transparenten Otto-Düse in Realgröße dargestellt.

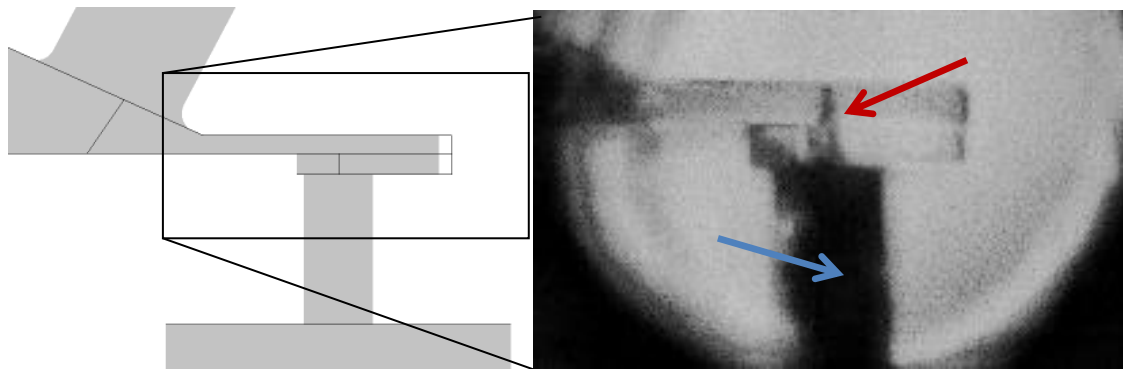


Abbildung 1.4.5: Stringkavitation in einer transparenten Otto-Düse (roter Pfeil rechts) aus Voruntersuchungen zum Projektantrag am LTT Erlangen

Die gezeigte Aufnahme entstammt aus einer für Voruntersuchungen zu diesem Antrag aufgebauten Transparentdüse am LTT Erlangen. Die Anströmung eines einzelnen Spritzlochs ist hier, inklusive Dichtsitz und Sackloch statisch in Quarzglas in realer Größe ausgeführt. Durch ein außerhalb des Quarzglaskörpers liegendes Ventil ist die Untersuchung transients Vorgänge möglich. Die Voruntersuchungen haben bereits gezeigt, dass auch komplexe Düsengeometrien als Transparentdüse dargestellt werden können und dass diese Düsen relevanten Fluidrücken standhalten (für einige Einspritzvorgänge, getestet bis 10 MPa). Die Kraftstofftemperatur bei der im gezeigten Bild wiedergegebenen Messung entspricht der Umgebungstemperatur, das Fluid stellt mit n-Dekan einen Schwersieder im ottomotorisch relevanten Kraftstoffspektrum dar. Das Düsenloch erscheint aufgrund starker Kavitation und der dadurch auftretenden

Phasengrenzen im Durchlichtbild schwarz (blauer Pfeil). Für Realkraftstoff und motorische Bedingungen ist eine Zunahme der Kavitationsneigung der Düse zu erwarten.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zusammenarbeit innerhalb des Projektkonsortiums

Zwischen den am Fördervorhaben beteiligten Projektpartnern (Vitesco Technologies, LTT Erlangen und Karlsruher Institut für Technologie, KIT) gab es während der gesamten Projektlaufzeit eine gute, offene und produktive Zusammenarbeit.

2 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Das nachfolgende Kapitel stellt die erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete dar.

2.1 AP 2.1: Beschaffung und Grundvermessung Musterinjektoren

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.2 AP 2.2: Shadowgraphie Computed Tomographie

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.3 AP 2.3: Beschaffung Glasdüse und Vermessung

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.4 AP 2.4: Konzeption, Bau und Aufbau Spraykammer

Die Anforderungen der optischen Messungen aus dem Projekt erfordern den Aufbau einer modernen Einspritzkammer. Die Kammer soll mobil sein, damit der Einsatz an verschiedenen Standorten möglich ist. Weiterhin soll die Kammer einen guten optischen Zugang zur Injektorspitze für Nahaufnahmen haben, gleichzeitig soll das Gesamtspray in möglichst großer Entfernung zur Düsen spitze erfasst werden können. Zusätzlich stellt die PDA Messtechnik besondere Ansprüche an den optischen Zugang. Da im Zuge des Projektes auch Tomographie-Messungen erfolgen, muss die Injektoraufnahme automatisch und hochgenau rotiert werden können. Damit die Kammer auch für zukünftige Entwicklungen in der Sprayvermessung gerüstet ist soll der Kammerdruck einstellbar sein von 0,3 bar absolut bis zu 13 bar Überdruck. Dazu gehört auch eine beheizte Spülluftzufuhr die bis zu 300 °C Lufttemperatur in der Kammer ermöglicht. Zusätzlich muss für eine möglichst motornahe Messung auch der Injektor temperiert werden können.

Um diesen zum Teil gegenläufigen Anforderungen gerecht zu werden wurde eine kontinuierlich durchströmte Einspritzkammer mit fünf variablen optischen Zugängen entworfen.

Der daraus abgeleitete Entwurf ist in Abbildung 2.4.1 dargestellt.

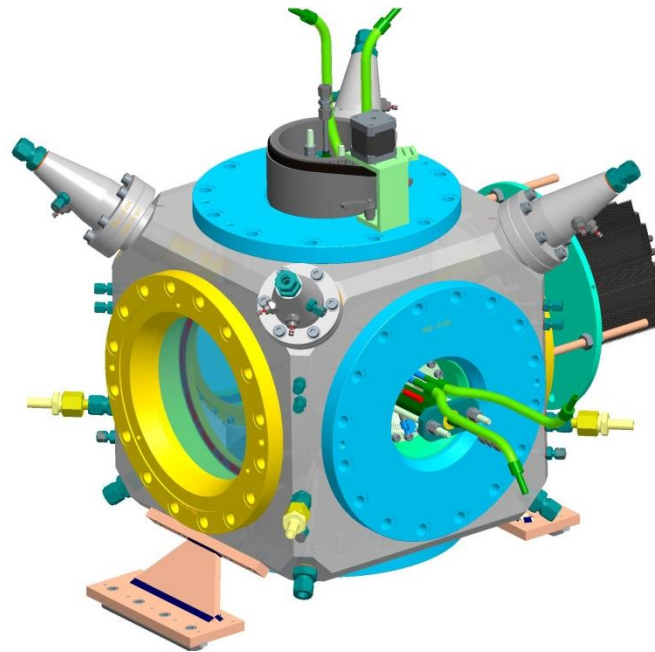


Abbildung 2.4.1: mobile Spraykammer CAD Entwurf

Für die Realisierung der PDA Messtechnik an der Kammer wird zur Signalauskopplung ein geneigter Fensterflansch eingesetzt (Abbildung 2.4.2). Dieser erlaubt die Auskopplung des Messsignals unter dem Brewster-Winkel wodurch die Signalqualität und -ausbeute signifikant steigt.

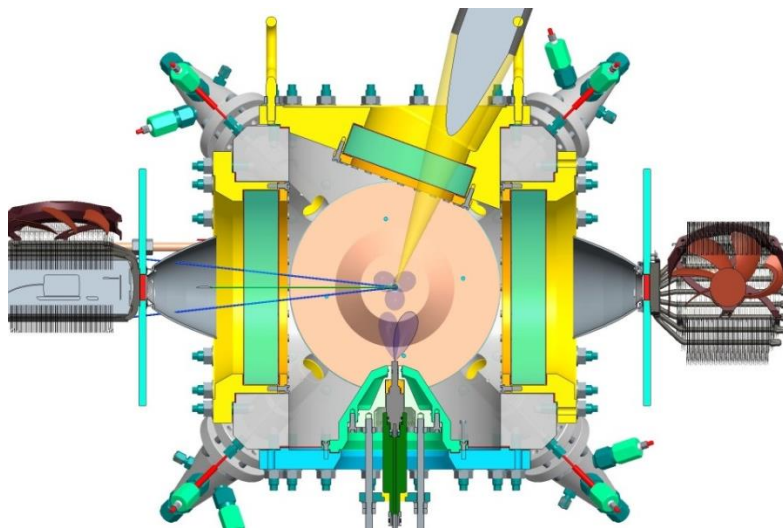


Abbildung 2.4.2: Schnittansicht der Kammer mit PDA-Flansch

Die Spülluftzuführung erfolgt über die vier oberen Ecken des Kammerkörpers. Die Beheizung der Spülluft erfolgt über elektrische Heizelemente in den Zuführungen. Abbildung 2.4.3 zeigt das realisierte Heizungskonzept wobei die Zuluft direkt über einen Flansch an den Kammerkörper mit integriertem Heizelement verschraubt wird. Dadurch wurde eine sehr kompakte und thermisch verlustarme Möglichkeit zur Spülluftheizung geschaffen die zusätzlich auch einfach zu warten ist.

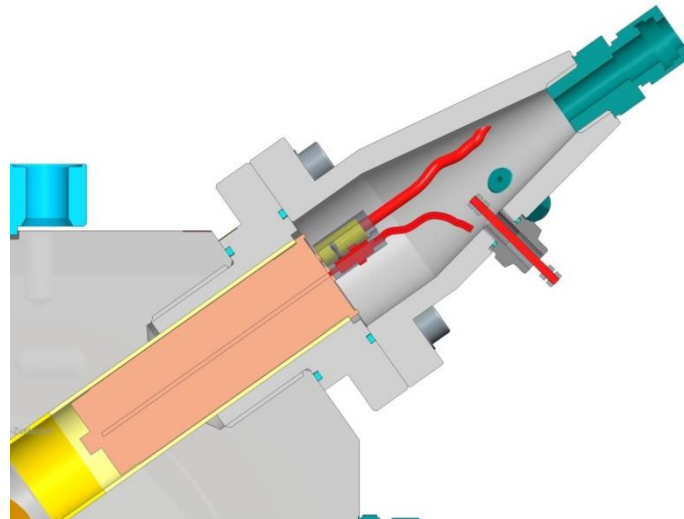


Abbildung 2.4.3: Schnittansicht Kammerheizung

Das Fließbild in Abbildung 2.4.4 zeigt die notwendigen Teilfunktionen zum Betrieb der Einspritzkammer und der Realisierung der geforderten Funktionen.

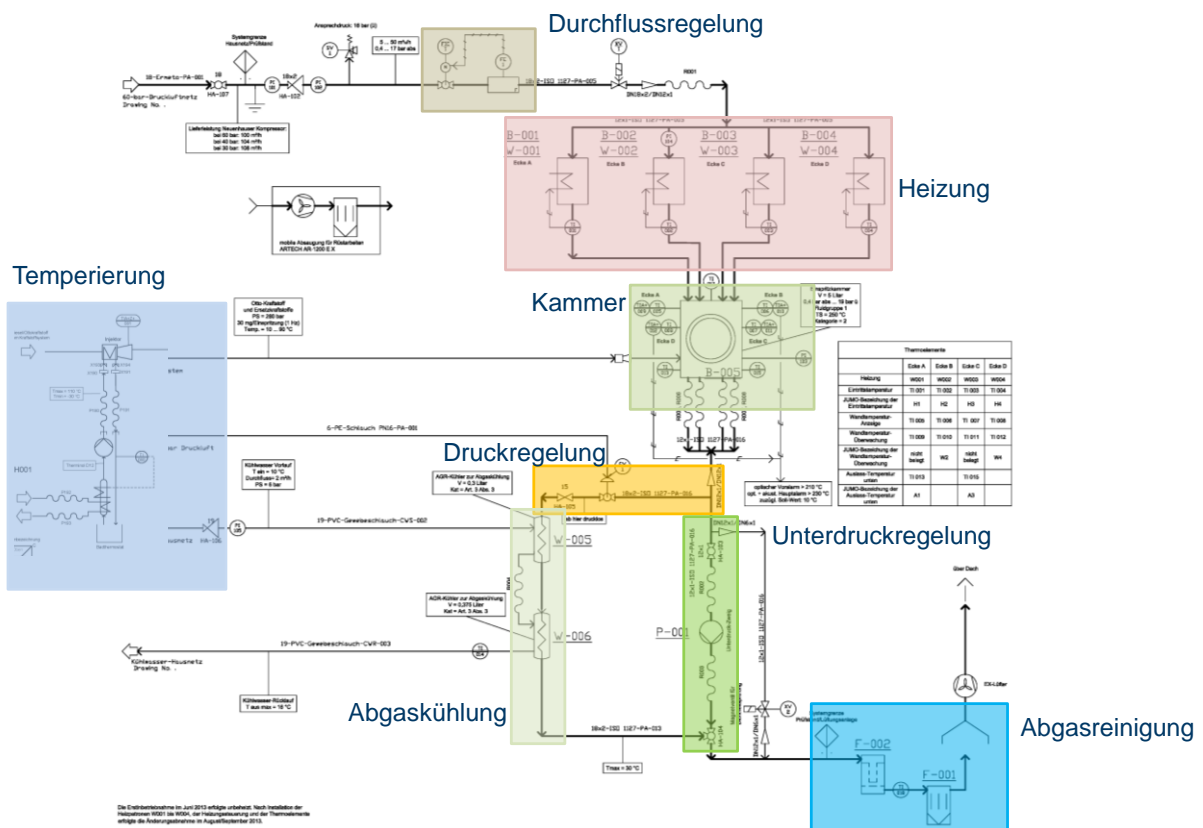


Abbildung 2.4.4: Fließbild zur mobilen Spraykammer

Für den sicheren Betrieb der Einspritzkammer ist ein detailliertes Bedien- und Sicherheitskonzept nötig.

Folgende Richtlinien bzw. Sicherheitsvorschriften werden für den Aufbau des Prüfstands eingehalten:

- Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU umgesetzt nach AD 2000
- Maschinenrichtlinie 2006/42/EG.
- Explosionsschutzverordnung nach ATEX 2014/34/EU
- Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU
- Emissionen

Im Rahmen der Dokumentation wird eine Gefahren- und Risikoanalyse inkl. Betriebsanweisung für den Prüfstand erstellt.

Die SPS Steuerung regelt und überwacht alle betriebs- und sicherheitsrelevanten Parameter der Kammer. Die eigentliche Messung und Datenaufzeichnung wird durch einen zusätzlichen Messrechner gesteuert. Dieser übernimmt die Ansteuerung der messtechnischen Komponenten wie Funktionsgenerator, Beleuchtung und Kamera. Die SPS und der Messrechner sind über eine OPC Schnittstelle miteinander verknüpft. Dies ermöglicht einen einfachen Datenaustausch und eine gemeinsame und zugeordnete Ablage der optischen Messdaten mit den Versuchsparametern. Die Steuerung der Messtechnik erfolgt durch eine Matlab Software mit grafischer Benutzeroberfläche auf dem Messrechner und erlaubt die Ansteuerung aller relevanten Komponenten während der Messung. Abbildung 2.4.5 zeigt das zugehörige Ablaufschema.

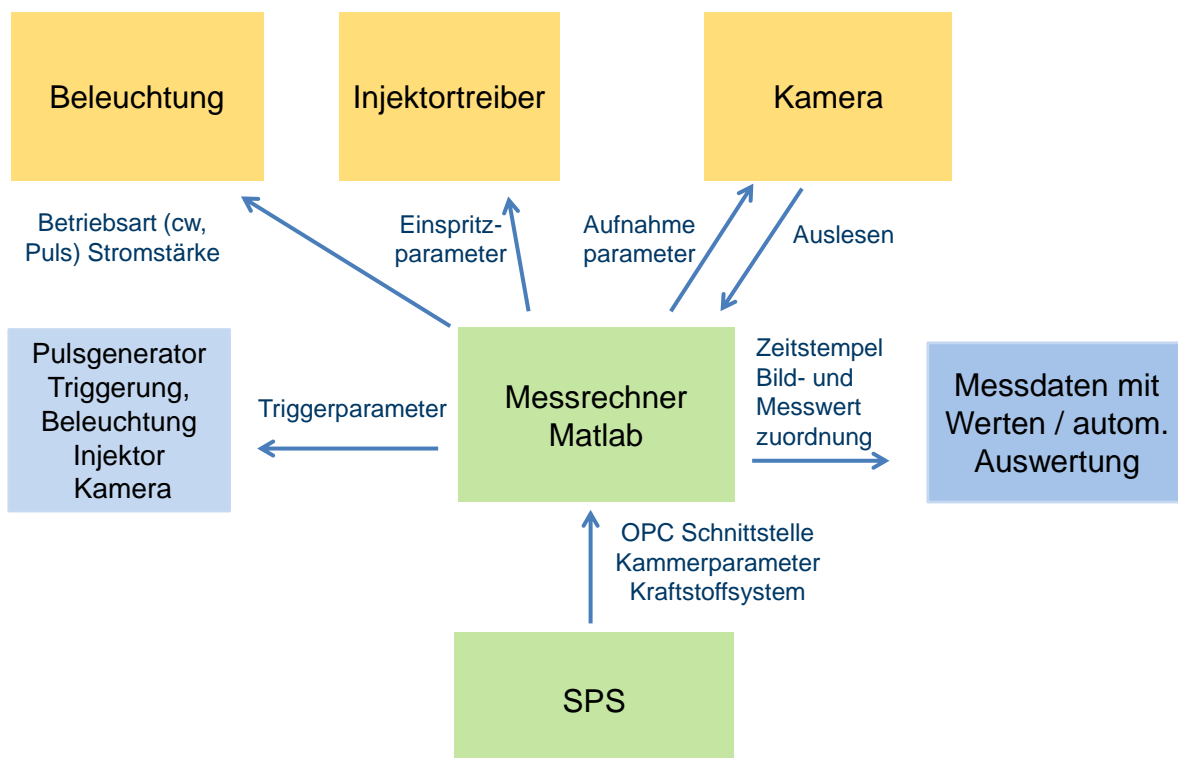


Abbildung 2.4.5: Bedienkonzept und Messablauf für die mobile Einspritzkammer

Aufbau

Die gesamte Kammer wird mit der zugehörigen Peripherie und der Traversierung in einem mobilen Gestell integriert. Abbildung 2.4.6 zeigt das Kammergestell im CAD Entwurf und im Laboraufbau. Das Gestell beinhaltet alle elektrischen und verfahrenstechnische Komponenten. Somit wird die geforderte Mobilität der Kammer zuverlässig gewährleistet. Der Aufstellraum muss über einen elektrischen Anschluss, Druckluftversorgung sowie einen geeigneten Abluftanschluss verfügen.



