

Vorwort des Herausgebers

Der schnelle technische Fortschritt im Turbomaschinenbau, der durch extreme technische Forderungen und starken internationalen Wettbewerb geprägt ist, verlangt einen effizienten Austausch und die Diskussion von Fachwissen und Erfahrung zwischen Universitäten und industriellen Partnern. Mit der vorliegenden Reihe haben wir versucht, ein Forum zu schaffen, das neben unseren Publikationen in Fachzeitschriften die aktuellen Forschungsergebnisse des Instituts für Thermische Strömungsmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) einem möglichst großen Kreis von Fachkollegen aus der Wissenschaft und vor allem auch der Praxis zugänglich macht und den Wissenstransfer intensiviert und beschleunigt.

Flugtriebwerke, stationäre Gasturbinen, Turbolader und Verdichter sind im Verbund mit den zugehörigen Anlagen faszinierende Anwendungsbereiche. Es ist nur natürlich, dass die methodischen Lösungsansätze, die neuen Messtechniken, die Laboranlagen auch zur Lösung von Problemstellungen in anderen Gebieten - hier denke ich an Otto- und Dieselmotoren, elektrische Antriebe und zahlreiche weitere Anwendungen - genutzt werden. Die effiziente, umweltfreundliche und zuverlässige Umsetzung von Energie führt zu Fragen der ein- und mehrphasigen Strömung, der Verbrennung und der Schadstoffbildung, des Wärmeübergangs sowie des Verhaltens metallischer und keramischer Materialien und Verbundwerkstoffe. Sie stehen im Mittelpunkt ausgedehnter theoretischer und experimenteller Arbeiten, die im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsprogramme in Kooperation mit Partnern aus Industrie, Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen durchgeführt werden.

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, dass alle Arbeiten durch enge Kooperation innerhalb des Instituts geprägt sind. Nicht ohne Grund ist der Beitrag der Werkstätten, der Technik-, der Rechner- und Verwaltungsabteilungen besonders hervorzuheben. Diplomanden und Hilfsassistenten tragen mit ihren Ideen Wesentliches bei, und natürlich ist es der stets freundschaftlich fordernde wissenschaftliche Austausch zwischen den Forschergruppen des Instituts, der zur gleichbleibend hohen Qualität der Arbeiten entscheidend beiträgt. Dabei sind wir für die Unterstützung unserer Förderer außerordentlich dankbar.

Neben der Bemühung, die Effizienz von Dieselmotoren weiter zu erhöhen, ist zwischenzeitlich die Reduktion von schädlichen Emissionen gleichrangiges Entwicklungsziel. Insbesondere die bei hohen Temperaturen während der Verbrennung entstehenden Stickoxide stehen im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsbemühungen. Zum einen werden Maßnahmen ergriffen, die schon bei der Verbrennung die Entstehung von Stickoxiden mindern. Wo solche Primärmaßnahmen nicht ausreichen, kommen zusätzliche Abgasreinigungssysteme zum Einsatz, die das entstandene Stickoxid wieder in unschädliche Komponenten umwandeln. Als eine sehr effektive Methode hat sich dabei die bereits aus der Kraftwerkstechnik bekannte „selektive katalytische Reduktion“ (SCR) von Stickoxiden mit Hilfe von Ammoniak herauskristallisiert. Da Ammoniak u.a. aufgrund seiner toxischen Eigenschaften in Fahrzeugen nicht mitgeführt werden kann, wird es durch die Eindüsung einer flüssigen Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL) in die heißen Abgase und einer anschließenden Verdunstung und chemischen Reaktion erst kurz vor dem Reduktionskatalysator erzeugt. Die chemische Reaktion zur Bildung von Ammoniak läuft allerdings nur innerhalb eines Fensters erhöhter Temperatur wunschgemäß ab. Wird ein bestimmtes Tempera-

