Universität Rostock

Traditio et Innovatio

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

AmmoniakMotor

Entwicklung von Simulationswerkzeugen für zukünftige maritime Ammoniak-Verbrennungsmotoren

Vorhaben: Realisierung und Betrieb eines schnelllaufenden NH_3-Forschungsmotors zur Entwicklung und Validierung von Simulationswerkzeugen für NH_3 als Kraftstoff maritimer Antriebssysteme

Förderkennzeichen: 03SX549C

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Till Mante

Dr.-Ing. Sascha Prehn

Laufzeit: 01.04.2021 - 31.12.2023

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Universität Rostock

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens 6

1.1 Aufgabenstellung 6

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 10

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen 11

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand 11

2 Projektergebnisse 18

2.1 Verwendung der Zuwendung / Ergebnisse 18

2.1.1 AP 1 Überprüfung und Abgleich der Einzelanforderungen 18

2.1.2 AP 4 Konzeption, Aufbau, Inbetriebnahme des Versuchsmotorprüfstands und erste Messkampagne 19

2.1.3 AP 5 Abgleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen 42

2.1.4 AP 7 Koordination, Zusammenfassung & Systematisierung der Ergebnisse 48

2.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 52

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten 53

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung im Sinne des Verwertungsplans 53

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 53

2.6 Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen, Tagungsteilnahmen & studentische Arbeiten 54

3 Literaturverzeichnis 57

4 Danksagung 60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufteilung des weltweiten CO_2-Ausstoßes auf die einzelnen Sektoren [1] 6
Abbildung 2: NO_X-Grenzwerte nach IMO-Richtlinien [2] 7
Abbildung 3: Einzylinder-Forschungsmotor-Prüfstand an der Universität Rostock.....10
Abbildung 4: Darstellung der der Informationsflüsse bzw. Interaktion der Projektpartner untereinander 11
Abbildung 5: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte von brennbaren Materialien und Batterien nach [3] 13
Abbildung 6: Brennverfahren mit Ammoniak.....14
Abbildung 7: Ammoniak-Kraftstoffsystem 19
Abbildung 8: System während normaler Abschaltung.....21
Abbildung 9: Motor-Stopp.....22
Abbildung 10: Havarie/Leckage im System, exemplarisch im Schrank 23
Abbildung 11: Umsetzung des Ammoniak-Kraftstoffsystems 24
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Brennverfahrens (NH_3-PFI mit Diesel-DI) 24
Abbildung 13: Umsetzung der Ammoniak-Einbringung.....25
Abbildung 14: Benutzeroberfläche des Motorsteuergeräts mit Diesel- & Ammoniakinjektorsteuerung (Injektor 1 & 2), sowie Ansteuerung des Proportionalventils 26
Abbildung 15: Drehmomentkurve des Einzylinder-Forschungsmotors und gewählter Lastpunkt 29
Abbildung 16: Darstellung des Substitutionsverlaufs und des Einflusses der verschiedenen Variationen auf den NH_3-Schlupf (Zahlen- und Buchstabenkennung für nachfolgende Zuordnung; HE…Haupteinspritzung, ES…Einspritzung, BZ…Bestromungszeitpunkt) 30
Abbildung 17: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei verschiedenen Diesel-Substitutionsraten von 0 – 50 % 31
Abbildung 18: Verschiedene Motorparameter in Abhängigkeit der Diesel-Substitutionsrate .32
Abbildung 19: Darstellung verschiedener Emissionen (in ppm) in Abhängigkeit der Diesel-Substitutionsrate.....33
Abbildung 20: CO_2-Äquivalent bei Diesel-Substitution ohne weitere Optimierungen.....33
Abbildung 21: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei einer Diesel-Substitutionsrate von 40 % für verschiedene HE-Bestromungszeitpunkte 34
Abbildung 22: Darstellung verschiedener Motorparameter bei einer Diesel-Substitutionsrate von 40 % in Abhängigkeit des HE-Bestromungszeitpunktes.....35
Abbildung 23: Darstellung verschiedener Emissionen bei einer Diesel-Substitutionsrate von 40 % in Abhängigkeit des HE-Bestromungszeitpunktes 35
Abbildung 24: Druck- und Heizverläufe, sowie Emissionen beim Verschieben der Dieseleinspritzmenge 36
Abbildung 25: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei verschiedenen Bestromungszeitpunkten einer frühen Diesel-Einspritzung bei einer Substitutionsrate von 60 %.....37
Abbildung 26: Darstellung verschiedener Motorparameter bei einer Diesel-Substitutionsrate von 60 % in Abhängigkeit des Bestromungszeitpunktes einer frühen Einspritzung.....38
Abbildung 27: Darstellung verschiedener Emissionen bei einer Diesel-Substitutionsrate von 60 % in Abhängigkeit des Bestromungszeitpunktes einer frühen Einspritzung 39
Abbildung 28: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei verschiedenen Verbrennungsluftverhältnissen bei einer Substitutionsrate von 70 %.....40
Abbildung 29: Darstellung verschiedener Emissionen bei einer Diesel-Substitutionsrate von 70 % in Abhängigkeit des Verbrennungsluftverhältnisses.....40

Abbildung 30: Abschließende Betrachtung der Roh- und Treibhausgasemissionen des Diesel-Ausgangspunktes (a) und nach den jeweiligen Variationen (c,e,g) 42
Abbildung 31: Drehmomentkurve des Einzylinder-Forschungsmotors und gewählter Lastpunkt 43
Abbildung 32: Druck- und Heizverläufe der Substitutionsreihe mit einer stabilen Verbrennung bis 70 % 45
Abbildung 33: Betriebsparameter und Emissionen der Substitutionsreihe 46
Abbildung 34: Verbrennungskennwerte 47
Abbildung 35: CO_2-Äquivalent der Substitutionsmessreihe mit einer stabilen Verbrennung bis 70 % Ammoniakanteil 47
Abbildung 36: Konzept der Abgasnachbehandlung zur Einhaltung aktueller Grenzwerte 48
Abbildung 37: Durchschnittliche maximale Substitutionsrate über den Betriebsstunden des Motors 50
Abbildung 38: Laufzeitabhängiger Kupfergehalt im Schmieröl durch den Einfluss von Ammoniak 51
Abbildung 39: Eisengehalt im Schmieröl 51

1 Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Aktuelle Situation

Die Welt befindet sich in einem großen Wandel. Neben vielen weiteren Themen steht der anthropogene Klimawandel seit vielen Jahren im Mittelpunkt und stellt die Gesellschaft vor große Herausforderungen. Dies betrifft grundlegend alle emissionsproduzierenden Bereiche und Sektoren mit unterschiedlichen Einflussgraden. Sehr stark involviert ist der Transport- und Energiesektor, wie in Abbildung 1 zu sehen. Gerade in diesen Sektoren spielt der Verbrennungsmotor eine wichtige Rolle und trägt daher maßgeblich zum CO_2-Ausstoß bei.

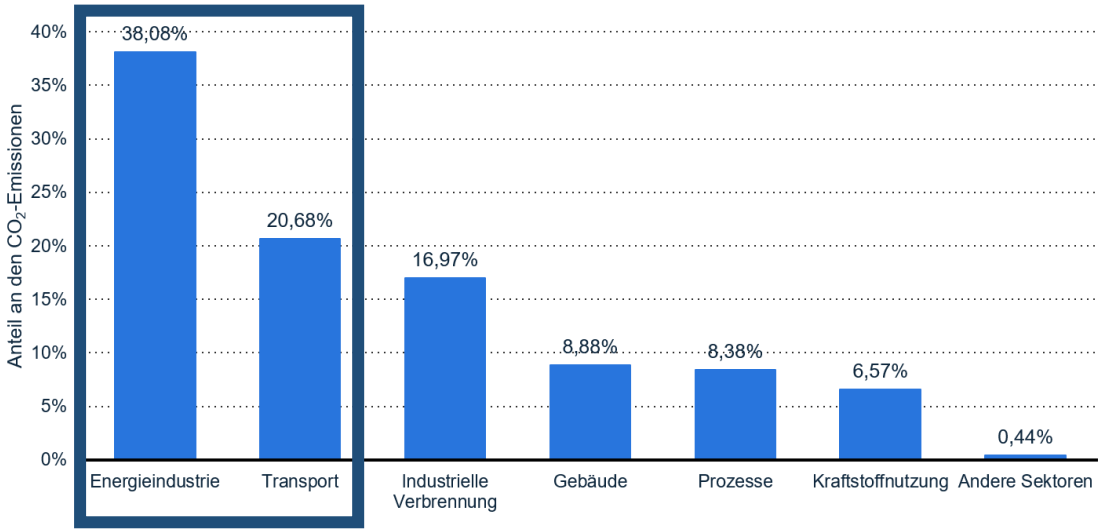

Abbildung 1: Aufteilung des weltweiten CO_2-Ausstoßes auf die einzelnen Sektoren [1]

Durch ein wachsendes Bewusstsein über die Auswirkungen von Abgasen bzw. Emissionen auf das Klima müssen Grenzwerte erheblich reduziert werden um die Erderwärmung drastisch abzumindern. Für die Schifffahrt müssen neben CO_2-Emissionen ebenfalls Stickoxide und Partikelemissionen betrachtet und gesenkt werden. Die strikten Grenzwerte bestärken diese Aussage und sorgen für einen fortlaufenden Bedarf an emissionsreduzierenden Technologien, sowohl als Neuentwicklungen als auch als Umrüstungen. Gerade bei den Stickoxidemissionen und Partikeln zeigen die IMO-Richtlinien die deutliche Herausforderung für die Schifffahrt auf, wie hinsichtlich der NO_X-Emissionen in Abbildung 2 zu sehen ist.

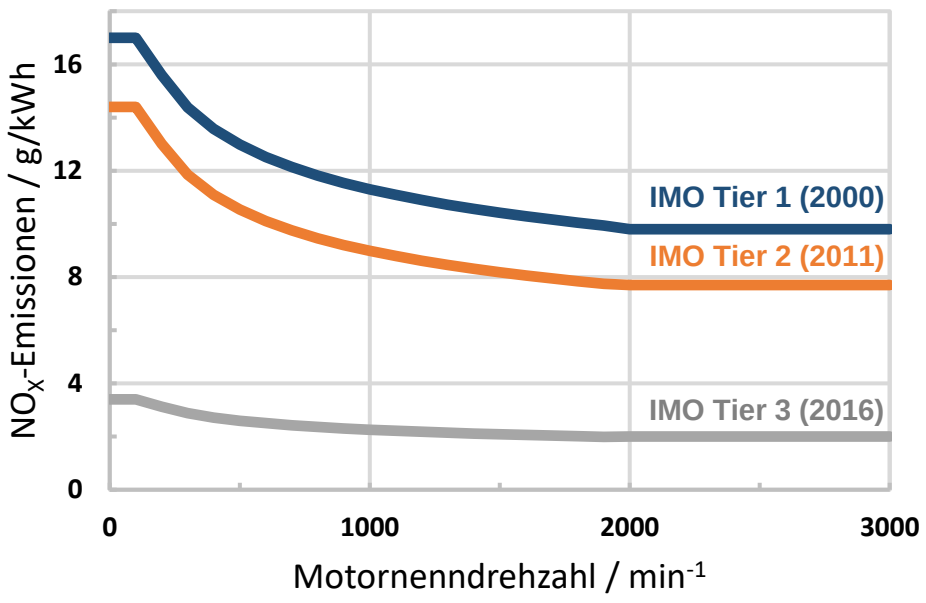

Abbildung 2: NO_X-Grenzwerte nach IMO-Richtlinien [2]

Für die Umsetzung existieren verschiedene Technologiekonzepte mit unterschiedlichen Komplexitätsstufen. Grundlegende Überlegung ist dabei der Wechsel der genutzten Kraftstoffe. Neben dem Ersetzen von konventionellen Kraftstoffen durch vergleichbare Surrogate auf biologischer oder synthetischer Basis kommt auch eine Betrachtung von komplett neuen Stoffen für den Einsatz als Kraftstoff in Frage. Dabei gibt es ebenfalls verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, wie bspw. den alleinigen Einsatz oder die Umsetzung als Dual-Fuel Brennverfahren in Kombination mit einem weiteren alternativen oder auch konventionellen Kraftstoff. Die Anwendung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben den wirtschaftlichen Gesichtspunkten wie Preis, Verfügbarkeit oder Infrastruktur sind weiterhin der Anwendungsfall, die Anforderungen oder auch Themen wie Haltbarkeit, Lagerung, Reichweite etc. ausschlaggebend für die Auswahl. Somit ergeben sich Forschungsaufgaben in viele unterschiedliche Richtungen.

Ein sehr attraktiver Kraftstoff ist Ammoniak. Durch das Fehlen von Kohlenstoffatomen läuft auch die Verbrennung mit Sauerstoff kohlenstofffrei ab und bietet in der Theorie somit eine CO_2-freie Energiegewinnung. Aufgrund herausfordernder Brenneigenschaften und einer hohen Toxizität und Korrosivität wurde Ammoniak bisher noch nicht umfangreich als Kraftstoff in Betracht gezogen, was sich durch die schärferen Grenzwerte und die potenzielle CO_2-Einsparung aber ändert. Durch die Brenneigenschaften wird Ammoniak in vielen Fällen in Kombination mit einem weiteren Kraftstoff verbrannt.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das Projekt AmmoniakMotor mit der Untersuchung eines Ammoniak Diesel Dual-Fuel Brennverfahrens. Durch lange Betriebszeiten von Schiffen wird es notwendig, ältere Motoren umrüstbar und klimaneutraler zu machen. Dazu soll das Projekt ein sog. Retrofit-Potenzial untersuchen. Beim Retrofit geht es darum, einen bestehenden Motor ohne größere Arbeits- und Kostenaufwände umzurüsten und dadurch Einsparungen in Emissionen, Verbrauch o.ä. zu erzielen. Im Projektvorhaben dient deshalb ein Dieselmotor als Basis und wird durch eine gasförmige Ammoniakeinbringung in den Ansaugtrakt des Motors (PFI) erweitert. Dies kann sowohl als kostengünstig eingestuft, als auch mit wenig Arbeitszeit umgesetzt werden im Vergleich zu bspw. direkteinspritzenden Konzepten.

Das Dual-Fuel Verfahren ist zwar eine bekannte Technologie in der Motorenentwicklung, bietet aber für den Einsatz von Ammoniak noch keine verwendbaren Erfahrungswerte. Durch den Einsatz und die Kombination zweier Kraftstoffe steigt zudem die Komplexität und erfordert noch genauere und umfangreichere Untersuchungen im ersten Forschungsschritt.

Um eine spätere Umsetzung und Auslegung an Motoren zu optimieren, wird neben der experimentellen Brennverfahrensuntersuchung im Projekt auch simulativ an Modellen zur Abbildung dieser Technologie gearbeitet.

Projektziele

Das Hauptziel des beantragten Projektes lautet:

Realisierung und Betrieb eines schnelllaufenden NH_3-Forschungsmotors zur Entwicklung und Validierung von Simulationswerkzeugen für NH_3 als Kraftstoff maritimer Antriebssysteme.

Das entwickelte Konzept soll zum einen das Retrofit-Potential aufzeigen, zum anderen sollen die Simulationswerkzeuge bestmögliche Voraussagen und Auslegungsgrundlagen für die Realisierung in der Schifffahrt liefern. Unter dem Aspekt Retrofit lautet das Ziel, den Ammoniakanteil an der Verbrennung so hoch wie möglich zu realisieren, um die CO_2-Reduktion zu maximieren. Dabei soll der Umrüstaufwand so gering bzw. kostengünstig wie möglich gehalten werden. Durch das Dual-Fuel Brennverfahren kann weiterhin nicht vollständig auf den Diesel als Zündkraftstoff verzichtet werden.

Teilprojektziele:

- Konzeption & Aufbau einer Ammoniak-Sicherheitstechnik, NH_3-Kraftstofflager
- Aufbau einer Ammoniakversorgung am Prüfstand
- Adaption des Versuchsträgers hinsichtlich Ammoniakversorgung
- Anpassung des Motorsteuergeräts
- Anpassung der Abgasmesstechnik
- Durchführung erster Messkampagnen und Überwachung der Betriebsstoffe
- Durchführung weiterer Messkampagnen

Das Forschungsprojekt umfasst allgemein Aspekte der Grundlagenforschung mit starkem anwendungsorientiertem Bezug. Hinzu kommt als wesentlicher Faktor eine Kombination leistungsstarker Simulationsmethoden, die einen erheblichen Erkenntnisgewinn sowohl bzgl. Der ablaufenden chemisch-physikalischen Prozesse im Brennraum als auch bzgl. Ihrer Eignung zur Beschleunigung der Entwicklungsprozesse erwarten lassen.

Das Vorhaben nahm in den folgenden Punkten Bezug zu den förderpolitischen Zielen:

1. **Stärkung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Forschungsstellen** durch die Entwicklung effizienter und zuverlässiger Auslegungsmethoden für Nutzung von Ammoniak in Schiffsmotoren
2. **Ausbildung leistungsfähiger Fachkräfte** durch die Projektergebnisse und Veröffentlichungstätigkeit (Know-How Transfer).
3. **Stärkung der beteiligten KMU's**
4. **Beitrag zur Defossilierung des Schiffsverkehrs** und damit zur maritimen Energiewende.

Diese und alle weiteren Ziele sind auch im Maritimen Forschungsprogramm festgehalten. Zum einen unter dem Innovationspfad „Alternative und adaptive Antriebskonzepte" und zum anderen unter dem Innovationspfad „Erschließung alternativer Energiequellen, -wandler und -speicher).

Die Ergebnisse des Projektes könnten in der Motorenindustrie beispielsweise folgende Entwicklungen nach sich ziehen:

- Entwicklung eines Motors mit Ammoniak-Diesel Dual-Fuel Brennverfahren

- Entwicklung einer geeigneten Ammoniak-Infrastruktur zur Umsetzung auf einem Schiff
- Entwicklung geeigneter Abgasnachbehandlungssysteme

Von besonderer Bedeutung für die Universität Rostock war der Aufbau einer modularen Ammoniakversorgung, welche für nachfolgende Projekte weiterhin zur Verfügung steht und durch den modularen Aufbau auch in anderen Prüfständen oder Standorten genutzt werden kann. Durch die gewonnenen Erfahrungen kann der Umgang mit Ammoniak in zukünftigen Projekten weiter verbessert werden. Zudem sind durch das Projekt die erforderlichen Sicherheitseinrichtungen für den Umgang mit Ammoniak vorhanden und stehen ebenfalls für weitere Projekte zur Verfügung. Durch die Erweiterung der Kraftstoffmöglichkeiten an der Universität Rostock profitiert ebenfalls die Ausbildung von Studenten, Fachpersonalen und Ingenieuren. Die Investitionen können sowohl zu Forschungszwecken, als auch zu Lehrzwecken genutzt werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Als motorischer Versuchsträger dient der Einzylinder-Forschungsmotor des Lehrstuhls für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock. Dieser Motor basiert auf einem Vierzylinder-Vollmotor für mobile Arbeitsmaschinen repräsentiert auch kleinere Motoren für den Einsatz in Binnenschiffen.

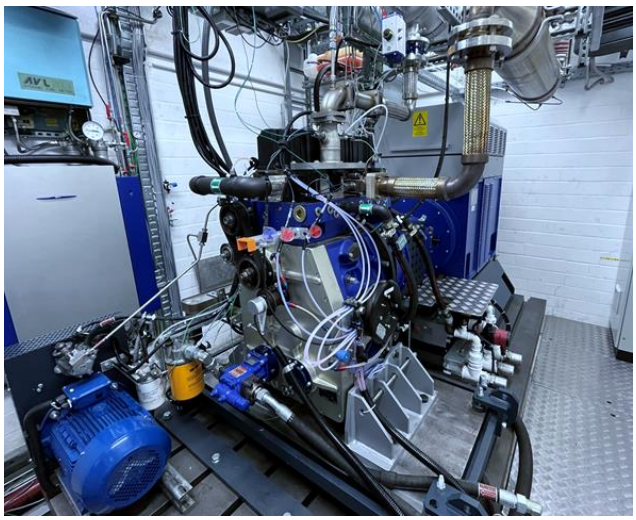

Abbildung 3: Einzylinder-Forschungsmotor-Prüfstand an der Universität Rostock

1 Zylinder, 4-Takt	
Nennleistung	45 kW
Nenndrehzahl	2.300 min^{-1}
Hubraum	1,29 l
Bohrung	110 mm
Hub	136 mm
Verdichtungs-verhältnis	16,4:1
Ansaugluft-system	Extern aufgeladen

Der Prüfstand verfügt weiterhin über eine voll konditionierbare Luft- und Abgasstrecke, um Effekte eines aufgeladenen Betriebs bestmöglich abzubilden. Zur Vor- und Nachbereitung des Prüfstandsbetriebs und der Erhöhung der Messqualität ist sowohl das Kühlwasser-, als auch das Schmierölsystem in seiner Temperatur konditionierbar. Weiterhin verfügt der Prüfstand über ein frei programmierbares Forschungssteuergerät, was in Verbindung mit dem Common-Rail Diesel-Hochdrucksystem ein breites Spektrum an Einstellmöglichkeiten bietet. Zur Messtechnik gehören u.a. eine Abgasmessanlage sowie eine Nieder- und Hochdruckindizierung. Zur Sicherheitstechnik gehört u.a. eine Gaswarnanlage und eine Feuerlöschanlage.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Konsortium, welches sich zur Bearbeitung der komplexen Themenstellung zusammengefunden hat, setzt sich aus den nachfolgenden Industrieunternehmen und Forschungsstellen zusammen:

FVTR GmbH	Ingenieursdienstleister für Verbrennungsmotoren und angewandte Thermodynamik
LOGEsoft	Softwareentwickler detaillierter und schneller Modelle zu Beschreibung von Verbrennung, Emmissionsnachbehandlung, Gas- und Oberflächenkinetik.
LKV, Universität Rostock	Forschungsstelle für Marinemotoren

Nachfolgend sind die wesentlichen Informationsflüssen innerhalb des Konsortiums schematisch dargestellt. Die Struktur wurde dabei so gewählt, dass einzelne Firmen und Institute ihr spezialisiertes Expertenwissen jederzeit untereinander austauschen können.

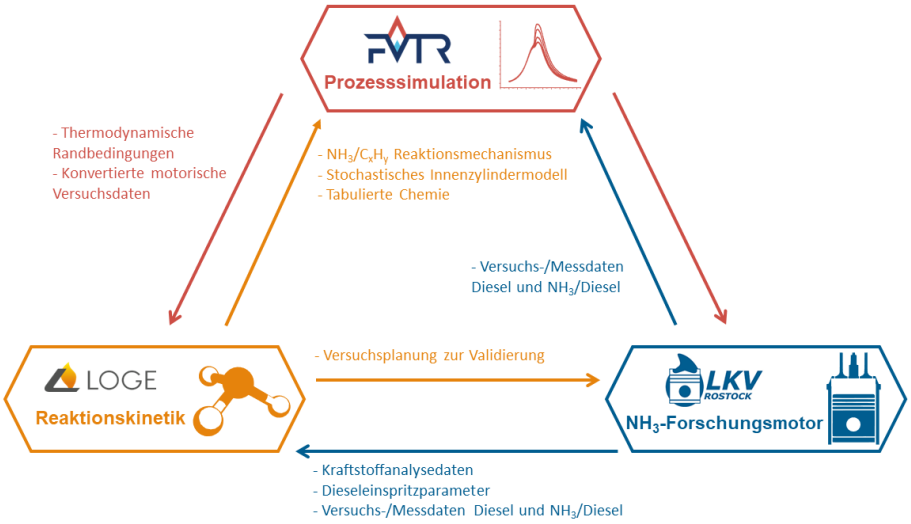

Abbildung 4: Darstellung der der Informationsflüsse bzw. Interaktion der Projektpartner untereinander

Die Koordination unterlag der FVTR GmbH. Die Partner haben sich in einem Zeitabstand von zwei Wochen für Arbeitsbesprechungen. In den Arbeitstreffen fand ein inhaltlicher und organisatorischer Austausch zwischen den Partnern statt. Für die bilaterale Abstimmung zwischen FVTR und LKV sowie LOGE und LKV wurden in der Regel interaktiv (mehrmals wöchentlich, bzw. täglich) Online-Meetings durchgeführt, um die Messdaten sowie Randbedingungen und Ergebnisse der Simulationen zu diskutieren, sodass ein Projektfortschritt und effizientes Abarbeiten der Arbeitspakete möglich waren.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Da Ammoniak als Kraftstoff im Vorfeld des Projekts eher weniger bekannt war, werden nachfolgend die Eigenschaften des Stoffes und mögliche Brennverfahren betrachtet. Weiterhin wird Überblick über die geschichtliche Einordnung gegeben.

Einige relevante Eigenschaften von Ammoniak im Hinblick auf die Anwendung in Verbrennungsmotoren sind in Tabelle 1 aufgeführt. Zu Vergleichszwecken wurden konventionelle Kraftstoffe (Diesel, Benzin) sowie Methan und Wasserstoff hinzugefügt.

Tabelle 1: Eigenschaften verschiedener Kraftstoffe für Verbrennungsmotorkonzepte

	Einheit	**NH_3**	**H_2**	**CH_4**	**Diesel**	**Benzin**
Heizwert	MJ/kg	18,6 [3]	120 [3]	50 [3]	42,5 [4]	44,5 [4]
Stöchiometrisches Luft-Kraftstoff-Verhältnis	kg/kg	6,1 [5]	34,3 [4]	17,2 [4]	14,5 [4]	14,6 [4]
Minimale Selbstzündungstemperatur	°C	650 [3]	520 [3]	630 [3]	180-320 [4]	260-460 [4]
Maximale laminare Flammengeschwindigkeit (T=298K; p=0,1MPa)	m/s	0,07 [3]	2,91 [3]	0,37 [3]	~0,4 [6]	~0,4 [6]
Entflammbarkeitslimit	-	0,63-1,4 [3]	0,1-7,7 [6]	0,5-1,7 [3]	0,75-2 [6]	0,7-2,5 [6]
Adiabatische Flammentemperatur	°C	1800 [3]	2110 [3]	1950 [3]	2327 [4]	2307 [4]

Der niedrigere Heizwert von Ammoniak ist im Vergleich zu anderen Brennstoffen deutlich geringer. Durch die Verwendung kohlenstofffreier Brennstoffe hat Ammoniak gegenüber Wasserstoff jedoch den Vorteil, dass Ammoniak je nach Temperatur bereits bei moderaten Drücken und Temperaturen in flüssiger Form vorliegt (p = 8,57 bar bei T = 20°C [7]). Dies führt zu einer höheren volumetrischen Energiedichte im Vergleich zu hochverdichtetem (700 bar) oder flüssigem Wasserstoff (Abbildung 5). Weiterhin ist es deutlich kostengünstiger lagerbar als Wasserstoff.