Abbildung 2.4.6: Gesamtansicht mobile Spraykammer CAD Modell

Abbildung 2.4.7 zeigt die Einspritzkammer mit aufgebauter High Speed Messtechnik.

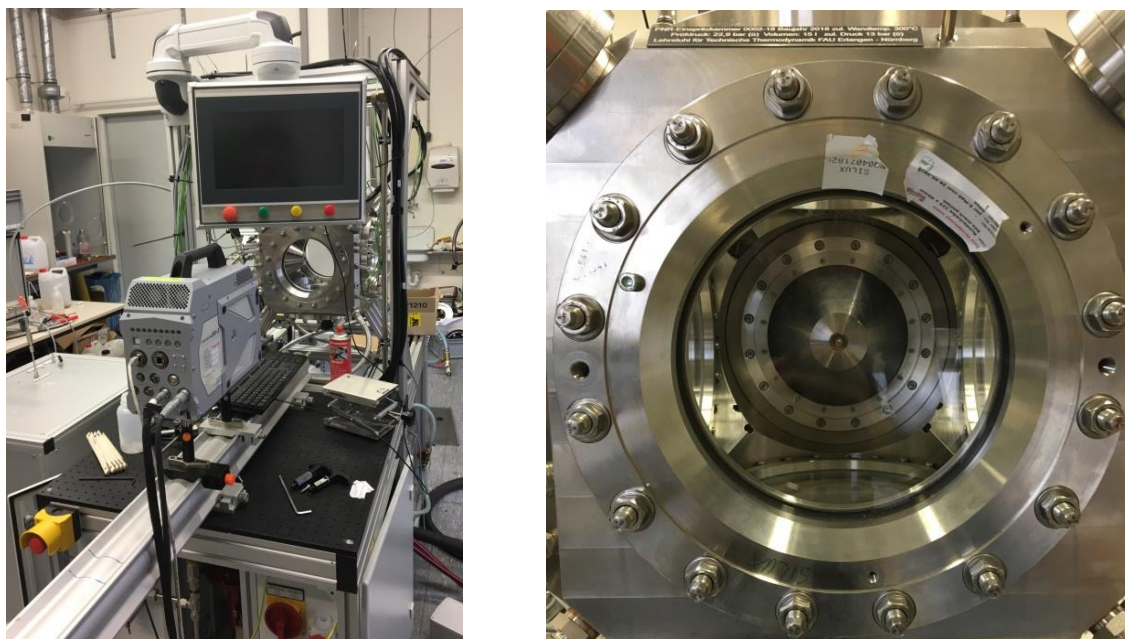


Abbildung 2.4.7: Gesamtansicht mobile Spraykammer, Detailansicht Kammerinnen-volumen

Injektorrotation

Weiterhin verfügt die mobile Einspritzkammer über eine automatisierte Injektorrotation. Dies ermöglicht eine einfache angulare Justierung des Injektors und die tomographische Erfassung des Kraftstoffsprays und den Einsatz der SCT-Technologie in der Einspritzkammer. Abbildung 2.4.8 zeigt links das CAD Modell und rechts die eingebaute Injektorrotation in der Einspritzkammer. Die Injektorrotation ist vollständig in die SPS-Steuerung eingebunden. Über die Verknüpfung mit der optischen Messtechnik ermöglicht dies einen automatisierten Messbetrieb. Die Injektorrotation erlaubt zudem eine wesentlich genauere Ausrichtung der Injektorlage und Erfassung des Kraftstoffsprays.

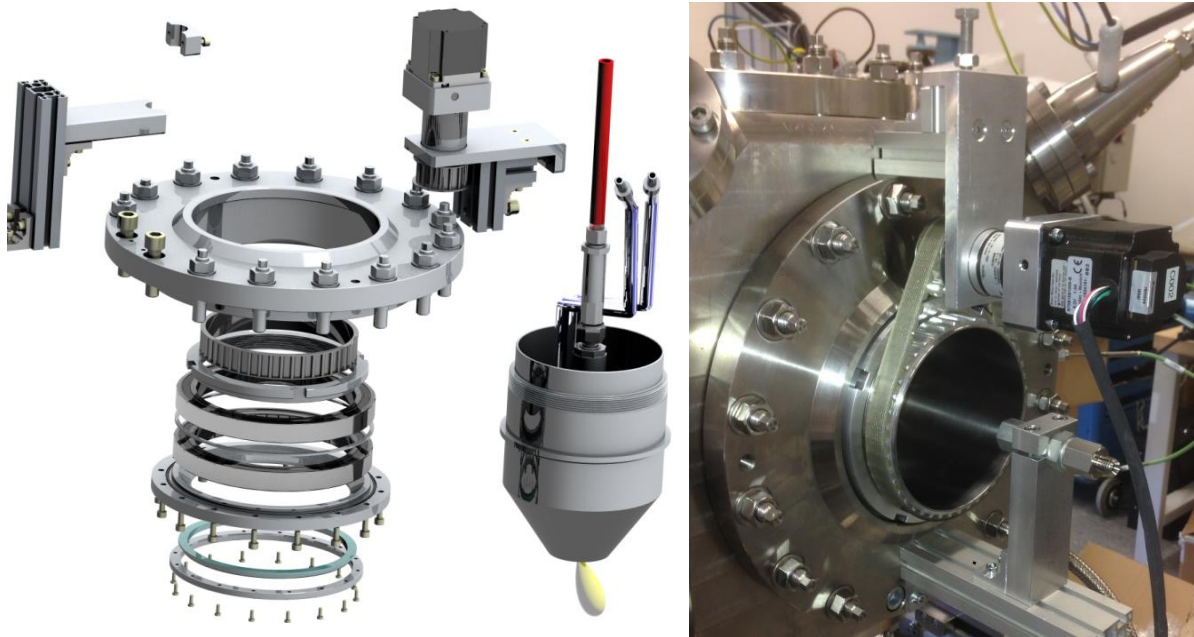


Abbildung 2.4.8: Injektorrotation, CAD Modell und aktueller Stand

Traversierung

Die Einspritzkammer ist mit einer linearen Traversierung ausgestattet. Die beiden Kammerfüße sind auf Linearachsen montiert die über eine Antriebswelle miteinander synchronisiert sind (Abbildung 2.4.9). Der Antrieb erfolgt über einen Schrittmotor. Zur genauen Positionserfassung ist ein Linearmaßstab in die Steuerung integriert und erlaubt das exakte und wiederholgenauer Anfahren beliebiger Positionen. Die Traversierung ermöglicht den parallelen Aufbau verschiedener Messtechnik und reduziert so den Einrichteaufwand erheblich.

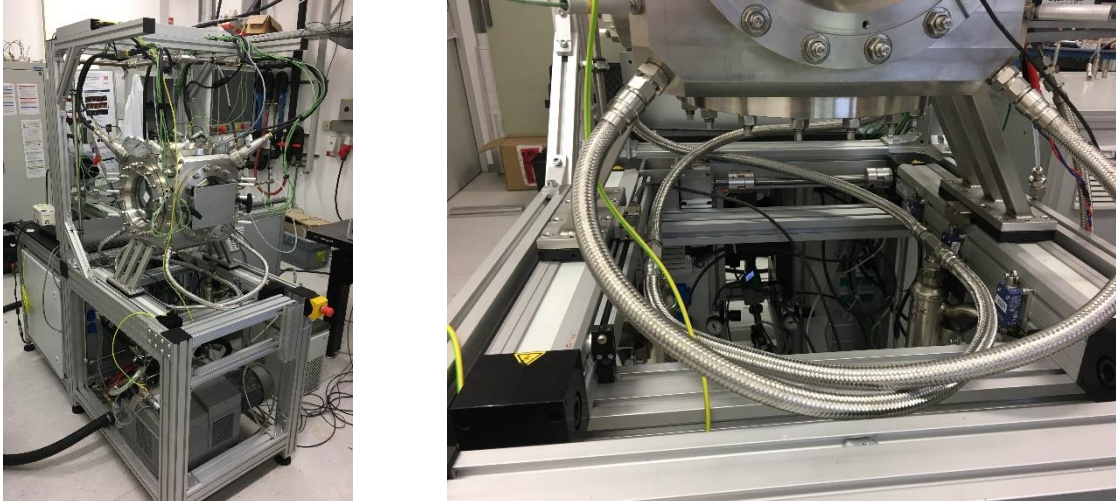


Abbildung 2.4.9: Traversierung Einspritzkammer

SPS-Steuerung

Die Steuerung des Prüfstands erfolgt über eine SPS Steuerung. Diese übernimmt die Prüfstandssteuerung und Sicherheitseinrichtungen. Weiterhin stellt sie die die Schnittstelle zwischen Anwender, der Messtechnik und der Datensicherung dar. Der integrierte Zustandsautomat erlaubt einen einfachen und sicheren Betrieb des Prüfstands.

- Steuerung, Überwachung und Aufzeichnung aller betriebs- und sicherheitsrelevanten Parameter über SPS
- Funktionen des Zustandsautomaten:
 - Eindeutige Festlegung des Betriebszustands
 - Einfacher Wechsel des Betriebszustands
 - Einfache Handhabung der Sicherheitsvorkehrungen
 - Kontrollierte Abschaltung und Deaktivierung
- Sicherheits- und Alarmschwellen für alle Parameter
- Aufzeichnung und Speicherung aller Parameter in einer Datenbank, Verknüpfung der Werte mit Messergebnissen
- Schnittstellen zum Datenaustausch: CAN-Bus, OPC

Abbildung 2.4.10 zeigt das Bedienpanel und den Steuerungsschaltschrank.

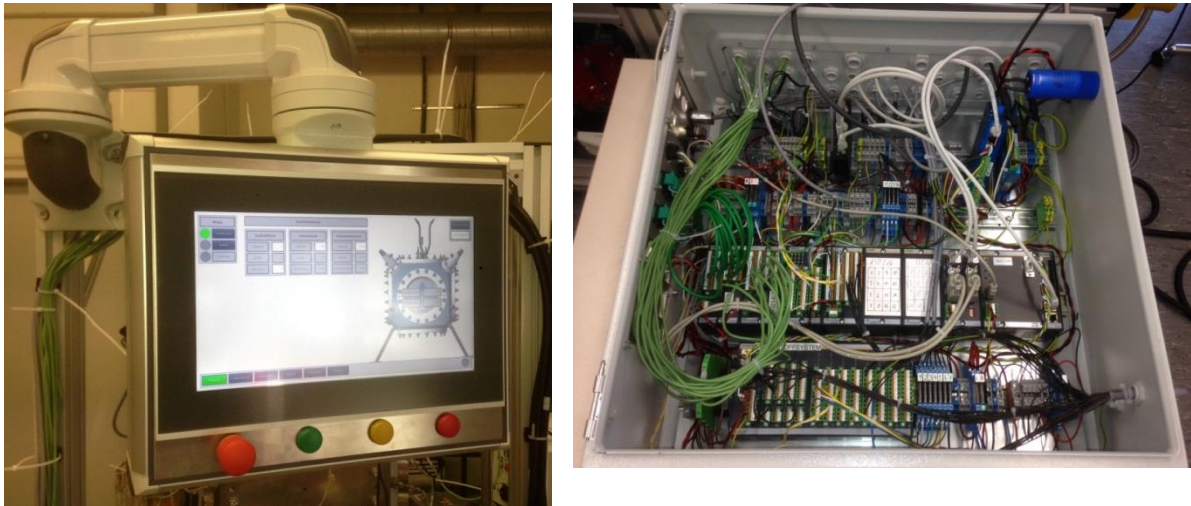


Abbildung 2.4.10: Bedienpanel mit Visualisierung der Steuerung (links), Steuerungsschaltschrank (rechts)

Die Bedienung der Kammer erfolgt über eine web-basierte Visualisierung. Abbildung 2.4.11 zeigt die Hauptseite der Kammersteuerung. Für jede Unterfunktion wurde eine eigene Seite erstellt, welche über die Taskleiste am unteren Bildschirmrand angewählt werden kann.

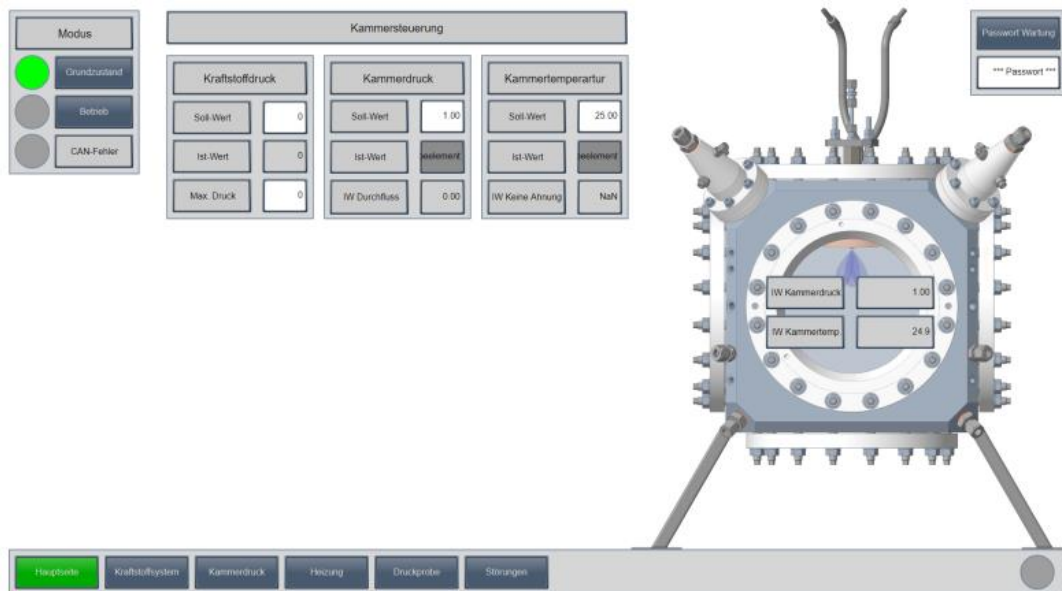


Abbildung 2.4.11: Hauptseite der Steuerungsoberfläche

Abbildung 2.4.12 zeigt exemplarisch die Visualisierung für den Druckverlauf in der Kammer. Zudem sind noch Visualisierungen für die Heizung, die Ansteuerung der Kraftstoffsysteme und für Störungen vorhanden.