turniveau nicht erreicht, kommt es unter anderem zur Bildung schädlicher Ablagerungen. Diese lassen sich nur mit hohem Aufwand wieder entfernen und führen zu erhöhten Druckverlusten im Abgassystem. Geringe Temperaturen des Abgases liegen bei niedrigen Lastpunkten des Motorbetriebs oder nach dem Kaltstart des Motors vor. Eine weitere Absenkung der Abgastemperatur erfolgt durch die Entspannung der Abgase in der Turbine eines Turboladers. Es ist deshalb naheliegend, die Eindüsung des Harnstoffes nicht nach, sondern vor der Turbine durchzuführen. Dabei ist aber sicherzustellen, dass die Verdunstung des Harnstoffes schon vor dem Eintritt der Abgase in das Turbinenlaufrad des Abgasturboladers abgeschlossen ist, um Erosionsschäden durch Tropfenschlag bzw. Ablagerungsbildung zu vermeiden. Um dieser Forderung gerecht zu werden, ist eine zuverlässige Vorhersage des Verdunstungsverhaltens von HWL bei erhöhten Drücken erforderlich. Allerdings ist über den Verdunstungsprozess von HWL bei den interessierenden Randbedingungen bisher nur wenig bekannt. Im vorliegenden Band der Schriftenreihe befasst sich der Autor folgerichtig mit der experimentellen und numerischen Untersuchung der Verdunstung von Harnstoff-Wasser-Lösungen über einen weiten Temperaturbereich des Abgases und unter erhöhten Umgebungsdrücken.

Das wesentliche Ziel der Untersuchungen bestand in der Generierung einer umfassenden Datenbasis zur Validierung numerischer Verfahren zur Beschreibung der Verdunstung von HWL unter realitätsnahen Randbedingungen. Zu diesem Zweck setzte der Autor eine generische aber einer realen Abgasanlage ähnelnde Versuchsstrecke ein, in der HWL mit Hilfe eines Zweistoffzerstäubers als sehr feines Spray in eine Heißgasströmung eingebracht wurde. Ein enger Sprühwinkel war erforderlich, um einen Wandkontakt der Flüssigkeit zu verhindern und damit der Bildung von Ablagerungen vorzubeugen. Mit Hilfe von bildgebenden optischen Verfahren wurden die Tropfengrößen und -geschwindigkeiten an verschiedenen axialen Positionen der Versuchsanlage gemessen und damit das Verdunstungsverhalten von HWL charakterisiert. Die Herausforderungen, die Tropfeneigenschaften in einem polydispersen verdunstenden Spray bei lokalen Geschwindigkeiten von bis zu 250 m/s zu messen, konnten durch eine sorgfältige Analyse des gesamten optischen Systems und geeignete Auswerte- und Kalibrierverfahren sowie Korrekturmaßnahmen zur Behebung von Abbildungsfehlern erfolgreich gemeistert werden. Dadurch gelang es dem Autor, das Verdunstungsverhalten von HWL im Vergleich zur Verdunstung von reinem Wasser zu erfassen und ein aus einer früheren Arbeit am Institut für Thermische Strömungsmaschine entwickeltes numerisches Verfahren zur Beschreibung des Verdunstungsprozesses auch für den Fall erhöhter Umgebungsdrücke zu validieren.

Vorwort des Autors

Bei einem Kaltstart des Motors sind die Bedingungen zur Einspritzung von Harnstoff-Wasser-Lösung im SCR-System denkbar ungeeignet. Im Gegensatz dazu findet ein wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) hervorragende Arbeitsbedingungen vor. Dies betrifft neben der technischen Ausstattung und Infrastruktur vor allem auch die Mitarbeiter und geschätzten Kollegen, ohne die eine derartige Arbeit nicht entstehen kann.

Aus diesem Grund danke ich der Institutsleitung für das außergewöhnliche wissenschaftliche Umfeld. Insbesondere danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer für das entgegengebrachte Vertrauen, die Möglichkeit diese Arbeit durchführen und die Ergebnisse auf internationalen Konferenzen vorstellen zu können. Zudem danke ich ihm für die Übernahme des Hauptreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer danke ich für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Rainer Koch, meinem direkten Vorgesetzten und Leiter der Forschungsgruppe Verbrennung und Zweiphasenströmung. Mit zahlreichen Diskussionen, seinem großen Erfahrungsschatz und seiner stetigen Unterstützung hat er meine Motivation für die Forschung befeuert und einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet.