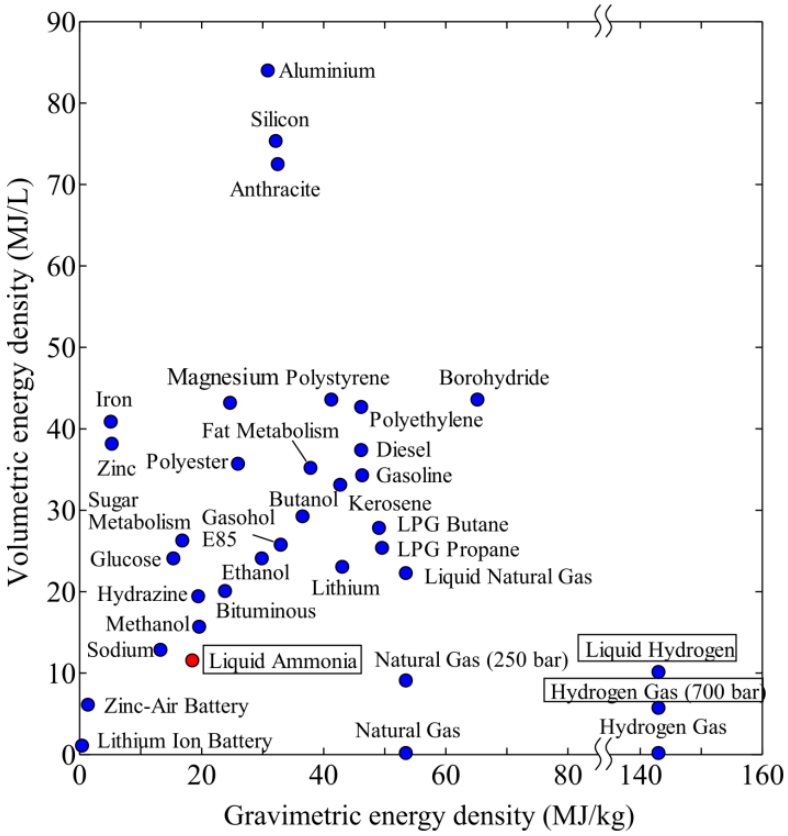

Abbildung 5: Gravimetrische und volumetrische Energiedichte von brennbaren Materialien und Batterien nach [3]

Die größten Herausforderungen bei der Verwendung von Ammoniak als Kraftstoff sind der hohe Wert der Mindest-Selbstentzündungstemperatur und die niedrige laminare Flammengeschwindigkeit. Um eine sichere Zündung und eine niedrige Brenndauer von Ammoniak-Luft-Gemischen zu gewährleisten ist es sinnvoll, Promotor-Kraftstoffe wie Wasserstoff oder Dieselkraftstoff zu verwenden. Ein Überblick über mögliche Verbrennungsprozesse für Verbrennungsmotoren mit Ammoniak als Kraftstoff wird nachfolgend gegeben. Eine weitere Besonderheit von Ammoniak ist seine besonders hohe Verdampfungsenthalpie. Ein schneller Druckabfall, z. B. an Leckagestellen, ist immer mit einem starken Temperaturabfall verbunden, der sich in der Regel in Form von Vereisung äußert.

Für die innermotorische Energieumsetzung von Ammoniak gibt es verschiedene Ansätze. Eine grobe Einteilung verschiedener Verfahren ist in Abbildung 6 dargestellt, wobei das hier gewählte NH_3-PFI/Diesel-DI Brennverfahren gekennzeichnet ist.

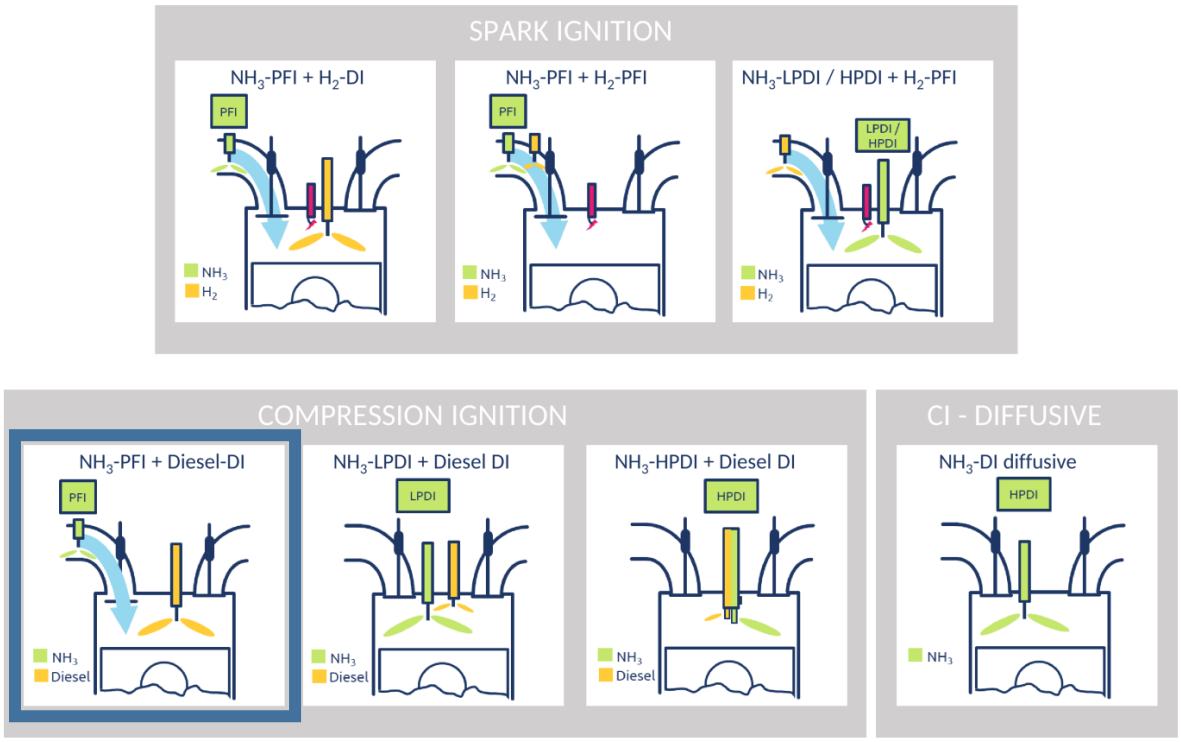

Abbildung 6: Brennverfahren mit Ammoniak

Im Wesentlichen kann in fremdgezündete und kompressionsgezündete Brennverfahren unterschieden werden. Bei beiden Gruppen wird zusätzlich neben dem Ammoniak ein Promoter zugeführt um die Entflammungsphase des Ammoniaks und die Brenngeschwindigkeit des Luft-Kraftstoffgemisches zu verbessern. Eine effiziente Umsetzung von Ammoniak ohne zusätzliche Zündbeschleuniger stellt die Kompressionszündung mit diffusiver Energieumsetzung dar. Wegen der hohen Selbstzündungstemperatur (vgl. Tabelle 1) muss die Verbrennungsluft sehr hoch verdichtet werden, wodurch geometrische Verdichtungsverhältnisse der Motoren von mind. 35:1 notwendig werden [8]. Technisch stellen derart hohe Verdichtungen große Herausforderungen an die mechanische und thermische Belastbarkeit des Motors sowie dessen Schmierung dar.

In der Vergangenheit wurden daher vorrangig Untersuchungen an verschiedenen Brennverfahren mit Promoter-Kraftstoffen entsprechend der Abbildung 6 durchgeführt. Theoretische und praktische Untersuchungen mithilfe eines Laborbrenners zur Steigerung der Brenngeschwindigkeit von Ammoniak-Luft-Gemischen wurde ca. 1945 von Tanner durchgeführt [9].

Für die vorgemischte Umsetzung von Ammoniak mittels Zündkerze wurde 1966 der Einfluss der Zündenergie auf die Ammoniak-Umsetzung an SI-Motoren durch Cornelius et al. untersucht [10]. Der Kraftstoff wurde gasförmig in den Luftpfad eines V8-Motors mit 3,5 l Hubraum dosiert. Analysiert wurde der Einfluss von Zündsystemen mit erhöhter Zündspannung sowie einer Doppelzündung.

1988 wurden durch Mozafari-Varnusfadrani [11]. Versuche an einem Einzylindermotor (Bohrung: 76,2 mm, Hub: 111,1 mm) mit variablem Verdichtungsverhältnis durchgeführt. Für Ammoniak wurde eine Verdichtung von 15:1 eingestellt. Durch die Verdampfung des Ammoniaks und der daraus resultierenden Abkühlung des Luft-Ammoniak-Gemisches konnte das Gemisch nur schwer im Brennraum entzündet werden.

Ebenfalls wurden an einem kleinem SI-Motor von Mørch et al. Versuche mit Ammoniak in Kombination mit Wasserstoff durchgeführt [12] Für einen stabilen Verbrennungsprozess musste ein Wasserstoffanteil von mind. 5 % (volumetrisch) zugeführt werden.

Die Kombination aus Wasserstoff und Ammoniak wurde ebenfalls von Frigo et al untersucht. Dabei wurden grundlegende Versuche an einem Einzylindermotor mit 0,5 l Hubraum durchgeführt [13]. Die energetische Zumischung von Wasserstoff musste im Vollastbetrieb auf 7 % angehoben werden, um den Variationskoeffizient des indizierten Mitteldrucks auf 4,5 % zu begrenzen. Für den Teillastbetrieb musste der Wasserstoffanteil auf 10-12 % für einen stabilen Motorbetrieb erhöht werden.

Von Youngmin wurden Experimente an einem Dreizylinder- Pkw-Motor durchgeführt [14]. Bei dem Versuchsaufbau wurden Ammoniak und Benzin über separate Injektoren in das Saugrohr des Motors dosiert. Am Prüfstand konnte der Ammoniakanteil bei 1440 1/min bei Volllast auf bis zu 80 % (energetisch) erhöht werden.

Ryu et al. untersuchten den Einfluss der Direkteinblasung von gasförmigem Ammoniak in den Brennraum eines Einzylinder-Forschungsmotors mit Funkenzündung [15]. Als Zündpromoter wurde Benzin verwendet, welches in das Saugrohr des Motors eingebracht wurde. Im Ergebnis konnten leicht niedrigere spezifische Verbräuche im Betrieb mit NH_3/Benzin erreicht werden. NO_X und NH_3-Emissionen waren gegenüber dem reinen Benzinbetrieb erhöht. In Bezug auf die CO-Emission konnte eine Verringerung gegenüber. dem Benzinbetrieb erreicht werden.

Youngmin et al. hat neben den Experimenten an einem SI-Motor mit Ammoniak-Benzin-Gemischen auch Untersuchungen an einem CR-Diesel PKW-Motor durchgeführt [16]. Dabei wurde das Ammoniak über einen Injektor in das Saugrohr dosiert. Der Diesel wurde über das am Motor installierte CR-System direkt in den Brennraum eingebracht. Der Anteil an Ammoniak lag bei bis zu 38 % (energetisch).

In den Experimenten von Nadimi et. al wurden an einem Dieselmotor mit 86 mm Bohrung Substitutionsraten des Dieselkraftstoffes von bis zu 84 % (energetisch) erreicht [17]. Dabei lag der COV des indizierten Mitteldrucks bei über 6 %. Mit zunehmendem Ammoniakanteil des Gesamtkraftstoffgemisches stiegen die NH_3-Emissionen deutlich an. Die Konzentration von Lachgas (N_2O) lag über die Steigerung des Ammoniakanteils im zugeführten Kraftstoff unterhalb von 100 ppm.

Der Dual-Fuel Betrieb mit Dieselmethylether (DME) und Ammoniak wurde von Zacharakis et al. an einem Benzin DI-motor mit 0,3 l Hubvolumen untersucht [18]. Für die Experimente wurden Ammoniak und DME in einem Tank gemischt und mittels Hochdruckpumpe über einen Injektor direkt in den Brennraum des Motors eingebracht. Bei einem Kraftstoffgemisch von 40 %/60 % (DME/NH_3) wurden im Teillastbetrieb hohe zyklische Schwankungen festgestellt, die mit zunehmender Last geringer wurden. Der Betrieb mit höheren Ammoniakanteilen wurde durch die hohe Verdampfungsenthalpie und damit die starke Abkühlung im Brennraum begrenzt.

Den Einfluss von NH_3-DME Gemischen auf den Verbrennungsprozess eines CI-Motors mit 0,3 l Hubraum wurde auch von Gross untersucht [19]. In der Arbeit wurde der Fokus auf die Einfacheinspritzung im Vergleich zur Mehrfacheinspritzung des Kraftstoffes gelegt. Zur Verringerung des langen Zündverzuges von Ammoniak wurde eine Pilotspritzung vor der Haupteinspritzung eingesetzt. Für ein festes Verhältnis der beiden Kraftstoffe (20 % NH_3/ 80 % DME) wurde der Einfluss des Abstandes zwischen Piloteinspritzung und Haupteinspritzung untersucht. Es wurde herausgefunden, dass die Piloteinspritzung nicht weiter als 35°KWvOT

eingebracht werden sollte, damit der Abstand zwischen der Energieumsetzung der Pilotmenge und der Haupteinspritzmenge des Kraftstoffes nicht zu groß wurde.

Auch Niki et. al haben den Einfluss einer frühen Voreinspritzung von Diesel [20] und einer geteilten Dieseleinspritzung [21] untersucht. Hier konnte ein positiver Effekt auf die Menge an unverbranntem NH_3 im Abgas aufgezeigt werden. Eine weitere Minderung des Ammoniaks im Abgas konnte durch eine Nacheinspritzung von Diesel erzielt werden.

Der Einfluss einer sehr frühen Piloteinspritzung mit zweiter Einspritzung von Dieselkraftstoff in ein vorgemischtes Ammoniak-Luftgemisch wurde auch von Mante untersucht ([22], [23]). Diese Untersuchungen fanden im Rahmen dieses Forschungsprojektes statt. Es konnte an einem Einzylinder-Forschungsmotor mit 1,29 l Hubraum gezeigt werden, dass eine sehr frühe Piloteinspritzung eine deutliche Verbesserung der Energieumsetzung des Ammoniak-Luftgemisches erzielt und damit das Potenzial besteht den Energieanteil von Ammoniak im Kraftstoffgemisch deutlich zu erhöhen.

Untersuchungen zur Ammoniak-Direkteinspritzung in Verbindung mit einer Diesel-Piloteinspritzung wurden von Stenzel et. al an einem Einzylinder-Forschungsmotor mit 5,17 l Hubraum durchgeführt [24]. Ammoniak wird hier mit bis zu 500 bar mittels Mehrnadelinjektor in den Brennraum eingebracht. Mit dem gleichen Einspritzsystem wurden von Frankl et al. Analysen an einem optisch zugänglichen Motor (Derivat eines MTU 4000 Dieselmotors) durchgeführt [25].

Auch Coppo et. al haben Brennverfahrensuntersuchungen an einem Einzylinder-Forschungsmotor mit 15,7 l Hubraum vorgenommen [26]. Bei diesem Versuchsaufbau wurden zwei Hochdruck-Injektoren für Ammoniak und Diesel eingesetzt. Bei einem BMEP von 20 bar bei 750 1/min wurde ein Motorbetrieb mit einem Kraftstoffverhältnis von 40 % Ammoniak zu 60 % Diesel dargestellt.

An einem schnelllaufenden Einzylindermotor mit 5,2 l Hubraum wurden durch Wermuth [27]. Untersuchungen zu Ammoniak/Diesel- und Ammoniak/Wasserstoff-Brennverfahren durchgeführt. Der Fokus lag auf der Steigerung der Substitutionsrate, den Betriebs- und Leistungsparametern sowie der Motorabgasemissionen im Dual-Fuel-Betrieb.

Scharl et al. [28] untersuchten unter der Verwendung einer Rapid-Compression-Expansion-Machine (RCEM) die Ammoniak/Diesel-Direkteinspritzung, um detaillierte Einflüsse von Schlüsselparametern der Verbrennung, wie z. B. dem Sprayinteraktionswinkel und dem relativen Einspritzzeitpunkt, aufzuzeigen. Trotz beobachteter Effekte wie dem Verlöschen der Dieselflamme durch das Ammoniak, wenn die Zeit zwischen den Einspritzungen zu kurz war, wurde bei den eingestellten Betriebspunkten ein energetischer Ammoniakgehalt von bis zu 96,8 % gemessen.

Angestrebter Fortschritt im Vergleich zum Stand der Wissenschaft und Technik

Mit diesem Projekt sollen in erster Linie Simulationswerkzeuge entstehen, mit deren Hilfe die Auslegung von Diesel-Ammoniak-Brennverfahren erleichtert und unterstützt wird. Dazu gehört neben der Modellerstellung auch die Untersuchung des Brennverfahrens am Prüfstandmotor.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist die Anzahl von Untersuchungen zu diesem spezifischen Brennverfahren nicht nennenswert hoch, sodass auf keine große Datenbank an verfügbaren Messdaten oder Erfahrungswerten zurückgegriffen werden kann. Dieses Projekt dient dazu, diesen Bereich der Forschung voranzutreiben und Erkenntnisse zum Ammoniak-Diesel-Dual-Fuel Brennverfahren zu gewinnen, mit denen im Anschluss weitergearbeitet

werden kann. Es soll gezeigt werden, dass dieses Brennverfahren in der Praxis umsetzbar ist und zeitgleich ein Potential zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen liefert. Da es sich in diesem Projekt um Grundlagenuntersuchungen handelt, kann hier keine Handlungsanweisung für die Praxisumsetzung entstehen. Aus den Eigenschaften von Ammoniak gehen weitere benötigte tiefgreifende Vorbereitungsschritte hervor, bevor ein solches Brennverfahren in der Praxis eingesetzt werden kann. Nichtsdestotrotz sollen die Ergebnisse dieses Projektes eine gewisse Richtung aufzeigen, denn gerade unter dem Gesichtspunkt eines Retrofit-Konzeptes kann dieses Brennverfahren ein großes Potenzial liefern.

Aus dem Prüfstandbetrieb und den generierten Messdaten geht die Bildung von Simulationswerkzeugen hervor. Mithilfe dieser Werkzeuge soll zukünftig die Brennverfahrensuntersuchung schneller, weiträumiger und auch kostengünstiger verlaufen.

Zusammenfassend sind die angestrebten Fortschritte:

- Umsetzung einer Ammoniakkraftstoffversorgung für den Betrieb eines Verbrennungsmotors mit Ammoniak als Kraftstoff und einer gasförmigen Niederdruckeinbringung dessen
- Untersuchung eines Ammoniak-Diesel Dual-Fuel Brennverfahrens mit hohen Diesel-Substitutionsraten an einem Einzylinder-Forschungsmotors
- Entwicklung von Simulationsmodellen zur Abbildung des Brennverfahrens und des Prüfstandsaufbaus zur Abbildung und Vorhersage der Verbrennung und der Emissionen
- Abschätzung des Retrofit-Potenzials und Bewertung der Umsetzbarkeit und des Einsatzes in Binnenschiffen

2 Projektergebnisse

2.1 Verwendung der Zuwendung / Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen einer Auflistung der jeweiligen Arbeitspakete, in welche der LKV integriert war.

2.1.1 AP 1 Überprüfung und Abgleich der Einzelanforderungen

AP 1.2 Konkretisierung: Sicherheitskonzept, Lieferung & Handhabung Ammoniak

Bevor Bauteile für den Prüfstand beschafft wurden, musste ein Sicherheitskonzept für den Umgang mit Ammoniak erstellt werden. Nachfolgend wird sowohl die Lieferung & Handhabung, als auch das Sicherheitskonzept für die Verwendung im Prüfstand aufgezeigt.

Grundsätzlich wird das verwendete Ammoniak aus Druckgasflaschen flüssig entnommen (40 kg Inhalt, ca. 8 bar), wodurch ein sicherer Umgang gewährleistet werden kann. Diese Flaschen lagern nach der Lieferung in einem abgesicherten Container, die genutzte Flasche wird aus dem Lager unter definierten Sicherheitsbedingungen in den Prüfstand gebracht und dort im Gasflaschenschrank platziert, gesichert und angeschlossen. Beim Umgang mit der Gasflasche und dem Anschluss und Arbeiten am Ammoniaksystem tragen Techniker und/oder Ingenieur entsprechende Sicherheitskleidung inkl. einer Vollmaske mit Filter speziell für den Einsatz mit Ammoniak.

Durch den verwendeten Gasflaschenschrank mit eingebauter Entlüftung kann sichergestellt werden, dass das Ammoniak bei einer Leckage nicht in den Prüfstandsraum entweichen, sondern kontrolliert abgeführt werden kann. Weiterhin wird angestrebt, das Ammoniak im Normalbetrieb über den Verbrennungsmotor zu verbrennen und somit das Kraftstoffsystem zu entleeren. Die Sonderfälle Motor-Stopp oder Havarie/Leckage werden in AP 4.1 genauer erläutert. Kommt es zu einer Leckage bzw. einem unerwarteten Austritt von Ammoniak, wird dies durch mehrere Ammoniak-Gassensoren detektiert. Durch die hinterlegten Grenzwerte wird die Gaswarnzentrale bei einer Überschreitung in einen Alarmzustand versetzt und sorgt für einen automatischen Not-Stopp des Motors. Weiterhin ist die Lüftung des Prüfstandsraumes während des Betriebs bei geöffneter Ammoniak-Gasflasche auf den vollen Durchsatz gestellt, um mögliche Austritte so schnell wie möglich abführen und das ausgetretene Ammoniak mit der Abluft verdünnen zu können. Das Bedienpanel der Lüftung ist so modifiziert, dass ein manuelles Eingreifen nur mutwillig möglich ist. Mit dieser Peripherie ist ein sicherer Umgang gewährleistet, welcher durch ein Sicherheitskonzept mit mehreren Sicherheitsstufen komplettiert wird.

Dieses Sicherheitskonzept betrachtet mehrere Auslegungsstufen, um einen ungefährdeten Betrieb für den Prüfstandsingenieur und Techniker zu gewährleisten. Dazu werden mögliche Anwendungsfälle/Schadensfälle aufgeschlüsselt, wie unter AP 4.1 nachzulesen ist. Weiterhin sind im Sicherheitskonzept die Gefahren beim Umgang mit Ammoniak, nötige Vorgehensweisen und das Sicherheitsequipment zusammengefasst. Zu den Vorgehensweisen zählen Situationen, in denen eine Person durch Ammoniak geschädigt/kontaminiert wurde und weitere Personen Erste-Hilfe leisten sollen, ohne sich selbst in Gefahr zu bringen. Zum Sicherheitsequipment zählen Gasmaske und Schutzanzug,

eine Notdusche, ein Spülset für die Augen und eine Sauerstoffflasche mit dazugehörigen Aufsätzen zur Notversorgung der geschädigten Person.

2.1.2 AP 4 Konzeption, Aufbau, Inbetriebnahme des Versuchsmotorprüfstands und erste Messkampagne

AP 4.1 Konzeption & Aufbau einer Ammoniak Sicherheitstechnik, NH_3-Kraftstofflager

Die Versuche mit Ammoniak werden am Versuchsträger mithilfe eines dezentralen und speziell für den Prüfstand entwickelten und aufgebauten Kraftstoffsystems durchgeführt. Zur Versorgung dient im Betrieb eine angeschlossene Druckgasflasche. Die restlichen Flaschen müssen außerhalb des Prüfstandes in einem speziell dafür vorgesehenen Lager aufbewahrt werden. Dazu dient ein F90 Außenlager mit Zwangsbelüftung und Leckwanne.

Um auf die verschiedenen Sicherheitsfälle einzugehen, wird nachfolgend das Konzept des Kraftstoffsystems erläutert. Abbildung 7 zeigt das Systemkonzept schematisch mit allen erforderlichen Bauteilen. Durch die Verwendung von flüssigem Ammoniak aus einer Gasflasche besteht die Herausforderung darin, das Gas vollständig zu verdampfen bevor es in die Ansaugung eingedüst wird. Durch das gewählte System besteht im weiteren Projektverlauf die Möglichkeit, das Medium flüssig zum Motor zu bringen. Die Durchflussmessung mithilfe eines Coriolis-Messgeräts findet immer im flüssigen Zustand des Ammoniaks statt.