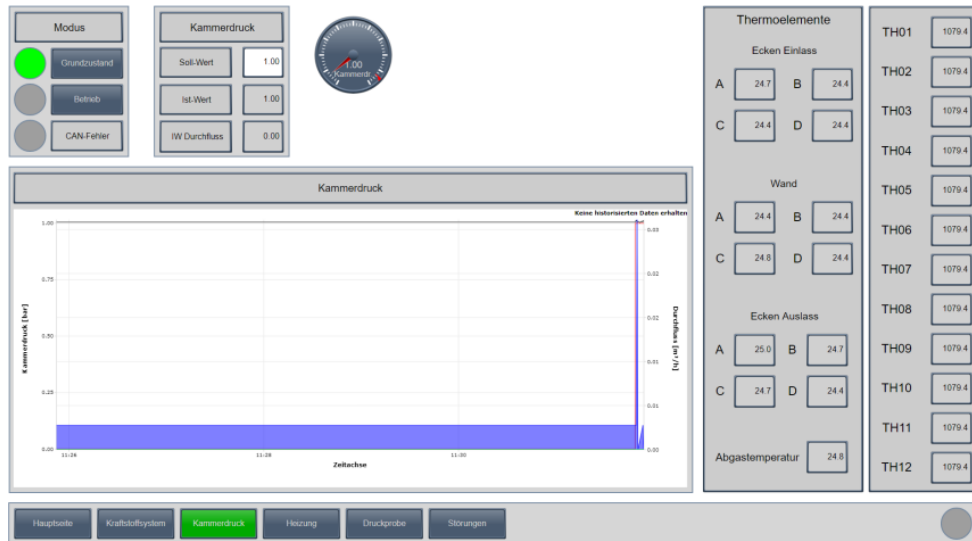


Abbildung 2.4.12: Visualisierung des Druckverlaufs in der Kammer

Mobiler Betrieb am Synchrotron (KIT)

Die Einspritzkammer wurde am LTT erprobt und es wurden im Rahmen des Projektes Messungen mit bereits vermessenen Glasdüsen durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Abgleichs sind in Kapitel 2.5 zu finden. Weiterhin kam die Kammer im November 2019 und im Dezember 2020 auch am KIT zum Einsatz. Das mobile Konzept der Einspritzkammer hat sich als sehr vorteilhaft erweisen. Die Messphasen konnten mit sehr wenig technischem Aufwand durchgeführt werden. Abbildung 2.4.13 zeigt den Aufbau am KIT sowie den Transport der mobilen Einspritzkammer im November 2019.



Abbildung 2.4.13: Aufbau am KIT und Transport der Einspritzkammer

2.5 AP 3.1: Aufbau Vitesco Glas-Düsen am LTT

Während des Projektes wurde die in AP 2.4 gezeigte Spraykammer aufgebaut. In diesem Kapitel sollen die Messungen an dieser neuen Kammer mit der bisher am LTT genutzten Spraykammer verglichen werden. Hierfür sind in Abbildung 2.5.1 Rohbilder aus einer Einspritzung $1500\ \mu\text{s}$ nach dem elektrischen Einspritzbeginn der originalen (b) sowie der replizierten (a) Glasdüse 1 gezeigt. Gut zu erkennen ist das veränderte Abbildungsverhältnis und die deutlich homogenere Ausleuchtung, welche durch ein LED Panel realisiert wurde.

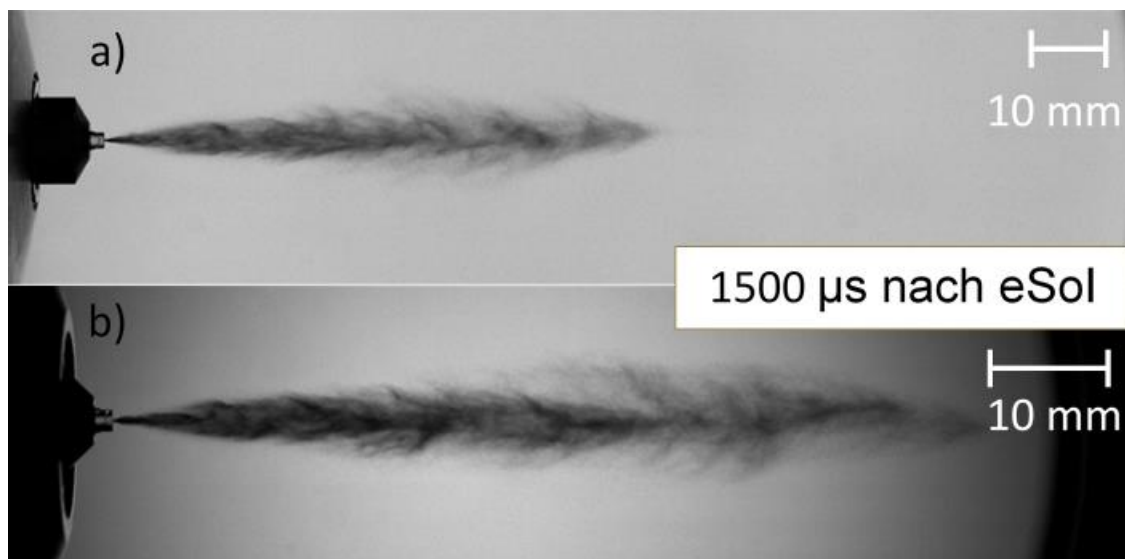


Abbildung 2.5.1: Vergleich der Kammeraufbauten

Zur Validierung der Ergebnisse der neuen Spraykammer wurden zwei Düsen nochmals vermessen. Der Vergleich der neuen und vergangenen Ergebnisse für die Düsen 19 und 23 ist in Abbildung 2.5.2 dargestellt. Hierbei wurde jede Düse mit drei Kraftstoffdrücken vermessen. Die Düsen 19 und 23 wurden für den Vergleich ausgewählt da sie besonders hohe, bzw. besonders niedrige Eindringtiefen vorweisen. Die Daten aus den neuen Messungen stimmen sehr gut mit den alten Datensätzen überein. Hierbei endet der Messbereich der früheren Messungen bei ungefähr 90 mm. Die mobile Spraykammer ermöglicht Messungen der Eindringtiefe bis zu 130 mm. Dies entspricht einem Zuwachs von über 40 % und ermöglicht eine genauere Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Düsengeometrie und Sprayausbreitung.

Im Zuge der Vergleichsmessungen wurde auch ein neuer Satz Glasdüsen an der mobilen Spraykammer vermessen. Dieser setzt sich zusammen aus Replika bereits vermessener Düsen von hohem Interesse für weiterführende Messungen sowie aus einigen neuen Geometrien.

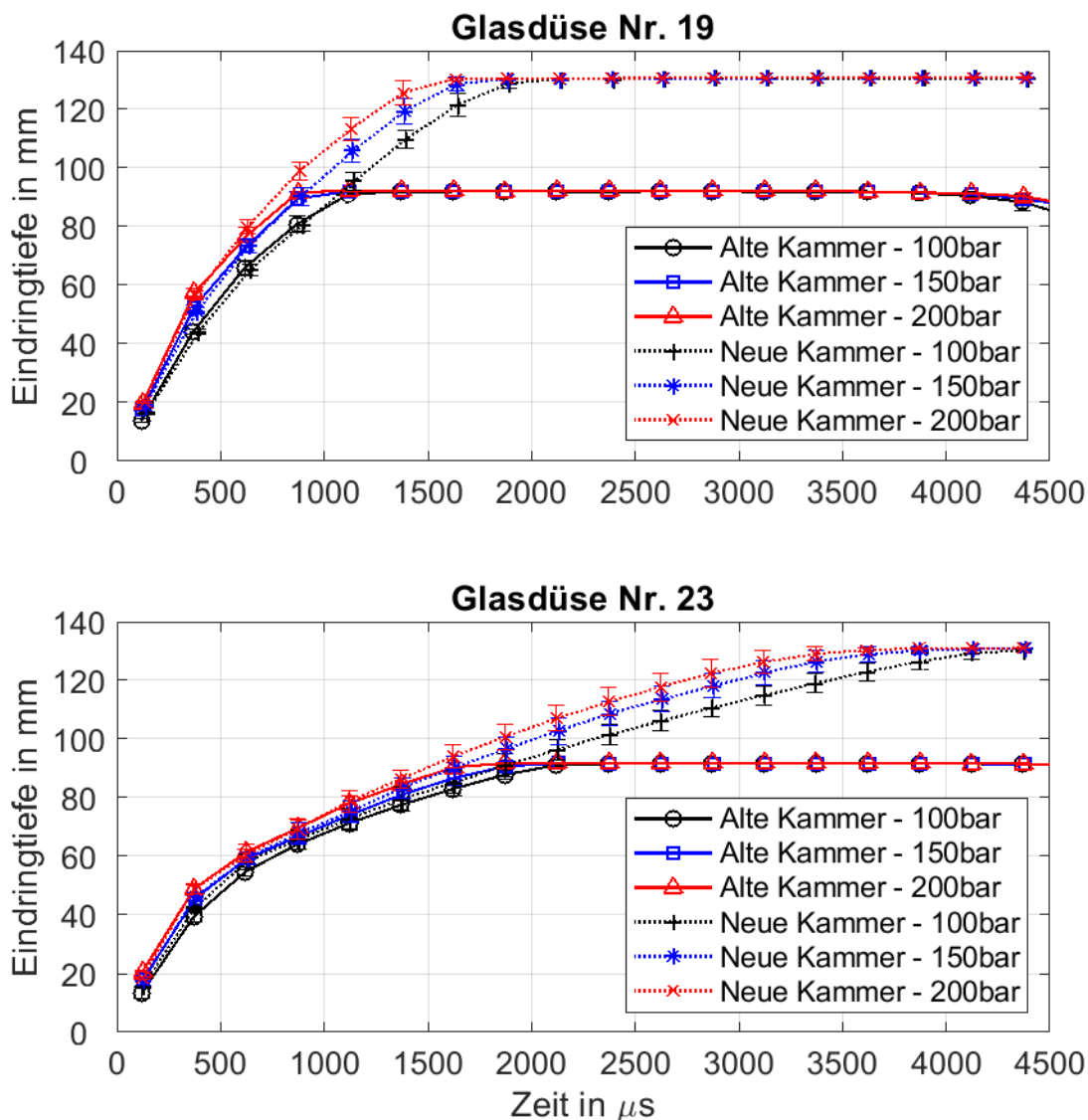


Abbildung 2.5.2: Abgleich der neuen Spraykammer mit vorhergegangenen Messungen

In Abbildung 2.5.3 sind die Messungen für die Originalen und Replikat für vier Düsen dargestellt. Bei den Düsen mit den Nummern 1, 3 und 5 kann hier der Verlauf der Eindringtiefe mit den neuen Düsen repliziert werden. Das Replikat der Düse 7 zeigt gegen Ende des alten Messbereichs einen steileren Verlauf. Insgesamt sind die Glasdüsen äußerst wiederholgenau.

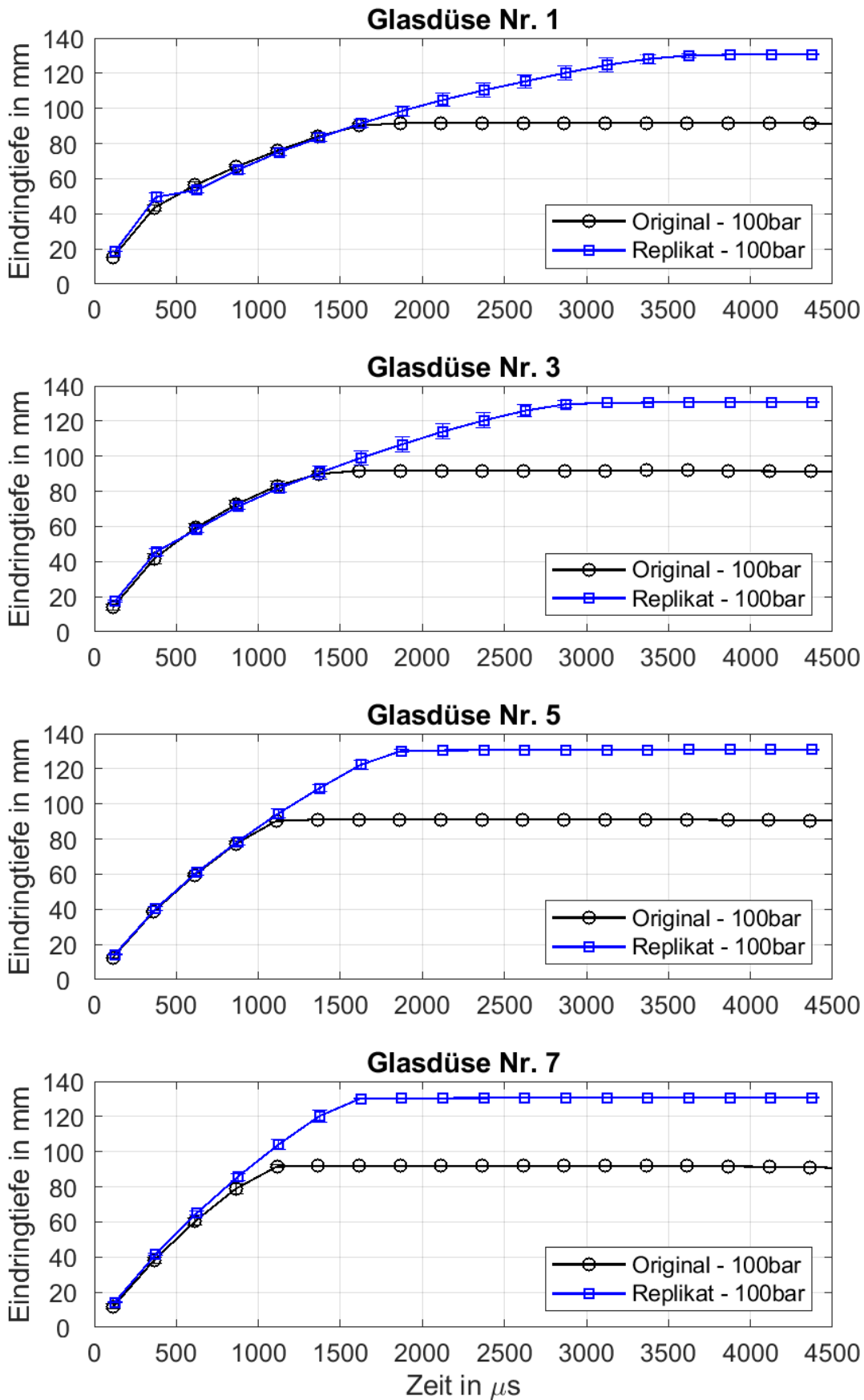


Abbildung 2.5.3: Abgleich zwischen Replika und Original Düsen

2.6 AP 3.2: Validierung Glasdüse am LTT

Für die Methodenentwicklung zur Dichtemessung in der Glasdüse wurde ein Versuch zur quasi-simultanen Messung von Shadowgraphy und Laser-induzierter-Fluoreszenz (LIF) aufgebaut. Hierfür wurden die Glasdüsen in einer kontinuierlich durchströmten Spraykammer mit optischen Zugängen aufgebaut. Der Aufbau wird in Abbildung 2.6.1 dargestellt.

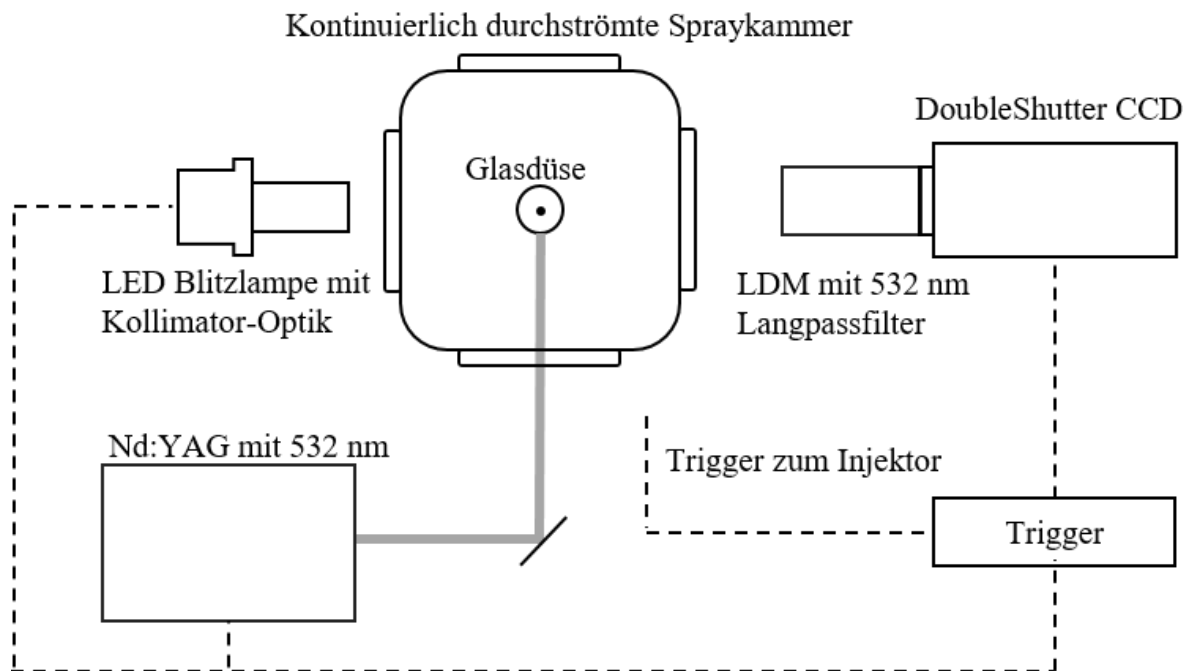


Abbildung 2.6.1: Aufbau zur simultanen Messung von Shadowgraphy und LIF

Als Lichtquelle für die Shadowgraphy-Aufnahmen dient ein gepulstes LED Array mit einem Intensitätsmaximum bei einer Wellenlänge über 550 nm. Für die LIF-Aufnahmen wird dem Kraftstoff ein Tracer beigemischt, welcher durch Licht der Wellenlänge 532 nm angeregt wird und fluoresziert. Als Anregungsquelle wird ein gepulster frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser verwendet. Für die Aufnahme der Bilder wird eine Doubleshutter Kamera des Typs PCO 2000 verwendet. Diese zeichnet sich durch einen sehr kurzen Verzug zwischen den beiden Bildern von 200 ns aus. Damit kein gestreutes Licht des Lasers auf den Chip treffen kann wird ein Lang-Pass-Filter mit einer Wellenlänge von 550 nm verwendet. Damit die kleinen Geometrien der Glasdüse abgebildet werden können wird ein Fernmikroskop vom Typ QM 100 Questar vor die Kamera gesetzt. Dieses verfügt über eine bis zu 8-fache Vergrößerung bei sehr guter Lichtstärke.