Bei den Mitarbeitern der mechanischen und elektrischen Werkstatt sowie den Technikern möchte ich mich für die Fertigung der Versuchsanlagen sowie für die tatkräftige Unterstützung bei der Inbetriebnahme bedanken. Dabei ist der überaus engagierte Einsatz von Uwe Fränkle, Lothar Kowatsch und Michael Lahm besonders hervorzuheben. Den IT-Verantwortlichen und den Sekretariaten möchte ich meinen Dank für die Erledigung einer Vielzahl von organisatorischen Aufgaben aussprechen und hier speziell Petra Geyer für Ihre Unterstützung danken.

Ich danke den wissenschaftlichen Kollegen für die fachliche und moralische Unterstützung während meiner gesamten Zeit am Institut. In diesem Zusammenhang sind mir zahlreiche Kaffeerunden sowie Aktivitäten nach Feierabend in bester Erinnerung. Aus diesem freundlichen und kooperativen Umfeld haben sich auch wertvolle Freundschaften entwickelt. Dabei denke ich insbesondere an meinen langjährigen Bürokollegen Stefanos Melekidis, ohne den es während meiner Doktorandenzeit definitiv weniger ausgezeichneten Kaffee, frühmorgendliches Krafttraining und spannende Diskussionen über Messtechnik gegeben hätte.

Ein großer Dank geht an alle Studenten, die ich kennenlernen und im Rahmen Ihrer Bachelor- oder Masterarbeit, eines Praktikums oder Ihrer Arbeit als studentische Hilfskraft betreuen durfte. Die Zusammenarbeit hat mir viel Freude bereitet und mit Ihrem Engagement haben die Studenten einen wesentlichen Beitrag zu meiner Forschungsarbeit geleistet.

Von ganzem Herzen möchte ich meinen Eltern Petra und Winfried dafür danken, dass sie mir diesen Weg ermöglicht und mich jederzeit dabei unterstützt haben. Meinem Bruder Benjamin danke ich insbesondere für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskripts. Mein abschließender Dank gilt meiner Frau Janina und meinem Sohn Tino für die unendliche Geduld und Liebe, die sie mir während dem Entstehen dieser Arbeit geschenkt haben.

1 Einleitung

Das Umweltbewusstsein der Gesellschaft spielt heutzutage in vielen Regionen der Welt eine entscheidende Rolle. Nach Angaben einer Studie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im Auftrag des Umweltbundesamtes ordnen 68 % der Befragten einer repräsentativen Umfrage im Sommer 2019 den Umwelt- und Klimaschutz als ein sehr wichtiges Problem ein (Rubik et al., 2021). In Deutschland zählt damit der Umwelt- und Klimaschutz, neben vergleichbaren Ergebnissen für Bildung und soziale Gerechtigkeit, zu den drei wichtigsten gesellschaftlichen Herausforderungen.

Aus der gestiegenen Bedeutung von Umwelt- und Klimaschutz resultieren erhöhte Anforderungen an den Verkehrssektor. Der überwiegende Einsatz fossiler Primärenergieträger in diesem Sektor ist nach der International Energy Agency (IEA, 2019) für ca. 25 % des weltweit ausgestoßenen Kohlenstoffdioxids (CO₂) verantwortlich. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der CO₂-Emissionen ist durch die Effizienzsteigerung der Energiewandlung gegeben. Neben den ökologischen Aspekten ergibt sich infolge des reduzierten Kraftstoffverbrauchs gleichzeitig ein ökonomischer Vorteil. Im Vergleich zu anderen Wärmekraftmaschinen erreicht der Dieselmotor in vielen Anwendungen den höchsten thermischen Wirkungsgrad. Insbesondere aufgrund dieses Effizienzvorteils hat sich der Dieselmotor als Antrieb für einen bedeutenden Anteil an Personenkraftwagen (Pkw) und für die große Mehrheit an Nutzkraftwagen (Nkw) und Schiffen durchgesetzt. Zusätzlich finden stationäre Motoren in deutlich geringeren Stückzahlen Anwendung im Stromsektor.