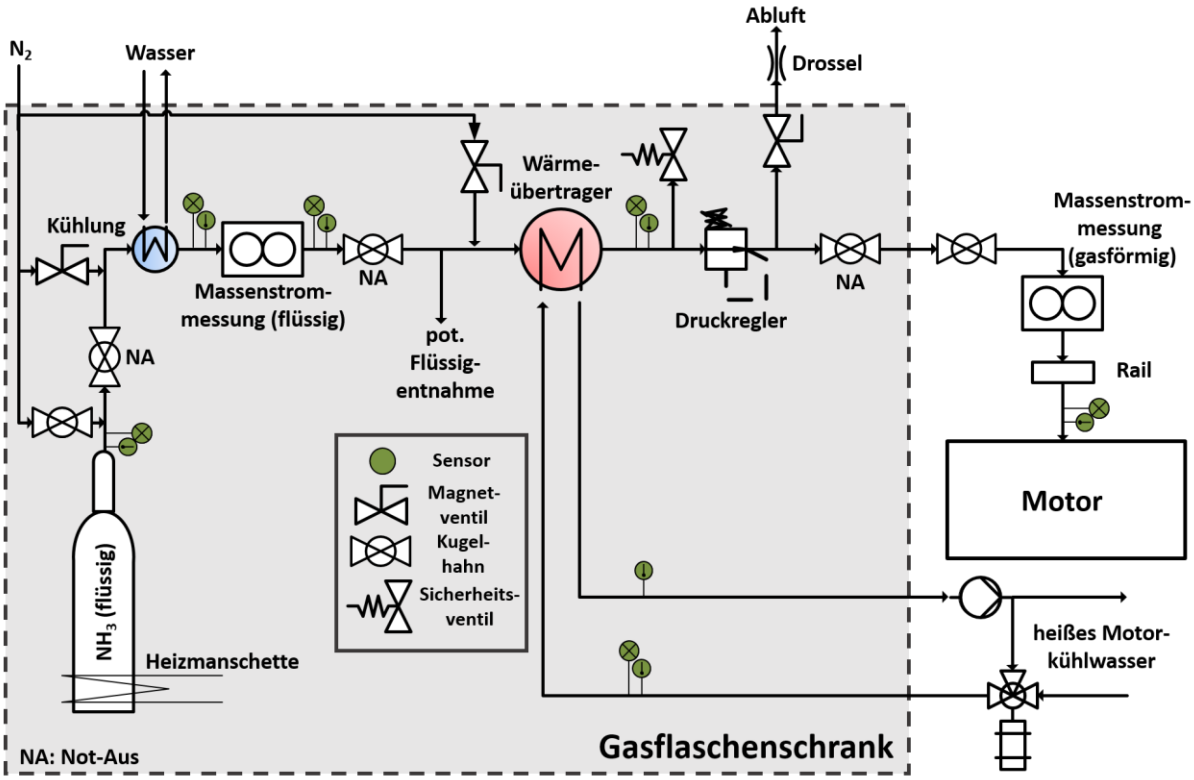

Abbildung 7: Ammoniak-Kraftstoffsystem

Die Druckgasflasche im Schrank wird über eine Heizmanschette erwärmt. Dadurch steigt der Druck des Ammoniaks in der Flasche, sodass nach der Kühlung vollständig flüssiger Zustand (links der Siedelinie) . Am Austritt der Gasflasche sitzt ein pneumatischer Kugelhahn, welcher

über die Prüfstandsoftware angesteuert wird. Dieser Kugelhahn ist im stromlosen Zustand geschlossen, um ein unbeabsichtigtes Austreten von Ammoniak zu unterbinden. Weiterhin wird das Ventil mit in die Sicherheitskette eingebunden werden und bei einem Notfall-Zustand automatisch schließen. Nach diesem Ventil wird ein Wärmeübertrager zur Kühlung des Mediums folgen. Mit diesem wird der Druckverlust im Coriolis ausgeglichen werden ohne in das Zwei-Phasen-Gebiet des Ammoniaks zu kommen. Hinter der Durchflussmessung sitzt dann ein weiterer Kugelhahn mit denselben Funktionen wie der Erste, weiterhin trennt dieser Kugelhahn den flüssigen Teil vom restlichen System. Es folgt der Wärmeübertrager, mithilfe dessen das Ammoniak definiert verdampft wird. Über das Kühlwasser des Prüfstandes mit einer Temperatur von 60-80 °C wird das Ammoniak erhitzt und auf einen definierten Zustand verdampft werden. Um das gasförmige Medium auf den geforderten Einblasdruck zu senken, sitzt hinter dem Wärmeübertrager ein Druckminderer. Anschließend ist ein Abzweig mit einem weiteren Ventil vorhanden, hinter welchem die Drossel sitzt. Diese soll genutzt werden, um das gasförmige Ammoniak bei einem ungeplanten Motor-Stopp kontrolliert und sicher abzuführen. Vor dem Schrankausgang sitzt ein weiterer Kugelhahn zur Absicherung des Systems und der Abtrennung nach außen. Die Leitung vom Gasflaschenschrank zum Motor wird ummantelt und aktiv beheizt werden, um das gasförmige Ammoniak am Kondensieren zu hindern und auf Temperatur zu halten. Zur Steuerung der eingebrachten Ammoniakmenge wird ein Proportionalventil verwendet, welches über die Prüfstandssteuerung angesteuert werden kann. Zur Einbringung in die Ansaugung des Motors wird ein Mischrohr genutzt, in welchem das Ammoniak durch Bohrungen in die strömende Ansaugluft gemischt wird. Um die Ammoniakleitungen nach dem Motorbetrieb oder nach einem Not-Aus des Prüfstandes spülen zu können sind mehrere Stickstoffanschlüsse vorgesehen, welche ebenfalls mit Ventilen gesteuert werden können.

Die Drossel in der Abluftleitung des Kraftstoffsystems sorgt für eine gefahrenlose Abführung des Ammoniaks bei Bedarf. Bei einem maximalen Abluftvolumenstrom von 9.000 m³/h aus der Prüfzelle und einem Ammoniak-Grenzwert am Schornsteinaustritt ergibt sich ein maximal zulässiger Ammoniak-Massenstrom von 0,44 kg/h. Bei einem gasförmigen Volumen von ca. 1,1 dm³ bzw. einer Masse von 0,007 kg ergibt sich eine benötigte Zeit von ca. 1 min. Dieses Vorgehen ist nachfolgend in Fall 2 näher beschrieben. Zuvor wird auf den Fall des regulär geplanten Prüfstandsstopps eingegangen und zuletzt auf den Fall einer Havarie bzw. einer Leckage.

Fall 1: Normaler Betrieb/Normale Abschaltung

Im normalen Fahrbetrieb mit Ammoniak strömt der Kraftstoff kontinuierlich durch die Leitung des Ammoniak-Kraftstoff-Systems. Beim Herunterfahren des Motors wird vorgesehen, das Nachströmen des Ammoniaks aus der Gasflasche mithilfe eines Kugelhahns (betätigt über die Prüfstandssteuerung) zu unterbinden und den restlichen Kraftstoff über den Motor im Brennraum umzusetzten. Das Leeren wird unterstützt durch das Spülen mit Stickstoff, welches direkt hinter dem geschlossenen Kugelhahn einströmt. Sobald das Kraftstoffsystem gespült und entspannt ist, kann ein weiterer Kugelhahn hinter dem Kraftstoffsystem geschlossen und der Motor komplett abgestellt werden. Der Medienfluss des Ammoniaks ist in der nachfolgenden Abbildung 8 dargestellt. Dabei stellt der gestrichelte Bereich den Gasflaschenschrank und die blaue Linie den Kraftstofffluss dar. Der restliche Aufbau des Kraftstoffsystems und die verwendeten Komponenten werden in AP 4.2 genauer beschrieben.

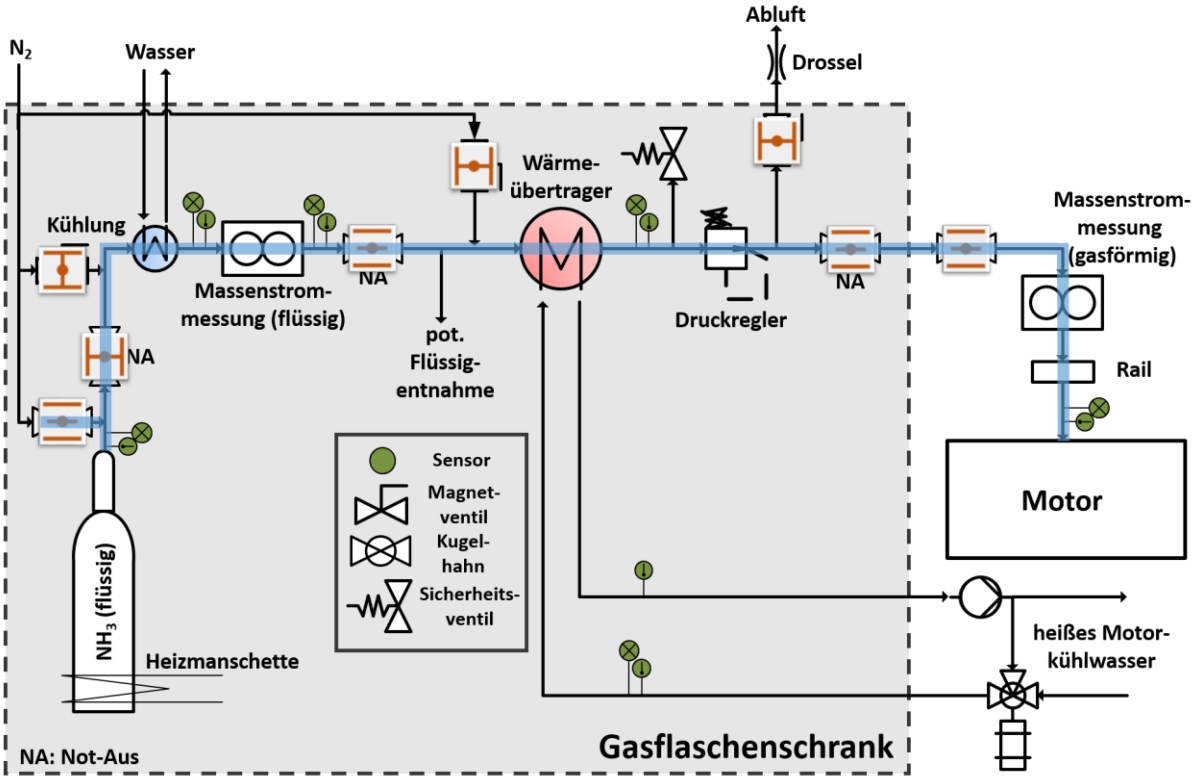

Abbildung 8: System während normaler Abschaltung

Fall 2: Motor-Stopp (Grenzwertüberschreitung)

Für diesen Fall sind weitere, elektrisch gesteuerte Kugelhähne im Kraftstoffpfad vorgesehen und in die Not-Aus-Kette des Prüfstands integriert. Bei einem unerwarteten Motor-Stopp fallen automatisch die Kugelhähne hinter der Gasflasche, vor dem Verdampfer und vor Austritt aus dem Gasflaschenschrank zu. Weiterhin wird die Kühlwassertemperatur, die für die Verdampfung des Ammoniaks sorgt, automatisch abgesenkt. Damit ist gewährleistet, dass das Ammoniak in der Leitung und im entlüfteten Gasflaschenschrank bleibt, kein weiterer Ammoniak aus der Gasflasche nachströmen oder in den Prüfstandsraum gelangen kann und die flüssige von der gasförmigen Phase getrennt ist. Kann der Motor nicht innerhalb kurzer Zeit neu gestartet und das Ammoniak mittels Fall 1 entleert werden, kommt dieser Fall zum Einsatz. Dabei wird der gasförmige Teil des Ammoniaks über eine Drossel in die Abluft geführt. Diese Drossel wird so ausgelegt, dass bei voller Abluft eine Durchmischung stattfindet, welche gewährleistet, dass das Ammoniak geruchsfrei aus dem Schornstein der Maschinenhalle austritt. Diese Dauer beträgt wie vorangegangen beschrieben ca. 14 min. Danach befindet sich nur noch flüssiges Ammoniak in der Leitung im Gasflaschenschrank. Dieses kann ohne Bedenken bis zum nächsten Einsatz dort verweilen oder nach Verdampfen ebenfalls über die Drossel abgeführt werden.

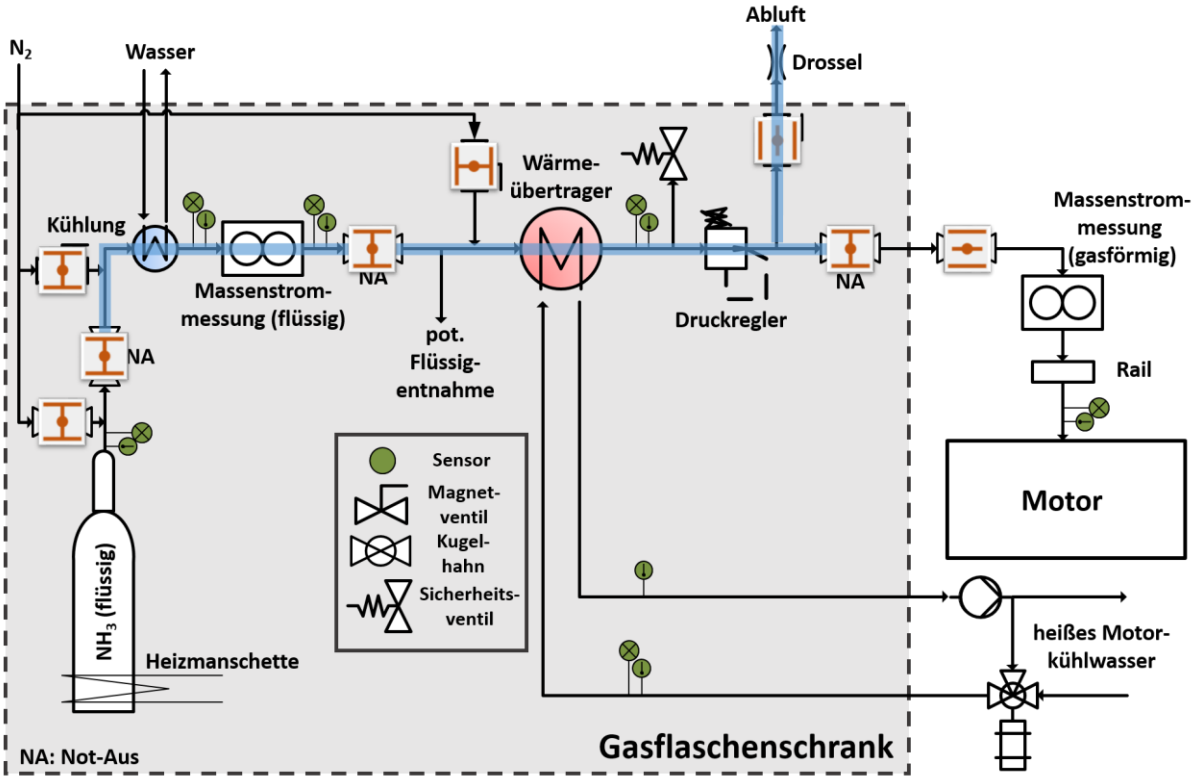

Abbildung 9: Motor-Stopp

Fall 3: Havarie/Leckage im System

Für diesen Fall ist die Einbindung der Gaswarnzentrale in die Not-Aus-Kette des Prüfstands relevant. Bei einem unerwarteten Ammoniakaustritt wird dieser mit den NH_3-Sensoren detektiert und löst bei Überschreitung des Grenzwertes ein Not-Aus aus. Die Kugelhähne hinter der Gasflasche, zwischen flüssigem und gasförmigem Pfad und vor Austritt aus dem Gasflaschenschrank fallen zu. Damit ist gewährleistet, dass das Ammoniak im Gasflaschenschrank bleibt und nur über dessen Entlüftungsanlage austreten kann (im Falle einer Leckage im Schrank, wie in Abbildung 10 dargestellt. Diese führt das Ammoniak wiederum direkt in die Abluft des Prüfstands und somit aus dem Schornstein der Maschinenhalle. Bei diesem Fall ist keine geruchsfreie Abführung des Mediums gewährleistet, es kommt ggf. zu einer Geruchsbelästigung, dafür kann durch den Einsatz der Gaswarnsensoren aber eine Gefährdung für Personen verhindert werden. Dieses Szenario stellt in der Realität aber nur einen Ausnahmefall dar.

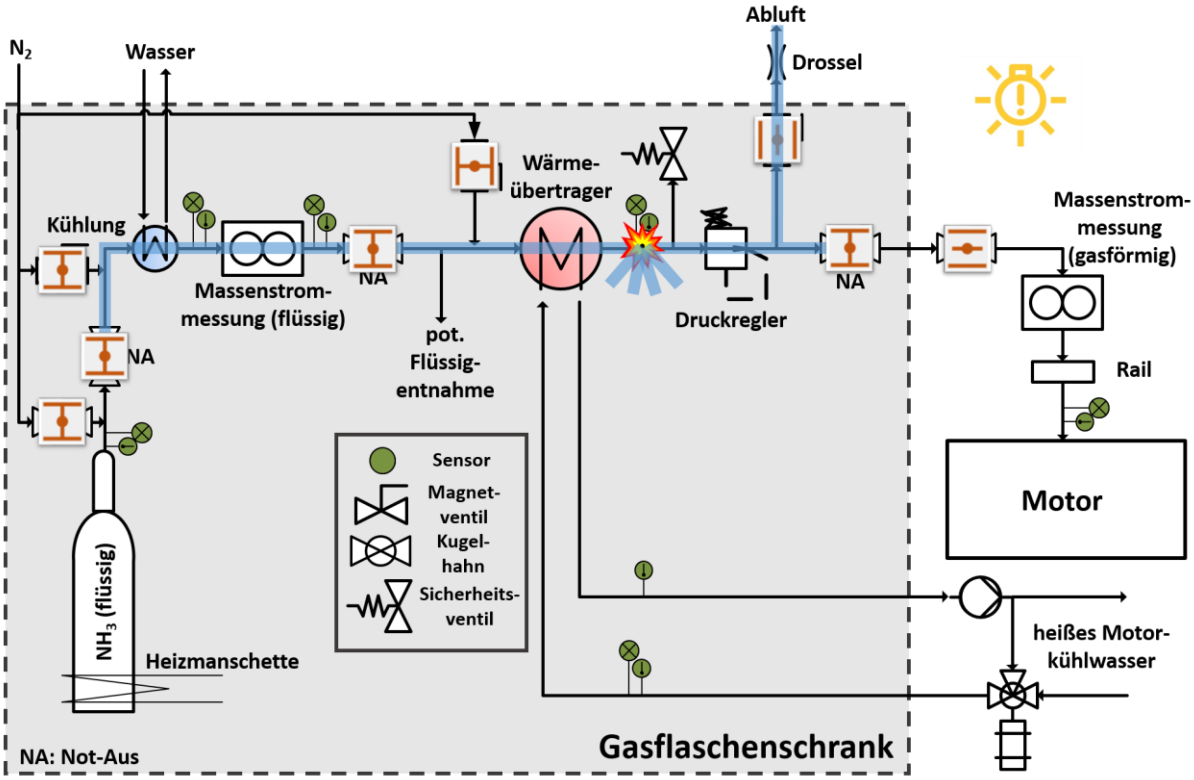

Abbildung 10: Havarie/Leckage im System, exemplarisch im Schrank

Das Sicherheitskonzept ist so ausgelegt, dass bei jedem möglichen Systemstopp oder Systemausfall eine Absicherung zur Vermeidung von Gesundheitsschäden des Personals durch Ammoniak sichergestellt ist. Es existiert mehr als eine Sicherheitsebene und zusätzlich wird großer Wert auf den Arbeitsschutz in Form von Gasmasken und einem Gaswarnsystem gelegt.

AP 4.2 Aufbau einer Ammoniakversorgung im Prüfstand

Das ausgearbeitete Konzept des Ammoniak-Kraftstoffsystems konnte ohne größere Änderungen umgesetzt werden. Das fertige System ist in Abbildung 11 nachfolgend dargestellt. Es wurde darauf geachtet, alle relevanten Materialien ammoniakbeständig auszuführen und ausführliche und regelmäßige Drucktests zu Leckageprüfungen durchzuführen. Durch den platzsparenden Aufbau ist es weiterhin möglich, eine zweite Ammoniak-Gasflasche im Schrank unterzubringen. Dies ist bei kühleren Außentemperaturen sinnvoll, um die Gasflasche vorzuwärmen und so die Stillstandszeit bei einem Flaschenwechsel zu verkürzen.

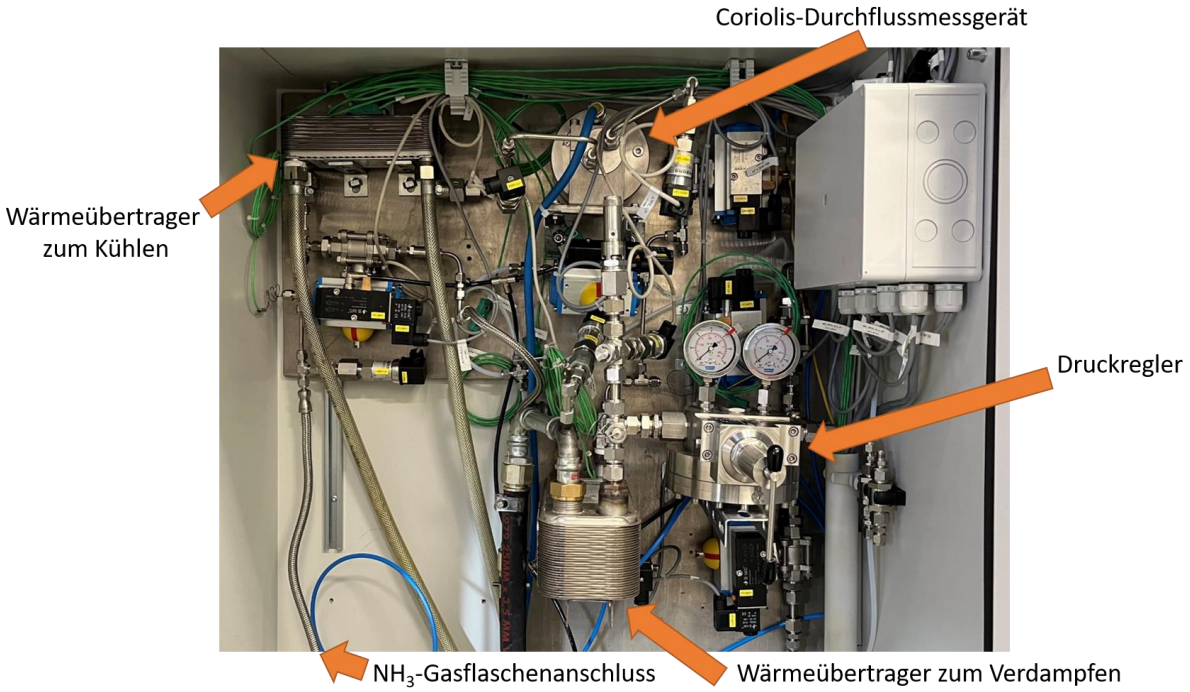

Abbildung 11: Umsetzung des Ammoniak-Kraftstoffsystems

AP 4.3_1 Adaption des Versuchsträgers hinsichtlich Ammoniakdosierung

Im Projektvorhaben steht das Retrofit-Konzept mit Ammoniak/Diesel als Dual-Fuel Brennverfahren im Vordergrund. Aus diesem Grund wurde zusätzlich zu dem Serien-Diesel-Einspritzsystem (DI – Direct Injection) eine Ammoniak-Saugrohreinblasung (PFI – Port Fuel Injection) in den Luftpfad des Motors integriert. Das Brennverfahren ist nachfolgend schematisch in Abbildung 12 dargestellt.

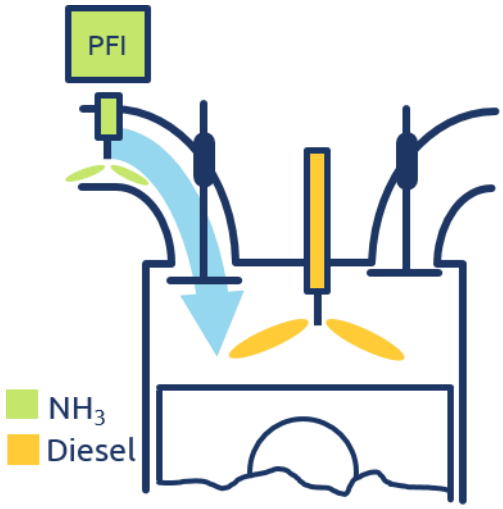

Abbildung 12: Schematische Darstellung des Brennverfahrens (NH_3-PFI mit Diesel-DI)

Das gasförmige Ammoniak wird aus dem Kraftstoffsystem per Edelstahlleitung bis über den Versuchsmotor geführt und endet an einem Proportionalventil. Dieses Ventil steuert den Durchfluss und die damit eingebrachte Ammoniakmenge in die Luftansaugung des Motors. Im Ansaugrohr ist ein Rohr eingebracht, welches mit mehreren Bohrungen versehen ist um eine

optimale Gemischbildung von Ammoniak und Luft zu erreichen. Dieser Aufbau ist auch hinsichtlich des Einsatzes in realen Schiffen im Zeit- und Kostenfaktor sehr attraktiv gegenüber anderen Konzepten wie bspw. einer Direkteinspritzung des Ammoniaks in den Brennraum, bei welchem eine Anpassung des Zylinderkopfes unumgänglich wäre und somit ein deutlich höherer Arbeitsaufwand entstehen würde. Die reale Umsetzung ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.