Die Bildqualität der Shadowgraphy-Aufnahmen hängt in erster Linie von dem verwendeten Fluid ab. Bereits kleine Abweichungen des Brechungsindex der Flüssigkeit vom Brechungsindex des Glases führen zu Linsen Effekten, welche die Ränder schwarz erscheinen lassen.

Tabelle 2.6.1: Brechungsindizes ausgewählter Fluide

Stoffname	Brechungsindex
Quarzglas	1,46
Benzin	1,427
Ethanol	1,362
n-Hexan	1,37
n-Heptan	1,38
iso-Oktan	1,393
n-Dekan	1,41
Toluol	1,496

In Tabelle 2.6.1: Brechungsindizes ausgewählter Fluide Tabelle 2.6.1 sind die Brechungsindizes von Quarzglas, Benzin sowie ausgewählter Kohlenwasserstoffe gegenübergestellt. Quarzglas hat im Vergleich zu Benzin und dessen Komponenten einen relativ großen Brechungsindex. Abbildung 2.6.2 zeigt den Vergleich von n-Dekan, Ethanol und Toluol und deren Mischungen in einer Glasdüse ohne Einspritzung. Gut zu sehen ist die Luftblase im Sackloch und der Effekt des Brechungsindexes. Für die Messungen in diesem Aufbau wurde die Mischung aus n-Dekan und Toluol gewählt.

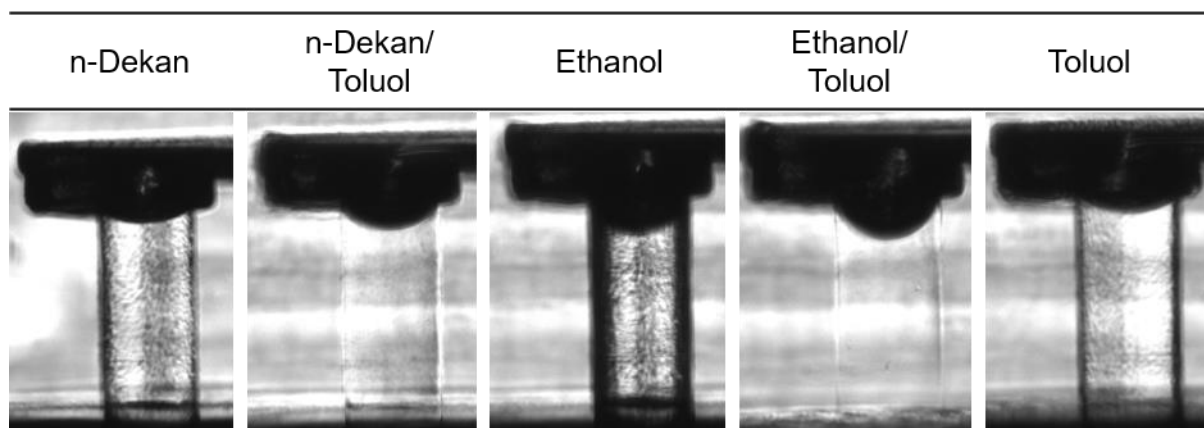


Abbildung 2.6.2: Vergleich von n-Dekan, Ethanol und Toluol sowie deren Mischungen

Für die LIF Messungen wird dem Kraftstoff der Feststofftracer Nilrot zugegeben. Dieser ist in Kohlenwasserstoffen löslich verändert aber auch das Absorptionsverhalten. Dies ist in Abbildung 2.6.3 zu sehen. Das Sackloch (b) der Düsengeometrie erscheint in der Shadowgraphy Aufnahme dunkler als das Düsenloch (a) darunter, da das Licht einen längeren Weg zurücklegen muss. In der LIF Aufnahme erscheint hingegen das Sackloch heller, da hier durch das größere Volumen mehr Tracer zur Fluoreszenz angeregt wird.

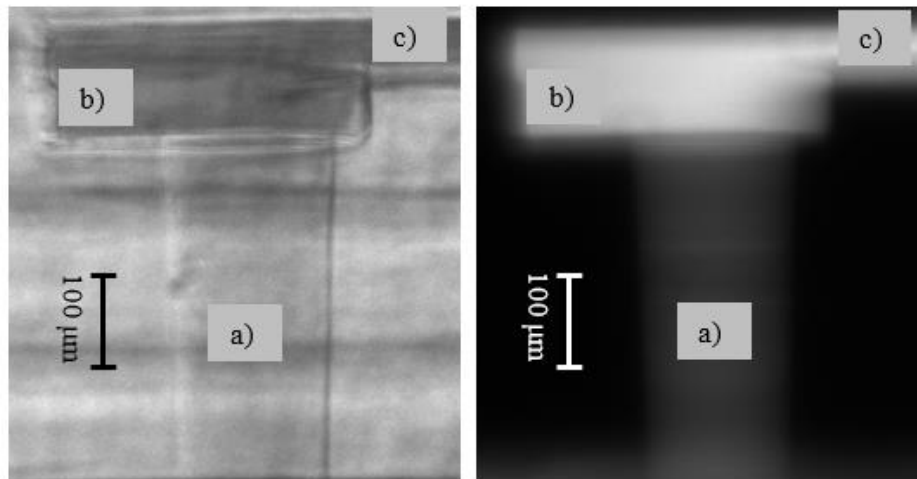


Abbildung 2.6.3: Shadowgraphy (links) und LIF (rechts) Aufnahmen ohne Einspritzung

Für die Untersuchungen wurden drei verschiedene Düsen mit unterschiedlichen Konizitäten aufgebaut. Die Düsen wurden mit kaltem Kraftstoff bei einem Einspritzdruck von 150 bar vermessen. Abbildung 2.6.4 zeigt typische Einzelaufnahmen der beiden Messtechniken während des Einspritzvorganges mit kaltem Kraftstoff für die drei Geometrien. Bei der konvergenten Düse ist eine Wirbelkavitation zu sehen die sich vom Sackloch bis zum Düsenaustritt fortsetzt. Die zylindrische und divergente Düse bilden ebenfalls eine Wirbelkavitation aus. Diese ist allerdings nur im Sackloch deutlich zu erkennen. Im Düsenloch selbst wird diese von Scherkavitation überlagert, welche beinahe den gesamten Sichtbereich ausfüllt.

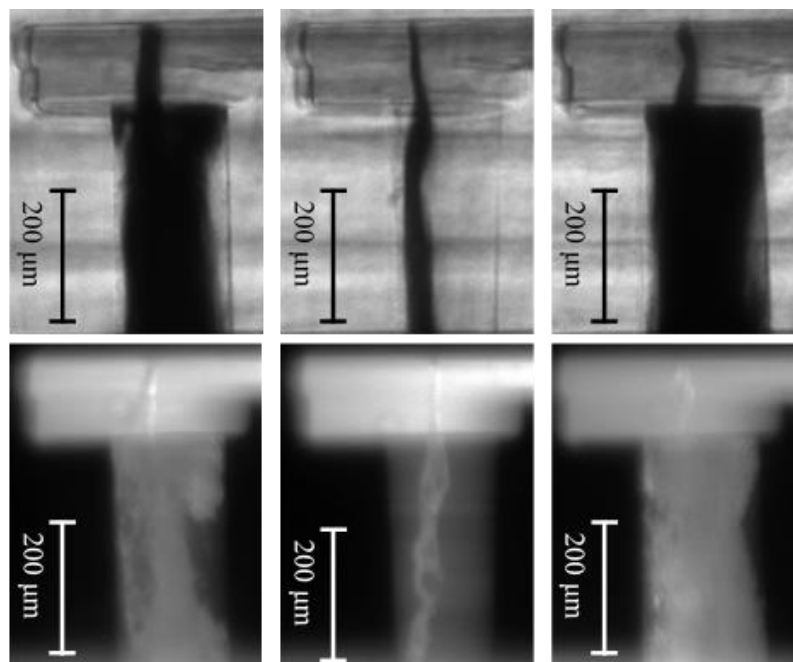


Abbildung 2.6.4: Shadowgraphy- (oben) und LIF-Aufnahmen (unten) der zylindrischen (Links), konvergenten (Mitte) und divergenten (Rechts) Düse

Aus den Shadowgraphy Aufnahmen ist vor allem ersichtlich wo sich die Kavitation befindet. Die Kavitationsgebiete selbst sorgen durch Extinktion für komplett schwarze

Bereiche auf den Aufnahmen. In den LIF Aufnahmen hingegen können Strukturen in den Kavitationsgebieten erkannt werden. Allerdings zeigt sich, dass die Kavitationsgebiete heller erscheinen als die Gebiete mit reiner Flüssigkeit. Besonders bei der konvergenten Düse ist das gut zu erkennen. Dieser Effekt wird ausgelöst durch eine Streuwirkung im 2-Phasengebiet der Strömung. In Abbildung 2.6.5 ist dieser Effekt ohne Strömung gezeigt. Die Abbildung zeigt eine im Sackloch gefangene Gas Blase. Auch hier erzeugt die Lichtstreuung und Brechung an der Phasengrenze einen deutlichen Glanzpunkt. Dies macht es unmöglich die LIF-Technik zur Bestimmung der Dichte der 2-Phasenströmung zu verwenden.

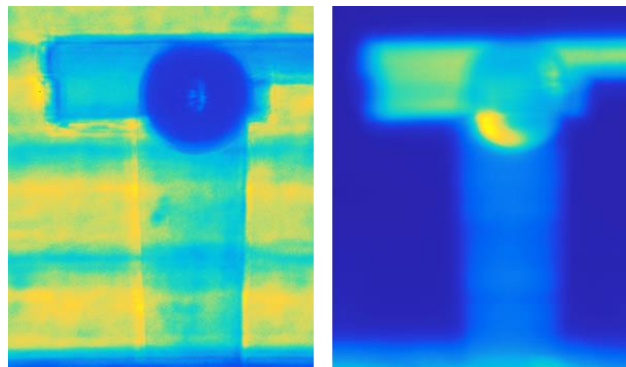


Abbildung 2.6.5: Shadowgraphy (links) und LIF (rechts) ohne Einspritzung mit Gasblase im Sackloch

Stattdessen kann ein Einblick in die Strömung selbst gewonnen werden. In Abbildung 2.6.6 sind die Mittelwertbilder aus 16 Shadowgraphy-Aufnahmen verschiedener Einspritzungen zur gleichen Zeit nach elektrischem Einspritzbeginn gezeigt. Die Wirbelkavitation erscheint hierbei weit weniger scharf da sie örtlich stark fluktuiert. Die Schichtkavitation scheint deutlich stabiler. Es zeigt sich wieder der Unterschied zwischen zylindrischer und divergenter Düse.

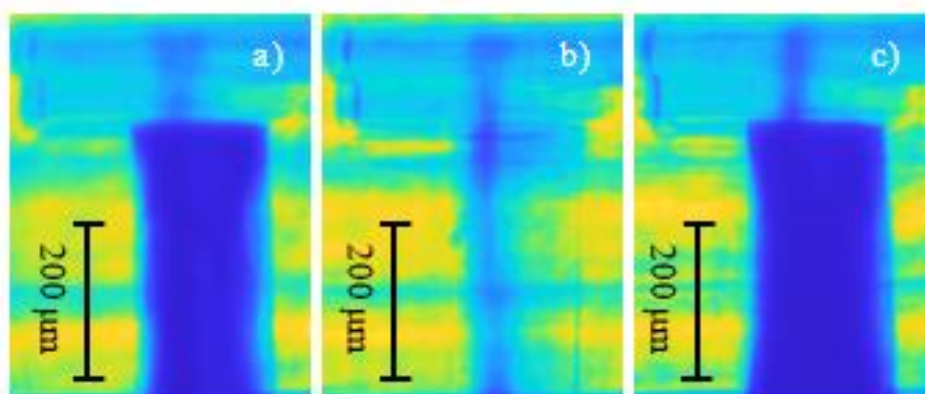


Abbildung 2.6.6: Shadowgraphy Mittelwertbilder der zylindrischen (Links), konvergenten (Mitte) und divergenten (Rechts) Düse

Verschiedene Strömungszustände, die sich in der konvergenten Düse einstellen, sind in Abbildung 2.6.7 gezeigt. Das Bild Paar a) zeigt die Wirbelkavitation an der vom Einlass abgewandten Seite im Düsenloch zeitgleich mit Scherkavitation am Düseninlass. Im Strömungszustand b) ist in der Shadowgraphy-Aufnahme ausschließlich Scherkavitation zu sehen. In den 200 ns Zeitversatz zwischen der Shadowgraphy und LIF-Aufnahme bildet sich eine Wirbelkavitation in der Mitte des Düsenlochs. Im Strömungszustand c) hat die Wirbelkavitation ihre obere Hälfte an die linke Seite des Düsenlochs angelehnt, während die untere Hälfte in der Mitte des Düsenlochs endet. In Strömungszustand d) haben sich gleichzeitig zwei Wirbel ausgebildet. Von diesen verschwindet einer in den 200 ns zwischen der Shadowgraphy und der LIF-Aufnahme

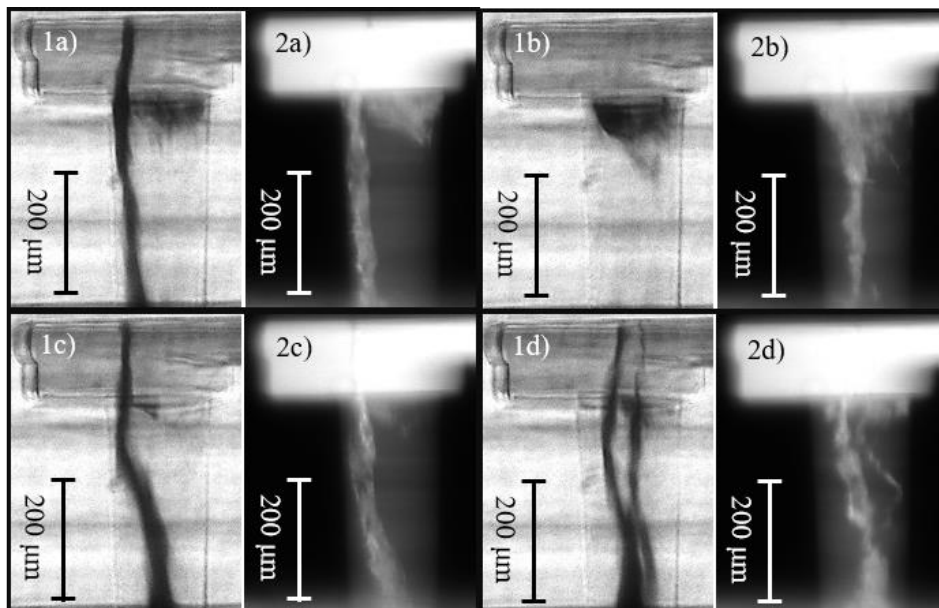


Abbildung 2.6.7: Shadowgraphy und LIF Aufnahmen für vier verschiedene Einspritzungen

Für die Methodenentwicklung zur Geschwindigkeitsmessung in der Glasdüse wurde eine Kirana Ultra Highspeed (UHS) Kamera von Specialised Imaging ausgeliehen. In Abbildung 2.6.8 ist der Messaufbau exemplarisch dargestellt. Hierbei werden Nahaufnahmen der Strömung innerhalb der Düse mit einer Bildrate von 2 MHz gemacht. Als Lichtquelle dient ein mit der Kamera synchronisierter Laser der Firma Cavilux, welcher die hohen Pulsraten darstellen kann. Als Medium wird Wasser verwendet, welches mit Polyamid Partikeln versetzt ist. Damit das Kraftstoffsystem, welches die Kraftstoffdrücke realisiert, keinen Schaden durch die Partikel nimmt wurde ein Medientrenner für hohe Drücke aufgebaut und in Betrieb genommen.