Die zukünftigen Einsatzgebiete von Dieselmotoren werden maßgeblich durch die strategischen Maßnahmen zur Umstellung auf einen nachhaltigen Verkehrssektor bestimmt. In diesem Zusammenhang wird die Kopplung von Strom- und Verkehrssektor eine entscheidende Rolle einnehmen, um die Reduzierung der CO₂-Emissionen im Sinne der europäischen Union (EU, 2011) für das Jahr 2050 zu erreichen. Neben hybriden und vollständig elektrischen Antriebssträngen wird laut der Studie von Schemme et al. (2017) insbesondere „Power-to-fuel“ als Schlüsseltechnologie für einen nachhaltigen Verkehrssektor angesehen. Alternative Kraftstoffe, die aus CO₂ und erneuerbarem Strom produziert werden, zeichnen sich durch eine um Größenordnungen höhere Energiedichte im Vergleich zu modernen Batterien aus. Aus diesem Grund bietet „Power-to-fuel“ eindeutige Vorteile, um auch in Zukunft große Reichweiten im Verkehrssektor zu ermöglichen und die langfristige Speicherung erneuerbarer Energien umzusetzen (Sternner und Stadler, 2017). Der Einsatz alternativer Kraftstoffe in Dieselmotoren kann folglich einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung der CO₂-Emissionen leisten.

Für den umweltbewussten Einsatz von Dieselmotoren sind neben den klimarelevanten auch die gesundheitsschädlichen Emissionen zu berücksichtigen. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Schwefeloxid können nach heutigem Stand der Technik effektiv mittels eines Oxidationskatalysators kontrolliert werden. Im Gegensatz dazu stellen Rußpartikel und Stickoxide (NO_x) die größten Herausforderungen dar, um die gesellschaftliche Akzeptanz des Dieselmotors zu gewährleisten (Tschöke et al., 2018). Die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für Rußpartikel und NO_x wurden in den letzten Jahren für alle relevanten Anwendungsbereiche stetig in Form von Abgasnormen verschärft. Aus diesem Grund erweisen sich die

Abgasnormen als ein entscheidender Innovationstreiber für Antriebsstränge mit einem Dieselmotor. Beispielsweise müssen neu zugelassene Pkw seit 2017 die Anforderungen der „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“ (WLTP) auf dem Rollenprüfstand erfüllen und zusätzlich einen „Real-Driving-Emission“-Test (RDE) auf öffentlichen Straßen absolvieren. Im Vergleich zu vorangegangenen Normen resultiert ein deutlich realitätsnäheres Prüfverfahren, was die Automobilindustrie vor technische Herausforderungen stellt.

Für Lastkraftwagen (Lkw) und Busse gelten bereits seit Einführung der Euro VI-Abgasnorm im Jahr 2013 strenge Grenzwerte im realen Fahrbetrieb. Die hinsichtlich der aktuellen Fahrzeugflotte relevanten Abgasnormen sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Seit der Einführung der Euro III-Abgasnorm im Jahr 2000 wurden die zulässigen Partikel- und NO_x -Emissionen um ungefähr 90 % reduziert. Die gestrichelte Kurve in Abbildung 1.1 repräsentiert die geschätzten Emissionen eines modernen Dieselmotors. Offensichtlich kann der Betriebspunkt des Motors entweder auf niedrige Partikel- oder auf niedrige NO_x -Emissionen abgestimmt werden. Die Einhaltung der aktuellen Grenzwerte ist deshalb mittels rein innermotorischer Maßnahmen, wie beispielsweise der Abgasrückführung, nicht mehr möglich. Aus diesem Grund ist der Einsatz einer Abgasnachbehandlung mithilfe eines Diesel-Partikelfilters (DPF) und Technologien zur Reduzierung der NO_x -Emissionen (De NO_x) zwingend notwendig.

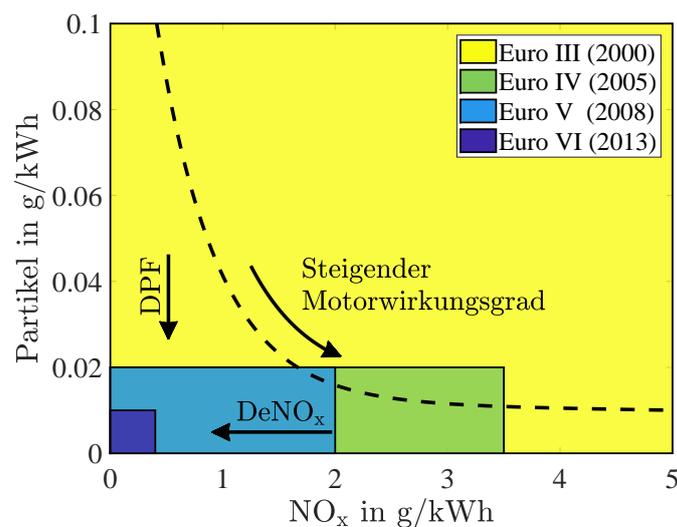


Abbildung 1.1: Übersicht der relevanten Abgasnormen für Lkw und Busse in Anlehnung an Johnson und Joshi (2018).

Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen zur Einhaltung der Abgasnormen wird von Notheis et al. (2017) analysiert. Die Studie zeigt auf, dass die Umweltbelastung durch Rußpartikel und NO_x , die auf den Verkehr zurückgeführt werden kann, in Deutschland seit 1995 deutlich gesunken ist. Dieser Trend wird auch in naher Zukunft anhalten, da die Zulassung eines Großteils der Fahrzeugflotte noch nicht auf den aktuellen Abgasnormen basiert. Prognosen lassen den Schluss zu, dass die Rußpartikelemissionen seit dem flächendeckenden Einsatz von Partikelfiltern unproblematisch und gegenüber dem Abrieb der Reifen und der Bremsen zu vernachlässigen sind (Notheis et al., 2017). Dagegen steht die Reduktion von NO_x -Emissionen weiterhin im Fokus neuer Entwicklungen.

Die innermotorische Abstimmung des Dieselmotors auf hohe NO_x -Emissionen bietet neben geringen Rußpartikelemissionen den Vorteil, dass gleichzeitig der Wirkungsgrad des Motors erhöht werden kann. Damit reduzieren sich der Treibstoffverbrauch und die CO_2 -Emissionen. Die wichtigsten DeNO_x -Technologien sind der NO_x -Speicherkatalysator (NSC, eng. NO_x storage catalyst) und die selektive katalytische Reduktion (SCR, eng. selective catalytic reduction). Nach Johnson und Joshi (2018) können moderne SCR-Systeme über den gesamten Betriebsbereich eine durchschnittliche Reduktion der NO_x -Emissionen von 90 % bis 95 % für Pkw und 98 % für Lkw erreichen. Folglich besteht die Möglichkeit, einen Dieselmotor mittels einer geeigneten Abgasnachbehandlung auf einen hohen Wirkungsgrad optimieren zu können. Insbesondere bei hohen Jahreslaufleistungen werden auf diese Weise sowohl die ökologischen als auch die ökonomischen Vorteile gegenüber alternativen Antriebsarten voll ausgeschöpft. Aus diesem Grund hat sich die SCR-Technologie zur Reduzierung der NO_x -Emissionen für einen weiten Bereich von Fahrzeugen im Nutz- und Personenverkehr durchgesetzt.

Im Bereich der Schifffahrt gelten seit 2016 verschärfte Grenzwerte für NO_x -Emissionen in weitreichenden Küstenregionen von Nordamerika, Kanada und der Karibik. Im Jahr 2021 werden diese Grenzwerte auf die Nord- und Ostsee ausgeweitet (IMO, 2017). Um die neue Gesetzgebung zu erfüllen, ist eine Reduzierung der NO_x -Emissionen um 75 % im Vergleich zur vorangegangenen Norm notwendig. Die SCR stellt eine aussichtsreiche Technologie dar, um auch diese Herausforderung zu bewältigen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die SCR-Technologie eine leistungsstarke Maßnahme ist, um die aktuellen und zukünftigen Abgasnormen für eine Vielzahl von Einsatzgebieten zu erfüllen.

Um das Reduktionsmittel Ammoniak für die SCR bereitzustellen, wird in zahlreichen Anwendungen Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL, Markenname AdBlue®) in das heiße Abgas eingespritzt. Die erfolgreiche Umsetzung der SCR-Technologie ist daher stark von zahlreichen physikalischen und chemischen Prozessen abhängig. Die relevanten Prozesse sind durch die Zerstäubung und Verdunstung von HWL, die Wechselwirkungen des Sprays mit dem turbulenten Abgasstrom, die Tropfen-Wand-Interaktion sowie die Bildung und Zersetzung von Ablagerungen gegeben (Lauer, 2018).