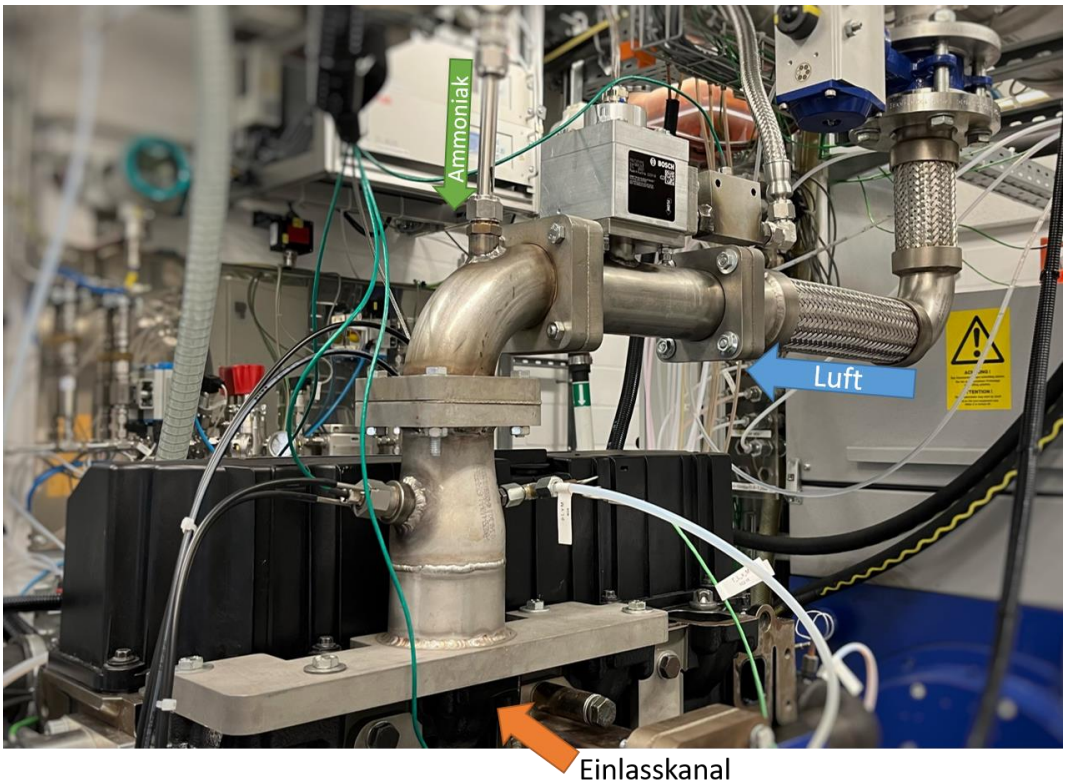

Abbildung 13: Umsetzung der Ammoniak-Einbringung

AP 4.3_2 Anpassung des Motorsteuergerätes

Mit der Ammoniakeinbringung ergaben sich neue Herausforderungen in der Programmierung und Ansteuerung durch das Motorsteuergerät. Dieses wurde sowohl hardware- als auch softwareseitig angepasst und bietet nun die Möglichkeit, die Ammoniakeinbringung über zwei unterschiedliche Wege umzusetzen und zu steuern. Die Bedienoberfläche des Motorsteuergeräts ist in Abbildung 14 dargestellt. Das Programm bietet die Möglichkeit das Proportionalventil des Ammoniaks anzusteuern (orange), als auch einen optionalen Ammoniak-Injektor (blau).

Neben verschiedenen Anzeigen (bspw. Betriebsstunden, Motordrehzahl) ist über die Oberfläche auch die Steuerung des Dieselsystems möglich. Dem Nutzer ist in Untermenüs weiterhin die Möglichkeit geboten, eine Vielzahl an Reglerparametern (z. B. Raildruck) selbst einzustellen. Dazu gehört bspw. auch die Injektorparametrierung inkl. der Implementierung der Stromprofile. Das bietet die Möglichkeit, Injektoren zu tauschen und mögliche Unterschiede zwischen verschiedenen Injektoren zu untersuchen.

Das ganze Motorsteuergerät verfügt weiterhin über alle nötigen Sicherheitseinrichtungen und Notabschaltungen, um im Betrieb eine automatische Abschaltung der Kraftstoffdosierung zu gewährleisten.

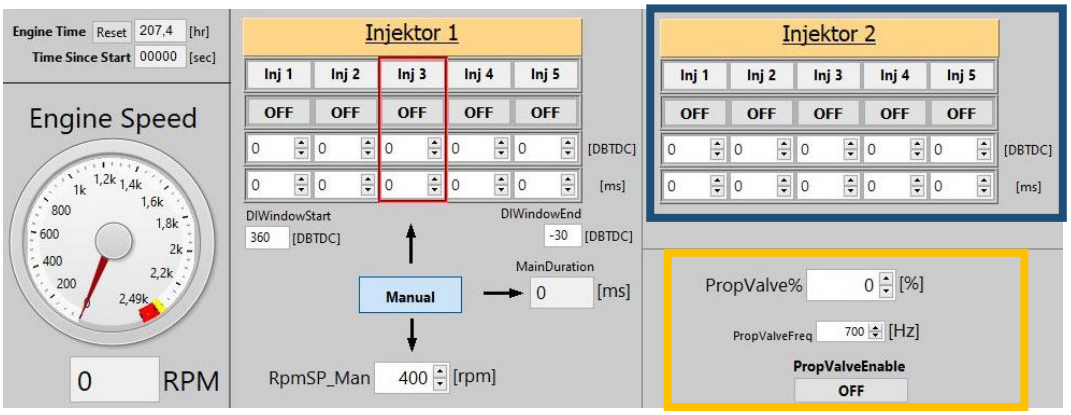

Abbildung 14: Benutzeroberfläche des Motorsteuergeräts mit Diesel- & Ammoniakinjektorsteuerung (Injektor 1 & 2), sowie Ansteuerung des Proportionalventils

AP 4.4 Anpassung der Abgasmesstechnik

Um die Zusammensetzung des Abgases zu untersuchen, welches bei der Verbrennung von Ammoniak und Diesel entsteht, wurde eine FTIR-Abgasmessanlage am Prüfstand in Betrieb genommen. Dazu verfügt das Abgassystem des Motors über Entnahmestellen, an denen das Rohabgas nach dem Motor entnommen und über beheizte Leitungen zur Abgasmessanlage gefördert wird. Die Abgasmessanlage ist im Stande, alle relevanten Bestandteile des Abgases zu messen. Zu diesen gehören u.a. NH_3, NO_X, N_2O, CO_2, CO. Alle Personen am Prüfstand wurden der Nutzung der Abgasmesstechnik unterwiesen.

Weiterhin wurde im Projektverlauf ein neues Sauerstoffmessgerät beschafft. Die Notwendigkeit der Beschaffung bestand aufgrund der Beständigkeit gegenüber Ammoniak. Durch den Einsatz des neuen Messgerätes konnte der Sauerstoffwert im Abgas sicher und zuverlässig gemessen werden.

Diese Daten sind essentiell zur Erstellung des Verbrennungsmodells durch die Projektpartner.

AP 4.5 Durchführung erster Messkampagnen und Überwachung der Betriebsstoffe

Vor dem Hintergrund des Projektziels, der Umsetzung eines NH_3-Forschungsmotors mittels eines Ammoniak/Diesel Dual-Fuel Brennverfahrens, und des möglichen Retrofit-Potentials in der Schifffahrt wurden Prüfstandsversuche systematisch durchgeführt und ausgewertet. Als Hauptziel galt es, hohe Ammoniakmengen umzusetzen und damit die Substitutionsraten des Diesels zu maximieren. Diese Zielstellung geht auch mit einer signifikanten CO_2-Reduktion einher.

Zur Einordnung der Ergebnisse sind nachfolgend die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projektvorhaben zusammengefasst:

1. **THG-Einsparpotential eines Ammoniak Dual-Fuel Brennverfahrens für Binnenschiffsantriebe nachgewiesen**

Durch die Abnahme der eingebrachten Dieselmenge sinken die CO_2-Emissionen proportional (vgl. Abbildung 35). Mit den niedrigen N_2O-Emissionen kann damit auch die Gesamt THG-Emission drastisch gesenkt werden. Bei dem untersuchten Brennverfahren wurde eine deutliche Reduzierung (bis zu 70 %) in den Treibhausgasemissionen festgestellt.

2. **Änderung der Abgaszusammensetzung durch motorische Umsetzung von Ammoniak** (vgl. Abbildung 19)

Durch Zugabe von Ammoniak entstehen neben den Hauptverbrennungsprodukten (Wasser, N2) auch Schadstoffemissionen wie z. B. NH_3- und N_2O-Emissionen. Dabei handelt es sich bei den NH_3-Emissionen um unverbranntes Ammoniak, welches durch unvollständige Umsetzung im Brennraum oder Ventilüberschneidung im Abgas zu messen ist. Das N_2O entsteht aus der Verbrennung von Ammoniak.

3. **Steigende NO_X-Rohmissionen**

Die NO_X-Emissionen steigen bei zunehmendem Ammoniakanteil. Dabei übersteigen die Rohemissionswerte jegliche Gesetzesrichtlinien, können aber durch den Einsatz geeigneter Katalysatorsysteme auf ein niedriges Niveau (IMO Tier 3) gesenkt werden. Eine Beispielrechnung ist in den Auswertungen der Ergebnisse der zweiten Messkampagne nachzulesen.

4. **Hohe Umsatzraten von Ammoniak erfordern eine Anpassung der Dieseleinspritzstrategie** (vgl. Abbildung 24)

Bei der Dieseleinspritzstrategie eines Serienmotors um den oberen Totpunkt wird der Diesel nicht gut aufbereitet um das gesamte vorgemischte Ammoniak-Luft-Gemisch im Brennraum zu erfassen und das Ammoniak vollständig umzusetzen. Die Folge sind sehr hohe Ammoniakemissionen. Durch eine angepasste Dieseleinspritzung (eine sehr frühe Voreinspritzung) kann der Diesel besser im Brennraum verteilt und die Ammoniakumsetzung deutlich verbessert werden. Es sind deutliche Verbesserungen in NH_3- und N_2O-Emissionen zu erkennen.

5. **Ein zunehmender Ammoniakanteil resultiert in einer deutlichen Änderung in der Wärmefreisetzung** (vgl. Abbildung 32)

Durch die Zugabe von Ammoniak und die damit verbundenen unterschiedlichen Brenneigenschaften führt vor allem im Heizverlauf zu starken Veränderungen. Die Niedertemperaturverbrennung des früh eingebrachten Diesels wird gehemmt. Der Start der Verbrennung verschiebt sich nach spät. Bei hohen Substitutionsraten findet die Wärmefreisetzung durch den früh eingebrachten Diesel und das Ammoniak so spät statt, dass die Haupteinspritzung des Diesels gleichzeitig verläuft und es in Folge eine einzige große Wärmefreisetzung gibt.

6. **Ammoniakeinfluss auf das Schmieröl** (vgl. Abschnitt 2.1.4 AP 7.4)

Ammoniak in der Verbrennung hat einen direkten Einfluss auf das Schmieröl. Aus den ersten Messungen und Analysen ging eine Abhängigkeit in Folge des kurz zuvor gefahrenen Ammoniakanteils hervor. Das Schmieröl weist weiterhin einen erhöhten Kupferanteil auf. Dieser Effekt ist auf die Aggressivität des Ammoniaks gegenüber Kupfer zu erklären.

7. **Untersuchtes Dual-Fuel Motorenkonzept kann maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende beitragen**

In Verbindung mit einem geringen Umrüstaufwand ergibt sich ein hohes Potential beim Retrofit bestehender Dieselmotoren. Die Anpassung des bestehenden Serienmotors erfordert ein Ammoniaksystem, eine Einbringung in die Luftansaugung und eine angepasste Dieseleinspritzstrategie und Abgasnachbehandlung. Die Kombination aus einfacher Umrüstung und hoher Einsparung von Treibhausgasemissionen macht das Konzept sehr attraktiv für zukünftige Motorenkonzepte, vor allem aber für die Adaption bestehender

Dieselmotoren (Retrofit). Ältere Motoren/Schiffe können dadurch schon heute umgerüstet werden und auch schon heute einen aktiven Beitrag zur Verringerung der Triebhausgasemissionen leisten. Zu beachten sind in jedem Fall die hohen Sicherheitsanforderungen und weitere Untersuchungen zum Schmieröleinfluss.

8. **Umfassendes Sicherheitskonzept für Schifffahrt erforderlich**

Vor dem Hintergrund, dass der Binnenschifffahrt teilweise sehr nahe an dichtbesiedelten Gebieten verkehrt, sowie dem hohen Gefährdungspotential von Ammoniak auf Mensch und Umwelt, müssen Leckagen zwingend vermieden werden. Dies erfordert ein umfassendes Sicherheitskonzept für das gesamte Schiff. Weiterhin ist ein Ammoniak-Tanksystem mit mehreren Sicherheitsebenen (z. B. doppelwandige Rohrleitungen, Leckagedetektion) notwendig, welches zusätzlich zum Dieseltank installiert werden muss. Ist der Platz vorhanden, kommt eine ausführliche Schulung und Sensibilisierung der gesamten Besatzung hinzu.

Bezugnehmend auf die Punkte 1 – 5 werden die Ergebnisse nachfolgend detailliert anhand einer gesamten Messreihe aus der ersten Messkampagne dargestellt.

Diese Messreihe startet im reinen Dieselbetrieb und endet in einem Diesel-Ammoniak-Substitutionspunkt, welcher durch Substitutionen und verschiedene Parametervariationen erreicht wird. Dazu ist in Abbildung 15 die Drehmomentenkurve mit dem gewählten Lastpunkt im sich daraus ergebenen Kennfeld abgebildet. Für die Untersuchungen wurde der Motor im Diesel-Ausgangspunkt bei mittlerer Last (ca. 10,5 bar IMEP) und einer Drehzahl von 1500 1/min betrieben. Die zugeführte Luft wurde auf eine Temperatur von 50 °C geregelt und mit einem Ladedruck von 1,9 bar dem Motor zugeführt. Den Startpunkt bildet ein Dieselbetriebspunkt, welcher schon eine Anpassung im Zeitpunkt der Voreinspritzung erfahren hat. Da mit der Dieseleinspritzstrategie des Serienmotors keine ausreichende Basis für eine Untersuchung des Brennverfahrens geschaffen werden konnte, musste diese im Vorfeld dementsprechend angepasst werden und liegt deshalb deutlich früher als in der Einspritzstrategie des Serienmotors. Der Dieselkraftstoff wurde mit zwei Einspritzungen bei Bestromungszeitpunkten von 55 °KWvOT (VE) und 10 °KWvOT (HE) und einem Raildruck von 900 bar eingespritzt. Die Ansteuerdauern des Injektors betrugen im Diesel-Ausgangspunkt 400 µs für die Voreinspritzung und 1200 µs für die Haupteinspritzung. Damit ergab sich ein Gesamtenergiestrom von ca. 143 MJ/h.

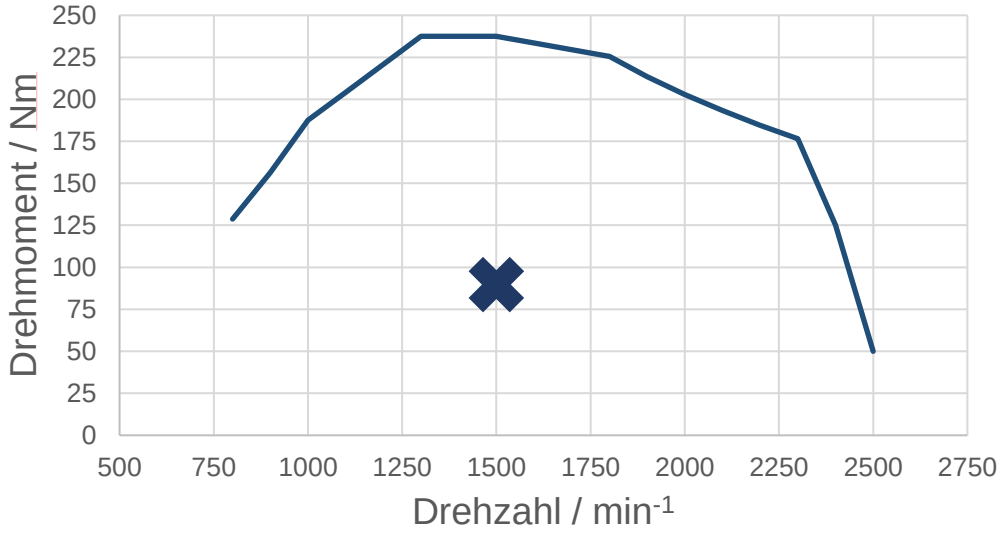

Abbildung 15: Drehmomentkurve des Einzylinder-Forschungsmotors und gewählter Lastpunkt

Die konstanten Parameter über der gesamten Messreihe sind nachfolgend nochmals tabellarisch zusammengefasst:

Tabelle 2: Konstante Parameter der gesamten Messreihe

Drehzahl min^{-1}	Ladedruck bar(a)	Dieseleinspritz-druck bar	Gesamtenergie-menge (NH_3+DK) MJ/h	Ladeluft-temperatur °C
1.500	1,9	900	143	50

Die Herangehensweise ist in Abbildung 16 dargestellt. Dabei zeigen die durchgezogenen Linien den Zielweg und die gestrichelten Linien die alternativen Messschritte vor der Optimierung. Es wird zu Beginn eine Substitutionsreihe durchgeführt (1, a → b). Mit Erhöhung des Ammoniakanteils stiegen der Anteil an unverbranntem Ammoniak im Abgas. Bei einer Substitutionsrate von 40% wurde begonnen eine Variation des Einspritzzeitpunktes der Diesel-Haupteinspritzung, um den Ammoniakschlupf zu senken (2, b → c). Ausgehend von dem optimierten Punkt wird die Substitution bis 60 % fortgesetzt (c zu d). Dann folgt die Optimierung der Einspritzstrategie mit dem Verschieben der eingebrachten Dieselmenge in die Voreinspritzung, was zu einer deutlichen Verringerung des Ammoniakschlupfes führt (3, d → e). Die Substitutionsrate kann anschließend weiter erhöht und der Ammoniakschlupf durch eine Lambda-Variation weiter gesenkt werden (4, f → g). Durch das Schaubild wird der Effekt des Wechsels auf eine frühe Einspritzung sehr deutlich (3). Die NH_3-Emissionen konnten in diesem Punkt (60 % Ammoniakanteil) um ca. 94 % reduziert und damit unter das Niveau des ursprünglichen 20 %-Punktes gebracht werden. Insgesamt konnte durch die Variationen ein sicherer Betrieb mit einem guten NH_3-Emissionsniveau bei einer Diesel-Substitutionsrate von 70 % erreicht werden (g).

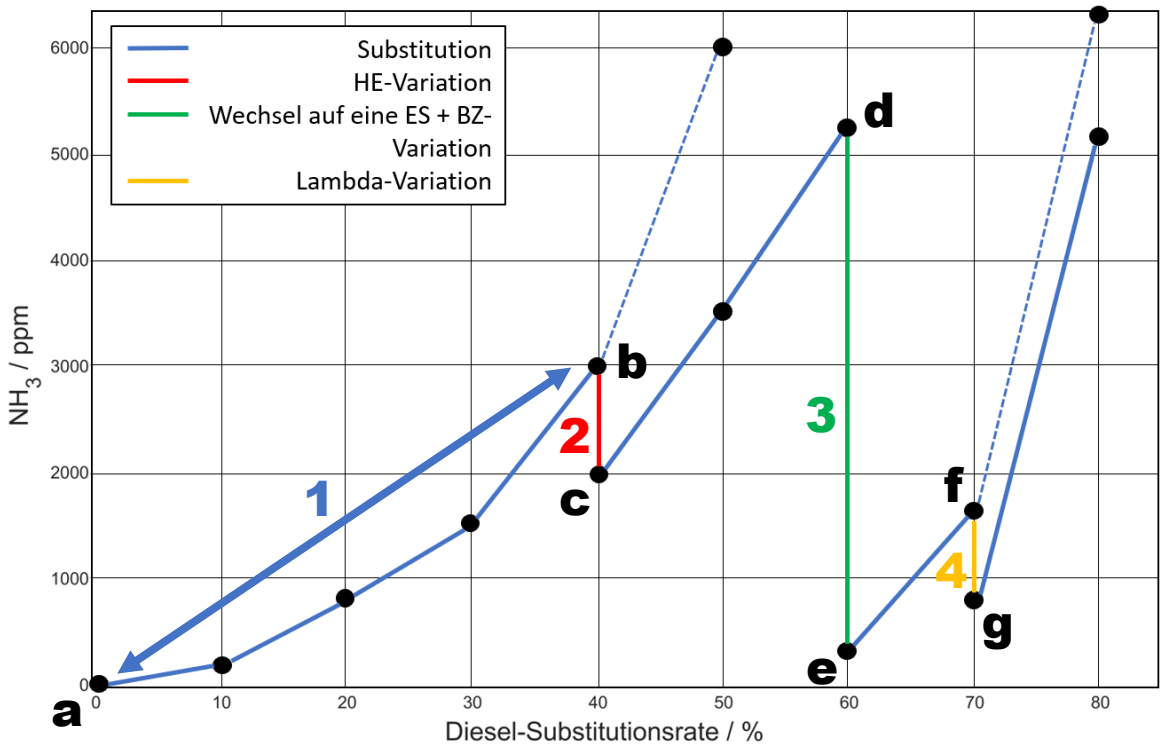

Abbildung 16: Darstellung des Substitutionsverlaufs und des Einflusses der verschiedenen Variationen auf den NH_3-Schlupf (Zahlen- und Buchstabenkennung für nachfolgende Zuordnung; HE…Haupteinspritzung, ES…Einspritzung, BZ…Bestromungszeitpunkt)

Ausgangssubstitutionsreihe (1, a → b)

In Abbildung 17 sind sowohl die Druck- als auch die Heizverläufe über °KW für Diesel-Substitutionsraten von 0 bis 50 % aufgetragen. In den Druckverläufen ist sowohl ein Anstieg über die Substitutionsrate, als auch ein Abfall ab 40 % zu erkennen. Dieses Verhalten lässt sich anhand der auf der rechten Seite abgebildeten Heizverläufe erklären. Für den reinen Dieselfall sind 3 Wärmefreisetzungen erkennbar. Die erste Wärmefreisetzung lässt sich durch die Niedertemperaturverbrennung des Diesels erklären. Durch die sehr frühe Einspritzung sind die Brennraumbedingungen noch sehr kühl, dadurch entsteht eine unterschiedliche Reaktion im Diesel-Luft-Gemisch als bei konventionellen Einspritzzeitpunkten, wenn der Kolben eine deutlich höhere Position im Zylinder hat und der Druck deutlich höher liegt. Diese Niedertemperaturverbrennung setzt eine gewisse Menge an Wärme frei, wodurch die Bedingungen im Brennraum ansteigen und gleichzeitig der Kolben den Brennraum weiter komprimiert. Durch die Änderung der Bedingungen schwächt die Niedertemperaturverbrennung ab und die Hochtemperaturverbrennung des Diesels schließt sich an. In dieser Verbrennung finden nun andere Reaktionen statt, die erst ab einer bestimmten Temperatur auftreten. Ist die voreingespritzte Dieselmasse umgesetzt, geht die Wärmefreisetzung zurück, bis die Haupteinspritzung des Diesels folgt und eine große Wärmefreisetzung folgt. Dieses Verbrennungsverhalten wird nachfolgend durch die Substitution mit Ammoniak und die unterschiedlichen Brenneigenschaften verändert. Es ist ein Abschwächen der Niedertemperaturverbrennung zu erkennen, da der eingebrachte Ammoniak in der Ansaugluft dafür sorgt, dass dem Diesel die für die Reaktion benötigten Radikale nicht mehr in vollem Maße zur Verfügung stehen. Weiterhin sorgt eine Erhöhung des Ammoniakanteils für eine verspätete Entzündung des Gemisches, was auf die schlechteren Brenneigenschaften zurückzuführen ist. Die Wärmefreisetzung nach der

Dieselhaupteinspritzung nimmt anfänglich ab, da durch die Substitution Dieselmasse in der Haupteinspritzung verringert wird. Da sich die früheren Wärmefreisetzungen aber weiter nach spät verschieben, schiebt sich die Hochtemperaturverbrennung der Voreinspritzung in die Hauptwärmefreisetzung und das Maximum steigt wieder an. Durch einen ansteigenden Premixed-Peak im weiteren Verlauf kommt es wiederum zu einem Abfall der maximalen Wärmefreisetzung ab 40 %.

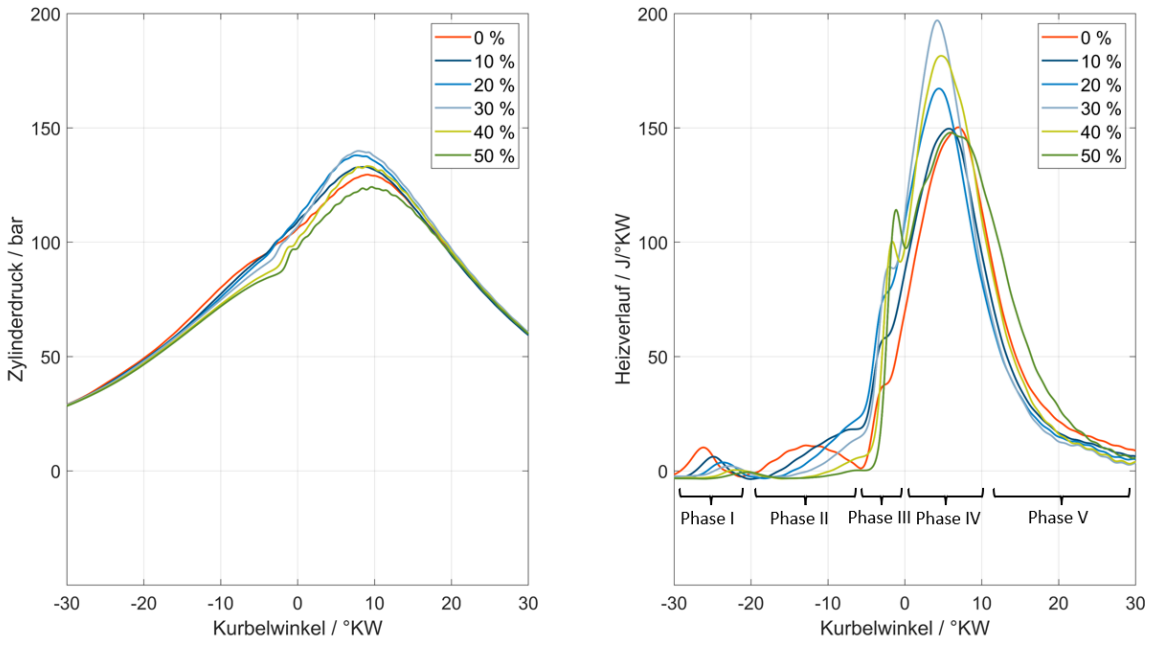

Abbildung 17: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei verschiedenen Diesel-Substitutionsraten von 0 – 50 %

Abbildung 18 zeigt diverse Motorparameter in Abhängigkeit der Substitutionsrate. Der indizierte Wirkungsgrad weist keinen Abfall über einer steigenden Substitutionsrate auf. Die Punkte für einen Ammoniakanteil von 20 bis 40 % zeigen einen erhöhten Wirkungsgrad aufgrund der Verlagerung des α_{50} in Richtung des Optimums bei ca. 8 °KWnOT. Dieses Verhalten spiegelt sich im Verlauf des indizierten Mitteldrucks ebenfalls wider. Das Verbrennungsluftverhältnis weist einen nahezu konstanten Verlauf auf. Der leichte Abfall mit steigender Substitutionsrate ist wahrscheinlich auf die Luftverdrängung durch das gasförmig eingeblasene Ammoniak im Saugrohr zurückzuführen. Ebenfalls abfallend ist der Verlauf der Abgastemperatur, was durch die, infolge des erhöhten Ammoniakanteils, reduzierte Prozesstemperatur zu erklären ist.