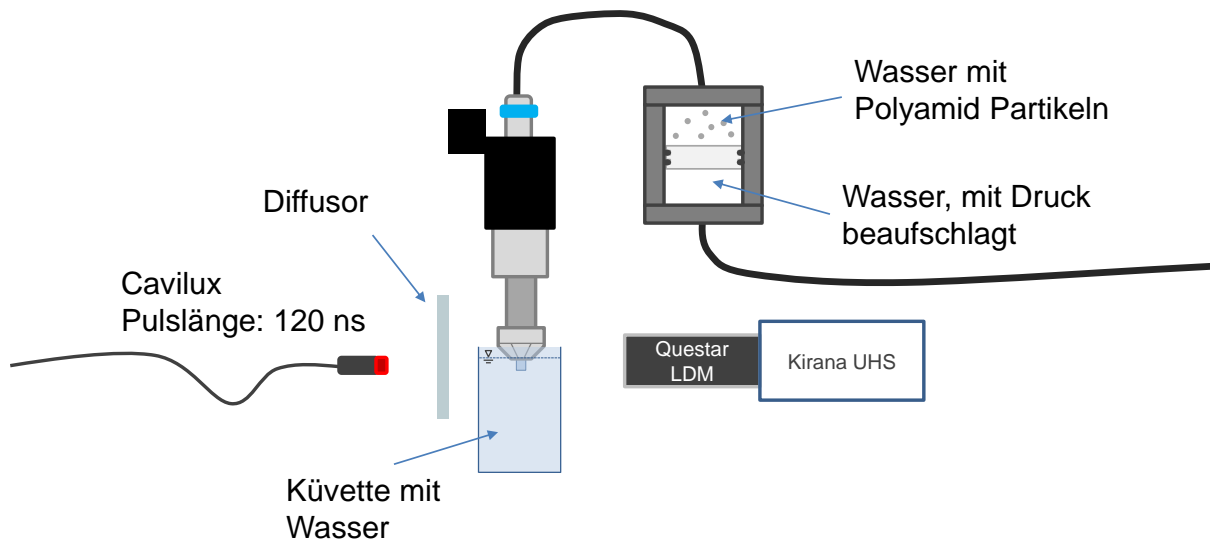


Abbildung 2.6.8: Aufbau zur Ultra-High-Speed-Messung

In Abbildung 2.6.9 sind drei Rohbilder aus derselben Sequenz dargestellt. Rot markiert ist ein Partikel, welches von der Strömung mitgetragen wird. Aus der Skala und dem Zeitabstand (500 ns) der Bilder ergibt sich eine Geschwindigkeit von 100 m/s.

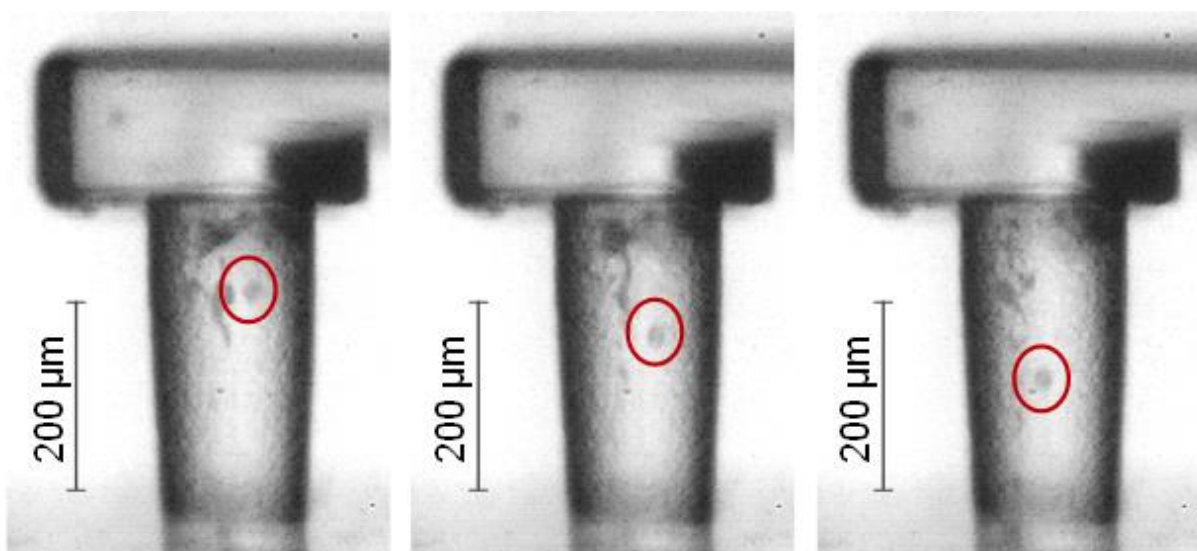


Abbildung 2.6.9: Rohbilder mit einem Bildabstand von 500 ns

Durch die schwierigen optischen Bedingungen und dem Auftreten von Kavitation in der Düse ist eine automatische Auswertung auf Basis einer Kreuzkorrelation nicht möglich, da es keine Möglichkeit gibt automatisiert zwischen Partikeln und sich lösenden Kavitations-Strukturen zu unterscheiden.

Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung manuell, indem der Nutzer die Partikel verfolgt und für jedes Bild markiert. Aus den Ergebnissen dieses Prozesses können einzelne Bahnlinien der Partikel erstellt werden. Für eine representative Düse sind diese in Abbildung 2.6.10, in einem Hintergrundbild aus der stationären Phase der Einspritzung, gezeigt. Der Farbverlauf gibt dabei die Geschwindigkeit des jeweiligen Partikels entsprechend der Skala wieder.

In Bild a) sind Partikel aufgetragen, welche das Sackloch der Düse außerhalb des Einzugsgebiets des Düsenlochs betreten. Diese Partikel zeigen im Sackloch geringe Geschwindigkeiten und folgen kurzlebigen Wirbeln. Sobald sie dem Düsenloch nahe genug kommen werden sie von der Strömung erfasst und zeigen hohe Beschleunigungen. Besonders in der Nähe der Wirbelkavitation zeigen die Bahnlinien geringe Geschwindigkeiten. Zum einen ist in der Nähe der Kavitation die genaue Position des Partikels nur schwer zu erkennen, zum anderen ist die Geschwindigkeitskomponente in oder aus der Betrachtungsebene an dieser Stelle besonders hoch und kann nicht erfasst werden.

In Bild b) sind Partikel aufgetragen, welche das Sackloch auf einer zentralen Bahn betreten. Diese Partikel werden direkt ins Düsenloch gesogen und verbringen kaum Zeit im Sackloch. Auch hier zeigen Partikel, die der Wirbelkavitation nahe kommen, kleine Geschwindigkeiten die nicht plausibel sind.

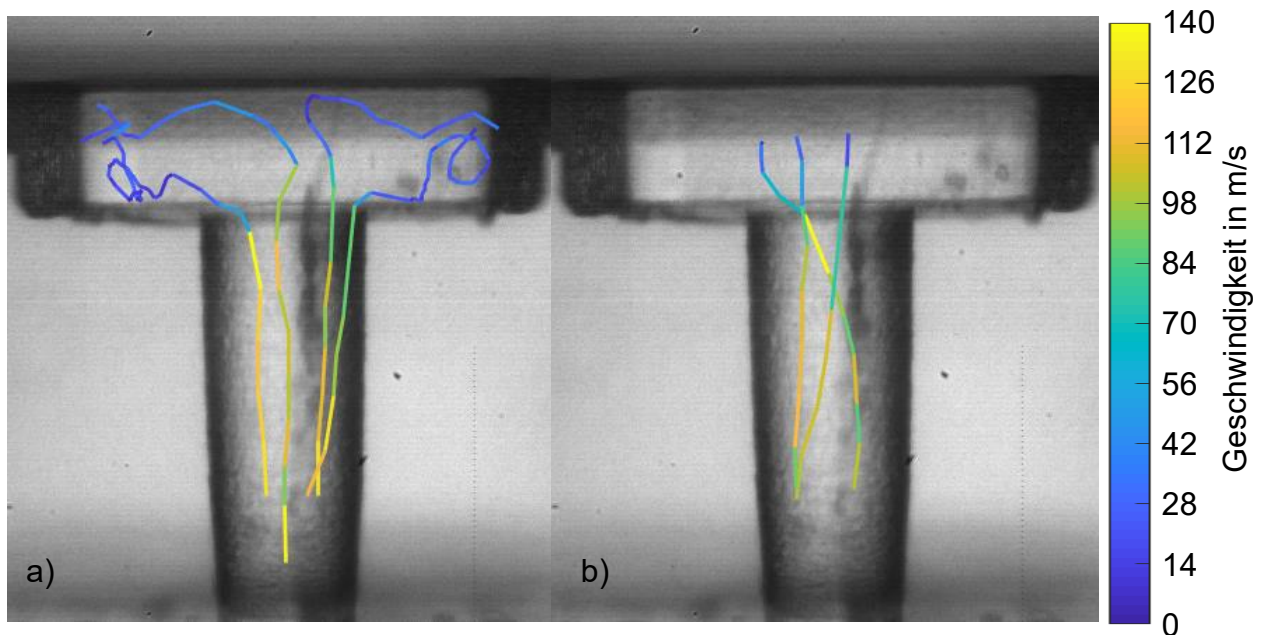


Abbildung 2.6.10: Bahnlinien mit farbkodierten Geschwindigkeiten

2.7 AP 3.3: Shadowgraphy (Mehrloch u. Glas-Düse)

In diesem Arbeitspaket werden die Ergebnisse der Shadowgraphy Messungen an Mehrloch- und Glasdüsen des Projektes gezeigt. Der Fokus liegt hierbei auf den Glasdüsen, Ergebnisse zu den Mehrlochdüsen können Kapitel 2.1 entnommen werden.

Zunächst soll die Auswertestrategie der beiden vorrangig betrachteten Parameter gezeigt werden. In *Abbildung 2.7.1* ist eine einzelne Aufnahme nach der Hintergrundkorrektur gezeigt. Hierbei ist die Düsen Spitze links im Bild und der Rand der detektieren Fläche des Sprays ist rot nachgezeichnet.

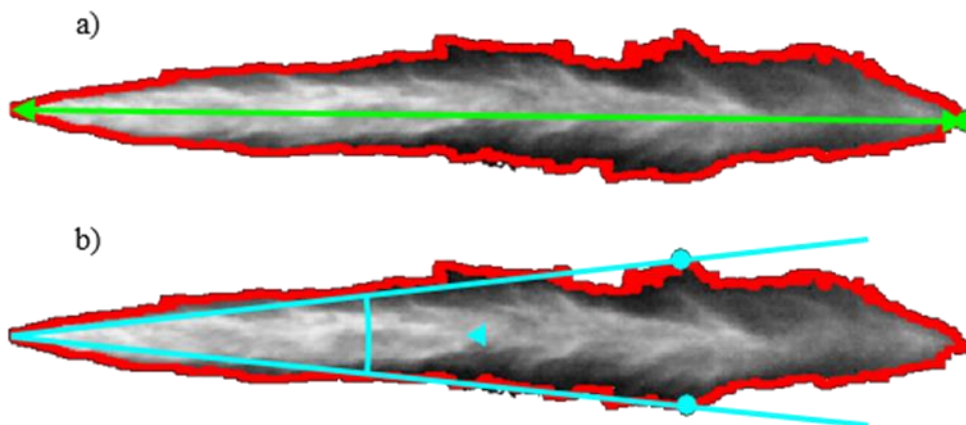


Abbildung 2.7.1: Momentaufnahme eines Sprays mit Darstellung der Eindringtiefe (oben) und des maximalen Kegelwinkels (unten)

Unter a) ist der Randpunkt mit dem größten Abstand von der Düsen Spitze sowie die sich daraus ergebende Eindringtiefe in grün eingezeichnet. Unter b) ist der maximale Kegelwinkel gezeigt. Hierfür wird zunächst eine Linie durch die Düsen Spitze sowie den intensitätskorrigierten Flächenschwerpunkt gelegt (hier durch ein Dreieck markiert). Anhand dieser Linie wird das Spray in eine obere und eine untere Hälfte geteilt. Schließlich werden aus diesen beiden Teilhälften die Randpunkte mit dem größten direkten Abstand zur Geraden durch den Schwerpunkt gefunden. Diese beiden Punkte, hier mit Kreisen gekennzeichnet, spannen zusammen mit der Düsen Spitze den Kegelwinkel auf.

Zunächst soll der Unterschied der Auswerteparameter zwischen zwei Ansichten anhand einer Düse gezeigt werden. Links in *Abbildung 2.7.2* sind Rohbilder des Sprays in zwei Ansichten zu sehen. Die erfasste Sprayfläche ist rot umrandet. Die Rohbilder zeigen das Spray der Glasdüse GN_17_3_23_1 zum Zeitpunkt 1800 μ s nach elektrischem Einspritzbeginn (eSOI). Die beiden Ansichten haben einen Versatz von 90°. Das Spray der in gezeigten Düse zeigt deutliche Unterschiede zwischen den beiden Ansichten. In Ansicht 0° ist das Spray deutlich in der Mitte konzentriert, die Randbereiche bestehen aus wesentlich dünnerem Spray. In der Ansicht 90° dazu ist das Spray deutlich gleichmäßiger verteilt. Die Düse bildet also deutlich eine ovale Spraygeometrie aus. Die Parameter der Eindringtiefe und des maximalen Spraywinkels sind zwischen den beiden Ansichten jedoch sehr ähnlich, die Asymmetrie des Sprays hat auf

Die beiden Konfigurationen unterscheiden sich ausschließlich in ihrem Austrittsdurchmesser. Dieser ist für die Düse 18 größer als der Einlassdurchmesser und für Düse 26 kleiner. Somit hat Düse 18 ein divergentes Düsenloch und Düse 26 ein konvergentes Düsenloch. Wie in der Abbildung zu sehen ist, zeigt GN 18 wesentlich mehr Kavitation im Düsenloch als GN 26. In dieser Geometrievariante führt dies in Kombination mit dem größeren Austrittsdurchmesser zu höheren Eindringtiefen und insgesamt einem kleineren Spraywinkel. Die hierfür verantwortlichen Effekte werden in AP 6.3 und AP 6.4 vom Projektpartner Vitesco Technologies GmbH interpretiert.

Die bisherige Betrachtung geht auf einzelne Düse ein. Im Folgenden soll der Shadowgraphy-Datensatz umfassend ausgewertet werden. Dabei werden Bezüge zwischen der Düsengeometrie und den Sprayparametern hergestellt. Das Ziel dabei ist ein empirisches Modell, dessen Parameter aus den Messungen abgeleitet werden. Allgemein lässt sich die Sprayausbreitung mit dem Impulserhaltungssatz darstellen:

$$\dot{M}_0 = \dot{m}_f \cdot u_0 = C_d \cdot \rho_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot u_0^2 \tag{1}$$

Dabei ist \dot{M}_0 der Impulsfluss durch die Düse, \dot{m}_f der Massenstrom und u_0 die Geschwindigkeit des Kraftstoffes am Düsenaustritt. Der Massenstrom ist dabei abhängig von der Dichte ρ_f des Kraftstoffs, der Geschwindigkeit u_0 sowie der durchströmten Kreisfläche welche mit dem Durchmesser d ausdrücken lässt. Zusätzlich ist der Massenstrom vom dimensionslosen Drosselkoeffizienten der Düse abhängig.

Aus verschiedenen Untersuchungen ist bekannt, dass die Eindringtiefe vornehmlich vom Impulsstrom \dot{M}_0 , der Umgebungsdichte ρ_a sowie dem Zeitpunkt t abhängt. Mit dem Ansatz der Dimensionsanalyse kann die Eindringtiefe S angenähert werden zu:

$$S \propto \rho_a^{-1/4} \cdot \dot{M}_0^{1/4} \cdot t^{1/2} \tag{2}$$

Für den Impulsstrom \dot{M}_0 kann der Ausdruck aus Gl. (1) eingesetzt werden. Aus der Bernoulli-Gleichung kann ein Ausdruck für die Geschwindigkeit gewonnen werden und schließlich kann die Eindringtiefe angenähert werden zu:

$$S \propto \rho_a^{-1/4} \cdot \Delta P^{1/4} \cdot d^{1/2} \cdot t^{1/2} \tag{3}$$

Dabei ist ΔP die Differenz zwischen Kraftstoffdruck und Umgebungsdruck. Der Durchmesser d der Düse ist hierbei der einzige Geometrieparameter. Aus der Forschung zu Dieseldüsen ist bekannt, dass die Geometrie der Düse vor allem einen Einfluss auf den Kegelwinkel θ des Sprays hat. Aus diesen Untersuchungen ergibt sich dieser zu:

$$S \propto \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-1/2} \tag{4}$$

Hauptgegenstand der Untersuchung sind demnach der Kegelwinkel und die Eindringtiefe. Aus den vorhandenen Datensätzen werden 30 Düsen als Grundlage für diese Untersuchung ausgewählt. Die Düsen sollen alle eine Einlochgeometrie aufweisen sowie das Spektrum der Parameter sinnvoll abdecken. Die Grenzen für die Geometrieparameter sowie ihre Definition sind in Tabelle 2.7.1 dargestellt.