Die größte Herausforderung bei der Entwicklung von SCR-Systemen ist die Vermeidung von Ablagerungen, insbesondere von Melamin-Komplexen, bei gleichzeitiger Gewährleistung optimaler Umwandlungsraten von NO_x im Katalysator (Fang und DaCosta, 2003). Zusätzlich verstärken sich diese Herausforderungen bei geringen Betriebstemperaturen des SCR-Systems, wie sie bei geringer Motorleistung oder nach einem Kaltstart auftreten können. Nach Notheis et al. (2017) und Tschöke et al. (2018) sind technische Lösungen eine Kombination von NSC und SCR oder ein zusätzliches, möglichst motornahes SCR-System. Auf diese Weise kann die Betriebstemperatur des zusätzlichen SCR-Systems erhöht werden, was vorteilhaft für die Funktionalität des Katalysators und die Aufbereitung der HWL ist. Eine weitere Optimierung hinsichtlich der Betriebstemperatur kann durch die Positionierung des SCR-Systems stromauf des Abgasturboladers erreicht werden. Diese neuartige Anordnung ist hauptsächlich im Bereich maritimer Anwendungen Gegenstand der Forschung und wird in den Studien von Kröcher et al. (2014), Christensen et al. (2019) und Foteinos et al. (2019) untersucht.

Analytische Modelle und numerische Vorhersagen sind wichtige Werkzeuge, um die diskutierten Herausforderungen während der Auslegung zukünftiger SCR-Systeme zu bewältigen. Für die Bewertung numerischer Vorhersagen und die Kalibrierung empirischer Modelle sind experimentelle Daten unerlässlich, da die relevanten Prozesse und ihre Wechselwirkungen nicht vollständig verstanden sind. Die separate Validierung der relevanten Teilmodelle ist von primärer Bedeutung, um ein tieferes Verständnis hinsichtlich der Bereitstellung von Ammoniak aus HWL aufzubauen. Außerdem ist eine weitestgehend allgemeingültige Validierung der relevanten Modelle für die Entwicklung zukünftiger SCR-Konzepte von Vorteil, insbesondere wenn sich diese von den heutzutage eingesetzten Konfigurationen deutlich unterscheiden. Geeignete Daten zur Validierung der relevanten Prozesse sind jedoch hinsichtlich der Sprayverdunstung von HWL nicht vorhanden. Daher ist das Hauptziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung einer experimentellen Methodik, die es ermöglicht, neue Einblicke in die Sprayverdunstung von HWL zu gewinnen und Validierungsdaten unter realistischen thermodynamischen Bedingungen zu generieren.

Die Verdunstung des Sprays wird experimentell bei erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen untersucht, um die Einspritzung der HWL sowohl stromauf als auch stromab eines Abgasturboladers beurteilen zu können. Ein generisches Experiment wird aufgebaut, um den Einfluss der Tropfen-Wand-Interaktion und etwaiger Ablagerungen vernachlässigen zu können. Im Gegensatz zu einem anwendungsorientierten Versuchsaufbau kann dadurch der Prozess der Sprayverdunstung nahezu unabhängig von den anderen Prozessen untersucht werden. Darüber hinaus bietet der generische Versuchsaufbau klar definierte Start- und Randbedingungen, was eine effiziente Validierung numerischer Vorhersagen ermöglicht. Aus der Hauptzielsetzung ergeben sich extreme Anforderungen an den erfolgreichen Einsatz einer optischen Messtechnik. Die detaillierte Charakterisierung des Sprays bei Druck- und Temperaturbedingungen von bis zu 0,24 MPa und 773 K erforderte die Weiterentwicklung einer bildgebenden Messtechnik. Der resultierende optische Aufbau mit einer räumlichen Auflösung von $0,75 \mu\text{m}/\text{pixel}$ ermöglicht erstmals die Untersuchung kleiner Tropfen mit einem Durchmesser von nur $4 \mu\text{m}$ und einer Geschwindigkeit von bis zu 250 m/s bei den anspruchsvollen thermodynamischen Bedingungen (Lieber et al., 2019). Die experimentellen Ergebnisse beinhalten sowohl charakteristische Spraydaten als auch Informationen über die turbulente Gasströmung an verschiedenen Positionen stromab der Einspritzdüse. Abschließend wird das Potential der einzigartigen Messdaten anhand der Validierung eines numerischen Modells demonstriert.