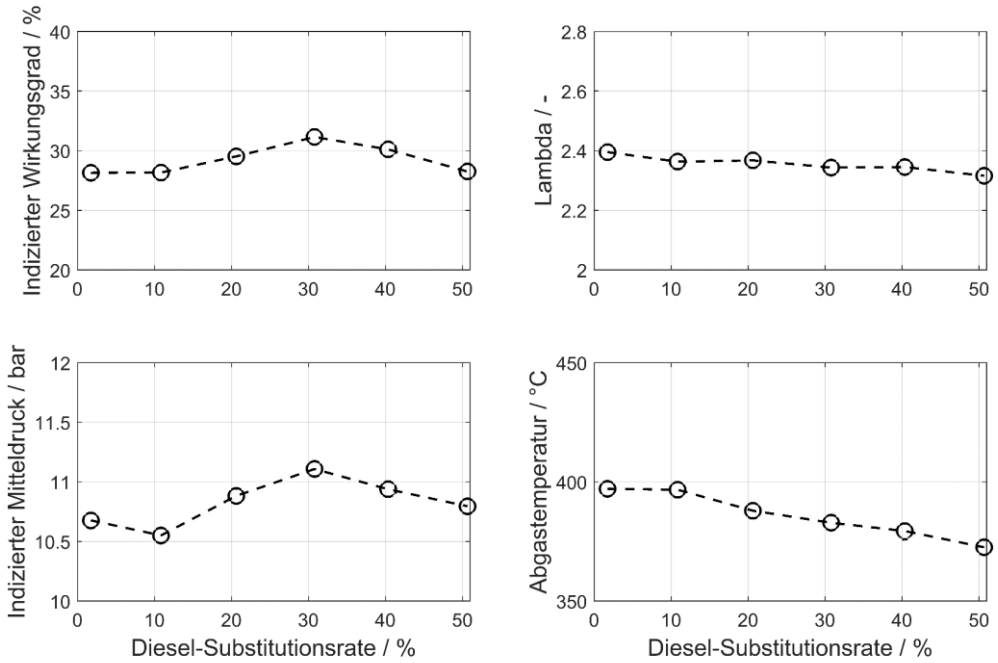

Abbildung 18: Verschiedene Motorparameter in Abhängigkeit der Diesel-Substitutionsrate

Abbildung 19 zeigt die verschiedenen Emissionen im Rohabgas (vor DOC) für die verschiedenen Substitutionsraten. Der Ammoniakschlupf steigt, aufgrund des erhöhten Ammoniakanteils wie zu erwarten stark an. Durch die konventionelle Dieseleinspritzung wird der Diesel wie eingangs erklärt nicht im gesamten Brennraum und damit im gesamten Ammoniak-Luft-Gemisch verteilt und verschlechtert die Verbrennung in den äußeren Bereichen des Brennraums. Die Stickoxide entstehen primär unter sehr hohen Temperaturen, sodass sich anhand des Diagramms vermuten lässt, dass die Verbrennungstemperatur bei hohem Ammoniakanteil gering ist. Der Grund für die erhöhten NOx-Emissionen für Ammoniakanteile von 10 bis 30 % ist der im Ammoniakmolekül gebundene Stickstoff. Die Temperaturen sind hier trotz Ammoniak noch ausreichend hoch, dass der zusätzliche Stickstoff zu NO reagieren kann. Allgemein lässt sich sagen, dass die NH_3- und NO_X-Emissionen ab 10 % (also ab Vorhandensein von Ammoniak an in der Verbrennung) einen gegenteiligen Verlauf aufweisen und es sich somit um einen Trade-Off handelt, welcher Bestandteil künftiger Untersuchungen sein wird. Die CO-Emissionen fallen nach Substitution durch Ammoniak aufgrund des verringerten Dieselanteils ab. Der Anstieg des Kohlenstoffmonoxids bei sehr hohen Ammoniakanteilen ist wieder durch die verringerte Verbrennungstemperatur und die damit unvollständige Oxidation des Diesels zu begründen.

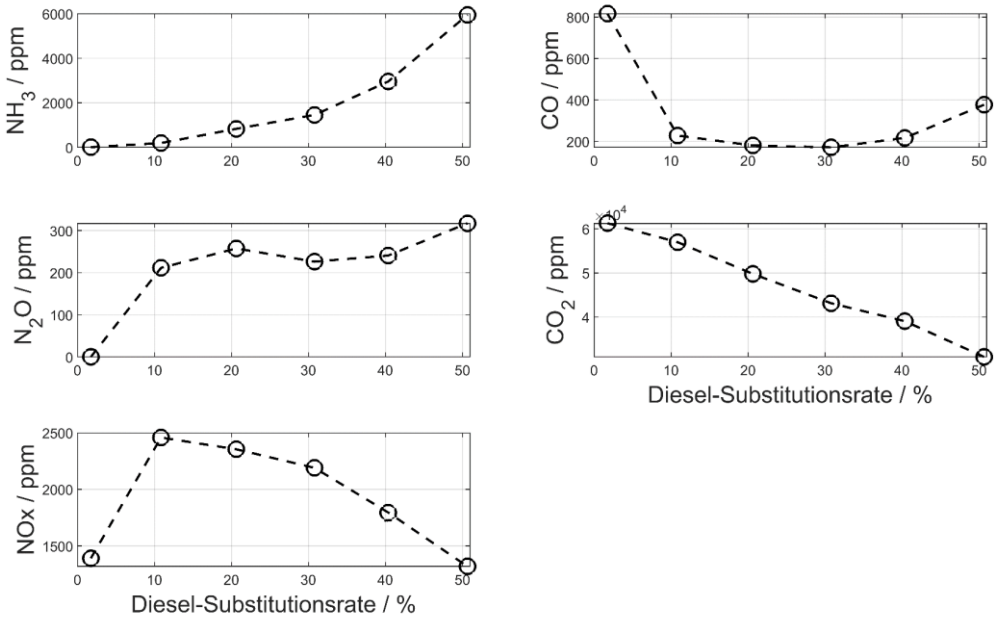

Abbildung 19: Darstellung verschiedener Emissionen (in ppm) in Abhängigkeit der Diesel-Substitutionsrate

Die Konzentration des Kohlenstoffdioxids nimmt aufgrund des fehlenden Kohlenstoffs im Ammoniakmolekül linear zur Substitutionsrate ab. Da die N_2O-Emissionen aber durch das Erhöhen des Ammoniakanteils (Stickstoffanteils) in Kombination mit einer verhältnismäßig kühlen Verbrennung drastisch zunehmen und ein 298-faches THG-Potential über 100 Jahre gegenüber CO_2 aufweisen, muss dieses mittels eines CO_2-Äquivalents berücksichtigt werden. Dieses ist in Abbildung 20 dargestellt. Ohne eine Optimierung der Einspritzstrategie kann somit also noch kein wirklicher positiver Effekt auf die Umwelt erreicht werden.

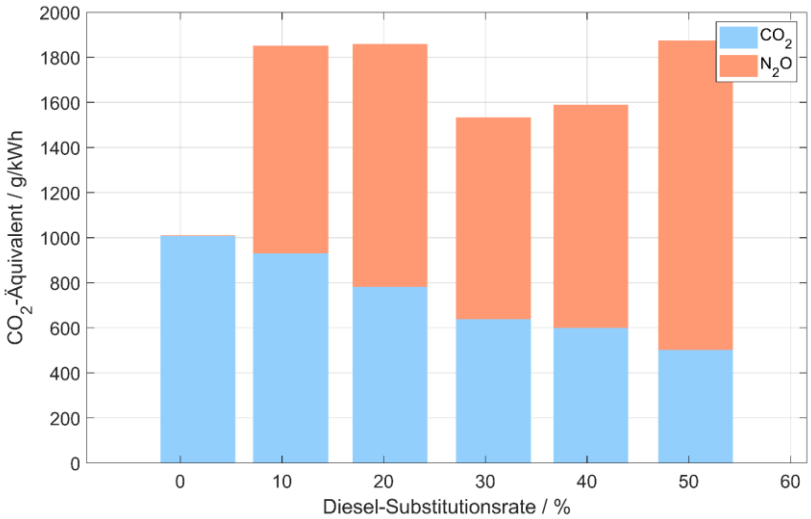

Abbildung 20: CO_2-Äquivalent bei Diesel-Substitution ohne weitere Optimierungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Variation des Bestromungszeitpunktes der Haupteinspritzung präsentiert. Dies geschieht noch vor der Optimierung der Einspritzstrategie.

Untersuchung einer Variation des Haupteinspritzzeitpunktes vom Diesel (2, b → c)

Da sich bei einer Substitutionsrate von 50 % sowohl im NH_3-Schlupf als auch bei den N_2O-Emissionen sehr hohe Werte einstellten, wurde der Ammoniakanteil wieder auf 40 % reduziert und der Bestromungszeitpunkt der Diesel-Haupteinspritzung, ausgehend von 10 °KWvOT, variiert. Dabei wurde der Zeitpunkt in Intervallen von 2 °KW zwischen 4 °KWvOT und 18 °KWvOT variiert.

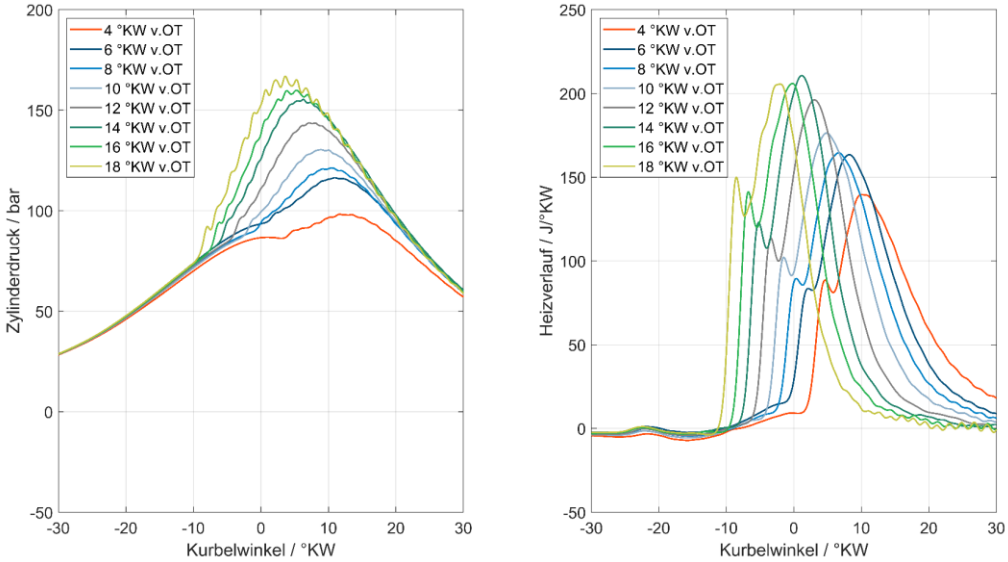

Abbildung 21: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei einer Diesel-Substitutionsrate von 40 % für verschiedene HE-Bestromungszeitpunkte

Die Druck- und Heizverläufe für die unterschiedlichen HE-Bestromungszeitpunkte sind in Abbildung 21 dargestellt. Der geringe Anstieg bei ca. 24 °KWvOT entspricht wieder der *Niedertemperaturverbrennung* der Dieselvoreinspritzung. Wie schon in der vorherigen Substitutionsreihe zu sehen ist ab 40 % ein pre-mixed peak ausgebildet, welcher auch hier deutlich erkennbar ist. Durch frühere HE-Bestromungszeitpunkte wird dieser Peak weiter verstärkt. Generell nimmt der Peak der Wärmefreisetzung für frühere Bestromungszeitpunkte zu. Da die eingebrachte Kraftstoffmenge konstant bleibt und sich die freigesetzte Wärme dementsprechend nicht ändern kann, muss dieser Effekt näher betrachtet werden. Zum einen lässt sich im Diagramm für spätere Bestromungszeitpunkte eine langsamere Ausbrandphase erkennen. Dies deckt sich mit einer ansteigenden Abgastemperatur, wie in Abbildung 22 zu erkennen ist. Weiterhin erhöht sich der Ammoniakschlupf bei späteren Bestromungszeitpunkten, da die Ammoniakumsetzung durch den späten Start der Verbrennung und den langsamen Brenneigenschaften deutlich schlechter wird, wie nachfolgend in Abbildung 23 zu sehen. Dadurch geht eine gewisse Energiemenge verloren, was sich auch durch einen leichten Abfall im indizierten Wirkungsgrad bemerkbar macht.

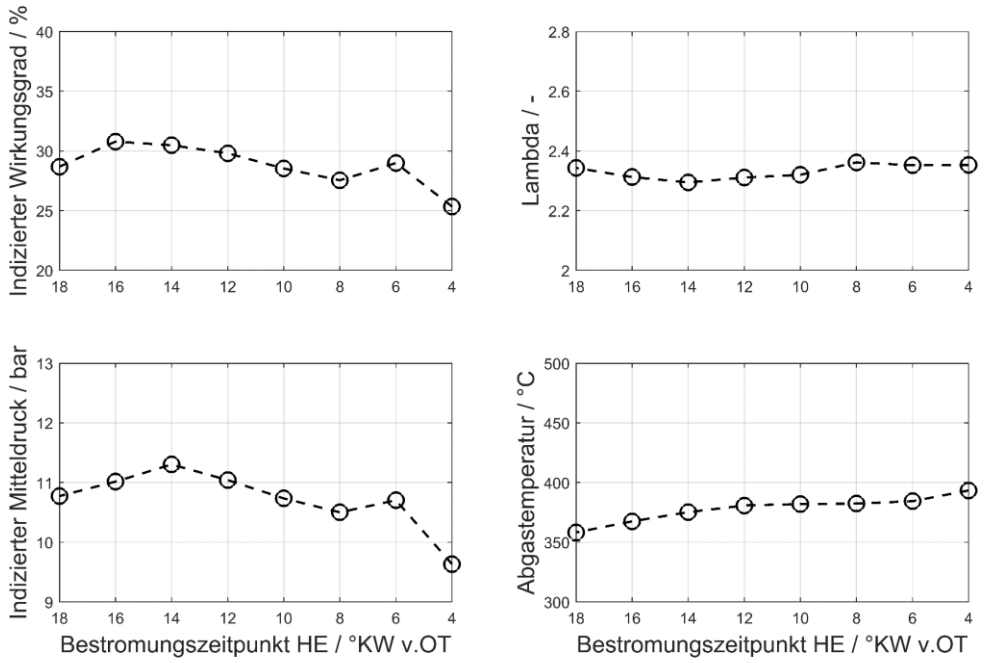

Abbildung 22: Darstellung verschiedener Motorparameter bei einer Diesel-Substitutionsrate von 40 % in Abhängigkeit des HE-Bestromungszeitpunktes

Die nachfolgend dargestellten Emissionen zeigen einen gegenläufigen Trend. Während die NH_3-, N_2O und CO-Emissionen mit späterem Bestromungszeitpunkt der Haupteinspritzung deutlich ansteigen, fallen die NO_X-Emissionen deutlich durch die sinkenden Brennraumtemperaturen. Dieser Trade-Off konnte über die gesamten Messungen beobachtet werden.

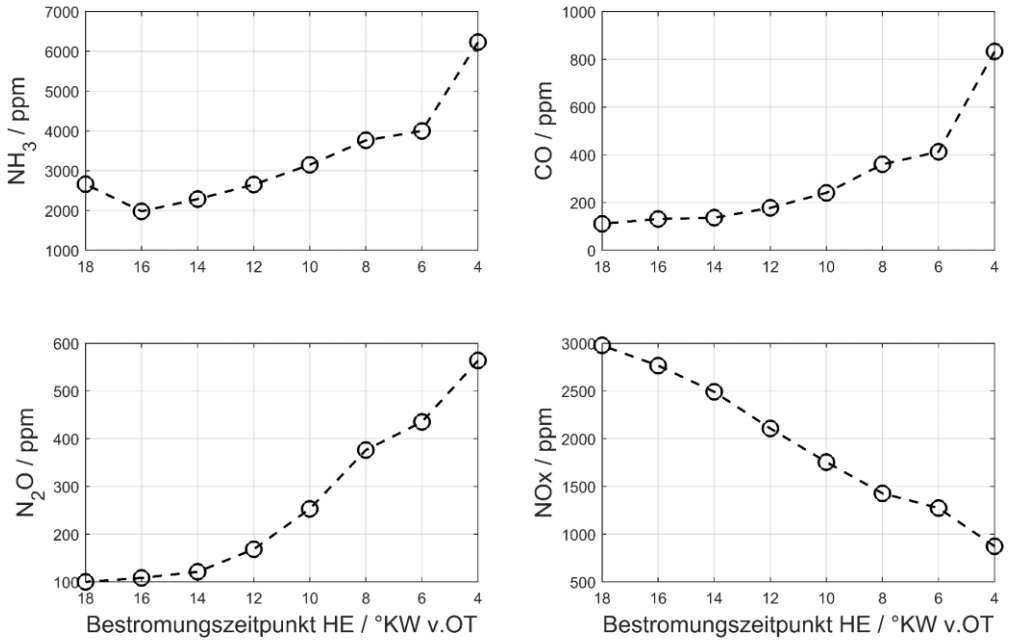

Abbildung 23: Darstellung verschiedener Emissionen bei einer Diesel-Substitutionsrate von 40 % in Abhängigkeit des HE-Bestromungszeitpunktes

Da sich bei einem Bestromungszeitpunkt von 18 °KWvOT eine schlechte Schwerpunktlage (2 °KWvOT), ein sehr hoher Druckanstiegsgradient (13,8 bar/°KW) und leicht erhöhte NH_3-Emissionen einstellten, wurde der Betriebspunkt mit einer Bestromung bei 16 °KWvOT für die folgenden Messungen gewählt. Anschließend konnte die Substitution bis 60 % fortgeführt werden. An diesem Punkt erreichten die NH_3-Emissionen einen Wert von ca. 5500 ppm. Um weiter substituieren zu können, wurde ausgehend vom Punkt mit 60 % Ammoniakanteil der Einfluss der Verschiebung der Dieseleinspritzmassen zwischen Vor- und Haupteinspritzung untersucht.

Untersuchung des Einflusses der Diesel-Voreinspritzung (3, d → e)

3.1 Änderung der Voreinspritzmenge

Zur Verbesserung des Ammoniakschlupfes und der Lachgasemissionen wurde eine Erhöhung der voreingespritzten Dieselmasse untersucht. Um den Lastpunkt konstant zu halten, wurde die Dieselmasse der Haupteinspritzung dementsprechend reduziert. In diesem Fall fällt die Dieselhaupteinspritzung sogar komplett weg, wie in der nachfolgenden Abbildung im Bestromungsverlauf des Dieselinjektors zu erkennen ist. Ziel war es, den Brennraum mit dem enthaltenen Ammoniak-Luft-Gemisch mit dem früh eingebrachten Diesel deutlich besser zu vermischen und dadurch eine deutliche Verbesserung in der Ammoniakumsetzung zu erhalten. Dieses Vorgehen ist im Druck- und Heizverlauf in Abbildung 24 dargestellt. Dabei ist hier nur der Start- und Endpunkt der Untersuchung gezeigt, um den Effekt zu verdeutlichen. Während des Versuchs wurde die Einspritzmenge systematisch verschoben und somit sukzessive die VE-Menge erhöht. Es sind deutliche Unterschiede im Heizverlauf erkennbar. Während beim Basis-Einspritzmuster noch ein deutlicher pre-mixed Peak erkennbar ist, tritt im optimierten Fall der Effekt der Niedertemperaturverbrennung auf. Durch den Wegfall des pre-mixed Peaks steigt das Maximum im Heizverlauf deutlich an. Weiterhin verschiebt sich die Verbrennung in Richtung früh, was hinsichtlich Wirkungsgraduntersuchungen beachtet werden muss. Weiterhin ist der gravierende Einfluss des Wechsels auf eine Einspritzung auf die NH_3- und N_2O- Emissionen zu erkennen. Die Erwartungen der Optimierung konnten bestätigt werden. Eine längere Voreinspritzung führte in diesem Fall zu einer Reduktion der NH_3-Emissionen von 5.500 ppm auf 370 ppm und der N_2O-Emissionen von 160 ppm auf 10 ppm. Die NO_X-Emissionen steigen durch die Änderung der Einspritzstrategie von ca. 2.000 ppm auf 3.600 ppm. Dies lässt sich mit einer erhöhten Brennraumtemperatur durch einen höheren Spitzendruck und eine höhere Wärmefreisetzung begründen.

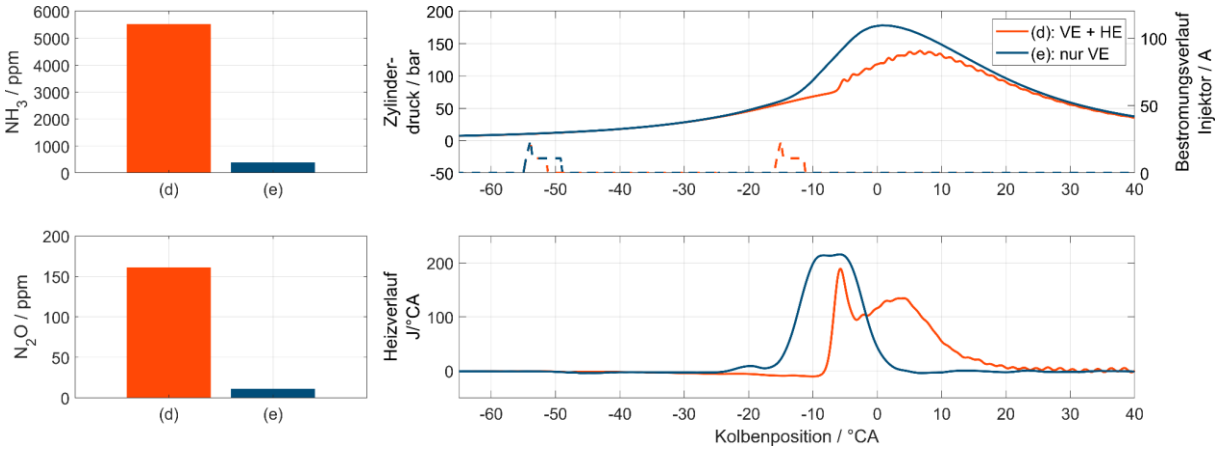

Abbildung 24: Druck- und Heizverläufe, sowie Emissionen beim Verschieben der Dieseleinspritzmenge

Im Ausgangsfall wird die Hauptmenge an Diesel zu einem Zeitpunkt eingespritzt, an dem die Brennraumatmosphäre bereits so heiß ist, dass der Diesel schnell verdampft und die Verbrennung im Zentrum des Brennraums im Bereich des Injektors stattfindet. Somit werden die Randbereiche, in denen sich das vorgemischte Ammoniak-Luft-Gemisch befindet, vom Dieselspray nicht erreicht. Die Folge ist ein höherer Ammoniakschlupf. Bei einer frühen höheren Einspritzung besteht mehr Zeit zur Ausbreitung des Dieselsprays, da der Zündverzug, aufgrund der kühleren Brennraumatmosphäre zu diesem Zeitpunkt, länger ist. Darüber hinaus ist der Brennraumdruck zum Zeitpunkt der Voreinspritzung geringer, sodass das Dieselspray weiter in den Brennraum eindringen kann. Außerdem wird der Diesel bei einer frühen Einspritzung nicht in die Brennraummulde des Kolbens eingespritzt, sondern oberhalb des Kolbens in den Brennraum. Zukünftig muss demnach die Wandbenetzung durch den Diesel beachtet werden, sowohl in der Emissionsentstehung, als auch im Schmieröleintrag.

3.2 Änderung des Voreinspritzzeitpunktes

Nachdem die Verschiebung der Dieseleinspritzmassen zu einer deutlichen Verbesserung geführt haben, sollte nun der Zeitpunkt der Bestromung der Voreinspritzung untersucht werden. Da der Ausgangspunkt schon den bestmöglichen Punkt darstellte und die Variation keine Verbesserung gezeigt hat, diente diese Messreihe als Sensitivitätsanalyse für die Auswirkungen der Änderung des Diesel-Voreinspritzzeitpunktes. Dafür wurde der Bestromungszeitpunkt, ausgehend von den ursprünglichen 55 °KWvOT in 5 °KW-Intervallen sowohl in Richtung früh bis 75 °KWvOT als auch in Richtung spät bis 45 °KWvOT verschoben. Die Änderung des Einspritzzeitpunktes zeigt deutliche Änderungen in den Maximalwerten des Zylinderdrucks und Heizverlaufs. Während der Start der Niedertemperaturverbrennung des Diesels konstant bleibt, verschiebt sich der Start der Hauptverbrennung mit späterem Einspritzzeitpunkt ebenfalls in Richtung spät. Dies kann mit der längeren bzw. kürzeren Zeit für die Gemischaufbereitung im Brennraum begründet werden.