Tabelle 2.7.1: Definition der Düsenparameter und das dazugehörige Spektrum

Parameter	Definition	Spektrum in μm
L	Lochlänge	182-460

D _{in}	Durchmesser Düsenloch Einlass	128-203
D _{out}	Durchmesser Düsenloch Auslass	112-189
H	Sackloch Höhe	30-220
H _{off}	Lochabstand vom Einlass	0-105

Im Folgenden sollen die Datensätze für Kegelwinkel und Eindringtiefe diskutiert werden. Hierfür werden Boxplots verwendet, da diese mit ihrer hohen Informationsdichte den besten Einblick in größere Datenmengen geben können. In Abbildung 2.7.4 sind die Boxplots für den Kegelwinkel der Düsen gezeigt. Hierbei wird ausschließlich der Zeitpunkt 800 μ s nach elektrischen Einspritzbeginn (eSOI) gezeigt. Jeder Zeitpunkt beinhaltet 25 einzelne Einspritzevents. Die roten Kreuze markieren einzelne Ausreißer welche außerhalb der 25- und 75 Perzentilen liegen. Um die Aussagekraft des Datensatzes zu verbessern werden diese Ausreißer für die Modellbildung ausgeschlossen.

Die Kegelwinkel der 30 Düsen befinden sich in einem Bereich von 7° bis zu 23°. Deutliche Unterschiede zwischen den Düsen sind erkennbar. Ebenfalls zu sehen ist eine starke Fluktuation dieser Messgröße. Die Interquartil-Abstände nehmen bei bestimmten Düsen einen großen Teil des relevanten Zahlenbereiches ein. Dies ist typisch für den Kegelwinkel, bereits in Abbildung 2.7.2 und Abbildung 2.7.3 sind die hohen Standardabweichungen zu jedem Zeitpunkt ersichtlich.

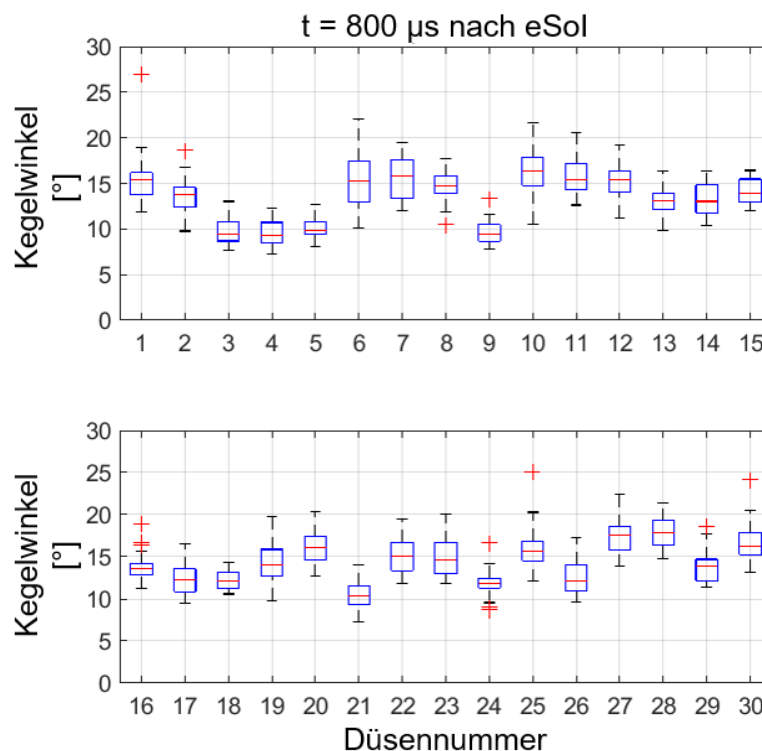


Abbildung 2.7.4: Boxplots der Kegelwinkel der verwendeten 30 Düsen

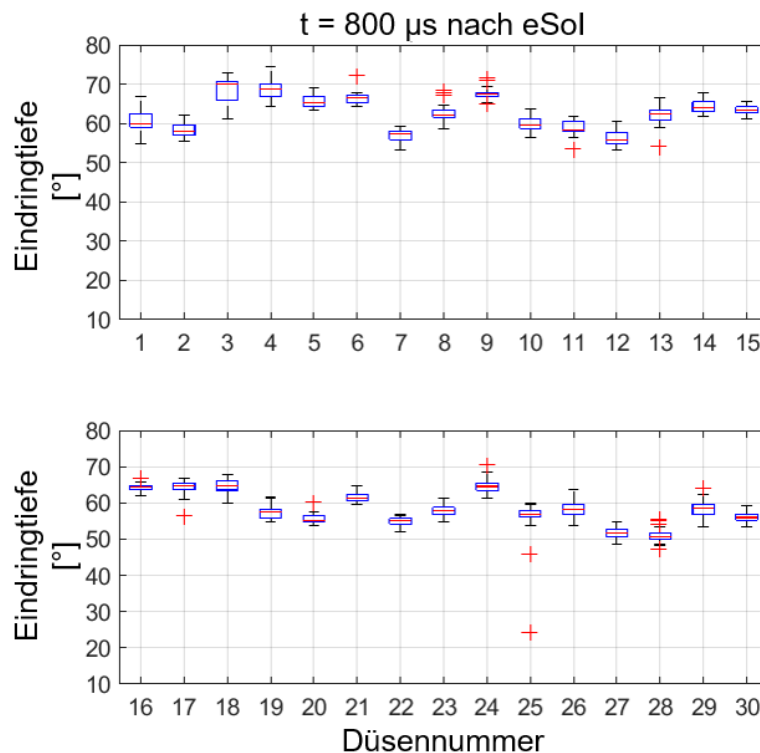


Abbildung 2.7.5: Boxplots der Eindringtiefe der verwendeten 30 Düsen

Der Zusammenhang zwischen Düsengeometrie und turbulenter Strömung im Inneren, welche den Kegelwinkel hauptsächlich beeinflusst, ist äußerst komplex. Anders als bei der Eindringtiefe gibt es kein auf physikalischen Gesetzen beruhendes Modell, welches einen Zusammenhang zwischen Kegelwinkel und Innengeometrie herstellt. Daher wird hier ein lineares Regressionsmodell für den Kegelwinkel aufgestellt. Hierbei sollen die Interaktions- und quadratischen Parameter berücksichtigt werden. Als Signifikanz-Kriterium für einen Parameter wird der p-Wert herangezogen. Hierbei sollen alle Parameter mit einem p-Wert kleiner 0,05 als signifikant gesehen und in das Regressionsmodell einbezogen werden. Dieser Prozess ergibt die in Gleichung (5) verwendeten Parameter mit den Koeffizienten aus Tabelle 2.7.2.

$$\theta = k_0 + k_1 \cdot L + k_2 \cdot H + k_3 \cdot H_{\text{off}} + k_4 \cdot D_{\text{in}} + i_1 \cdot H \cdot H_{\text{off}} + i_2 \cdot L \cdot D_{\text{in}} + i_3 \cdot L \cdot D_{\text{out}} + i_4 \cdot D_{\text{in}} \cdot D_{\text{out}} + q_1 \cdot D_{\text{in}}^2 + q_2 \cdot D_{\text{out}}^2 \quad (5)$$

Tabelle 2.7.2: Koeffizienten des Kegelwinkelmodells

Parameter	Koeffizient	Wert	Einheit
Achsenabschnitt	k_0	14,82	°
L	k_1	-2,08	°
H	k_2	-1,36	°
H_{off}	k_3	-0,93	°
D_{in}	k_4	1,02	°
$H \cdot H_{\text{off}}$	i_1	0,59	°

$L \cdot D_{in}$	i_2	-0,19	°
$L \cdot D_{out}$	i_3	0,89	°
$D_{in} \cdot D_{out}$	i_4	1,54	°
D_{in}^2	q_1	-0,87	°
D_{out}^2	q_2	-1,00	°

In Abbildung 2.7.6 sind die experimentellen Daten des Kegelwinkels den Ergebnissen aus dem Modell gegenübergestellt. Das Modell mit einem hohen R^2 bildet das Experiment mit guter Konfidenz ab.

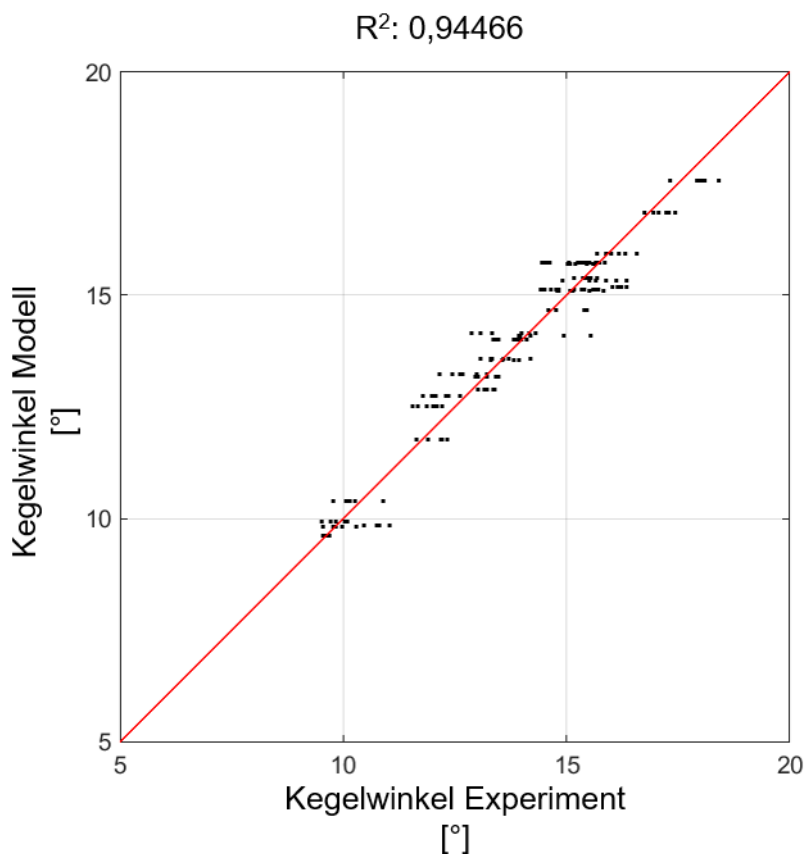


Abbildung 2.7.6: Gegenüberstellung des Kegelwinkel aus den Experimenten mit dem Modell

Mit den Gleichungen (3) und (4) als Grundlage und der Modellbeschreibung für den Kegelwinkel soll im Folgenden Abschnitt mittels nicht linearer Regression das empirische Modell für die Eindringtiefe gezeigt werden. Da Kraftstoffdruck und Umgebungsdichte über den gesamten Datensatz gleichbleibend sind, können diese in eine Konstante k_0 des Modells integriert werden:

$$S(t) = k_0 \cdot D_{out}^a \cdot t^b \cdot \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^c \tag{6}$$

Die Werte der Koeffizienten können Tabelle 2.7.3 entnommen werden. Die Gegenüberstellung der Modellergebnisse mit den experimentellen Daten sind in Abbildung 2.7.7 zu finden.

Tabelle 2.7.3: Definition der Düsenparameter und das dazugehörige Spektrum

Parameter	Koeffizient	Wert
Konstante	k_0	0,317
D_{out}	a	-0,039
t	b	0,731
$\tan(\Theta/2)$	c	-0,316

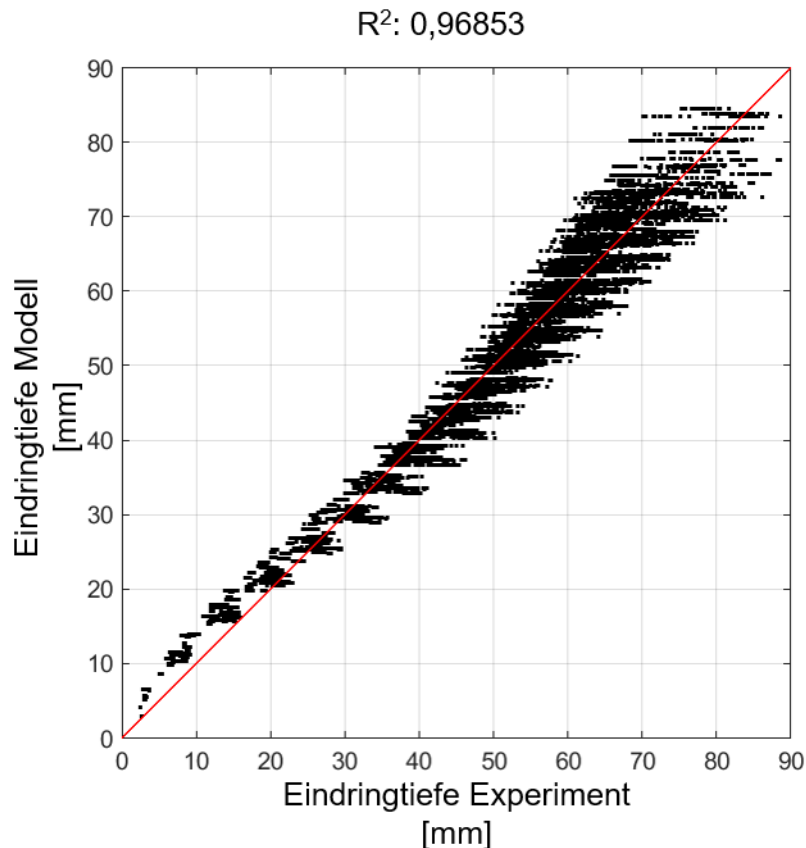


Abbildung 2.7.7: Gegenüberstellung der Eindringtiefe aus den Experimenten mit dem Modell

2.8 AP 3.4: PDA/LDA (Mehrloch u. Glas-Düse)

Für die Untersuchung mit der Phasen-Doppler-Anemometrie bzw. mit der Laser-Doppler-Anemometrie wird das Spray in mehreren Abständen von der Düsen Spitze vermessen. In Abbildung 2.8.1 sind für die Glasdüse GN_17_3_23_1 die verschiedenen Düsenabstände dargestellt. Links sind Shadowgraphy Aufnahmen mit den entsprechenden Messebenen bei 5 mm, 10 mm, 30 mm und 50 mm überlagert. Weiterhin wird entlang der Sprayachse ausgehend von 5 mm Düsenabstand bis zu einem Abstand von 70 mm gemessen. In der Mitte von Abbildung 2.8.1 sind die Messorte für die 30 mm Ebene schematisch dargestellt. Es werden auf den beiden Hauptachsen des Sprays an jeweils 11 Punkten die Geschwindigkeiten und Tropfengrößen gemessen. Rechts in Abbildung 2.8.1 werden die mittleren Geschwindigkeiten während des Sprayvorgangs für beide Hauptachsen gezeigt.

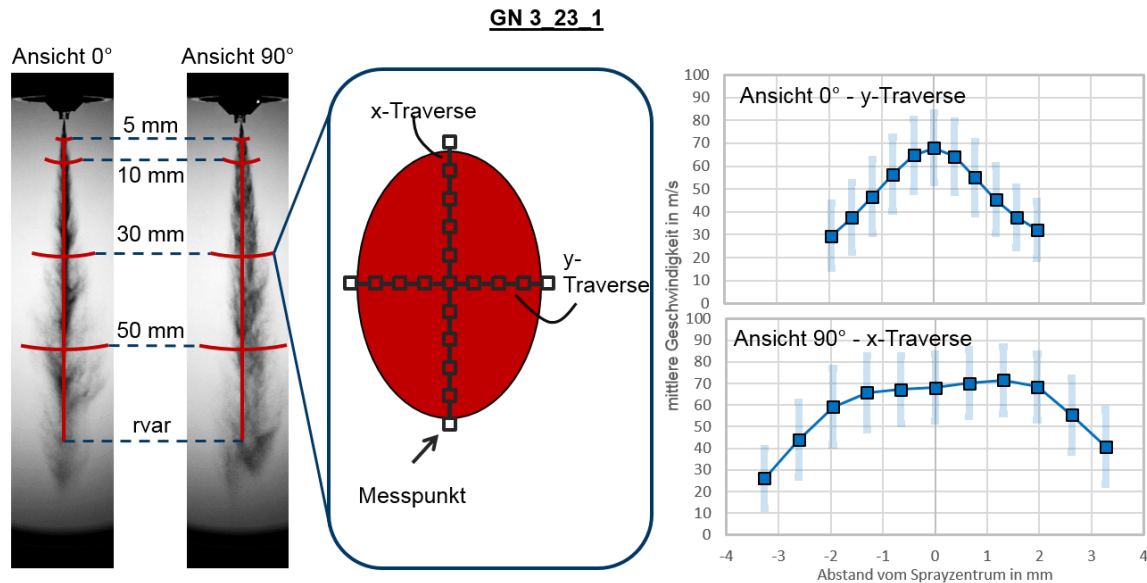


Abbildung 2.8.1: Übersicht LDA/PDA Messungen einer Glasdüse

In Abbildung 2.8.2 sind die Rohdaten für Düse GN_17_3_5_1 in zwei Abständen von der Düse gezeigt. Der Abstand von 5 mm von der Düse ist oben, der Abstand von 30 mm unten in der Abbildung zu sehen. Jeder Rohdaten-Punkt zeigt die Axiale Geschwindigkeitskomponente eines gemessenen Tropfens. Die Mittelwerte sowie die Tropfenanzahl werden über Intervalle der Länge 100 μ s gebildet. Nahe an der Düse ist das Spray dichter als in größeren Entfernungen. Dies hat zur Folge, dass pro Einspritzung wesentlich weniger Tropfen erfasst werden können. Nach der Öffnungsdauer von 3 ms endet die Einspritzung. Mit steigender Entfernung von der Düse erreicht das Spray das Messvolumen immer später. Aus diesem Grund wird für die Mittelwertbildung einer Position, wie sie in Abbildung 2.8.1 zu sehen ist, nur das Hauptsprayevent betrachtet. Dieses beinhaltet alle Tropfen, die nach bis zu 3 ms nach den ersten Tropfen das Messvolumen passieren. In Abbildung 2.8.2 ist das Hauptsprayevent für die beiden Abstände gekennzeichnet.

Weiterführende Darstellungen der Ergebnisse sind im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH zu finden.

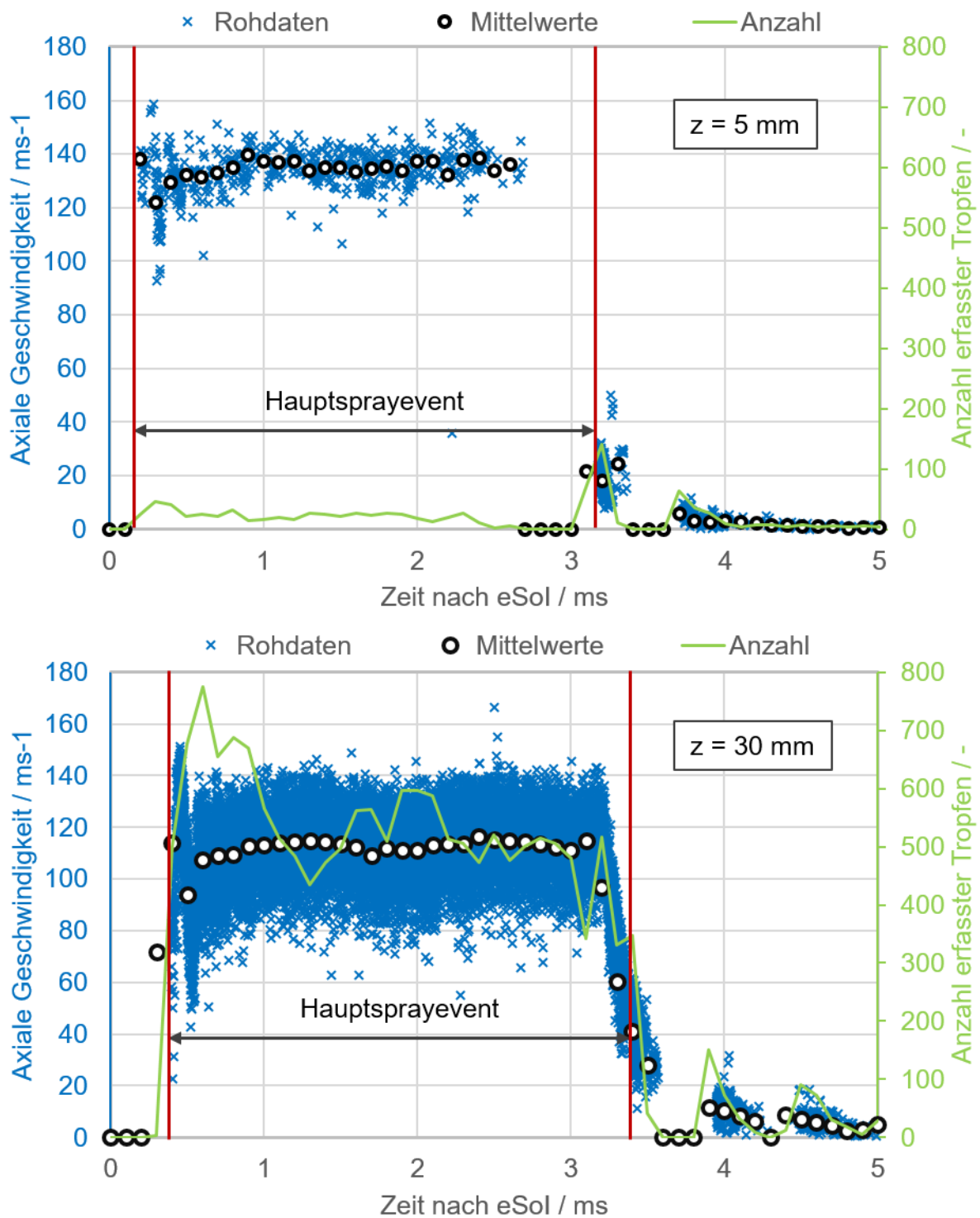


Abbildung 2.8.2: Scatterplots der Rohdaten für die Abstände 5 mm und 30 mm

2.9 AP 3.5: Messungen im Strömungskanal (crossflow)

Im ursprünglichen Projektantrag wurde in Arbeitspaket 3.5 der Einsatz der Laser-Lightsheet Scanning Technik (L2S2) eingeplant. Bei dieser Messtechnik wird ein Laserlichtschnitt in definierten Abständen durch das Spray gerastert. Damit lässt sich eine räumliche Verteilung des Kraftstoffsprays rekonstruieren. Ziel des APs ist die Erfassung der räumlichen Verteilung des Kraftstoffsprays und die Korrelation mit Strahlkraftmessungen. Wie bereits in der Beschreibung des APs ist diese Technik mit sehr hohem Aufwand verbunden.

Die Alternative zur Laser-Lightsheet Scanning Technik ist die dreidimensionale Erfassung über die Injektorrotation mit der SCT Technik. Diese wurde neben dem Prüfstand bei Vitesco auch in die Einspritzkammer am LTT (AP 2.4) integriert. Das Verfahren liefert gleichwertige Ergebnisse bei geringerem Aufwand. Abbildung 2.9.1 zeigt ein Ergebnisbeispiel einer tomographischen Aufnahme des Kraftstoffsprays.

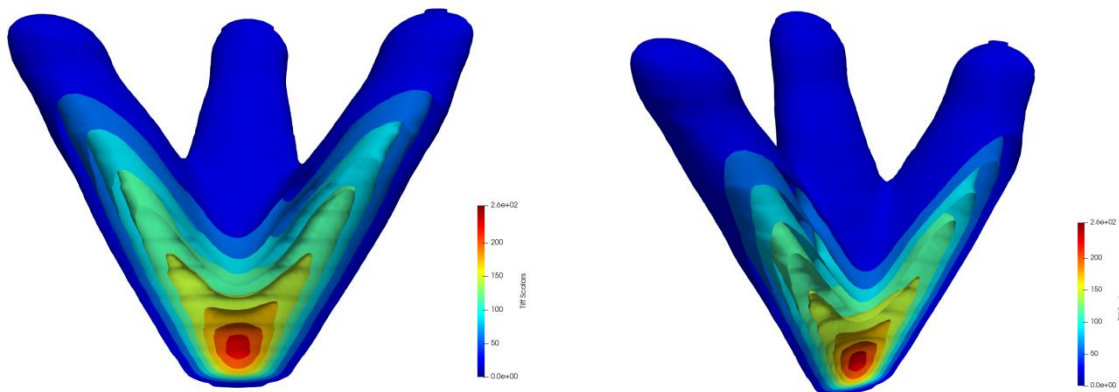


Abbildung 2.9.1: 3D- Schnittansicht des rekonstruierten Sprays

Crossflow

Zur Vervollständigung des Arbeitspakets werden die Injektoren zudem am Verwehungsprüfstand des LTT untersucht. Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einem Radialventilator zur Erzeugung der Luftströmung sowie einem transparenten Kanalabschnitt zur Untersuchung des Kraftstoffsprays. Der Prüfstand erzeugt Querströmungsgeschwindigkeiten bis 50 /m/s. Abbildung 2.9.2 zeigt den schematischen Aufbau des Verwehungsprüfstands. Abbildung 2.9.3 zeigt eine Shadowgraphy Aufnahme des Kraftstoffsprays unter Querströmung.

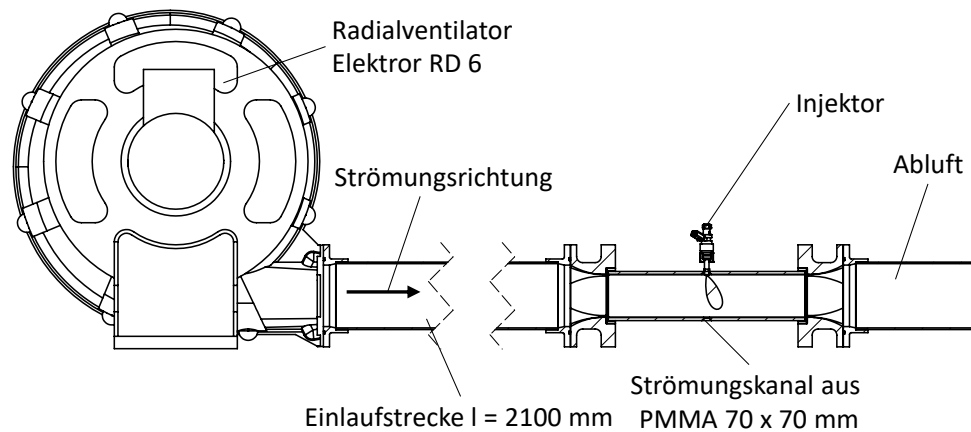


Abbildung 2.9.2: Aufbau des Verwehungs- (Crossflow) Prüfstand am LTT

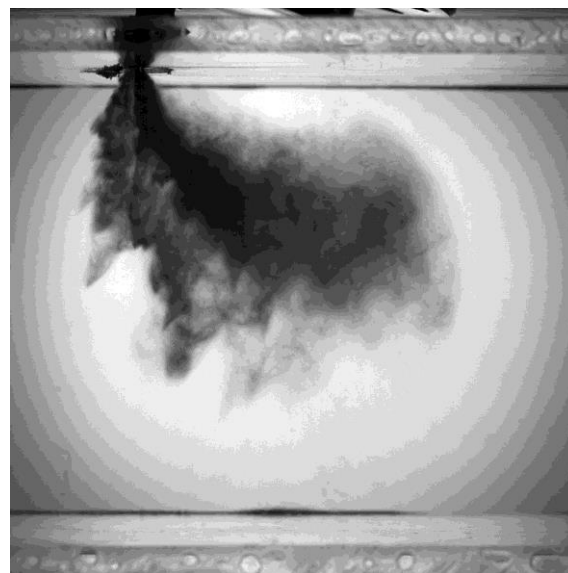


Abbildung 2.9.3 Verwehung eines Kraftstoffsprays bei einer Querströmungsgeschwindigkeit von 45 m/s und einem Kraftstoffdruck von 170 bar

Die auftretende Verwehung lässt sich mit dem Strahlimpuls korrelieren. Abbildung 2.9.4 zeigt Shadowgraphy Aufnahmen eines Einloch-Injektors bei unterschiedlichen Einspritzdrücken und Querströmungsgeschwindigkeiten. Der Strahlimpuls erhöht sich durch die Steigerung des Einspritzdrucks. Dies reduziert die auftretende Verwehung und erhöht die axiale Eindringtiefe.

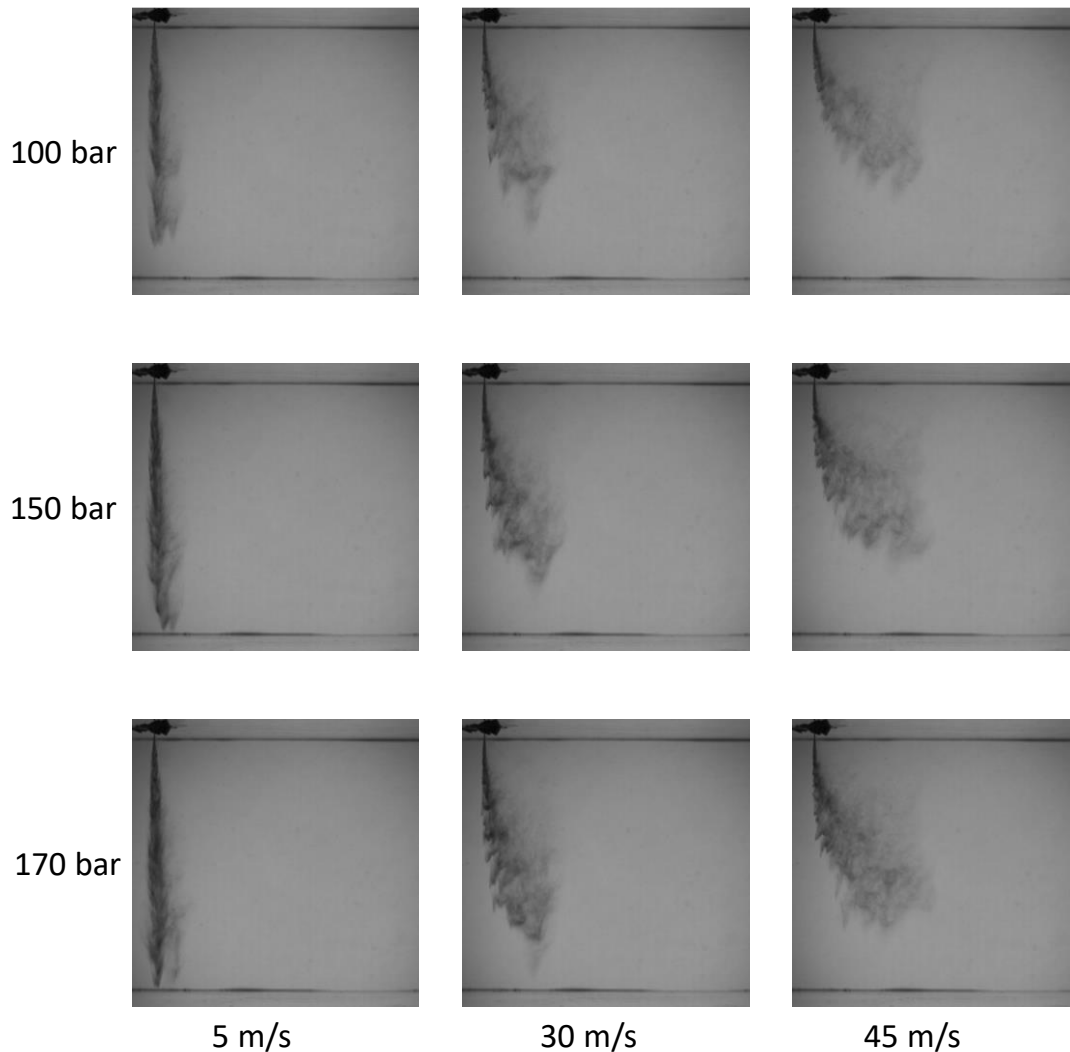


Abbildung 2.9.4: Untersuchung eines Einloch-Injektors am Verwehungsprüfstand

2.10 AP 3.6: HSV LDM (Mehrloch u. Glas-Düse)

Die Hochgeschwindigkeits-Aufnahmen mit einem Long-Distance.Microscope (LDM) für die Erfassung des düsennahen Kegelwinkels dienen der Validierung des Kegelwinkels aus den Fernfeldmessungen. In Abbildung 2.10.1 ist eine Aufnahme aus den Messungen dargestellt. Die erfassten Kavitationsbereiche in der Düse sind rot umrandet. Die Auflösung ist nicht groß genug um die Kavitationsstrukturen ausreichend darzustellen. In grün ist der erfasste Winkel der Nahfeldmessung gezeigt. Dieser Nahfeldkegelwinkel wird in Abbildung 2.10.2 dem aus den Fernfeldmessungen gegenübergestellt. Durch die höhere Auflösung des Nahfeldaufbaus werden hier deutlich größere Winkel gemessen. Fluidstrukturen die im Fernfeldaufbau nicht erfasst werden können gehen in den Winkel des Nahfeldaufbaus mit ein.

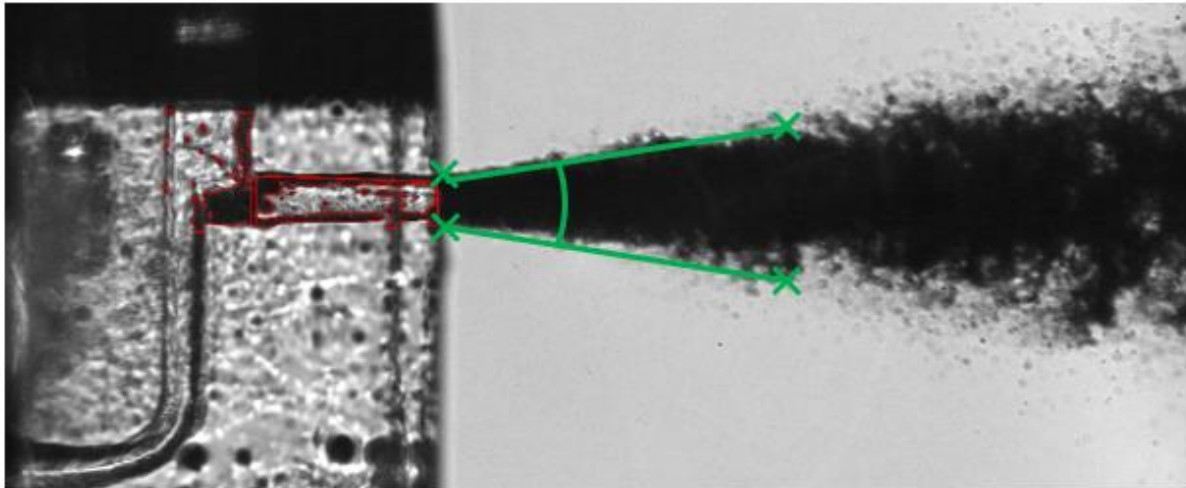


Abbildung 2.10.1: Beispielbild Glasdüse Nahaufnahme

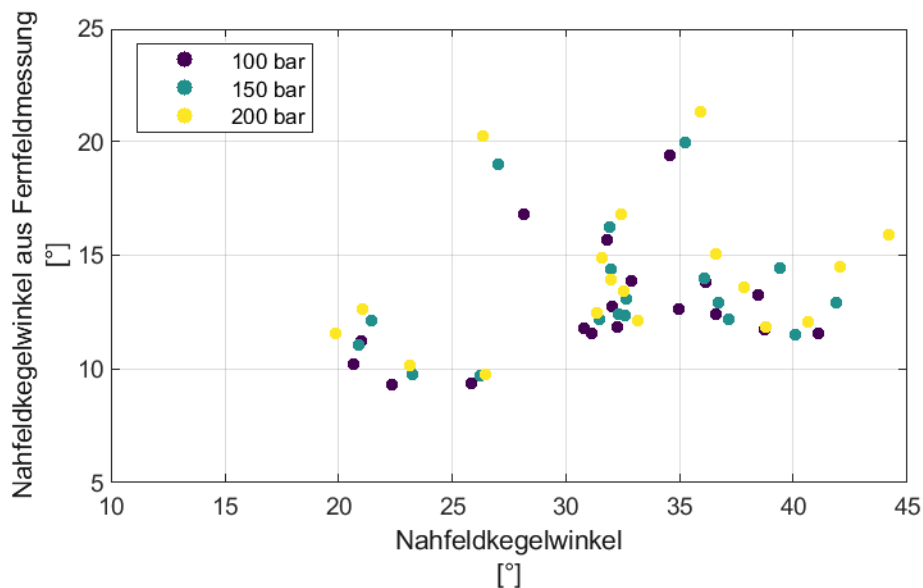


Abbildung 2.10.2: Vergleich der Nahfeldkegelwinkel gemessen mit Nah- und Fernfeldaufbau

Der Nahfeldkegelwinkel aus den Fernfeldmessungen korreliert nur bedingt mit dem Nahfeldkegelwinkel der Nahfeldmessungen. Wesentlich besser korreliert der Nahfeldkegelwinkel mit dem Fernfeldkegelwinkel oder maximalen Kegelwinkel, siehe Abbildung 2.10.3.

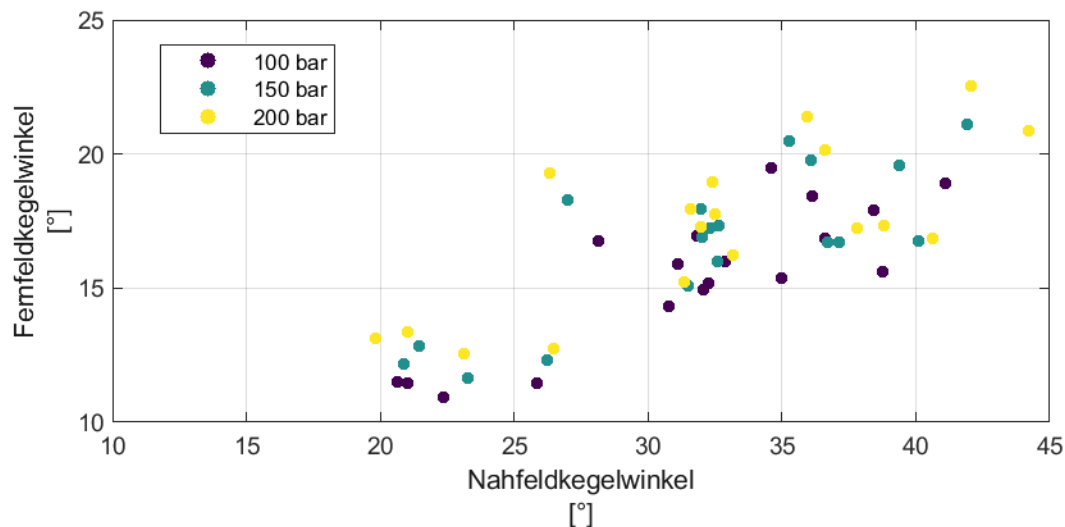


Abbildung 2.10.3 Vergleich des Nahfeldkegelwinkels mit dem Fernfeldkegelwinkel aus dem Fernfeldaufbau

Dies ist auch der Grund für die Wahl des maximalen Kegelwinkels für die Modelluntersuchung aus Arbeitspaket 3.3.

Weitere Auswertungen und Ergebnisse dieser Messtechnik und Korrelationen zu weiteren Messverfahren befinden sich innerhalb dieses Berichts in Abschnitt 2.22.

2.11 AP 4.1: Verfahrensentwicklung (Röntgensimulation)

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.12 AP 4.2: Detektorentwicklung

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.13 AP 4.3: Entwicklung des mobilen Messplatzes

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.14 AP 5.1: Messungen Mehrloch- und Glas-Düse am KIT

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.15 AP 5.2: Röntgen-Messungen Spraygeschwindigkeit und -dichte

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.16 AP 5.3: Spray Röntgen und simultan HSV

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.17 AP 5.4: Phasenkontrastmessungen an Glas-Düse

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Institut für Photonenforschung und Synchrotronstrahlung (IPS) – Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

2.18 AP 6.1: Grundlagen Numerik / Black Box Primärzerfall

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.19 AP 6.2: Analytische Modellbildung Primärzerfall

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.20 AP 6.3: Direkte numerische Simulation Primärzerfall

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.21 AP 6.4: Designrechnungen (Design vs. Penetration)

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.22 AP 3.x - AP 5.x Abgleich mehrerer Arbeitspakete

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

Abgleich HSV LDM (AP 3.6) und Röntgenmessungen (AP 5.x)

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

Abgleich Shadowgraphy (AP 3.3) und Röntgenmessungen (AP 5.x):

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.23 AP 7.1: Charakterisierung der Injektoren am Einzylinder

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.24 AP 7.2: Untersuchungen am Vollmotor

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.25 AP 7.3: Untersuchungen am Fahrzeug

Eingehende Darstellung der Ergebnisse im Abschlussbericht des Verbundpartners Vitesco Technologies GmbH.

2.26 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die vom Lehrstuhl für technische Thermodynamik geleisteten Arbeiten innerhalb der Projektlaufzeit waren alle notwendig und wurden in angemessenem Aufwand erledigt.

2.27 Ausblick auf Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Übergang von der Injektor-Innenströmung zum Spray bestimmt die Sprayausbreitung erheblich. Eine physikalische Beschreibung dieses Vorganges kann für die Weiterentwicklung einer Simulation genutzt werden und somit einen Teil zur Injektorauslegung beizutragen. Die hohe Turbulenz am Düsenaustritt stellt eine Herausforderung für die Messtechnik dar die Daten für eine solche physikalische Beschreibung liefern

kann. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Sprays mit konventionellen optischen Methoden sowie zeit- und orts aufgelöster Röntgenuntersuchungen ermöglichen die erfolgreiche Bearbeitung dieser Aufgabe. Ein neuer mobiler Prüfstand der die simultane Anwendung dieser Methoden erlaubt sowie die Anwendung erprobter Hochgeschwindigkeitsmesstechniken für die Sprayuntersuchung stellt den Beitrag seitens des LTT zu dieser Aufgabe dar.

2.28 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurden relevante Produkte sowie Projekte und Forschungsprojekte (soweit bekannt) recherchiert. (siehe auch Kapitel 1.4).

Neue Erkenntnisse, welche den Projektablauf beeinflusst hätten, sind dem Projektteam während der Laufzeit nicht bekannt geworden.

2.29 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Seitens des LTT gab es folgende Veröffentlichungen teils in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern:

- Bornschlegel, S., Conrad, C., Durst, A., Wang, J., & Wensing, M. (2017): „Multi-hole gasoline direct injection: In-nozzle flow and primary breakup investigated in transparent nozzles and with X-ray“. International Journal of Engine Research, 19(1), 67-77.
- Conrad C., Bornschlegel S., Durst A., Jordan D., Wensing M.(2018) „Influence of the nozzle geometry on in-nozzle cavitation investigated in real-size glass nozzles with shadowgraphy and LIF“ ICLASS 2018, 14th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (Chicago, IL, 22. Juli 2018 - 26. Juli 2018)
- Conrad, C., & Wensing, M. (2020). „Influence of Nozzle Geometry Parameters on the Propagation of Fuel Spray Investigated with Linear and Non-Linear Regression Models.“ SAE Technical Papers, 2020.

Darüber hinaus befinden sich zwei gemeinsame Publikationen von KIT und LTT-Erlangen Planung (a.) zur Kombination von Shadowgraphie und 3D-Röntgenbildgebung unter Verwendung der entwickelten Auswertelgorithmen, und (b.) zum Einfluss der Glasdüsengeometrie auf das Sprayverhalten basierend auf den gemessenen Bildgebungsdatensätzen.

3 Referenzen

- ⁱ Umweltbundesamt; www.umweltbundesamt.de/2Fdaten/2Fverkehr/2Fschadstoff-treibhausgas-emissionen-de
- ⁱⁱ H. Zhang, E. Achleitner, J. Beer, F. Kapphan, W. Klügl, O. Maiwald, G. Rösel, J. Ehrhard, Die Zukunft der Benzin-Motoren, Wiener Motorensymposium 2015
- ⁱⁱⁱ Fath, A., K-U. Munch, and Alfred Leipertz. "Spray Break-Up Process of Diesel Fuel Investigated Close to the Nozzle." *International Journal of Fluid Mechanics Research* 24.1-3 (1997).
- ^{iv} Wu, P-K., R. F. Miranda, and G. M. Faeth. "Effects of initial flow conditions on primary breakup of nonturbulent and turbulent round liquid jets." *Atomization and Sprays* 5.2 (1995).
- ^v Som, S., and Suresh K. Aggarwal. "Effects of primary breakup modeling on spray and combustion characteristics of compression ignition engines." *Combustion and Flame* 157.6 (2010): 1179-1193.
- ^{vi} A. J. Butcher, p. G. Aleiferis, D. Richardson, Development of a real size optical injector nozzle for studies of cavitation, spray formation and flash boiling at conditions relevant to direct-injection spark-ignition engines, *Int. Journal on Engine Research*, 2013
- ^{vii} L. Zigan, Laserdiagnostische und numerische Untersuchungen zum Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf die Sprayausbildung bei der Benzindirekteinspritzung, *Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik* 11.6 (2011)
- ^{viii} M. Gavaises. A. Andriotis, C. Arcoimanis, Complex cavitation structures in Diesel fuel injector nozzles, *Proceedings of Injection Systems for IC Engines*, IMechE Paper C677/019/09, London, S.149-161 (2009)
- ^{ix} B. A. Reid et al 2015 *J. Phys.: Conf. Ser.* 656 012099

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Individueller Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt: PN-Reduktion – Reduktion der Partikelemission von direkteinspritzenden Ottomotoren Teilvorhaben: optische Messungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Michael Wensing Richard Weiß Dr. Alexander Neubauer Chris Conrad	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.01.2021
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Lehrstuhl Für Technische Thermodynamik Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Am Weichselgarten 8, 91058 Erlangen, Deutschland)	9. Ber. Nr. Durchführende Institution keine
	10. Förderkennzeichen 19117011B
	11. Seitenzahl 51
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 9
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 47
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, Hannover, 09.08.2021	
18. Kurzfassung Zentrales Ziel des Projektes ist es einen umweltfreundlichen Antrieb durch Kombination eines effizienten Ottomotors (CO ₂ arm, niedrige Stickoxidemissionen) mit einer Einspritztechnologie zu schaffen, welche die Partikelemissionen bei hohen Motorlasten um 50 % reduziert. Um die Reduktion der Partikelemissionen zu erreichen, muss eine schnelle und vollständige Durchmischung der Frischluft im Brennraum mit dem direkt eingespritzten Kraftstoffspray erfolgen, bei gleichzeitiger Minimierung von Kraftstoffwandaufträgen auf Brennraumwände. Aufgrund der zahlreichen Einflussparameter und deren komplexer Wechselwirkung ist die angestrebte deutliche Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik nur mit massiver Unterstützung durch die Simulation, die z.B. Methoden der Computational Fluid Dynamics (CFD) benutzen, zu erreichen. Es fehlt jedoch als ein entscheidender Verbindungsschritt eine physikalische Beschreibung des Übergangs von der Injektor-Innenströmung zum Spray, das sich am Injektor-Austritt initial formt. Diese Lücke wird durch koordinierte Untersuchung von Kraftstoffsprays im Düsenbereich mit Röntgenstrahlen und optischen Untersuchungen der sich aus den primären Strukturen entwickelnden Sprays geschlossen. Diese Ergebnisse fließen in das Design neuer Düsen ein. Zur Erfüllung der Projektziele wurde kontinuierlich durchströmte Einspritzkammer mit Injektor Rotation und Druck- sowie Temperaturregelung aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Messungen am Gesamtspray und am Düsenaustritt haben dazu beigetragen ein besseres Verständnis des Spray-Vorganges zu erreichen. Durch die optimierten Düsen konnte ohne Anpassung der Applikationsstrategie das Partikelniveau im Betrieb mit 350bar Einspritzdruck um 45% abgesenkt werden. Durch eine Steigerung des Einspritzdruckes auf 500bar beträgt die Verbesserung 57%. Weitere Optimierungen an der Einspritzstrategie haben durchaus das Potential die Emissionen noch weiter zu reduzieren.	
19. Schlagwörter Benzindirekteinspritzung, Primärzerfall, optische Messtechnik, Röntgentechnologie	
20. Verlag -	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Joint project: PN-reduction – reduction of the particulate emissions of direct injection gasoline engines Subproject: optical measurements	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr. Michael Wensing Richard Weiß Dr. Alexander Neubauer Chris Conrad	5. end of project 31.01.20121
	6. publication date
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) Institute for Engineering Thermodynamics Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Am Weichselgarten 8, 91058 Erlangen, Deutschland)	9. originator's report no. 1
	10. reference no. 9I17011B
	11. no. of pages 51
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 9
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 47
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek Hannover, Hannover, 09.08.2021	
18. abstract Main target of the project is to develop a clean propulsion technology by combining an efficient gasoline engine (low CO ₂ , low nitric oxide emissions) with an injection technology which can reduce the emitted particles during high load by -50%. To reduce particulate emissions, the injected fuel needs to be completely mixed with the combustion air. Additionally the liquid fuel wallfilm needs to be minimized. Due to the high complexity and high amount of influence parameters, the main target can only be achieved by using advanced simulation methods, e.g. computational fluid dynamics (CFD). However the needed physical understanding of fuel breakup mechanism, as important link between the internal nozzle flow and the fuel spray, is still missing. This issue is solved by combining optical measurement techniques with x-ray techniques of the primary spray area. The gained knowhow is directly used to develop new injector nozzle designs. To fulfill the project targets a continuously scavenged Injection chamber was developed and built. With the built-in Injector rotation a tomographic view of the spray is possible. Also the temperature and pressure can be regulated to realize realistic experimental conditions. The Measurements close to the nozzle outlet lead to a better understanding of the whole spray process. With the design optimizations out of this joint project, the particulate emissions can be reduced by -45% at 350bar injection pressure (without adapting the application strategy). By using 500bar injection pressure the PN reduction is -57%. Further benefit is expected by adapting the application strategy to the needs of the new nozzle designs.	
19. keywords Gasoline direct injection, Simulation methodology, primary break up, optical measurement techniques, x-ray techniques	
20. publisher	21. price