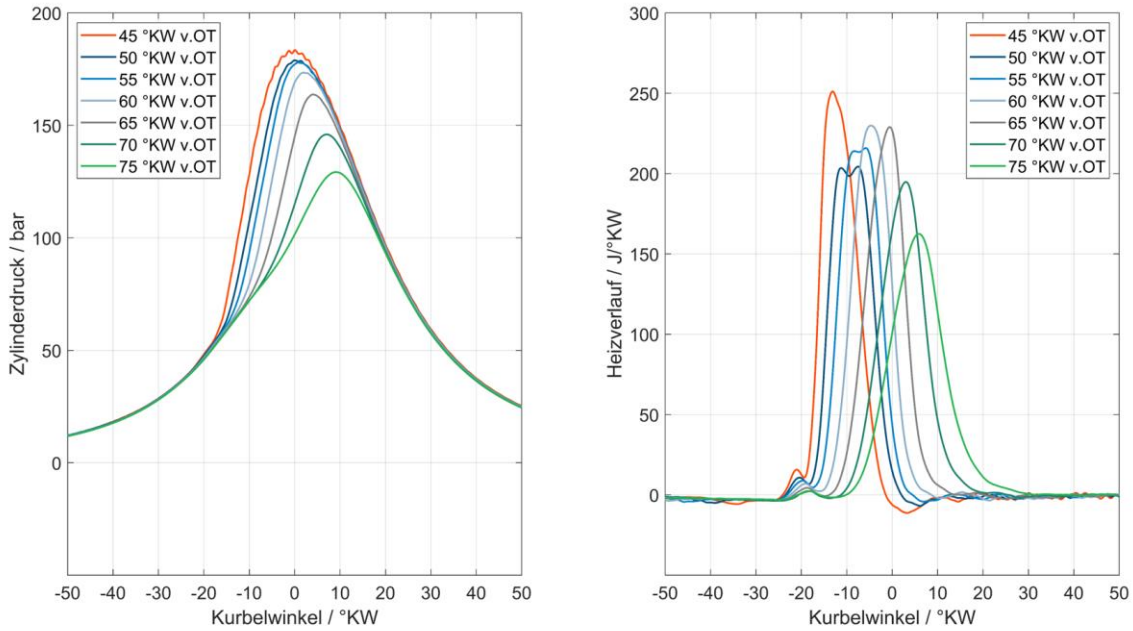

Abbildung 25: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei verschiedenen Bestromungszeitpunkten einer frühen Diesel-Einspritzung bei einer Substitutionsrate von 60 %

Mit einer Verschiebung der Bestromung in Richtung früh nimmt der Peak der Niedertemperaturverbrennung durch die Dieselverbrennung ab, was zu einem späteren Brennbeginn der Ammoniakverbrennung führt. Durch die frühere Dieseleinbringung kann sich dieser deutlich besser im Brennraum verteilen und mit dem Ammoniak und der Luft vermischen. Dadurch wird die Dieselumsetzung gehemmt und der Peak nimmt ab. Eine weitere mögliche Erklärung könnte ein Aufspritzen des Diesels auf die Brennraumwand sein. Durch den frühen Einspritzzeitpunkt ist der Gegendruck im Brennraum so gering, dass das Dieselspray weiter in den Brennraum eindringen kann und somit die Zylinderwand erreicht. Infolgedessen kommt es zu einem Eintrag des Diesels ins Schmieröl, sodass dieser nicht mehr vollständig an der Verbrennung teilnimmt und zu einer Erhöhung der CO-Emissionen, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Die Maxima der Wärmefreisetzung nehmen, aufgrund der unvollständigen Erfassung des Ammoniak-Luft-Gemisches bei früher Einspritzung ab. Dies lässt sich mit dem Anstieg der NH_3-Emissionen belegen.

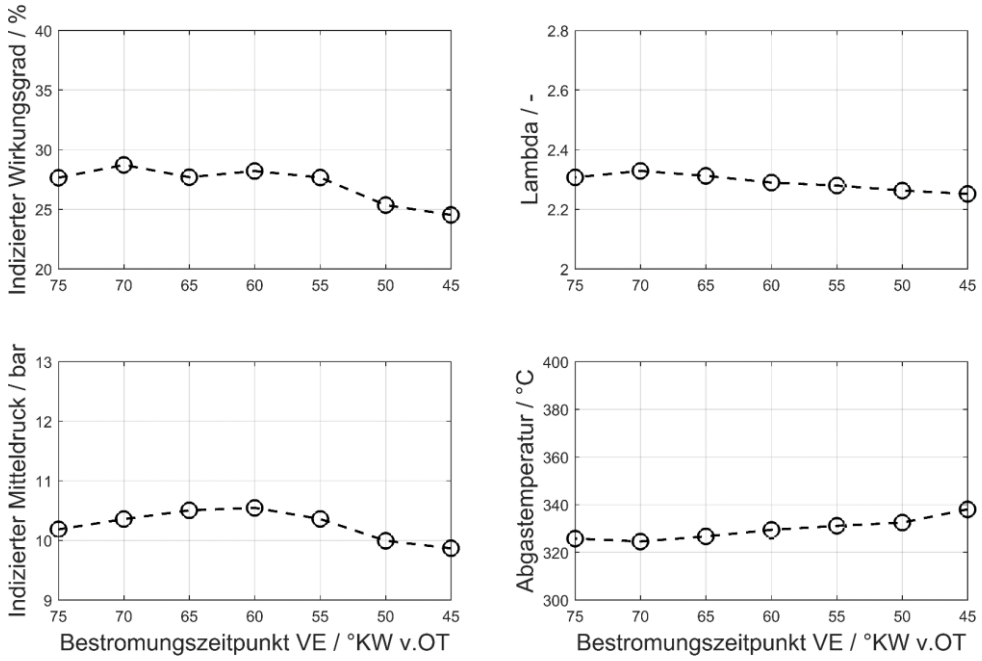

Abbildung 26: Darstellung verschiedener Motorparameter bei einer Diesel-Substitutionsrate von 60 % in Abhängigkeit des Bestromungszeitpunktes einer frühen Einspritzung

Die Motorparameter in Abbildung 26 können wie folgt erläutert werden. Der Mitteldruck und der Wirkungsgrad sind insgesamt auf einem niedrigeren Niveau, als noch bei den vorherigen Variationen, trotz des weiterhin konstanten Gesamtenergiestroms durch beide Kraftstoffe. Grund hierfür ist die schlechte Schwerpunktlage der Verbrennung bei einer sehr frühen Einspritzung. Dies könnte ggf. durch eine kleine Haupteinspritzung verbessert werden. Der Punkt bei einer Bestromung bei 70°KWvOT weist den besten Wirkungsgrad, aufgrund der nahezu optimalen Lage des α_{50} und einer hinreichend großen Wärmefreisetzung auf. Das Verbrennungsluftverhältnis steigt mit einer Verschiebung der Bestromung nach früh. Dies könnte die Theorie des Dieseleintrags ins Schmieröl bestätigen. Dadurch, dass der Diesel die Brennraumwände benetzt und daher nicht aktiv an der Verbrennung teilnimmt, nimmt das Lambda zu. Die Abgastemperatur hingegen steigt bei später Einspritzung an, obwohl die Verbrennung früher endet. Zu erklären wäre dies durch die höhere gesamte Wärmefreisetzung bei später Einspritzung.

Abbildung 27 zeigt den Einfluss des Bestromungszeitpunktes der Voreinspritzung (bei einer Einspritzung) auf die unterschiedlichen Emissionen im Rohabgas. Anders als bei der

Haupteinspritzung (mit zwei Einspritzungen) steigen NH_3 und N_2O bei einer Verschiebung des Zeitpunktes nach früh an. Ursache hierfür ist, entsprechend der oben erläuterten Vermutung, das Aufspritzen des Diesels auf die Brennraumwände. Durch den Schmieröleintrag und die damit geringere verbrannte Dieselmenge fehlt die nötige Energie zum Zünden des Ammoniak-Luft-Gemisches, wodurch es insgesamt zu einer unvollständigen und damit kühleren Verbrennung kommt. Der Anstieg der CO- bzw. Abfall der NO_X-Emissionen bestätigt diese Annahme.

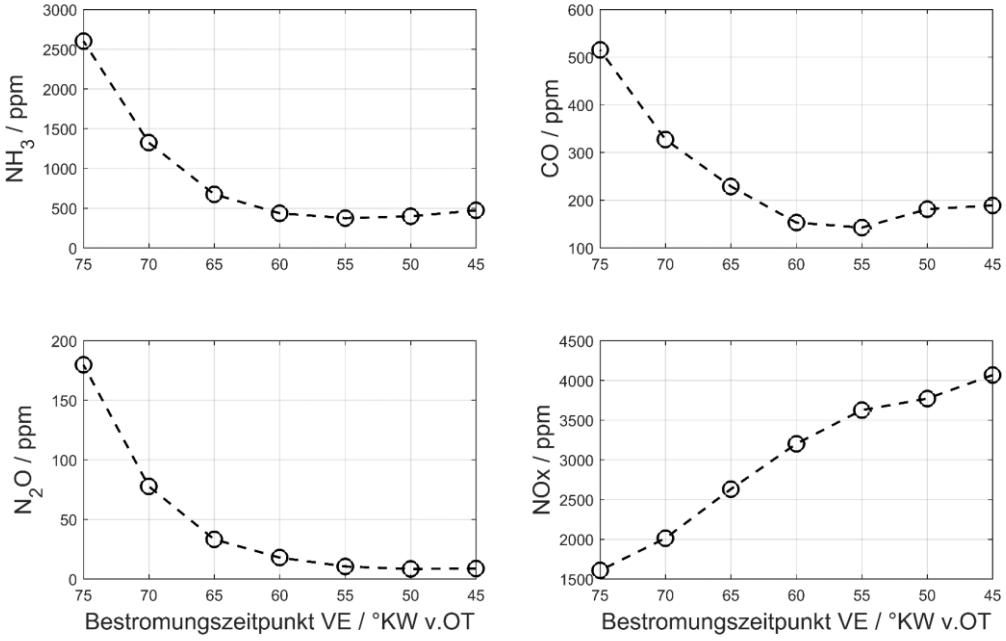

Abbildung 27: Darstellung verschiedener Emissionen bei einer Diesel-Substitutionsrate von 60 % in Abhängigkeit des Bestromungszeitpunktes einer frühen Einspritzung

Nach Abschluss der Variation wurde ein Bestromungszeitpunkt von 50 °KWvOT gewählt. Dieser Punkt war wies den besten Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und Emissionsniveau auf bei stabiler Verbrennung. Ausgehend von dieser Einstellung wurde die Dieselsubstitution von 60 % auf 80 % erhöht. Da anschließend der NH_3-Schlupf mit über 6000 ppm wieder einen kritischen Wert erreichte, sollte die Verbrennung mit einer abschließenden Variation des Verbrennungsluftverhältnisses optimiert werden.

Untersuchung einer Variation des Lambdas (4, f → g)

Für die Lambda-Variation wurde die Substitutionsrate wieder auf 70 % reduziert und das Verbrennungsluftverhältnis, von 1,7 auf 3,1 in Schritten von 0,3 angehoben. Dafür wurde der dem Motor zugeführte Luftmassenstrom über die Veränderung des Ladedrucks eingestellt. Zur Einhaltung des Gesamtenergiestroms und der Kraftstoffanteile wurde der NH_3-Massenstrom ebenfalls angepasst, um den Einfluss des Ladedrucks auf die Ammoniakeinblasung im Saugrohr zu kompensieren.

Anhand der Druckverläufe in Abbildung 28 ist der direkte Einfluss des veränderten Ladedrucks auf den Spitzendruck zu erkennen. Dieser sinkt bei niedrigen Ladedrücken und damit geringen Verbrennungsluftverhältnissen ab.

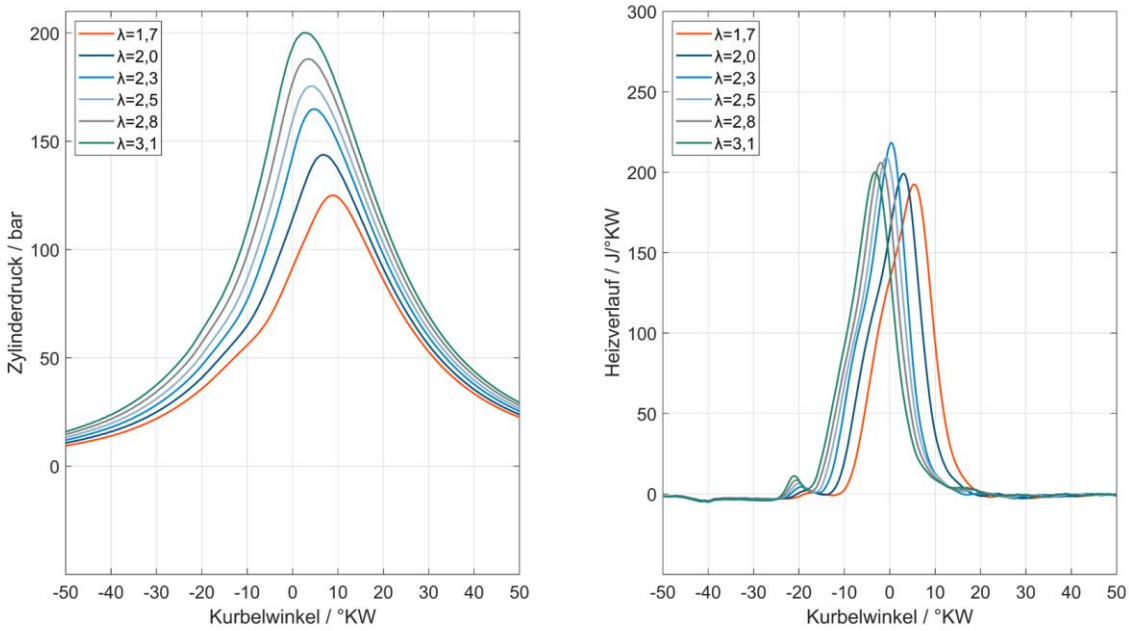

Abbildung 28: Druckverläufe und DVA-aufbereitete Heizverläufe bei verschiedenen Verbrennungsluftverhältnissen bei einer Substitutionsrate von 70 %

Die Emissionen für verschiedene Verbrennungsluftverhältnisse sind in Abbildung 29 dargestellt. Der NH_3-Schlupf und die N_2O-Emissionen steigen mit höherem Lambda an. Zu erklären ist dies durch den allgemeinen Abfall der Prozesstemperatur bei mageren Bedingungen, was durch die geringen Stickoxid-Emissionen in diesem Bereich bestätigt wird. Dadurch verschlechtert sich die Umsetzung von NH_3 und N_2O deutlich. Die CO-Emissionen verhalten sich wie zu erwarten und steigen mit Absenkung des Lambdas.

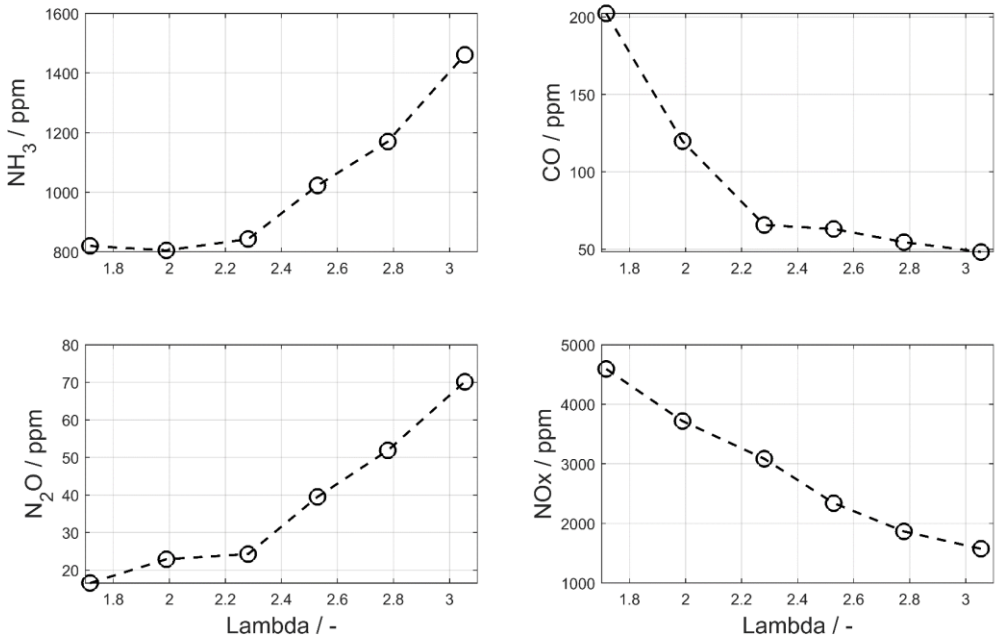

Abbildung 29: Darstellung verschiedener Emissionen bei einer Diesel-Substitutionsrate von 70 % in Abhängigkeit des Verbrennungsluftverhältnisses

Abschließend wurde ein Lambda von 2 aufgrund des Kompromisses aus sehr niedrigen NH_3- und N_2O-Emissionen, akzeptablen CO- und NOx-Emissionen sowie einer guten Schwerpunktlage und maximalen Wärmefreisetzung gewählt. Mit diesen finalen Einstellungen konnte die Substitutionsrate auf 80 % erhöht werden. In diesem Punkt konnte die Verbrennung nicht mehr stabil gehalten werden, was Ammoniakemissionen von 5.500 ppm zur Folge hatte. Um eine Substitution bei noch höheren Ammoniakanteilen erreichen zu können, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, wie beispielsweise der Einfluss einer Kombination aus einer großen frühen Einspritzung und einer späten Einspritzung zum Aufrechterhalten der Verbrennung des Ammoniak-Luft-Gemisches.

Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Messkampagne hinsichtlich der Abgasrohemissionen

Durch die Messkampagne konnten tiefgründige Untersuchungen zur Abgaszusammensetzung und dem Verhalten der Rohemissionen durchgeführt werden (Punkte 1, 2, 3). In direktem Zusammenhang zur Abgaszusammensetzung steht das Brennverfahren, bei dem die wohl größten Entwicklungsschritte gemacht werden konnten (Punkte 4 & 5). Die Realisierung und Optimierung des Brennverfahrens stellte eine essentielle Grundlage zur Betrachtung höherer Substitutionsraten dar und bildet den Grundstein für weitere Untersuchungen. Der Schmieröleinfluss wurde regelmäßig überwacht und analysiert und bietet daher die Möglichkeit, auch hier eine erste Aussage zum Schmieröleinfluss von Ammoniak zu treffen (Punkt 6). Durch die gesamte Arbeit am Prüfstand, die gewonnenen Erfahrungswerte und die Resultate der Messungen konnte eine gute Abschätzung des Potentials dieses Brennverfahrens und der Umsetzung im realen Betrieb getroffen werden (Punkte 7, 8, 9).

Zum Abschluss der Betrachtungen der ersten Messkampagne sind nachfolgend nochmal die wichtigsten Rohemissionen über den relevanten Betriebspunkten dargestellt. In Abbildung 30 sind die Stickoxid-Emissionen, CO_2-Emissionen und die Treibhausgasemissionen in g/kWh dargestellt. Für die Betrachtung wurden drei Betriebspunkte gewählt. (1) zeigt den Ausgangspunkt im reinen Dieselbetrieb. Aus diesem Grund gibt es keine NH_3- oder N_2O-Emissionen. Die Treibhausgasemissionen werden nur durch das entstehende CO_2 beeinflusst (sehr geringe Einflüsse durch Nebenprodukte werden vernachlässigt). In (2) ist der Punkt mit einer Substitutionsrate von 60 % dargestellt, an welchem das Maximum an Ammoniakanteil ohne starke Beeinflussung der Dieseleinspritzstrategie erreicht wurde. In diesem Punkt sind sehr hohe NH_3- und N_2O-Emissionen erkennbar. Durch die hohen Lachgasemissionen stellt sich in den Treibhausgasemissionen ein Nachteil gegenüber dem reinen Dieselbetrieb ein, obwohl energetisch 60 % weniger Diesel eingebracht wurde. (3) zeigt nun den Betriebspunkt bei gleicher Substitutionsrate nach der Verschiebung der Dieseleinspritzmenge in die Voreinspritzung. Es sind deutliche Vorteile in NH_3-, N_2O- und Treibhausgasemissionen sichtbar. Durch die Veränderung in der Verbrennung (siehe Druck- und Heizverläufe) steigen die NO_X-Emissionen an.

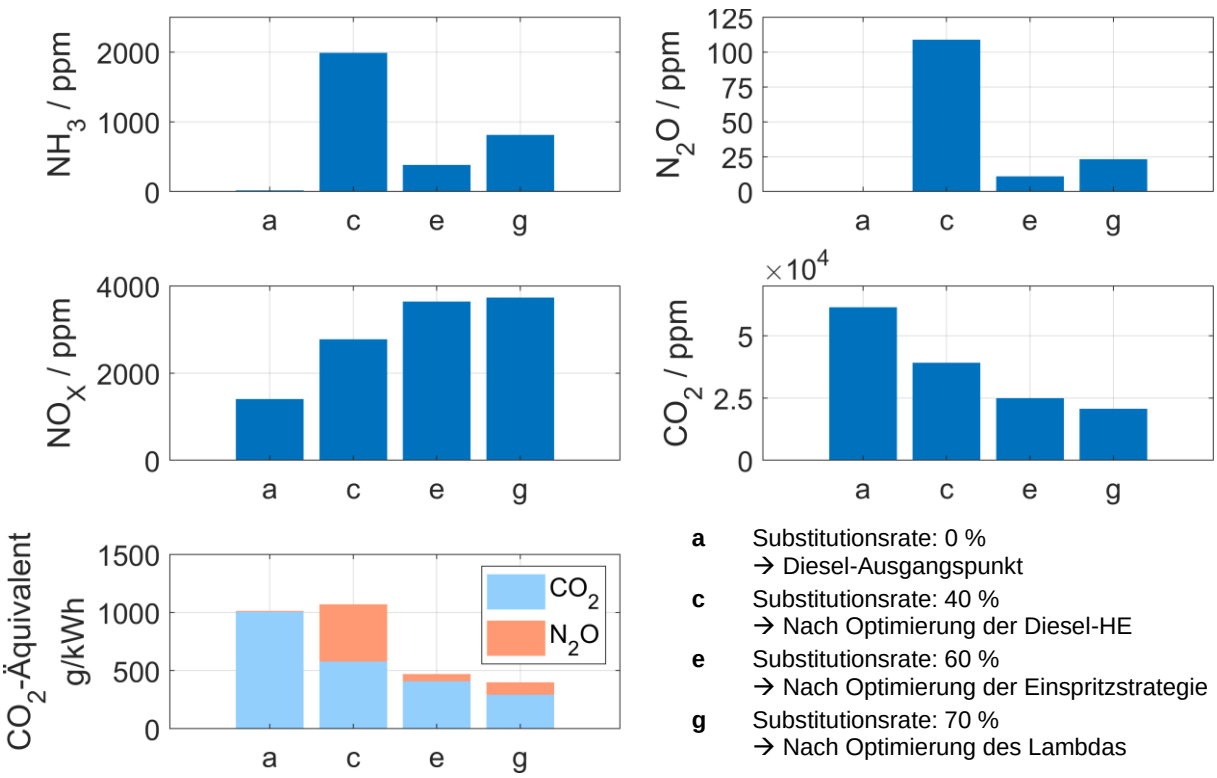

Abbildung 30: Abschließende Betrachtung der Roh- und Treibhausgasemissionen des Diesel-Ausgangspunktes (a) und nach den jeweiligen Variationen (c,e,g)

Um die weiteren Auswirkungen des neuen Kraftstoffes auf den Motor zu untersuchen, wurden in regelmäßigen Abständen Schmierölproben entnommen und im lehrstuhleigenen Schmierstofflabor analysiert. Mithilfe dieser Untersuchung wurden neben der Überwachung des Versuchsträgers auch neue Erkenntnisse zur Schmierölbelastung durch die Verbrennung von Ammoniak gewonnen. Weiterhin wurde auch der Dieselkraftstoff überwacht und analysiert. Im Abschnitt 2.1.4 sind nähere Informationen zur Befundung des Versuchsmotors ausgeführt.

Während der ersten Messkampagne sind keine Komplikationen aufgetreten und alle Messungen konnten erfolgreich durchgeführt werden. Ein negativer Einfluss von Ammoniak auf den Versuchsträger konnte nicht festgestellt werden.

2.1.3 AP 5 Abgleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen

Dieser Abschnitt wird inhaltlich nicht tiefgründig behandelt, da die Aufarbeitung und Auswertung der numerischen Ergebnisse bei den Projektpartnern FVTR und LOGE liegt. Der Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen ist ein wichtiger Schritt in der Modellerstellung und -validierung, sodass diese Thematik in den jeweiligen Berichten ausführlich behandelt wird.

AP 5.5 Durchführung weiterer Messkampagnen

Aufbauend auf die Ergebnisse der ersten Messkampagne wurde der Messplan für die weitere Messkampagne erstellt. Durch die Substitutionsmessreihen und Parametervariationen war es nun möglich, eine effiziente Versuchsplanung für die Erzielung von maximalen Substitutionsraten unter Beachtung von Emissionswerten zu erarbeiten. Es wurden Parameter

identifiziert, die sensitiv auf das Brennverfahren und die Emissionsentstehung wirken. Weiterhin sind die Parameterstudien auch in Bezug auf die Weiterentwicklung und Robustheit der Simulationsmodelle erforderlich.

Exemplarisch für die Fortschritte, die in der zweiten Messkampagne hinsichtlich der Emissionen gemacht wurden, ist nachfolgend eine Substitutionsmessreihe dargestellt.

Untersuchung der Substitutionsrate in einem mittleren Lastpunkt

Zunächst wurde ein Betriebspunkt mittlerer Last gewählt, wie in Abbildung 31 zu sehen ist. Dieser Betriebspunkt entspricht schon der optimierten Dieseleinspritzstrategie, die in der ersten Messkampagne entwickelt werden konnte.

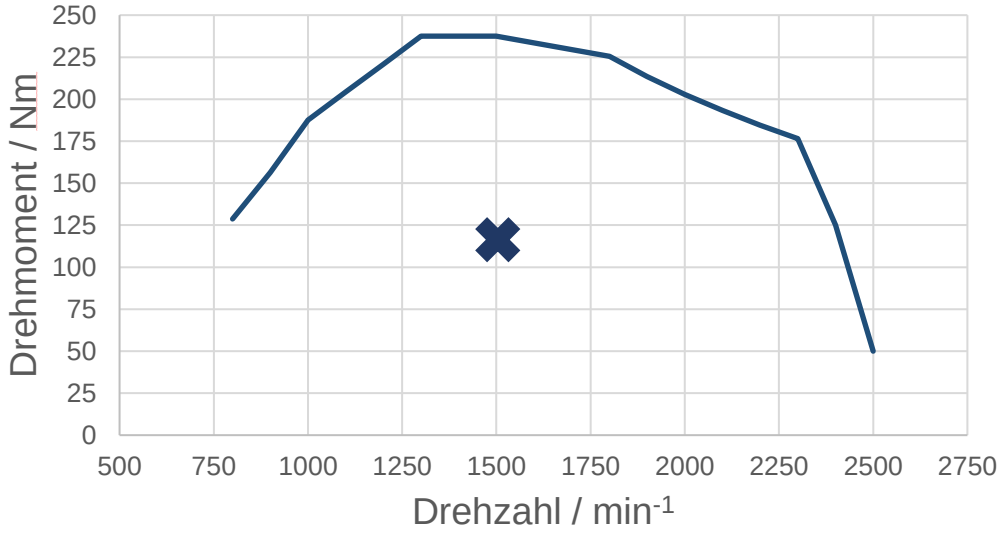

Abbildung 31: Drehmomentkurve des Einzylinder-Forschungsmotors und gewählter Lastpunkt

Dabei wurden folgende Parameter konstant gehalten:

Tabelle 3: Konstante Parameter der Substitutionsreihe

Drehzahl	Ladedruck	Bestromungsbeginn der Dieselvoreinspritzung	Bestromungsbeginn der Diesel-haupteinspritzung	Dieseleinspritzdruck	Gesamtenergiemenge (NH_3+DK)	Ladelufttemperatur
min^{-1}	bar(a)	° KWvOT	° KWvOT	bar	MJ/h	° C
1.500	1,9	55	10	900	142	50

Die nachfolgend untersuchte Substitutionsmessreihe beginnt im reinen Dieselbetrieb. Ab diesem Zeitpunkt wird der Verbrennung nach und nach Ammoniak zugesetzt und weniger Dieselkraftstoff während der Haupteinspritzung (Verringerung der Bestromungsdauer der Diesel-Haupteinspritzung) eingebracht. Die Gesamtenergiemenge aus den beiden Kraftstoffen wird konstant gehalten.

Abbildung 32 zeigt die Druck- und Heizverläufe für fünf ausgewählte Substitutionsraten. Die Druckkurve zeigt einen stetigen Anstieg des Maximaldrucks über die Substitutionsrate. Die Verbrennung der Dieselvoreinspritzmasse ist deutlich an der Heizkurve des reinen Dieselpunktes (orange durchgehend) zu erkennen, bei der die Wärmefreisetzung auf einem ähnlichen Niveau wie die der Hauptverbrennung liegt. Die Verbrennung des Kraftstoffes aus der Voreinspritzung ist in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste geringe Wärmefreisetzung wird als Niedertemperaturverbrennung des Dieselkraftstoffes (auch als erste Zündstufe bezeichnet) identifiziert. Die Verbrennung von Dieselkraftstoff bei niedrigen Temperaturen erfolgt aufgrund spezifischer chemischer Reaktionen. Die zweite Wärmefreisetzung der Umsetzung der Voreinspritzmasse tritt auf, wenn die Niedertemperaturchemie durch den Anstieg der Brennraumtemperatur und damit der Änderung der chemischen Reaktionen abnimmt und die vollständige Oxidation der Voreinspritzdieselmenge stattfindet. Daraufhin gelangt der Diesel aus der Haupteinspritzung in den Brennraum und zündet nach einem kurzen Zündverzug.

Mit zunehmender Substitutionsrate ist zu erkennen, dass die Niedertemperaturverbrennung sukzessive abnimmt und sich nach spät verschiebt, bis sie bei einer Substitutionsrate von etwa 50 % so gut wie verschwunden ist. Bei dieser hohen Menge an vorgemischtem Ammoniak wird die Niedertemperaturverbrennung des Dieselkraftstoffes unterdrückt. Aus den Untersuchungen von Loge konnte ermittelt werden, dass mit zunehmendem Ammoniakanteil die OH-Radikale eher mit dem Ammoniak (NH_3+OH → NH_2+H_2O) anstelle mit dem Diesel reagieren. Durch den steigenden Ammoniakanteil im Brennraumgemisch, der langsameren Brenngeschwindigkeit und der hohen Zündtemperatur lässt sich die Verschiebung der ersten Wärmefreisetzung nach spät erklären. Im weiteren Verlauf verschiebt sich auch die zweite Wärmefreisetzung der Voreinspritzung in Richtung spät. Auch die Intensität dieser Wärmefreisetzung nimmt zu, da der zunehmende übrige Diesel aus der gehemmten Niedertemperaturverbrennung nun zusammen mit dem Ammoniak umgesetzt wird. Bei einer Substitutionsrate von 50 % verschiebt sich die Wärmefreisetzung in die der Dieselhaupteinspritzung, was ebenfalls auf die langsamere Verbrennung zurückzuführen ist. Das Maximum der Hauptverbrennung verschiebt sich bei Substitutionsraten von bis zu 50 % in Richtung früh. Aufgrund des ineinander Übergehens von Vor- und Hauptverbrennung gibt es im weiteren Verlauf nur noch eine deutlich sichtbare Wärmefreisetzung mit hoher Intensität. Ab einer Substitutionsrate von 70 % verschiebt sich die Lage der maximalen Wärmefreisetzung wieder etwas in Richtung spät. Die Dieselhaupteinspritzung liegt nun genau in der sich entwickelnden Wärmefreisetzung der vorgemischten Ammoniak/Diesel-Verbrennung.

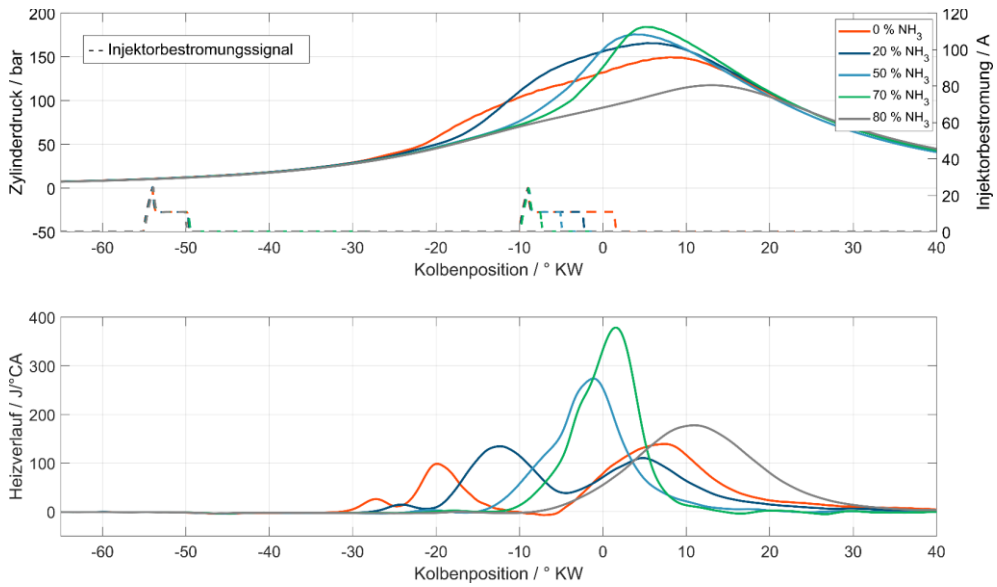

Abbildung 32: Druck- und Heizverläufe der Substitutionsreihe mit einer stabilen Verbrennung bis 70 %

Abbildung 33 zeigt neben dem Wirkungsgrad und der Abgastemperatur auch die Rohemissionen für die dargestellten Substitutionsraten. Die Ammoniakkonzentration im Abgas steigt mit zunehmender Substitution kontinuierlich auf 383 ppm (bei 70 % Substitutionsrate). Im Vergleich zu anderen Untersuchungen mit Saugrohreinblasung des Ammoniaks und Diesel-Direkteinspritzung liegen die Ammoniakemissionen auf einem niedrigen Niveau. Bei 80 % und einer unvollständigen Verbrennung steigt der Ammoniakschlupf auf 3.700 ppm an. Bei dieser Substitutionsrate bedarf es weiterer Untersuchungen um die Verbrennung zu stabilisieren.

Die Substitution von Diesel führt zu einem Rückgang der CO-Emissionen. Um die gesamten Treibhausgasemissionen zu betrachten, müssen die N_2O-Emissionen berücksichtigt werden. Ausgehend von einer reinen Dieselverbrennung ohne N_2O-Konzentration im Abgas steigt die Konzentration mit zunehmendem Substitutionsgrad auf 10-20 ppm an. Die Senkung des Dieselmassenstroms geht auch mit einer stetigen Verringerung der CO_2-Emissionen einher. Es kann eine Reduktion von ca. 70 % erreicht werden. Der indizierte Wirkungsgrad zeigt bei konstanter Energiezufuhr einen Anstieg auf, wodurch weiteres CO_2 eingespart werden kann. Die Effizienzsteigerung mit zunehmender Substitution zeigt sich auch durch die Absenkung der Abgastemperatur.

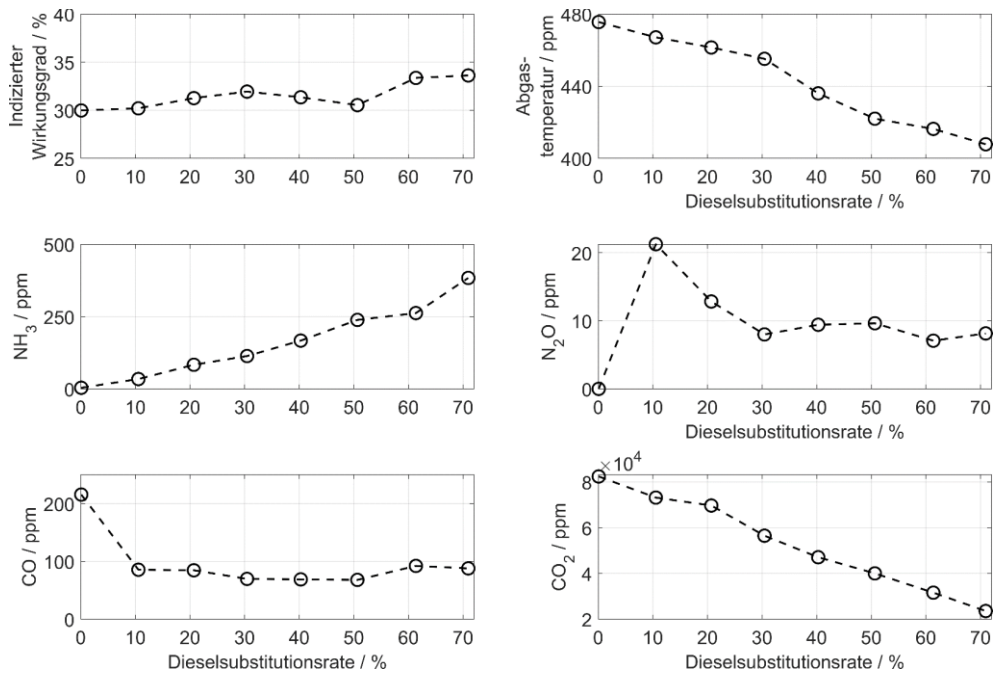

Abbildung 33: Betriebsparameter und Emissionen der Substitutionsreihe

Aufgrund der konstanten Dieseleinspritzzeitpunkte während der Steigerung der Substitution (vgl. Tabelle 3) ist der Einfluss der Ammoniakzugabe auf den Zündverzug (SoE_{VE} - SoC) in Abbildung 34 sehr deutlich zu erkennen. Der Zündverzug nimmt mit höheren Substitutionsraten zu, wobei der Verbrennungsbeginn um ca. 18° nach spät verschoben wird. Dies liegt daran, dass mit zunehmender Ammoniakmenge die Niedertemperaturverbrennung des Dieselkraftstoffes reduziert und die vorgemischte Dieselvoreinspritzmasse schnell und spontan in einer späteren Wärmefreisetzung umgesetzt wird. Durch diese hohe Reaktivität wird das Ammoniak ebenfalls schnell entzündet und verbrannt. Darauf deutet auch die kürzer werdende Dauer zwischen Start und Schwerpunkt der Verbrennung (SoC - CoC) hin. Da sich das Ende der Verbrennung (EoC) tendenziell in Richtung früh verschiebt, sinkt die absolute Brenndauer mit zunehmender Substitutionsrate durch die Unterstützung der intensiveren Vormischverbrennung der Voreinspritzung auf die Gesamtverbrennung. Diese generell kürzer werdende Brenndauer kann analog zu den sich immer weiter zusammenschiebenden Wärmefreisetzungen betrachtet werden, da für hohe Substitutionsraten nur noch eine große Wärmefreisetzung festgestellt wird.

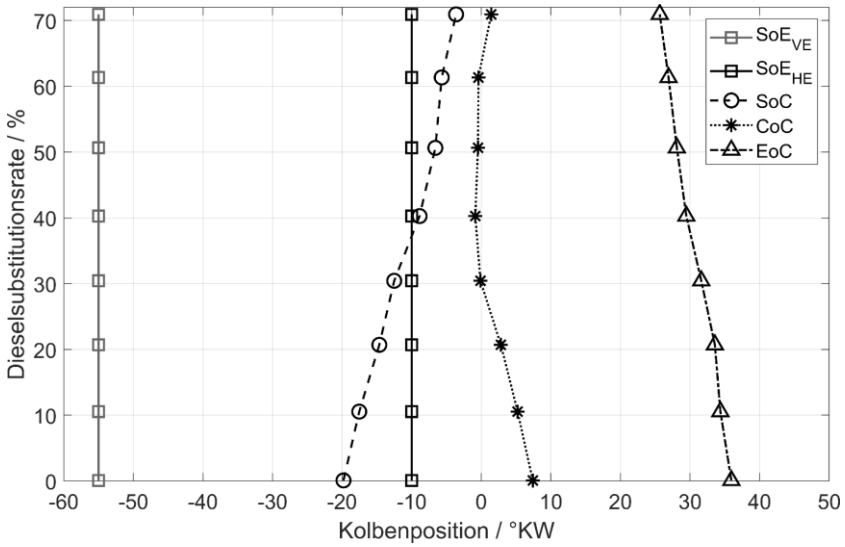

Abbildung 34: Verbrennungskennwerte

Zusammenfassend ergibt sich eine CO_2-Einsparung von ca. 69 % für eine Substitutionsrate von 70 %. Wie in Abbildung 35 zu sehen, nehmen die CO_2-Emissionen proportional zur Steigerung der Substitutionsrate ab und die N_2O-Emissionen bleiben auf einem sehr niedrigen Niveau. Bei 80 % steigen die N_2O-Emissionen aufgrund der unstabilen Verbrennung wieder an, dieser Punkt zeigt aber das Potential, auch eine Substitutionsrate von 80 % effizient erreichen zu können.

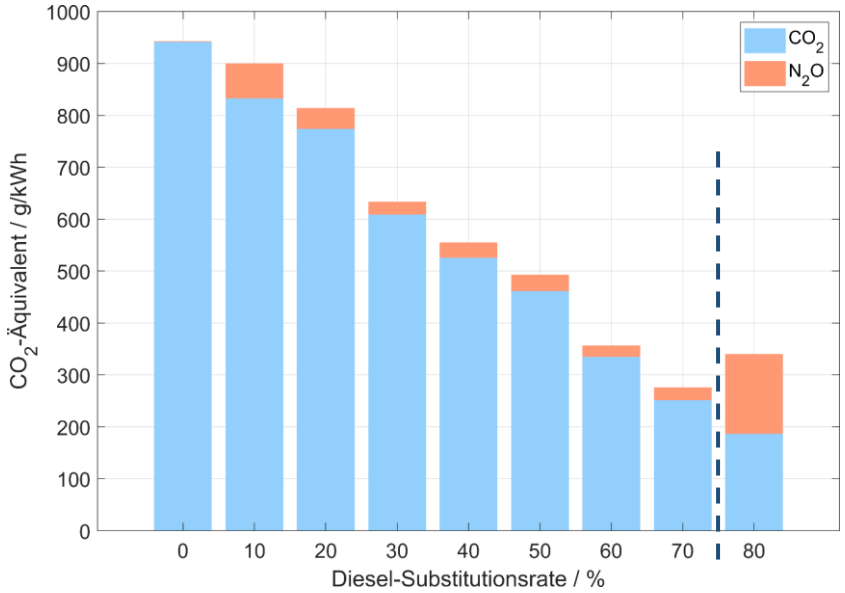

Abbildung 35: CO_2-Äquivalent der Substitutionsmessreihe mit einer stabilen Verbrennung bis 70 % Ammoniakanteil

Die NO_X-Emissionen liegen zwar als Rohemissionen (5.300 ppm) deutlich über den Grenzwerten, wie bspw. IMO Tier 3, können aber durch eine Abgasnachbehandlung unter die geforderten Grenzwerte gesenkt werden. Dazu ist in Abbildung 36 ein Konzept zur Realisierung dieser Abgasnachbehandlung dargestellt. Durch innermotorische Anpassungen gestaltet sich die NO_X-Reduzierung aufgrund der neuen Abgaszusammensetzung schwierig, da bei einer Anpassung auch die NH_3- und N_2O-Emissionen beeinflusst werden.

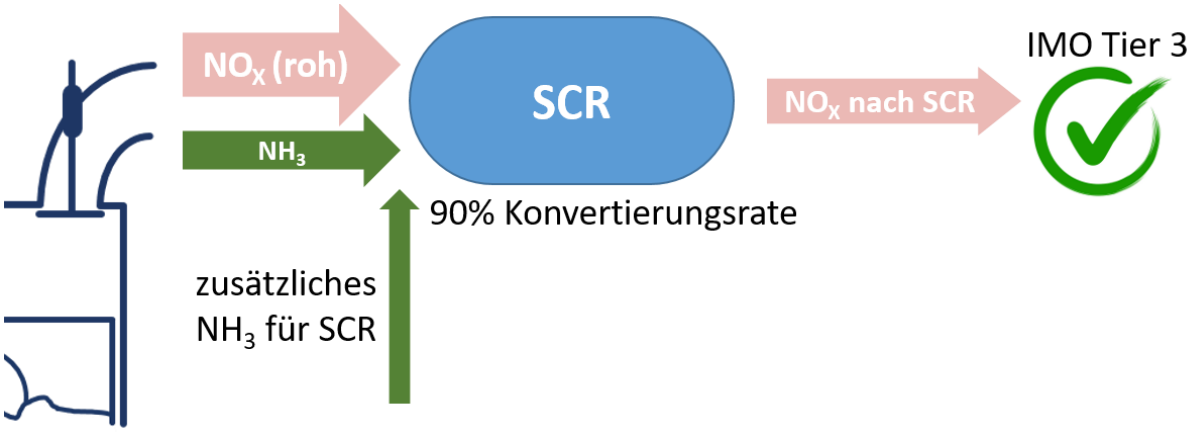

Abbildung 36: Konzept der Abgasnachbehandlung zur Einhaltung aktueller Grenzwerte

Auch in dieser Messkampagne wurde das Schmieröl überwacht und regelmäßig untersucht. Die Ergebnisse bestätigten die Untersuchungen aus der ersten Messkampagne.

2.1.4 AP 7 Koordination, Zusammenfassung & Systematisierung der Ergebnisse

AP 7.1 Projektkoordination, Kommunikation, Organisation/Durchführung von Projekttreffen

Als Konsortialführer übernimmt die FVTR die federführende Verantwortung für die Koordination, Organisation und Durchführung von Projektmeetings, Projekttreffen oder weiteren Projektangelegenheiten.

AP 7.2 Durchführung eines projektbegleitenden Ammoniak-Workshops

Der Ammoniak-Workshop wurde am 10.04.2024 durchgeführt. Dieser fand im Rahmen des CAMPFIRE-Treffens zum Austausch über maritime Antriebe statt. In diesem Konsortium konnte eine Vielzahl an Unternehmen und Forschungseinrichtungen, welche sich mit dem Thema Ammoniak auseinandersetzen, erreicht werden. Ziel des Workshops war neben der Vorstellung des Projekts mit den erreichten Ergebnissen vor allem ein Wissensaustausch beim Umgang mit Ammoniak.

AP 7.3 Dokumentation der Ergebnisse, Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Veröffentlichungen publiziert. Siehe Abschnitt 2.6 für nähere Informationen. Die Ergebnisse wurden aufbereitet und im Rahmen von Veröffentlichungen, Zwischenberichten und dem Abschlussbericht dokumentiert.

AP 7.4 Systematisierung der exp. Erkenntnisse, Übertragbarkeit auf größere Motoren

Mit diesem Projekt wurde erfolgreich ein Ammoniak-Diesel-Dual-Fuel Brennverfahrens an einem Einzylinder-Motor umgesetzt und untersucht. Als Ergebnis des Verbundprojektes können klare Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Entwicklung von Ammoniak-Diesel-Dual-Fuel Brennverfahren gegeben werden welche sich in verschiedene Teilaspekte untergliedern:

Ammoniak-Zündung:

Aus vorangegangenen Projekten (03SX421A) konnten Erkenntnisse der Dual-Fuel Verbrennung mit Erdgas auf die Verbrennung mit Ammoniak übertragen werden. Eine führe Piloteinspritzung von Diesel mit einer zweiten Einspritzung im Bereich des oberen Totpunktes

resultiert in einer deutlich besseren Umsetzung des schwer brennbaren Ammoniaks. Im Vergleich zu dem Erdgas-Brennverfahren sollten die Piloteinspritzung bei Ammoniak noch deutlich früher liegen (bis zu 60° KW vor ZOT), um den Ammoniakschlupf auf deutlich unterhalb von 1000 ppm im Abgas zu reduzieren. Durch eine zweite Dieseleinspritzung um den oberen Totpunkt wird die Gesamtbrenndauer und die Lage der Verbrennung gesteuert wodurch vorrangig Einfluss auf die NOX-Emissionen und den Wirkungsgrad genommen werden kann.

Ammoniak-Verbrennung:

Infolge der sehr frühen Diesel-Piloteinspritzung wurde für Diesel-Substitutionsraten von 0-50% (Betriebsdruckabhängig) eine dreiphasige Wärmefreisetzung bei der thermodynamischen Auswertung festgestellt. Auf Basis der Erkenntnisse von LOGE kann bei der ersten Wärmefreisetzung von einer Niedertemperaturverbrennung von Ammoniak ausgegangen werden, die zweite entspricht der Umsetzung des Diesels aus der Piloteinspritzung und die dritte Wärmefreisetzung entspricht der Verbrennung des vorgemischten Ammoniaks und der Dieseleinspritzmenge um den oberen Totpunkt. Mit zunehmenden Substitutionsraten sind die ersten beiden Phasen der Verbrennung deutlich weniger ausgeprägt bis zu einem vollständigen Übergang zu einer einzelnen Wärmefreisetzung. Die Hintergründe zu den spezifischen Wärmefreisetzungen und Reaktionspfaden sind nach den Untersuchungen und Modellierungen noch nicht vollständig verstanden. Die Zünd- und Verbrennungsvorgänge sollten daher mit optischen Messmethoden [OH-Endoskopie (Chemilumineszenz), UV-Endoskopie] untersucht werden um damit auch die wesentlichen Reaktionspfade für die Modellierung spezifizieren zu können

Übertragung auf größere Bohrungsgrößen

Die Übertragung des Brennverfahrens auf Motoren mit größerer Bohrung ist zum jetzigen Zeitpunkt der Erkenntnis möglich. Um die Sicherheit dieser Aussage zu erhöhen wird empfohlen das Verbrennungskonzept mit der sehr frühen Dieseleinspritzung auch an einem Einzylinder-Motor mit größerer Bohrung zu überprüfen.

Materialeigenschaften und Auswirkungen auf das Schmieröl:

Bei den begleitenden Schmierölluntersuchungen wurden signifikante Konzentrationen an Ammonium (Indikator für Ammoniakanteil im Schmieröl) festgestellt. Ammonium ist eine schwache Säure (pKs=9,25) und kann daher zu einer erhöhten Beanspruchung des Schmieröls in Bezug auf die alkalische Reserve. Das Vorhandensein von Ammoniak im Schmieröl in Verbindung mit Wasser (Verbrennungsprodukt) kann zu Reaktionen mit Kupfer (u. A. Bestandteil in Grundlagern, Nockenwellenlager etc.) führen. Welche genauen Wechselwirkungen zwischen Ammoniak und Schmieröl vorliegen und welchen Einfluss diese auf die Performance des Öls und Ablagerungen auf Bauteilen haben ist derzeit unbekannt.

AP 7.5 Befundung des Versuchsmotors

Durch die tägliche Dokumentation im Prüfstandsbetrieb ist eine genaue Aussage über die Betriebsstunden, die genutzten Mengen Kraftstoff und die Belastung in Form der Betriebspunkte möglich. Mithilfe dieser Dokumentation und der fachkundigen Kenntnisse des zuständigen Technikers und Ingenieurs ist eine tiefgründige Einschätzung des Versuchsträgers möglich. In regelmäßigen Abständen wurden dazu motorspezifische Wartungsarbeiten und Tests durchgeführt und dokumentiert.

Das in regelmäßigen Abständen untersuchte Schmieröl im lehrstuhleigenen Schmierstofflabor unterstütze die Befundung des Motors weiterhin. Die Analysen zeigten Trends im Schmieröleinfluss durch Ammoniak und halfen bei der Aufarbeitung der Messkampagnen hinsichtlich Anpassungen für kommende Messungen oder Projekte. Dazu sind nachfolgend einige Änderungen im Schmieröl dargestellt. Zur Einordnung ist in Abbildung 37 die durchschnittliche maximale Substitutionsrate während der Versuche über die Betriebsstunden dargestellt. Diese Kurve gibt einen ungefähren Verlauf der Fortschritte in der Brennverfahrensentwicklung wieder. Die Punkte liegen zeitlich mit den Schmierölproben überein, wie anhand der abgebildeten Probennummern zu erkennen ist. Es kann abgeleitet werden, dass erst ab ca. 50 Betriebsstunden ein nennenswerter Betrieb mit Ammoniak realisiert wurde und die maximal erreichte Substitutionsrate anfangs noch bei nur ca. 30 % lag. Dieser Wert konnte aber über die folgenden 150 Betriebsstunden stetig gesteigert werden und fand mit ca. 88 % nach 200 Betriebsstunden sein Maximum. Aufgrund der weiterhin regelmäßigen Betriebszeiten im Dieselbetrieb (bspw. zum „Leerfahren“ des Kraftstoffsystems, zur Aufnahme von Referenzpunkten) müssen die Messdaten kritisch betrachtet werden.

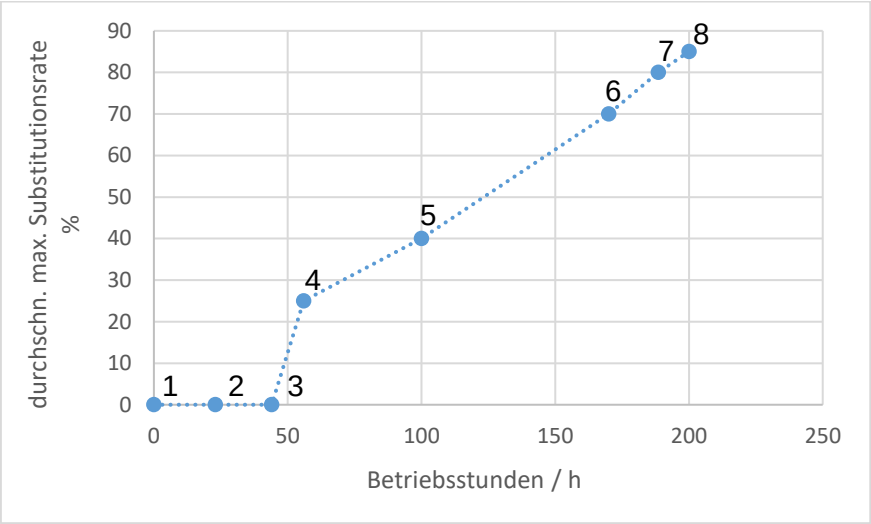

Abbildung 37: Durchschnittliche maximale Substitutionsrate über den Betriebsstunden des Motors

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Schmierölkennwerte über der Probennummer dargestellt. Die Skalierung im Vergleich zu Abbildung 37 ändert sich durch den Wegfall der Betriebsstunden und ist bei der Betrachtung zu beachten.

Analog zur Einbringung von Ammoniak zur Verbrennung konnte ein Anstieg im Ammonium-Gehalt des Schmieröls festgestellt werden. Dies ist offensichtlich auf den Betrieb mit Ammoniak und die dadurch entstehende Einbringung ins Schmieröl zu erklären. Dabei ist aber kein direkter Zusammenhang zwischen maximal erreichter Substitutionsrate und Ammonium-Gehalt erkennbar. An dieser Stelle ist nicht sicher, ob der Ammonium-Gehalt im Schmieröl gleichbleibend ist, oder ob sich der Gehalt je nach Lastpunkt, Substitutionsrate oder Zeitpunkt der Probenziehung ändert. Als Hypothese kann formuliert werden, dass der Ammonium-Gehalt während des Betriebes mit hohen Substitutionsraten dementsprechend ansteigt, aber wieder absinkt, wenn der Motor vor der Ziehung der Probe (z. B. zum Entleeren) eine gewisse Zeit im reinen Dieselbetrieb gefahren wird. Dieses Verhalten sollte in kommenden Projekten genauer betrachtet und untersucht werden.

Ein unterschiedlicher Zusammenhang stellt sich hingegen beim Kupfergehalt des Schmieröls ein. Abbildung 38 zeigt den Verlauf des Kupfergehalts über den Probennummern. Dieser steigt

mit andauerndem Betrieb an und zeigt eine Abhängigkeit zur maximalen Substitutionsrate, bzw. zur Steigerung der eingebrachten Ammoniakmenge. Durch den Ammoniakbetrieb werden demnach kupferhaltige Bauteile im Motor, hauptsächlich Lager, angegriffen und bringen Bestandteile ins Schmieröl ein. Die aggressive Wirkung von Ammoniak auf Kupfer belegt diesen Effekt.

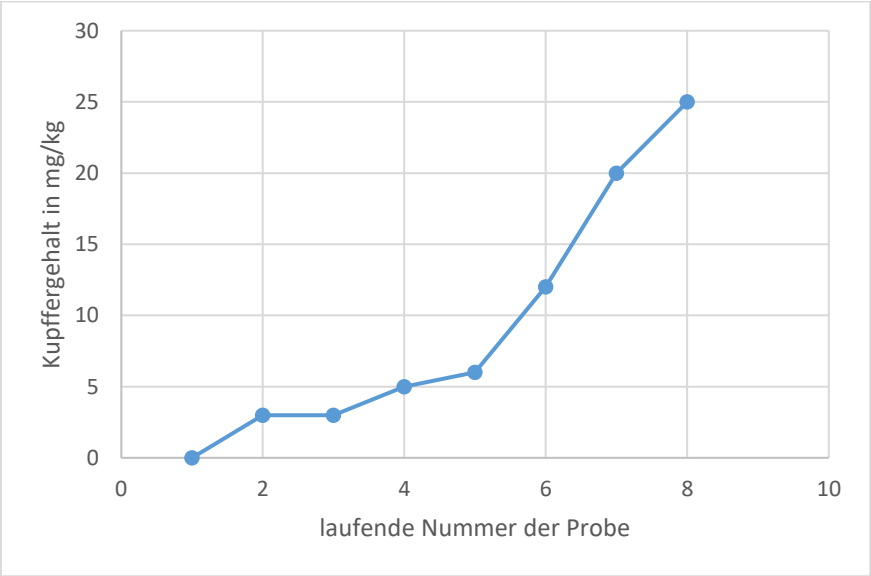

Abbildung 38: Laufzeitabhängiger Kupfergehalt im Schmieröl durch den Einfluss von Ammoniak

Auch bei Eisen ist ein solches Verhalten zu beobachten. Eisen ist ebenfalls nicht beständig gegenüber Ammoniak und reagiert korrosiv bei Kontakt. Da im Motor sehr viele eisenhaltige Bauteile zu finden sind, wie bspw. Zylinderkopf. Zylinderblock, Ventile oder Ketten, ist der Einfluss auf das Schmieröl erwartbar. Der Anstieg ist im Vergleich zum Kupfergehalt aber deutlich niedriger, da Kupfer stärker reagiert als Eisen.

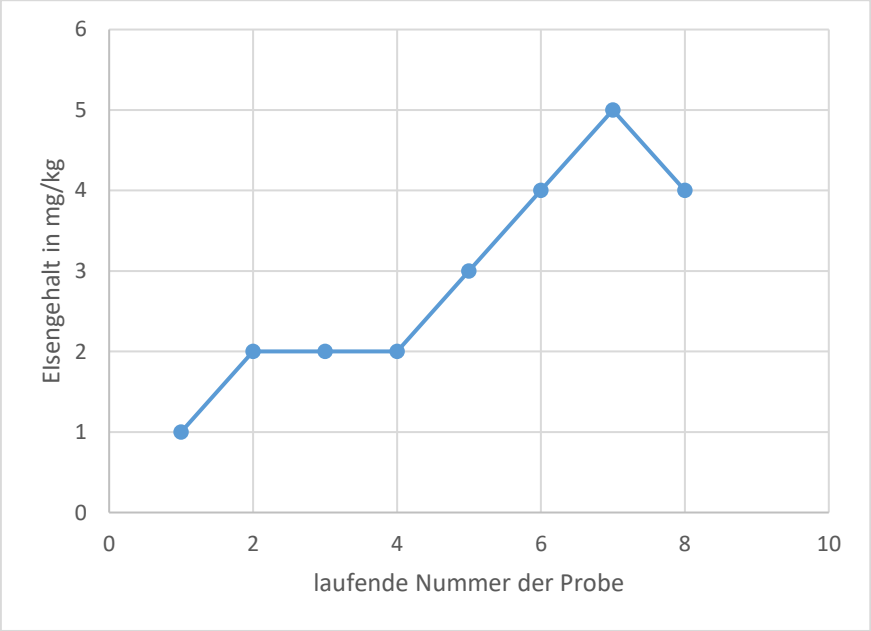

Abbildung 39: Eisengehalt im Schmieröl

Neben den gezeigten Werten wurde eine Vielzahl weiterer Kennwerte untersucht, wie bspw. die Dichte, Viskosität, Wassergehalt, TAN, TBN, Ruß, Kraftstoffgehalt oder weitere einzelne Stoffgehalte. Alle Befundungen wurden technisch dokumentiert und stehen den Ingenieuren für kommende Messungen und Projekte zur Verfügung.

2.2 Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind:

0812/0817/0822 Personalkosten 264.380,80 €

In den Personalkosten sind alle Arbeitsleistungen der am Projekt beteiligten Fachkräfte in Form von folgenden Positionen enthalten:

- Bauliche Erweiterungs- und Optimierungsmaßnahmen des Prüfstandes und dessen Peripherien
- Programmiertechnische Entwicklung bzw. Erweiterungs- und Optimierungsmaßnahmen von Auswerteroutinen für Prüfstandsdaten
- Auslegung und Beschaffung von Prüfstandssystemen
- Prüfstandsbetrieb mit paralleler Datenerfassung
- Turnusbasierte Sicherheitsüberprüfungen von Prüfstandsperipherien
- Projektkoordination und -dokumentation
- Analyse und Beurteilung von erfassten Daten aus Prüfstandsbetrieb
- Aktive Teilnahme an Fachtagungen
- Ausarbeitung von Publikationen/Schaffung wissenschaftlicher und infrastruktureller Voraussetzungen für Dissertationsvorhaben

0850 Gegenstände und andere Investitionen 151.986,31 €

Im Rahmen des Projektes wurden diverse Investitionen getätigt, die zur Realisierung der Projektziele notwendig waren. Hier ergaben sich die größten Positionen in der Erweiterung des Prüfstandes durch zusätzliche Installationen von Peripherien wie bspw. der Abgasmessanlage, des Ammoniak-Verdampfermoduls, der Ansaugtonne oder des Gasflaschenschrankes. Außerdem wurden vorhandene Systeme durch die Investitionen erweitert bzw. optimiert. Dies betrifft vor allem das Controlling des Prüfstandes in Bezug auf das Steuergerät, der Messtechnik und der Automatisierung.

Nähere Informationen zu den Investitionen können der Geräteliste entnommen werden.

0838 Verbrauchsmaterial 25.922,72 €

Zur Umsetzung aller Prüfstandsaufgaben waren Ausgaben im Verbrauchsmaterial über die Laufzeit des Projekts notwendig. Die größten Positionen im Verbrauchsmaterial stellte der benötigte Kraftstoff dar.

Umwidmungen

Zusätzlich zu den Umwidmungen aus den Zwischenberichten 2021 und 2022 kamen im Jahr 2023 folgende Umwidmungen hinzu:

Im Jahr 2023 wurden für die Teilnahme am CIMAC Kongress in Busan (Südkorea) insgesamt 4.500 € umgewidmet. Dabei kamen 1.000 € aus 0850 und 2.500 € aus 0844. Die erfolgreiche Teilnahme am Kongress mit Vorstellung der Projektzwischenergebnisse ist auf die umfangreichen und sehr positiven Erkenntnisse am Motorenprüfstand zurückzuführen und das hohe Potential, dass das entwickelte Brennverfahren hinsichtlich einer Retrofit-Lösung bietet. Dementsprechend war das Interesse im Verlaufe des Kongresses deutlich sichtbar.

Weiterhin war aufgrund der umfangreichen Motorenversuche die Unterstützung eines Studenten als Hilfswissenschaftler äußerst hilfreich. Aus diesem Grund wurde eine Weiterbeschäftigung des Studenten angestrebt. Aufgrund der verzögerten Anstellung eines Technikers (unzureichende Bewerberzahl mit entsprechender Qualifikation) konnten die Mittel aus 0817 (5.000 €) umgewidmet werden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die in der Vorhabensbeschreibung dargestellten Arbeiten wurden wie geplant im Projektvorhaben erfolgreich abgearbeitet. Die geleisteten Arbeiten am Prüfstand waren notwendig, um die hohe Qualität der Messergebnisse sicherzustellen. Alle installierten Peripherien waren für den erfolgreichen Prüfstandsbetrieb notwendig. Die Menge und Qualität der Projektergebnisse sprechen für die durchgeführten Arbeiten. Mithilfe der geleisteten Arbeiten am LKV konnten die Projektpartner weiterhin sehr gut arbeiten und die Simulationsmodellentwicklung vorantreiben. Die Vielzahl an Veröffentlichungen und die positive Resonanz auf Konferenzen bestätigten die Ergebnisse der geleisteten Arbeiten. Auch intern stellt das Projektvorhaben viele wichtige Erkenntnisse bereit, bspw. für andere Projekte in Bezug auf den Umgang mit Ammoniak, Weiterentwicklung von Messtechnik oder Prüfstandssicherheitskonzepten.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertung im Sinne des Verwertungsplans

Das in diesem Projekt entstandene Ammoniak-Kraftstoffmodul bildet die Grundlage für weitere wissenschaftliche Tätigkeiten in folgenden Forschungsprojekten. Durch das erlangte Fachwissen über das Brennverfahren können weitere darauf aufbauende Projekte bearbeitet werden und das diesbezügliche Know-how an den Lehrstühlen weiter vertieft werden.

Des Weiteren werden die herausgearbeiteten Ergebnisse für Publikationen auf Fachtagungen verwendet. Die Forschungsresultate der Themengebiete Ammoniak-Diesel Dual-Fuel Brennverfahren, Emissionsbildung und Schmieröl-Wechselwirkungen bilden die Grundlage für Dissertationen von Projektmitgliedern seitens des LKV. Die Ergebnisse fließen ebenfalls in die Lehrveranstaltungen (Vorlesungen und Praktika) mit ein

Im Verwertungsplan ist keine direkte wirtschaftliche Verwertung seitens der Universität vorgesehen.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Wie schon in Abschnitt 1.3 ausgeführt, sind parallel zu diesem Forschungsprojekt weitere Untersuchungen zu Brennverfahren mit Ammoniak gelaufen. Auch diese Untersuchungen konnten erfolgreich einen Betrieb mit Ammoniak realisieren. Durch die Teilnahme an Konferenzen und Webmeetings fand ein Informationsaustausch statt, durch welchen alle

beteiligten Parteien profitieren konnten. Die Brennverfahren unterschieden sich grundlegend in der Art der Einbringung, Positionierung des Injektors oder Dimensionierung des Versuchsträgers. Durch die Untersuchung eines direkteingespritzten Verfahrens von Ammoniak und Diesel konnte bspw. die Injektorentwicklung weiter vorangetrieben werden. Anhand der Emissionen lässt sich aber gegenüber dem durch dieses Forschungsprojekt untersuchten Brennverfahrens kein deutlicher Vorteil erkennen. Speziell vor dem Hintergrund einer Retrofit-Anwendung ist das durchgeführte Projekt auf dem Gebiet der Forschung mit den erzielten Ergebnissen sehr gut aufgestellt.

2.6 Erfolgte bzw. geplante Veröffentlichungen, Tagungsteilnahmen & studentische Arbeiten

Konferenzbeiträge mit Manuskript:

Mante, T.; Prehn, S.; Theile, M.; Seidel, L.; Mestre, L.; Buchholz, B. Mauss, F.: Ammoniak als Kraftstoffoption für eine klimaneutrale Schifffahrt – Herausforderungen, Umgang & erste Untersuchungen, 19. FAD Konferenz, Dresden, 3.-4. November 2022

Mante, T.; Prehn, S.; Theile, M.; Seidel, L.; Mestre, L.; Buchholz, B. Mauss, F.: Investigation of an ammonia diesel dual-fuel combustion process on a heavy duty single cylinder research engine for the development of suitable simulation tools for maritime applications, 17th MTZ conference Heavy-Duty-, On- and Off-Highway Engine, Donaueschingen, 16.-17. November 2022

Mante, T.; Prehn, S.; Seidel, L.; Mestre, L.; Theile, M.; Hoppe, A.; Buchholz, B.; Mauss, F.: Numerical Study of NH3-Diesel Combustion in a Retrofit for Marine Engines using Detailed Kinetics, 30th CIMAC World Congress 2023. Ed. by VDMA. Busan, 12.-16. Juni 2023

Seidel, L.; Mestre, L.; Mante, T.; Theile, M.; Hoppe, A.; Prehn, S. et al.: Numerical study of NH3-hydrocarbon (Diesel) chemistry interaction in marine engines using detailed reaction kinetics, 2nd Symposium on Ammonia Energy, Orléans (France), 11.-13. Juli 2023

Mante, T.; Prehn, S.; Glauner, M.; Seidel, L.; Mestre, L.; Theile, M.; Hoppe, A.; Buchholz, B.; Mauss, F.: Ammoniak Diesel Dual-Fuel Brennverfahren – Einfluss der Piloteinspritzstrategie auf Innenprozess und Emissionen, 20. FAD Konferenz, Dresden, 08.-09. November 2023

Theile, M.; Prehn, S.; Seidel, L.; Mante, T.; Hoppe, A.; Mestre, L.; Buchholz, B.; Mauss, F.: Entwicklung von Simulationswerkzeugen für zukünftige maritime Ammoniak-Verbrennungsmotoren, Statustagung maritime Technologien, Berlin, 05.-06. Dezember 2023

Theile, M.; Prehn, S.; Seidel, L.; Mante, T.; Hoppe, A.: Design of an ammonia retrofit concept for maritime propulsion units smaller than 400 kW, 13. Dessauer Gasmotoren-Konferenz, Dessau, 15.-16. Mai 2024

Geplante Fachliteratur:

Journal-Beitrag im *International Journal of Engine Research* mit dem Titel: „Development of an ammonia-diesel dual-fuel combustion process with consideration of greenhouse gas"

Studentische Arbeiten:

Art der Arbeit	Thema
Bachelorarbeit	Aufbau und Erprobung des 1-Zylinder Versuchsmotors Basis Deutz TCD 5.2
Bachelorarbeit	Auslegung eines Luft- und Abgassystems für einen 1-Zylinder Forschungsmotor
Bachelorarbeit	Auslegung und Konstruktion einer Luft- und Abgasstrecke für einen Einzylinder-Forschungsmotor
Projektarbeit	Recherche zu klimaneutralen Motorenkonzepten mit grünem Ammoniak für die maritime Branche
Studienarbeit	Untersuchungen eines Ammoniak-Diesel-Brennverfahrens am Einzylinder-Forschungsmotor für eine potenzielle Retrofit-Anwendung im Bereich der Binnenschifffahrt
Masterarbeit	Numerische Untersuchung von Ammoniak-Brennverfahren für eine motorische Anwendung

3 Literaturverzeichnis

[1] Statista (Crippa, M. et al.), Verteilung der CO2-Emissionen weltweit nach Sektor 2022, abrufbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/, 2023

[2] IMO, Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13, abrufbar unter: https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx, 2024

[3] Hideaki Kobayashi et al. “Science and technology of ammonia combustion”. In: Proceedings of the Combustion Institute 37.1 (2019), pp. 109–133. doi: 10.1016/j.proci.2018.09.029. abrufbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748918306345, 2023.

[4] Ram B. Gupta. Hydrogen fuel: Production, transport, and storage. MECHANICALENGINEER-INGnetBASE. Boca Raton: CRC Press, 2009. isbn: 9781420045758.

[5] Rui Liu, David S.-K. Ting, and M. David Checkel. “Ammonia as a Fuel for SI Engine”. In: SAE Technical Paper Series. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2003. doi : 10.4271/2003-01-3095.

[6] Günter P. Merker and Rüdiger Teichmann, eds. Grundlagen Verbrennungsmotoren: Funktionsweise und alternative Antriebssysteme Verbrennung, Messtechnik und Simulation. 9., korrigierte Auflage. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg, 2019. isbn : 978-3-658-23556-7.

[7] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, ed. Gestis Stoff datenbank: Ammoniak, wasserfrei. May 30, 2023. Abrufbar unter: https://gestis.dguv.de/data?name=001100, 2023.

[8] James T. Gray et al. “Ammonia Fuel — Engine Compatibility and Combustion”. In: SAE Transactions 75 (1967), pp. 785–807. issn: 0096736X.

[9] Rudolf Tanner. “Über die Verwendung von Ammoniak als Treibstoff ”. PhD thesis. Eidgenössische technische Hochschule, Zürich., 1945.

[10] Walter Cornelius, L. William Huellmantel, and Harry R. Mitchell. “Ammonia as an Engine Fuel”. In: SAE Transactions 74 (1966), pp. 300–326. issn: 0096736X.

[11] Aliasghar Mozafari-Varnusfadrani. Predictions and Measurements of Spark-Ignition Engine Characteristics Using Ammonia and Other Fuels: Dissertation. 1988.

[12] C. S. Mørch et al. “Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system”. In: Fuel 90.2 (2011), pp. 854–864. issn : 0016-2361. doi : 10.1016/j.fuel.2010.09.042. abrufbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236110005132, 2023.

[13] Stefano Frigo and Roberto Gentili. “Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen”. In: International Journal of

Hydrogen Energy 38.3 (2013), pp. 1607–1615. doi : 10.1016/j.ijhydene.2012.10.114. abrufbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912024408, 2023

[14] Youngmin Woo. Demonstration of Ammonia-Gasoline Dual Fuel System in a Spark Ignition Internal Combustion Engine. 2012. abrufbar unter: https://nh3fuelassociation.org/wp- content/uploads/2012/10/woo-youngmin.pdf, 2023

[15] Kyunghyun Ryu, George E. Zacharakis-Jutz, and Song-Charng Kong. “Eff ects of gaseous ammonia direct injection on performance characteristics of a spark-ignition engine”. In: Applied Energy 116 (2014), pp. 206–215. issn: 0306-2619. doi : 10.1016/j.apenergy.2013.11.067. abrufbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913009756, 2023.

[16] Youngmin Woo, Jin Young Jang, Young Jae Lee, Jong-Nam Kim. Recent progress on the ammonia-gasoline and the ammonia-diesel dual fueled internal combustion engines in Korea. Des Moines, IA, USA, 2014. abrufbar unter: https://nh3fuelassociation.org/wp- content/uploads/2014/10/nh3fa-2014-youngmin-woo.pdf, 2023

[17] Ebrahim Nadimi et al. “Eff ects of ammonia on combustion, emissions, and performance of the ammonia/diesel dual-fuel compression ignition engine”. In: Journal of the Energy Institute 107 (2023), p. 101158. issn: 17439671.

[18] George Zacharakis-Jutz, ed. Performance characteristics of ammonia engines using direct injection strategies. Iowa State University, 2013. doi: 10.31274/etd-180810-3542.

[19] Christopher Wolfgang Gross, ed. Combustion and emissions characteristics of a compression-ignition engine using ammonia-DME mixtures. Iowa State University, 2012. doi: 10.31274/etd-180810-72.

[20] Yoichi Niki et al. “Diesel Fuel Multiple Injection Eff ects on Emission Characteristics of Diesel Engine Mixed Ammonia Gas Into Intake Air”. In: Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 141.6 (2019). issn: 0742-4795. doi: 10.1115/1.4042507.

[21] Yoichi Niki. “Experimental Investigation of Effects of Split Diesel-Pilot Injection on Emissions From Ammonia-Diesel Dual Fuel Engine”. In: ASME 2021 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2021. Isbn: 978-0-7918-8551-2. doi: 10.1115/ICEF2021-66341.

[22] Till Mante et al. “Investigation of an ammonia diesel dual-fuel combustion process on a heavy-duty single cylinder research engine for the development of suitable simulation tools for maritime applications”. In: 17th International MTZ Conference Heavy-Duty. Ed. by Johannes Liebl. Vol. 2022. Springer Vieweg Wiesbaden, 2022. isbn: 978-3-658-38105-9.

[23] Till Mante et al. “Numerical Study of NH3-Diesel Combustion in a Retrofit for Marine Engines using Detailed Kinetics”. In: 30th CIMA World Congress 2023. Ed. by VDMA. 2023.

[24] Karsten Stenzel et al. “AmmoniaMot – Experimental investigations of an ammonia dual-fuel combustion process for decarbonisation of the maritime sector”. In: 7th Large Engine Symposium - The Future of Large Engines. Ed. by

Bert Buchholz. Vol. 2022. FVTR Textbook series, 2022, pp. 225–236. isbn: 978-3-941554-25-2.

[25] Stephanie Frankl et al. “Investigation of ammonia and hydrogen as CO2-free fuels for heavy duty engines using a high pressure dual fuel combustion process”. In: International Journal of Engine Research 22.10 (2021), pp. 3196–3208. issn: 2041-3149. doi: 10.1177/1468087420967873.

[26] Marco Coppo and Nicole Wermuth. “Powering a greener future: the OMT injector enables high-pressure direct injection of ammonia and methanol”. In: 7th Large Engine Symposium – The Future of Large Engines. Ed. by Bert Buchholz. FVTR Textbook series, 2022. isbn: 978-3-941554-25-2.

[27] Wermuth, Nicole. “Decarbonisation of high-power systems: ammonia-hydrogen and ammonia-diesel combustion in HS engines”. In: 30th CIMA World Congress 2023. Ed. by VDMA. 2023.

[28] Scharl, Valentin; Sattelmayer, Thomas (2022): Ignition and combustion characteristics of diesel piloted ammonia injections. In: Fuel Communications 11, S. 100068. DOI: 10.1016/j.jfueco.2022.100068.

4 Danksagung

Die Autoren möchten sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projektes AmmoniakMotor (Projektnummer: 03SX549C) bedanken.

Darüber hinaus gilt unser Dank den Projektpartnern der LOGE Deutschland GmbH und der FVTR GmbH für die Unterstützung des Projektes.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages