



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jan Hagenow

Abgasanalytik im Kontext alternativer Kraftstoffe für Dieselmotoren

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Jan Hagenow

**Abgasanalytik im Kontext alternativer
Kraftstoffe für Dieselmotoren**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Jan Piatek
Zweitprüfer: Prof. Dr. Sven Jerzembeck

Abgabedatum: 25.08.2021

Zusammenfassung

Jan Hagenow

Thema der Bachelorthesis

Abgasanalytik im Kontext alternativer Kraftstoffe für Dieselmotoren

Stichworte

Abgasanalytik, alternative Kraftstoffe, Dieselmotor, Verbrennungsmotoren, Schadstoffemissionen, Oxymethylenether, Messkampagne, synthetische Kraftstoffe, Dieselmotorkraftstoff, Klimawandel, Energiewende, Dieselskandal

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Themengebiet der alternativen Kraftstoffe für Dieselmotoren mit Fokus auf die Abgasanalytik. Es wird untersucht inwiefern alternative Kraftstoffe eine kurz- und mittelfristige Lösung darstellen können, einen Dieselmotor klimaneutral zu betreiben. Zudem wird an der HAW Hamburg eine Abgasanalytik in Betrieb genommen. Je nach Verfügbarkeit des Motorprüfstandes wird entweder eine Referenzmessung mit einem OME-Blend durchgeführt oder eine Messkampagne zur Vorbereitung von studentischen Laborversuchen im Kontext alternativer Kraftstoffe geplant.

Jan Hagenow

Title of the paper

Exhaust gas analysis in the context of alternative fuels for diesel engines

Keywords

Exhaust gas analysis, alternative fuels, diesel engines, combustion engines, pollutant emissions, oxymethylenethers, measurement campaigns, synthetic fuels, diesel fuel, climate change, energy transition, diesel scandal

Abstract

This thesis deals with the topic of alternative fuels for diesel engines with a focus on exhaust gas analysis. It is investigated to what extent alternative fuels can represent a short and medium-term solution for operating a diesel engine in a climate-neutral manner. In addition, exhaust gas analysis is being put into operation at the HAW Hamburg. Depending on the availability of the engine test bench, either a reference measurement with an OME-blend is carried out or a measurement campaign is planned to prepare student laboratory tests in the context of alternative fuels.



Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn Jan Hagenow

Thema: Abgasanalytik im Kontext alternativer Kraftstoffe für Dieselmotoren

Für die Reduktion der CO₂- und Schadstoffemissionen im Verkehrssektor, bei mobilen Maschinen und der dezentralen Energieerzeugung können alternative Kraftstoffe aus regenerativen Quellen kurzfristig eine signifikante Rolle spielen. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Abgasemissionsmesstechnik eines Dieselmotorprüfstandes wieder in Betrieb genommen und zur Untersuchung der Schadstoffemissionen alternativer Kraftstoffe, z.B. Oxymethylenether (OME) genutzt werden. Je nach Verfügbarkeit von Prüfstand und Messtechnik liegt der Fokus mehr auf dem praktischen Teil der Inbetriebnahme und Messung oder der theoretischen Planung einer Messkampagne für studentische Laborversuche.

Folgende Aspekte sind im Rahmen der Bachelorthesis zu bearbeiten:

- Recherche zum Einfluss verschiedener alternativer Kraftstoffe für Dieselmotoren hinsichtlich der Schadstoffemissionen
- Bewertung der besonderen Anforderungen alternativer Kraftstoffe an die Abgasanalytik
- Inbetriebnahme von Abgasanalytik an einem Motorprüfstand: Smokemeter, Opazimeter, FTIR
- Bei Verfügbarkeit von Prüfstand und Emissionsmesstechnik Referenzmessungen mit Diesel und Beispielmessungen mit alternativem Kraftstoff (z.B. OME-Blends)
- Planung einer Messkampagne zur Vorbereitung studentischer Laborversuche zum Thema alternative Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren

26. Mai 2021
Datum

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen.....	4
2.1. Dieselkraftstoff	4
2.2. Alternative Kraftstoffe.....	6
2.3. Schadstoffemissionen des Dieselmotors.....	11
2.4. Einfluss der alternativen Kraftstoffe auf die Schadstoffemissionen.....	18
2.5. Abgasanalytik beim Dieselmotor.....	23
2.6. Bewertung der Anforderungen an die Abgasanalytik im Kontext alternativer Kraftstoffe.....	37
3. Dieselmotor-Prüfstand an der HAW	42
3.1. Vorstellung des Prüfstandes.....	42
3.2. Vorstellung der Abgasanalytik	47
4. Inbetriebnahme der Abgasanalytik	56
4.1. Smokemeter	58
4.2. Opazimeter	61
4.3. Sesam-FTIR	63
5. Planung einer Messkampagne.....	67
6. Zusammenfassung und Fazit	76
Literaturverzeichnis	84
Anhang.....	88

Symbolverzeichnis

Physikalische und mathematische Symbole

A	Querschnittsfläche	[m ²]
c	Geschwindigkeit	[m/s]
h	Planck Konstante	[6,626 · 10 ⁻³⁴ Js]
H_u	Unterer Heizwert	[J/kg]
I	Elektrischer Strom	[A]
I	Intensität	[kg · s ⁻³]
k	Absorptionskoeffizient	[1/m]
$k_{korrigiert}$	Korrigierter Absorptionskoeffizient	[1/m]
l	Länge	[m]
L_{eff}	Effektive Länge	[mm]
M	Drehmoment	[Nm]
N	Opazität	[-]
n	Anzahl	[-]
n	Drehzahl	[U/min]
p_{atm}	Atmosphärendruck	[bar]
$p_{Messzelle}$	Druck in der Messzelle	[bar]
P	Leistung	[W]
R	Widerstand	[Ω]
R_A	absolute Helligkeit	[Lm]
R_B	Reflexionsvermögen des geschwärten Filterpapiers	[Lm]
R_W	Reflexionsvermögen des weißen Filterpapiers	[Lm]
T	Temperatur	[°C]
$T_{Gas,Messzelle}$	Gastemperatur in der Messzelle	[K]
T_{Norm}	Genormte Temperatur	[K]
U	Spannung	[V]
x	Variable	[-]
y	Variable	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]

λ

Luftverhältnis

[-]

Chemische Symbole

C	Kohlenstoff
C-C	Kohlenstoffbindung
CO	Kohlenmonoxid
C ₂ H ₅ OH	Ethanol
CH ₂	Methylengruppe
CH ₃ OH (Halbstruktur)	Methanol
CH ₃ CHO	Acetaldehyde
CH ₃ -O-CH ₃	Dimethylether (DME)
CH ₃ -O-(CH ₂ O) _n -CH ₃	Oxymethylenether (OME)
CH ₄	Methan
CH ₄ O (Summenformel)	Methanol
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	Kohlenwasserstoff
HCHO	Formaldehyde
H-C-O	Aldehyde
HNCO	Isocyan Säure
N ₂	Stickstoff
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxid
NH ₃	Ammoniak
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoff
N ₂ O	Distickstoffoxid
O ₂	Sauerstoff
O ₃	Ozon
OH	Hydroxygruppe
SO ₂	Schwefeldioxid
THC	Gesamtkohlenwasserstoff

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
AMA	Abgasmessanlage
BtL	Biomass-to-liquid (Biomasse zu Flüssigkeit)
CLD	Chemilumineszenz Detektor
CNG	Compressed Natural Gas (Erdgas)
CPC	Kondensationskernzähler
CtL	Coal-to-liquid (Kohle zu Flüssigkeit)
CVS	Constant-Volume-Sampler-Verfahren
CZ	Cetanzahl
DC	Elektrostatisches Verfahren
DPF	Dieselpartikelfilter
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	Differentieller Mobilitätsanalysator
DME	Dimethylether
EN	Europäische Normung
EU 5	Abgasnorm
EFM	Exhaust Gas Flow
FAME	Fatty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
FID	Flammenionisationsdetektor
FSN	Filter Smoke Number
FTIR	Fourier-Transform Infrarotspektroskopie
FTV	Fischer-Tropsch-Verfahren
GCG	Gaschromatograph
GtL	Gas-to-liquid (Gas zu Flüssigkeit)
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HVO	Hydrotreated vegetable Oil
ISO	Internationale Organisation für Normung
LED	Leuchtdiode
LDS	Laser-Dioden-Spektroskopie
LNG	Liquified Natural Gas (flüssiges Erdgas)
LPG	Liquified Petroleum Gas (Autogas)

MSM	Massenspektrometer
NDIR	Nichtdispersiver Infrarotdetektor
OME	Oxymethylenether
PASS	Fotoakustisches Verfahren
PEMS	Portable Abgasmessung
Pkw	Personenkraftwagen
PL	Pollution Level
PMD	Paramagnetischer Detektor
QCL	Quantumkaskadenlaser
RDE	Real Driving Emissions Test
RME	Rapsmethylester
SCR	Selektive Katalytische Reduktion
SESAM	System für Emissionen, Probenahme (Sampling) (and) Messen
THz	Terahertz
UVF	UV-Fluoreszenzdetektor
XtL	X-to-liquid (Variable Energie zu Flüssigkeit)
ZET	Zentrum für Energietechnik

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einfluss der alternativen Kraftstoffe auf die Schadstoffemissionen	18
Tabelle 2: Abgasmesstechnik für gasförmige Emissionen [34] [49].....	26
Tabelle 3: Abgasmesstechnik für feste Bestandteile [49] [34].....	34
Tabelle 4: Technische Daten des Dieselmotors an der HAW [35]	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Herstellung von Methanol [17]	10
Abbildung 2: Abgaszusammensetzung vom Dieselmotor ohne Abgasnachbehandlung [37]	12
Abbildung 3: Rußbildung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses und der Temperatur [15]	14
Abbildung 4: Einflussgrößen auf das Brennverfahren [37]	15
Abbildung 5: Emissionsgrenzwerte von Pkw [46].....	17
Abbildung 6: CVS-Verfahren zur verdünnten Abgasmessung [34]	25
Abbildung 7: Aufbau eines typischen Messschrankes [34].....	28
Abbildung 8: Aufbau NDIR [49]	29
Abbildung 9: Aufbau FID [34].....	30
Abbildung 10: Aufbau eines CLD [49]	31
Abbildung 11: Physikalisches Prinzip eines FTIR-Spektrometers [34]	33
Abbildung 12: Aufbau eines Opazimeters [49]	35
Abbildung 13: 4-Zylinder Dieselmotor Prüfstand an der HAW	42
Abbildung 14: Schema des Prüfstandes [23].....	44

Abbildung 15: E-Motor des Prüfstandes	44
Abbildung 16: Aufbau der Kraftstoffversorgung.....	45
Abbildung 17: Benutzeroberfläche Morphee 2	46
Abbildung 18: Smokemeter Vorderansicht.....	48
Abbildung 19: Smokemeter Hinteransicht	48
Abbildung 20: Opazimeter an der HAW.....	51
Abbildung 21: SESAM FTIR an der HAW Vorderansicht.....	53
Abbildung 22: SESAM FTIR an der HAW Hinteransicht	53
Abbildung 23: Vorfilter vom FTIR.....	54
Abbildung 24: Anzeigen am FTIR.....	54
Abbildung 25: Abgasentnahmestelle am Motorprüfstand	56
Abbildung 26: Schaltschrank für die Prüfstandssteuerung [35]	58
Abbildung 27: Anschlüsse am Smokemeter	59
Abbildung 28: Entnahmebox.....	60
Abbildung 29: Entnahmebox Hinteransicht	60
Abbildung 30: Benutzeroberfläche Smokemeter in Morphee 2.....	60
Abbildung 31: Anschlüsse des Opazimeters linke Seite	62
Abbildung 32: Anschlüsse des Opazimeters rechte Seite	62
Abbildung 33: Druckluft-Anschluss Opazimeter	62
Abbildung 34: Opazimeter.....	62
Abbildung 35: Benutzeroberfläche des Sesam-FTIRs in Morphee 2.....	63
Abbildung 36: Aufbau des Monitors für die FTIR Software.....	64
Abbildung 37: Schnittstellen des FTIRs	64
Abbildung 38: Sesam-FTIR Hauptbedienung [5].....	65
Abbildung 39: Motorkennfeld des Dieselmotors an der HAW Hamburg [35].....	70
Abbildung 40: Kraftstoffbehälter	71
Abbildung 41: CO ₂ -Emissionen in Abhängigkeit des OME-Blendanteils [17].....	73
Abbildung 42: NO _x -Ruß-Tradeoff von zwei Teillastpunkten mit Diesel, OME und 15% OME [17].....	74

1. Einleitung

„Der Diesel stirbt aus“ [12], „Aus für Diesel: Sind bald nur noch Benziner und E-Autos unterwegs?“ [31], „München Fahrverbote: Der Diesel hat keine Zukunft mehr“ [44], diese und viele weitere negative Schlagzeilen machte der Dieselmotor vor allem nach dem Abgasskandal im Jahr 2015. Die Volkswagen AG, eine der größten Automobilhersteller weltweit, musste im September 2015 offiziell verkünden, die Abgaswerte ihrer Dieselfahrzeuge manipuliert zu haben. Die Grenzwerte für die Schadstoffemissionen wurden hierbei durch die Software der Abgaskontrollanlage an Prüfständen nur unter gewissen Umständen eingehalten. In der Realität sahen die Emissionen jedoch anders aus [53]. Gerade der erhöhte Ausstoß von Stickstoffoxiden ist problematisch, da dieser die Luftqualität in Metropolregionen maßgeblich beeinflusst und zu verschiedenen negativen Auswirkungen in Bezug auf Umwelt und Gesundheit führen kann [48]. Durch den Klimawandel und dessen Folgen, die immer mehr an Bedeutung gewinnen, hat der Dieselskandal die Debatte um den Antrieb der Zukunft zusätzlich emotional aufgeladen. Es kam zu diversen internationalen Klagen und Rückrufaktionen der Dieselfahrzeuge [53]. Verbraucher waren verunsichert und der Absatzmarkt kann bis heute nicht an die Zeiten vor der Abgasaffäre anknüpfen. Der Dieselmotor der vor 10 Jahren noch als umweltfreundliche Alternative zum Benziner galt, rückt bei der breiten Bevölkerung in ein zunehmend schlechteres Licht [2] [24]. Der scheinbar große Gewinner in der Frage, welchem Antrieb die Zukunft im Verkehrssektor gehört, ist der Elektromotor. Um die zukünftigen Klimaschutzziele einzuhalten, müssen die neu zugelassenen Verbrennerfahrzeuge immer strengere Grenzwerte der CO₂- und Schadstoffemissionen einhalten. Elektroautos haben hier den Vorteil, lokal keine Emissionen auszustoßen. Da es bei den Elektroautos noch diverse Probleme hinsichtlich Ladeinfrastruktur, Reichweite, Kosten und Verfügbarkeit gibt, birgt eine drastische Mobilitätswende auch vielerlei Risiken. Zudem können Elektroantriebe nicht in allen Bereichen eingesetzt werden, wo Verbrennungsmotoren zu finden sind. Das bedeutet, dass die Entwicklung von kurz- und mittelfristigen klimaneutralen Alternativen für den Dieselmotor unausweichlich ist.

Problemstellung

Fakt ist: Der Diesel hat in den letzten Jahren einen erheblichen Imageschaden erleiden müssen und die inner- und außermotorischen Maßnahmen zur Verbesserung der Emissionen geraten zunehmend an ihre Grenzen. Global gesehen wird die Nachfrage von Dieselmotoren in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen. Zusätzlich steigt seit Jahren der Bestand an zugelassenen Verbrennerfahrzeugen an [49]. Diese Faktoren bereiten der Industrie und der Politik im Zusammenhang mit dem Klimawandel große Probleme. Hoffnung machen alternative Kraftstoffe, die den Dieselmotor retten könnten. Durch das

Biokraftstoffquotengesetz werden Unternehmen in Deutschland bereits seit 2007 dazu verpflichtet, fossilen Kraftstoffen wie dem Diesel einen Mindestanteil von sieben Prozent Biokraftstoff beizumischen [42]. Seit einigen Jahren gibt es zudem neue Entwicklungen und Überlegungen einen Verbrennungsmotor über alternative Kraftstoffe klimafreundlicher betreiben zu können. Der hohe Druck auf die Entwicklung neuer zukunftsfähiger Alternativen geht vor allem von den anspruchsvoller und strenger werdenden gesetzlichen Emissionsgrenzwerten aus. Außerdem ist die Herstellung des konventionellen Dieselmotors über fossile Primärenergien aufgrund von hohen CO₂-Emissionen und dem Verbrauch von begrenzten Ressourcen nicht nachhaltig und ein problematischer Faktor im Bereich des Klimawandels. Auf dieser Grundlage wird das Ziel verfolgt, in Zukunft dafür zu sorgen, dass der regenerative Anteil im Dieselmotor weiter steigt oder der fossile Kraftstoff sogar komplett durch einen Kraftstoff auf regenerativer Basis ersetzt wird, der zudem lokal kaum Emissionen entstehen lässt. Die Schwierigkeiten bei der Entwicklung solcher Kraftstoffe liegen momentan hauptsächlich darin, dass der Kraftstoff sauber verbrennt und klimaneutral hergestellt werden kann, gleichzeitig, aber auch günstig zu produzieren ist. Mit der Verwendung von alternativen Kraftstoffen, die zu einem deutlich geringeren CO₂- und Schadstoffausstoß führen können, resultieren hohe Anforderungen an die moderne Abgasanalytik. Um im Entwicklungsbereich Referenzmessungen mit aussagekräftigen Ergebnissen durchführen zu können, werden Messtechniken benötigt, die niedrige Nachweisgrenzen und hohe Messgenauigkeiten aufweisen. Auch im Bereich der Zulassungsverfahren von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren entstehen somit große Herausforderungen die veränderten Abgaszusammensetzungen zu überprüfen [49] [34].

Forschungsfrage und Ziel der Arbeit

In dieser Bachelorthesis wird die Forschungsfrage untersucht, inwiefern die Verwendung von alternativen Kraftstoffen in Bezug auf ihre CO₂- und Schadstoffemissionen eine kurzfristige Lösung für den Dieselmotor sein kann. Dabei wird vor allem der alternative Kraftstoff Oxymethylenether (OME) näher beleuchtet. Zudem liegt der Fokus auch auf den Anforderungen an die moderne Abgasanalytik und ihrer Bedeutsamkeit im Bereich der Verbrennungsmotoren. Neben den oben genannten theoretischen Zielsetzungen werden in dieser Bachelorarbeit auch praktische Ziele verfolgt. Das Ziel im praktischen Teil dieser Arbeit ist vor allem die erfolgreiche Inbetriebnahme der Abgasanalytik an der HAW Hamburg, um anschließend den alternativen Kraftstoff OME im Einsatz als Blend entweder praktisch durch eine Referenzmessung oder theoretisch durch die Planung einer Messkampagne untersuchen zu können. Die Ergebnisse dieser Bachelorarbeit dienen somit auch als Grundlage für die Vorbereitung studentischer Laborversuche im Kontext alternativer Kraftstoffe an der HAW Hamburg.

Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Um die oben genannte Forschungsfrage zu untersuchen und die gesetzten Ziele zu erreichen, werden folgende Themengebiete in dieser Arbeit beleuchtet. Im zweiten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zusammengetragen. Dazu werden zuerst die grundsätzlichen Eigenschaften eines Dieselmotors beschrieben. Anschließend werden alternative Kraftstoffe für Dieselmotoren, die bereits eingesetzt werden oder in der Entwicklungsphase stehen zusammengetragen. In diesem Zusammenhang wird die Zukunftsfähigkeit der alternativen Kraftstoffe hinsichtlich ihres Herstellungsprozesses und ihres Einflusses auf die lokalen Emissionen beim Verbrennungsprozess untersucht. Um die Emissionen der Kraftstoffe beurteilen zu können, werden die wesentlichen Bestandteile der Abgaszusammensetzung dargestellt und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt beschrieben. Hierbei werden auch weitere Maßnahmen zur Reduzierung und Optimierung der Schadstoffemissionen erläutert. Da die Abgasanalytik für die Ermittlung der Abgaszusammensetzung eine zentrale Rolle spielt, werden ebenfalls die wesentlichen Messtechniken im Bereich der Abgasanalyse dargestellt und die hohen Anforderungen an diese bei der Verwendung von alternativen Kraftstoffen näher betrachtet. Für den praktischen Teil der Arbeit wird im dritten Kapitel der an der HAW Hamburg vorhandene Dieselmotor-Prüfstand mit Fokus auf die Abgasanalytik vorgestellt. Anschließend wird im vierten Kapitel die Inbetriebnahme der drei vorhandenen Messgeräte (Smokemeter, Opazimeter, Sesam FTIR) durchgeführt und dokumentiert. Aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit des Motorprüfstandes ist in dieser Bachelorarbeit keine Referenzmessung mit einem OME-Blend als alternativen Kraftstoff möglich. Als Grundlage für die Vorbereitung künftiger studentischer Laborversuche im Kontext alternativer Kraftstoffe wird im fünften Kapitel eine Messkampagne mit dem alternativen Kraftstoff OME geplant. Unter Berücksichtigung der zusammengetragenen theoretischen Grundlagen werden die zu erwartenden Ergebnisse der Messkampagne im Anschluss untersucht und analysiert. Das sechste Kapitel liefert eine Zusammenfassung der Ergebnisse, sodass eine abschließende Stellungnahme hinsichtlich der Forschungsfrage, inwiefern alternative Kraftstoffe eine Alternative für Dieselmotoren sein können, gegeben werden kann. Auch wird im abschließenden Kapitel ein persönlicher Ausblick auf die weitere Entwicklung und künftige Forschung in dieser komplexen Thematik gegeben.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen im Bereich des Dieseldiesels, der alternativen Kraftstoffe, der Schadstoffemissionen eines Dieselmotors und der Abgasanalytik beleuchtet. Anschließend wird auf dieser Basis der Einfluss von alternativen Kraftstoffen auf die Schadstoffemissionen untersucht. Zudem werden die besonderen Anforderungen an die Abgasanalytik durch alternative Kraftstoffe zusammengetragen und bewertet. Ziel ist es, ein grundlegendes Verständnis der Themengebiete aufzubauen, um die Forschungsfrage dieser Bachelorarbeit beantworten zu können.

2.1. Dieseldiesel

Der im Dieseldieselmotor eingesetzte flüssige Dieseldieselkraftstoff wird größtenteils aus Erdöl gewonnen und in Erdölraffinerien hergestellt. Erdöl ist ein Teil der Primärenergien, welche ähnlich wie Erdgas und Kohle zu den erschöpflichen fossilen Energien gehören. Hauptbestandteile des Kraftstoffes sind im Wesentlichen verschiedene Kohlenwasserstoffe, welche sich in unterschiedliche Klassen einteilen lassen [49]:

- Paraffine (Alkane)
- Olefine (Alkene)
- Naphtene (Zyklo-Alkane)
- Aromate
- Sauerstoffhaltige Verbindungen [36]

Neben diesen Bestandteilen können außerdem nicht erwünschte Komponenten, wie zum Beispiel Verunreinigungen oder Schwefel vorhanden sein. Die Zusammensetzung des Kraftstoffes und die daraus resultierende Qualität kann nicht nur den Betrieb, sondern auch die Schadstoffemissionen stark beeinflussen [49].

Ein großes Problem ist die Herstellung des Diesels auf fossiler Basis. Zum einen ist es im Hinblick auf das Thema Nachhaltigkeit bedenklich, dass endliche Energien im großen Stil abgebaut werden. Zum anderen sorgen die Rohölförderung, der Transport sowie der Betrieb der Raffinerien für klimaschädliche Emissionen. Die durch die Herstellung entstandenen CO₂-Emissionen betragen rund zehn Prozent der Emissionen, die später im Verbrennungsprozess des Kraftstoffes entstehen [19]. Ein Vorteil des Dieseldieselkraftstoffes im alltäglichen Gebrauch ist vor allem der günstigere Kraftstoffpreis im Vergleich zum Benzin. Außerdem ist er energiereicher und effizienter, so dass ein Dieseldieselmotor bis zu 25 Prozent weniger Kraftstoff verbraucht als ein Ottomotor mit Benzin [51].

Zum Betreiben eines Dieselmotors können verschiedene Dieselmotorkraftstoffe verwendet werden. Diese müssen bestimmte Anforderungen erfüllen, damit der Kraftstoff sauber verbrennt, der Motor optimal arbeiten kann und eine lange Lebensdauer erreicht wird. In Europa gilt hierfür die Anforderungsnorm EN 590. Ziele der ausgewählten Anforderungen an den Dieselmotorkraftstoff sind vor allem die Schadstoffentstehung zu reduzieren und einen sicheren Betrieb des Dieselmotors zu gewährleisten. Die Qualität des Kraftstoffes kann dabei durch verschiedene Merkmale bemessen werden [37].

Cetanzahl

Da ein Dieselmotor mit einem selbstzündenden Zündungsverfahren arbeitet, ist die Cetanzahl (CZ) eine der wichtigsten Kennzahlen zur Beurteilung des Kraftstoffes. Sie beschreibt die Zündwilligkeit des Dieselmotorkraftstoffes. Umso höher die Cetanzahl ist, desto leichter wird sich der Kraftstoff entzünden. Ein hochwertiger Dieselmotorkraftstoff besteht meist aus einem hohen Anteil von Paraffinen, die für eine Cetanzahl von über 50 sorgen. Sind im Kraftstoff viele Aromate enthalten, reduzieren diese die Zündwilligkeit. Bei einer geringen Cetanzahl ist das Funktionsprinzip des Motors eingeschränkt, sodass sich der Kraftstoff verspätet entzündet. Dieser Vorgang wird als Zündverzögerung bezeichnet. Dadurch wird der Kraftstoff explosionsartig und unkontrolliert verbrannt, was zu einem erhöhten Lärm und einem unruhigem Motorlaufverhalten führt [37].

Dichte und unterer Heizwert

Weitere zentrale Werte, welche die thermodynamischen Prozesse im Brennraum maßgeblich beeinflussen, sind die Dichte ρ und der untere Heizwert H_U . Der untere Heizwert H_U gibt die durch die Verbrennung freigesetzte, vom Motor nutzbare Wärmemenge an [36]. Umso höher die Dichte eines Dieselmotorkraftstoffes ist, desto größer ist auch sein Energiegehalt pro Volumeneinheit [37]. Somit haben diese beiden Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Verbrennung des Kraftstoffes und bestimmen dadurch die zu erreichende Motorleistung und Fahrzeugreichweite.

Siedebereich

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Siedebereich. Der Kraftstoff besteht aus verschiedenen Komponenten, welche bei unterschiedlichen Temperaturen sieden. Der Siedeverlauf des Kraftstoffes gibt an, wie viel Prozent des Kraftstoffes bei unterschiedlichen Temperaturen verdampfen und ist somit von der Zusammensetzung des Kraftstoffes beeinflussbar. Für einen Dieselmotorkraftstoff wird ein niedriges Siedeende angestrebt, da Rückstände des Kraftstoffes beim Verbrennungsprozess die Rußbildung steigern [36]. Trotzdem darf der Siedebeginn nicht zu gering sein, da die Schmiereigenschaften und die Cetanzahl hierdurch abnehmen [37].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kraftstoffkennzahlen große Auswirkungen auf den Betrieb des Dieselmotors haben. Grundsätzlich müssen Kraftstoffe spezielle Anforderungen erfüllen, dennoch lässt die Wahl der Zusammensetzung des Kraftstoffes und die Art der Herstellung einen gewissen Spielraum zu, um die Schadstoffentstehung bei dem Betrieb des Motors positiv zu verändern.

2.2. Alternative Kraftstoffe

Da die Möglichkeiten zur Schadstoffbegrenzung durch inner- und außermotorische Maßnahmen begrenzt sind und die Herstellung von Diesel auf fossiler Basis nicht nachhaltig ist, wird schon seit einigen Jahren an alternativen Kraftstoffen für den Dieselmotor geforscht. Die alternativen Kraftstoffe für moderne Verbrennungsmotoren müssen dabei verschiedene Anforderungen erfüllen, damit das möglichst langlebige und effiziente Betreiben des Dieselmotors sichergestellt ist. Des Weiteren werden Anforderungen hinsichtlich des klimafreundlicheren Verbrennens und der Herstellung gestellt, um die alternativen Kraftstoffe von dem üblichen fossilen Dieselmotorkraftstoff zu unterscheiden. Folgende Aspekte müssen bei der Entwicklung von alternativen Kraftstoffen berücksichtigt werden [15]:

- Hohe Energiedichte
- Leichte Handhabbarkeit (Lagerung, Transport)
- Vollständige Verbrennung
- Klimaneutrale Herstellung
- Verfügbarkeit
- Keine Gesundheitsgefährdung für Mensch und Natur
- Verbesserung der Emissionswerte [15]

Primäres Ziel der Verwendung von alternativen Kraftstoffen ist neben dem klimafreundlicheren Betreiben des Dieselmotors auch die Abhängigkeit von fossilen Energien wie Erdöl zu verringern.

Biokraftstoff

Das Biokraftstoffquotengesetz führte mit Beginn des Jahres 2007 die gesetzliche Verpflichtung ein, dem Dieselmotorkraftstoff einen Mindestanteil von Fettsäuremethylester (FAME) beizumischen. Heute liegt der Anteil bei bis zu sieben Prozent [21]. FAME, umgangssprachlich auch als Biodiesel bekannt, ist eine Verbindung aus pflanzlichen oder tierischen Fetten und dem Alkohol Methanol. Es kann aus verschiedenen Rohstoffen hergestellt werden. In Europa wird überwiegend Raps, in Amerika aber auch Soja oder Palmöl verwendet [37]. Theoretisch gesehen hat die Verwendung von Biodiesel viele Vorteile. Er wird aus nachwachsenden

Rohstoffen gewonnen, ist ungiftig, verringert die Emissionen gewisser Schadstoffe und kann einfach transportiert und gelagert werden. In der Realität sind aber die erhofften positiven Auswirkungen auf die Umwelt kaum spürbar. Der Kohlenmonoxid- und Rußausstoß sinkt zwar, jedoch kommt es sogar zu einer Zunahme des Ausstoßes von den problematischen Stickstoffoxiden. Außerdem kann die Herstellung auch als kritisch betrachtet werden, da die erforderlich große Menge an Raps, Soja oder Palmöl, zu Monokulturen führt und gerade in Brasilien der Regenwald für Palmölplantagen abgeholzt wird. Neben den umweltspezifischen Aspekten entfallen auch die preislichen Vorteile beim Tanken von Biodiesel, da es keine steuerlichen Zuschüsse mehr gibt [1]. Zusammenfassend ist der Biodiesel zwar einer der bekanntesten Biokraftstoffe, spielt im Bereich der alternativen Kraftstoffe der Zukunft jedoch eine geringe Rolle.

Gas-Kraftstoffe

Weitere alternative Kraftstoffe, die bereits in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, sind zum Beispiel Autogas (LPG), Erdgas (CNG), flüssiges Erdgas (LNG) und teils Wasserstoff. Autogas basiert auf Butan und Propan, welche als Nebenprodukte bei den Erdölraffinerien auftreten und wird als Ottokraftstoff eingesetzt. Erdgas dagegen besteht hauptsächlich aus Methan und gehört zu den fossilen Energieträgern. Flüssiges Erdgas wird durch die Abkühlung von aufbereitetem Erdgas erzeugt. Die Betreibung des Dieselmotors mit Gas birgt vor allem Vorteile in der Entwicklung von Schadstoffemissionen. Langfristig werden sie sich trotzdem aufgrund der Abhängigkeit von fossilen Primärenergien nicht durchsetzen [18]. Außerdem ist die Umrüstung des Dieselmotors auf Gas mit hohen Kosten verbunden, weshalb Gas meistens bei Ottomotoren eingesetzt wird. Wasserstoff kann dagegen über eine Brennstoffzelle Strom produzieren und dadurch einen Elektromotor in einem Pkw antreiben. Außerdem wird bereits daran geforscht, auch Dieselmotoren mit Wasserstoff zu betreiben. Trotz ein paar notwendiger Umbaumaßnahmen bleibt die Basis des Motors bestehen. Durch die Verwendung von Wasserstoff kann der Dieselmotor laut ersten Forschungsergebnissen bei einem Wirkungsgrad von bis zu 44,5 Prozent Emissions- und CO₂-neutral betrieben werden [26]. Das Problem an Wasserstoff als Kraftstoff ist aber vor allem die Lagerung, der aktuelle Kostenfaktor und die bis jetzt schlecht ausgebaute Infrastruktur.

Synthetische Kraftstoffe

Seit einigen Jahren stellen vor allem synthetische Kraftstoffe eine Alternative zu den konventionellen Kraftstoffen dar. Sie können zum einen aus fossilen Energieträgern, aber auch aus Biomasse hergestellt werden. Basierend auf dem Herstellungsverfahren können sie in verschiedene Klassen eingeteilt werden:

- XtL-Kraftstoffe (X-to-liquid)
 - GtL-Kraftstoffe (gas-to-liquid)

- CtL-Kraftstoffe (coal-to-liquid)
- BtL-Kraftstoffe (biomass-to-liquid) [13]

Bei einem **XtL-Kraftstoff** wird aus den Primärenergien Synthesegas produziert. Das „X“ steht dabei für die beliebig austauschbaren Energieträger. Diese werden dann durch das Fischer-Tropen-Verfahren (FTV) katalytisch zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Der entstandene Kraftstoff ist schwefel- und aromatenfrei, sehr hochwertig und führt zu einem geringeren Schadstoffausstoß [37]. GtL-Kraftstoffe werden durch die Umwandlung von Erdgas in Synthesegas und anschließender Verflüssigung durch das FTV gewonnen. Sie werden bereits heutzutage an Tankstellen angeboten und als Gemisch mit Kerosin in der Flugzeug- und Schiffbranche eingesetzt. Der Kraftstoff kann ohne Umbauten getankt werden und sorgt zu lokal geringeren Emissionen von Stickstoffoxiden, Partikeln und Kohlenmonoxid [43]. Beim CtL-Verfahren werden flüssige Kohlenwasserstoffe aus Kohle erzeugt. Sinn der Verwendung von CtL-Kraftstoffen ist und war vor allem die Unabhängigkeit von Erdöl. Trotzdem gelten sie nicht als zukunftsfähig, da der CO₂-Ausstoß bei der Herstellung immens hoch ist. BtL-Kraftstoffe dagegen werden aus Biomasse hergestellt. Im Vergleich zum Biodiesel gehören sie zur zweiten Generation der Biokraftstoffe und haben den Vorteil, die gesamte Biomasse zu nutzen und nicht nur ein Teil der Pflanzen, wie es bei Biodiesel der Fall ist. Das Verfahren zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen ist jedoch sehr komplex und kostenintensiv. Außerdem herrscht beispielsweise im Holzsektor eine Nutzungskonkurrenz aufgrund der steigenden Rohstoffpreise, sodass eine Herstellung, die sich wirtschaftlich lohnt, zusätzlich beeinträchtigt wird [29].

HVO-Kraftstoffe („Hydrotreated Vegetable Oil) gehören auch zu den synthetischen Kraftstoffen und werden durch Abfallfett der Lebensmittelindustrie, sowie Pflanzenölen hergestellt. Die Herstellung erfolgt durch eine katalytische Reaktion der Pflanzenöle mit Wasserstoff. Diese wandeln sich dann in Kohlenwasserstoffe um und können anschließend dem konventionellen Dieselmotorkraftstoff untergemischt werden [45].

Aktuell wird an weiteren synthetischen Kraftstoffen geforscht, die in der Zukunft ernstzunehmende Alternativen darstellen könnten. Die sogenannten **E-Fuels** oder **Power-to-X** basieren auf Wasserstoff als Energiequelle. Der Wasserstoff wird mit CO₂ verbunden, sodass ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf entsteht. Wasserstoff wird durch die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien klimaneutral und ohne Mengenbegrenzung hergestellt. Dadurch lassen sich synthetische Kohlenwasserstoffe, wie Dimethylether (DME), OME, Ethanol und Methanol herstellen. Im Vergleich zum üblichen Dieselmotorkraftstoff lassen sie sich sauberer verbrennen und könnten zukünftig teilweise auch über die vorhandene Infrastruktur vertrieben werden. Derzeit gibt es bereits Forschungsprojekte in Deutschland, in denen synthetisches E-Gas produziert und in das Erdgasnetz eingespeist wird. Synthetischer Diesel oder Benzin wird dagegen noch nicht ins Tankstellennetz gespeist. Der größte

Schwachpunkt der E-Fuels sind die momentan hohen Wirkungsgradverluste bei der Herstellung. Außerdem müsste es größere Kapazitäten zur Speicherung des regenerativ erzeugten Stroms geben, da die Erzeugung stark schwanken kann. Aktuell wären die Kosten für den Endverbraucher im Vergleich zum Diesel knapp viermal so teuer. Laut Experten wird es aufgrund des schlechten Wirkungsgrades für den E-Fuel Kraftstoff schwierig, sich im Pkw-Sektor durchzusetzen. Langfristig könnten die E-Fuels Transportbereich wie beispielsweise der Schifffahrt oder der Flugzeugbranche eingesetzt werden, da durch die hohe Energiedichte kaum Raum und Gewicht vom Antrieb und dem Kraftstoff in Anspruch genommen werden. Außerdem wird der Preis laut Studien in Zukunft auch im Bereich der heutigen Dieselpreise liegen [39] [17].

Eine kurzfristige Alternative könnte **DME** darstellen. DME gehört zu der Gruppe der Ether. Diese bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen, mit der Besonderheit, dass eine CH_2 -Gruppe durch ein Sauerstoffatom ersetzt wird [15]. DME ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) kann dabei als Reinstoff für leicht modifizierte Dieselmotoren zum Einsatz kommen. Es wird bereits von Unternehmen wie Shell für andere Einsatzgebiete hergestellt. DME wird hauptsächlich aus Methanol produziert, welches das Potenzial besitzt, zukünftig aus regenerativen Quellen hergestellt zu werden. Jedoch gibt es auch die Möglichkeit DME über Synthesegas herzustellen. Basis des Synthesegases können fossile Rohstoffe, Biomasse oder Wasserstoff aus der Elektrolyse sein. Vorteile des DMEs sind vor allem die lokal verringerten partikelfreien Emissionen. Aktuell ist zum Betanken noch keine flächendeckende Infrastruktur vorhanden. Dennoch könnte zukünftig das LPG-Tankstellennetz angepasst und für DME verwendet werden [20] [17].

Neben den bereits genannten Kraftstoffen gibt es einen weiteren synthetischen Kraftstoff, den sauerstoffhaltigen Oxymethylenether (**OME**). Der Kraftstoff OME besteht aus einer Reihe organisch-chemischer Verbindungen von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff [27]. Die Herstellung erfolgt über Methanol und kann unter der Nutzung von regenerativen Energien erfolgen. Der große Vorteil von OME ist, dass bei seiner Verbrennung praktisch keine Rußpartikel entstehen und das die Oxymethylengruppen angepasst werden können, um gewisse Eigenschaften wie die Cetanzahl zu verbessern [49]. Durch das Fehlen einer C-C Bindung im OME-Molekül, hat OME einen halb so hohen Energiegehalt, wie der konventionelle Dieselmotorkraftstoff. Deshalb macht es Sinn, dem Dieselmotorkraftstoff OME beizumischen. Trotzdem gibt es auch schon Ansätze einen Motor mit OME als Reinstoff zu betreiben. Der Kraftstoff könnte in Zukunft dann auch über das bereits vorhandene Tankstellennetz vertrieben werden. OME bietet daher ein großes Potenzial im Bereich der alternativen Kraftstoffe, um die lokalen Schadstoffemissionen zu reduzieren, sofern die Herstellung durch regenerativen Strom erfolgt. Aktuell wird OME jedoch noch überwiegend aus fossilen Energien gewonnen, da es noch keine industriellen Produktionsstandorte gibt [27].

Wie zuvor beschrieben basieren OME und DME auf **Methanol** (CH_3OH). Dieser Rohstoff kann in der Energiewende eine zentrale Rolle in diversen Anwendungsbereichen spielen. Methanol hat den Vorteil, durch regenerative Quellen und CO_2 hergestellt zu werden. Die Erzeugung von Methanol ist dabei sehr vielseitig, wie es folgende Abbildung 1 veranschaulicht. Die Verfahren unterscheiden sich hierbei durch die jeweilig verwendeten CO_2 -Quellen. Das CO_2 kann aus industriellen Punktquellen, Biomasse oder aus der Atmosphäre bezogen werden.

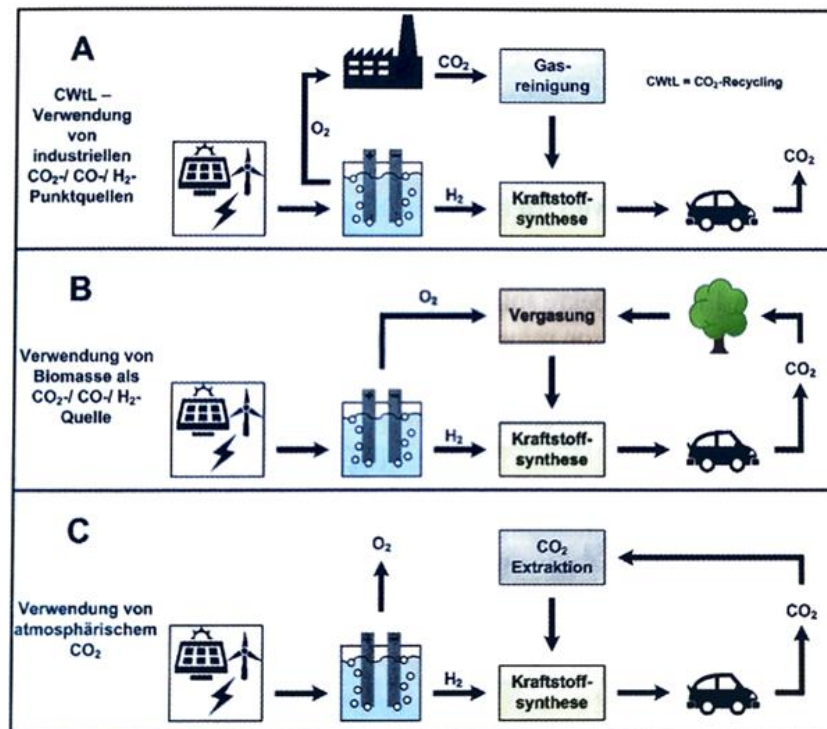


Abbildung 1: Herstellung von Methanol [17]

Über Methanol-Synthese-Anlagen könnte der schwankende regenerative Strom durch Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid in Methanol umgewandelt werden, wodurch Methanol als Energiespeicher in Form von Kraftstoff dienen kann. Somit wäre das Problem, überschüssige Energie aus erneuerbaren Energien zu speichern, durch Methanol gelöst. Bereits vorhandene Anlagen, die Methanol über fossile Energien herstellen, könnten außerdem bei geringen Umbauaufwand Methanol auf regenerativer Basis produzieren und sogar ökonomische Vorteile bieten. Methanol kann nicht nur als Basis zur Produktion von weiteren Kraftstoffen dienen, sondern auch als Reinstoff verwendet werden. Vorteile bietet Methanol vor allem in der einfachen Lagerung und Logistik sowie den lokal geringeren Emissionen. Dennoch müssen Dieselmotoren aufgrund der geringen Schmierfähigkeit und Viskosität bei einer hohen Korrosivität modifiziert werden, wenn Methanol als Reinstoff getankt werden soll [17] [25].

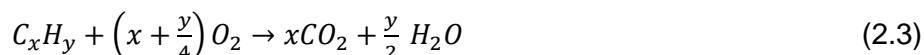
2.3. Schadstoffemissionen des Dieselmotors

Aufgrund der immer strenger werdenden Abgasnormen und dem zentralen Thema des Klimawandels, spielen die Schadstoffemissionen des Dieselmotors eine zunehmend entscheidende Rolle. Die Emissionen des Straßenverkehrs, in dem hauptsächlich Verrennungsmotoren im Einsatz sind, betragen in den Industrienationen etwa 20 Prozent der Gesamtemissionen. Des Weiteren nehmen die Fahrzeugbestände und somit auch die Schadstoffemissionen global weiter zu. Um ein Verständnis zu entwickeln, wie es möglich ist die Emissionen zu reduzieren, müssen zunächst die Schadstoffentstehung und die Emissionskomponenten genauer betrachtet werden [37].

Aktuell werden hauptsächlich fossile Energieträger als Grundlage bei der Kraftstoffherstellung für Verbrennungsmotoren verwendet. Diese bestehen überwiegend aus verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen. Je nachdem wie der Kraftstoff chemisch aufgebaut ist und welche Bestandteile er besitzt, lassen sich die Emissionen des Verbrennungsprozesses beeinflussen. Der Kohlenstoff und der Wasserstoff des Kraftstoffes reagieren während der Verbrennung mit dem Sauerstoff der zugeführten Luft zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Die Beziehungen werden über folgende Reaktionsgleichungen angegeben [36].



Wird der Kraftstoff als C_xH_y dargestellt, ergibt sich die folgende allgemeine Reaktionsgleichung [36].



Die entstandenen Emissionen (siehe Abbildung 2) setzen sich aus den Hauptkomponenten Sauerstoff (O_2) Stickstoff (N_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2), und Wasser (H_2O) in Form von Dampf zusammen. Das entstandene Wasser geht aus dem im Kraftstoff gebundenen Wasserstoff hervor. Beim Abkühlen des Wasserdampfes kondensiert das Wasser. Das Kohlenstoffdioxid entsteht durch die vollständige Verbrennung der Kohlenstoffe im Kraftstoff. Die Menge des ausgestoßenen Kohlenstoffdioxids ist proportional zum Kraftstoffverbrauch und lässt sich bei üblichen Kraftstoffen nur über diesen begrenzen. CO_2 wird zwar nicht als Schadstoff eingestuft, spielt es im Vergleich zu den anderen Hauptbestandteilen eine primäre Rolle. Grund hierfür ist, dass das CO_2 maßgeblichen Einfluss auf den Treibhauseffekt hat, welcher zur Klimaerwärmung führt. Deshalb gilt es nach den Abgasnormen die CO_2 - Emissionen massiv zu reduzieren. Stickstoff nimmt typischerweise knapp dreiviertel des emittierten Abgases ein. Dies liegt dem zugrunde, dass Stickstoff ein Hauptbestandteil der vom Motor angesaugten Luft ist und bei der Verbrennung nicht beteiligt ist [37].

Schadstoffe

Da in der Realität kein idealer Verbrennungsprozess abläuft, sondern der Kraftstoff Verunreinigungen und weitere Komponenten beinhaltet, kommt es bei der Verbrennung zu der Entstehung von Schadstoffen. Die Schadstoffe setzen sich typischerweise aus folgenden Komponenten zusammen, die im weiteren Verlauf näher erläutert werden [37].

- Stickstoffoxide (NO_x)
- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Schwefeldioxid (SO_2)
- Feststoffe (Partikel) [37]

Die Zusammensetzung des Abgases und dessen Anteile sind in Abbildung 2 veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass die Schadstoffe einen sehr geringen Anteil von ungefähr 0,1 Prozent an der gesamten Abgaszusammensetzung ausmachen. Die Schadstoffe bestehen dabei hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden.

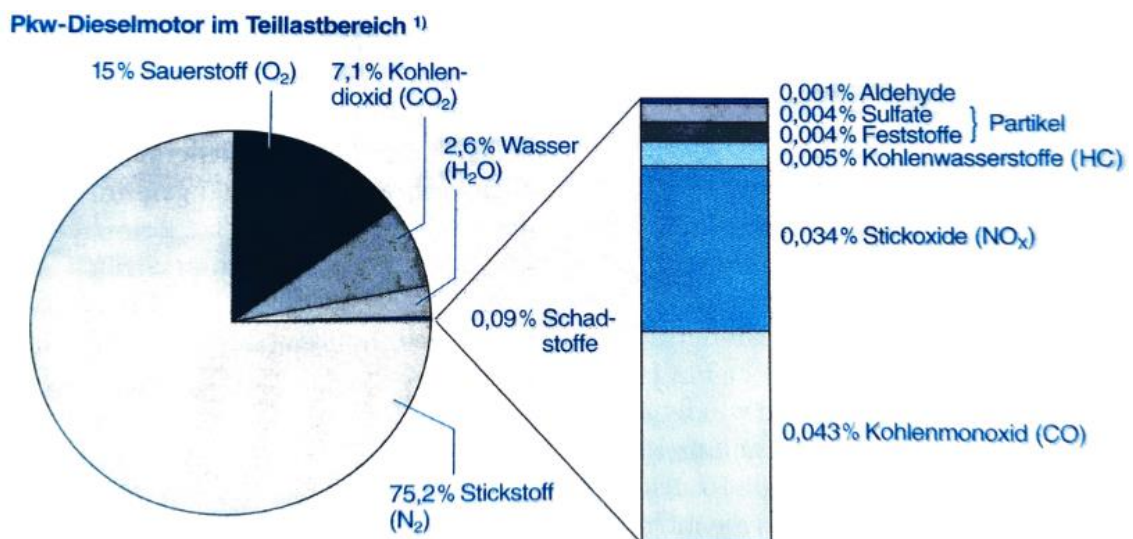


Abbildung 2: Abgaszusammensetzung vom Dieselmotor ohne Abgasnachbehandlung [37]

Stickstoffoxid ist ein Sammelbegriff, unter dem verschiedene Oxide aus Verbindungen von Stickstoff und Sauerstoff zusammenfasst werden. Im Abgas eines Verbrennungsmotors entsteht vor allem Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2) und Distickstoffoxid (N_2O). Stickstoffoxid ist farb- und geruchslos und oxidiert in der Luft zum giftigen Stickstoffdioxid. Die Bildung von den Stickstoffoxiden wird maßgeblich von der Verbrennungstemperatur und dem lokalen Luftverhältnis beeinflusst. Je höher die lokale Flammtemperatur und das lokale Luftverhältnis sind, desto mehr Stickstoffoxide entstehen [15]. Stickstoffoxide beeinflussen vor allem die Luftverschmutzung in großen Metropolen. Sie sind bei erhöhter Konzentration toxisch für die Atemwege und verstärken die Ozonbildung. Außerdem sind sie mitverantwortlich für sauren Regen und der daraus resultierenden Waldschäden [37].

Kohlenwasserstoffe sind unterschiedliche chemische Verbindungen von Kohlenstoff und Wasserstoff und entstehen im unvollständigen Verbrennungsprozess aufgrund von Sauerstoffmangel. Schlechte Gemischbildung führt außerdem zu fetten Gemisch-Zonen im Brennraum, wodurch die Oxidationsprozesse in Bereichen mit geringerer Temperatur nicht stattfinden können (Quenching-Effekt). Des Weiteren sorgen Einspritzdüsen durch ungewollte Nacheinspritzungen zu Tropfendurchmesser, die teils nicht vollständig oxidiert werden können. Kohlenwasserstoffe gelten teilweise als krebserregend und können zu Reizungen an den Schleimhäuten führen [15].

Kohlenmonoxid ist farb- und geruchslos und entsteht durch Luftmangel bei der Verbrennung. Normalerweise wird bei ausreichend Luft der Kohlenstoff vollständig in Kohlenstoffdioxid umgesetzt. Ist aber zu wenig Luft im Brennraum vorhanden, treten fette Zonen des Luft-Kraftstoff-Gemisches auf, was zur unvollständigen Oxidation der Kohlenstoffe führt. Trotzdem kann auch bei einem Luftverhältnis größer als eins, lokal vermehrt Kohlenmonoxid durch die inhomogene Gemischbildung des Kraftstoffes entstehen. Kommt der Mensch mit Kohlenmonoxid in Kontakt, kann dies zur Verringerung der Sauerstoffaufnahme des Blutes führen, was negative gesundheitliche Folgen mit sich bringen kann [15].

Die Entstehung von **Schwefeldioxid** spielt heutzutage kaum noch eine Rolle. Dies hat den Grund, dass die Schwefelverbindungen im Abgas aus dem Schwefelanteil im verwendeten Kraftstoff resultieren. Durch strenge Kraftstoff-Normen, wie der EN590, besitzen die Dieselmotorkraftstoffe aktuell einen Schwefelgehalt von unter zehn mg/kg, wodurch nur sehr wenig Schwefeldioxid im Abgas entstehen kann. Schwefeldioxid ist ein toxisches Gas, welches aber bei sehr geringen Konzentrationen nicht als gesundheitsgefährdend eingestuft wird. In höherer Dosis kann es die Schleimhäute reizen und Atembeschwerden verursachen. Außerdem kann Schwefeldioxid ähnlich wie Stickstoffdioxid zur Versauerung der Böden führen [47]. Im Pkw ist es problematisch, wenn es sich im Katalysator festsetzt und seine Reinigungswirkung reduziert [37].

Partikel werden vor allem durch lokalen Luftmangel und der daraus resultierenden unvollständigen Verbrennung gebildet. Sie können komplexe Strukturen aufweisen, bestehen aber hauptsächlich aus Ketten von Kohlenstoffteilchen mit einer großen spezifischen Oberfläche. Überwiegend handelt es sich um Ruß und andere geringe Anteile von Sulfaten und Aschen. Die Rußbildung wird vor allem von der lokalen Flammentemperatur und dem lokalen Luftverhältnis im Brennraum beeinflusst. In der Brennzone des Einspritzstrahles, herrscht durch die diffusive Gemischbildung ein fetter Bereich, wodurch die Entwicklung von Rußpartikeln gefördert wird [15]. In der folgenden Abbildung 3 wird der Einfluss von den Parametern Luftverhältnis und Temperatur auf die Rußbildung veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass bei einem geringen Luftverhältnis erhöhte Rußbildung zu erwarten ist. Beträgt

zusätzlich die Flammtemperatur zwischen 1600 und 1700 Kelvin kann der Rußertrag auf über 40 Prozent steigen.

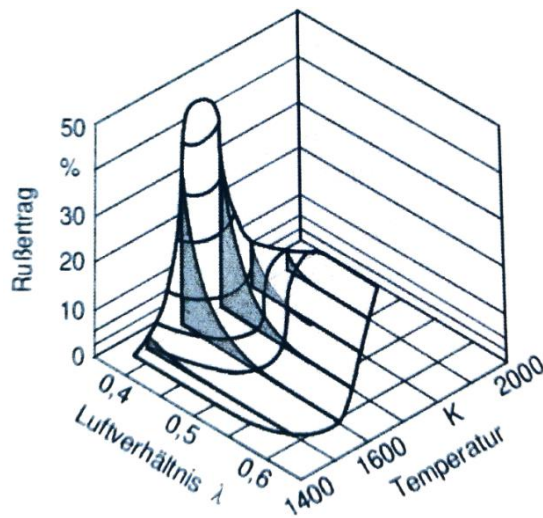


Abbildung 3: Rußbildung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses und der Temperatur [15]

Die Auswirkungen von Partikeln auf den Menschen sind bis heute nicht eindeutig belegt, es wird aber davon ausgegangen, dass kleine Partikel in der Lunge zu Krebs und anderen Krankheiten wie Asthma führen können [41]. Der Fokus der öffentlichen Debatten um die Reduzierung der Abgasemissionen eines Dieselmotors liegt vor allem auf den Stickstoffoxiden, den Partikeln und dem CO₂-Austoß. Speziell der Klimaschutz sowie die menschliche Gesundheit spielen in Verbindung mit den genannten Bestandteilen eine zentrale Rolle.

Reduzierung von Schadstoffen

Eine der größten Herausforderungen bei der Reduzierung der Schadstoffe im Hinblick auf die Stickstoffoxide und die Partikelbildung sind die sogenannten Trade-Offs. Ein Trade-Off oder auch Zielkonflikt genannt bedeutet, dass die Verminderung eines Schadstoffes zur Erhöhung eines anderen führt. Praktisch bedeutet dies, dass eine bessere Verbrennung bei höherer Temperatur zu einer geringen Ruß- und CO₂-Bildung führt, aber erhöhte Mengen von Stickstoffoxiden entstehen. Maßnahmen dagegen die zu einer Senkung der Stickstoffoxide führen, sorgen für einen Anstieg der Ruß- und CO₂-Bildung [51].

Bei der Reduzierung von Abgasemissionen wird zwischen **inner- und außermotorische Maßnahmen** unterschieden. Da die entstehenden Schadstoffe stark vom Motorbetrieb abhängen, gibt es viele Faktoren im **innermotorischen** Bereich die optimiert werden können, um die Abgasemissionen zu beeinflussen und zu senken. Das Einspritzsystem des Dieselmotors besitzt dabei eine Schlüsselrolle. Dieses beinhaltet folgende Aspekte [36]:

- Einspritzparameter
 - Zeitpunkt

- Anzahl der Einspritzungen (Menge, Dauer)
- Druck
- Einspritzverlaufsformung
- Einspritzdüsenparameter
 - Lochzahl
 - Düsenwinkel
- Kolbenform
- Ladungsbewegung
 - Drall oder Tumble Bewegung
- Ladedruck [36]

Gerade der Einspritzzeitpunkt und der Einspritzverlauf bestimmen die Gemischbildung und die Lage des Verbrennungsschwerpunktes, was die Effizienz und die Emissionen maßgeblich beeinflussen kann. Außerdem wird ein hoher Einspritzdruck angestrebt. Durch moderne elektronische Einspritzsysteme wie zum Beispiel das Common-Rail-System, werden diese Parameter hinsichtlich der Verringerung des Kraftstoffverbrauches und der Schadstoffe optimiert. Trotzdem stoßen diese Optimierungen auch an ihre Grenzen [52].

Zusätzlich spielt die richtige Abstimmung des Brennverfahrens eine zentrale Rolle. Hierbei gibt es verschiedene Einflussgrößen. Die Kategorien der Einflussgrößen werden in Abbildung 4 veranschaulicht. Wie zu erkennen, resultieren aus allen Kategorien jeweils mehrere veränderbare Parameter. Das zeigt die Komplexität der innermotorischen Maßnahmen, denn jede Anpassung eines Parameters kann Einfluss auf das Brennverhalten und somit auf den Schadstoffausstoß haben.

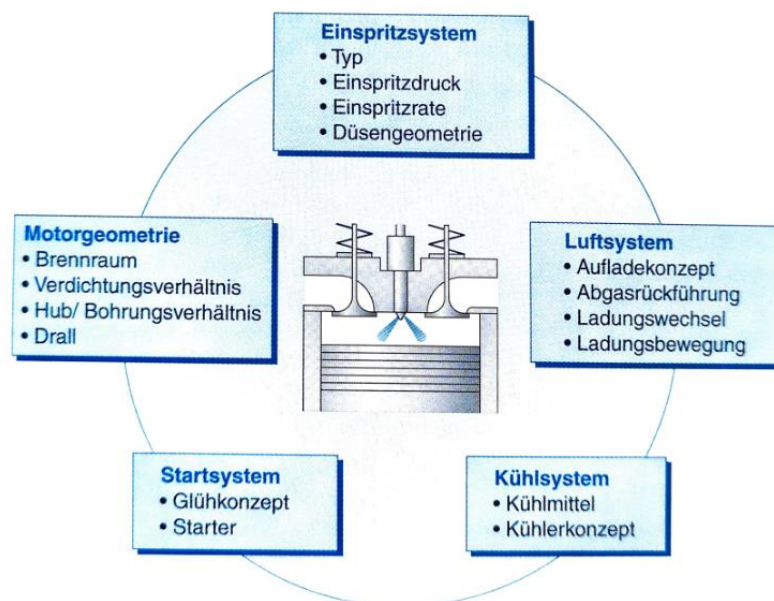


Abbildung 4: Einflussgrößen auf das Brennverfahren [37]

Durch eine elektronisch geregelte Abgasrückführung werden die Temperatur und das lokale Luftverhältnis im Brennraum gesenkt, was die Entstehung von Stickoxiden reduziert. Eine Voreinspritzung kann zu einem ruhigeren Motorlaufverhalten und gegebenenfalls zur Senkung von Stickstoffoxiden führen. Durch die Verwendung von modernen Einspritzsystemen wie dem Common Rail System, die hohe Einspritzdrücke erzeugen, werden Abgasemissionen weiter vermindert [52].

Kann die Entstehung der Schadstoffe durch innermotorische Maßnahmen nicht weiter optimiert werden, kann das entstandene Abgas durch **außermotorische Maßnahmen** behandelt werden. Typischerweise kommen dabei Katalysatoren und Partikelfilter zum Einsatz. Für einen Dieselmotor wird überwiegend zwischen dem klassischen Oxidationskatalysator und dem SCR-Katalysator (Selektiver Katalytischer Reduktions-Katalysator) unterschieden. Bei dem Oxidationskatalysator werden die Abgaskomponenten CO und HC in die Stoffe H₂O und CO₂ umgewandelt. Der Katalysator besteht aus einem metallischen oder keramischen Träger und sorgt mit seiner Beschichtung aus Edelmetallen dafür, dass CO und HC mit Sauerstoff oxidieren können [30]. Der SCR-Katalysator sorgt für eine Reduzierung der Stickstoffoxide durch Ammoniak. Der Ammoniak entsteht durch die Thermolyse und Hydrolyse aus einer zugegebenen Harnstofflösung, die als Adblue bekannt ist. Chemische Reaktionen sorgen im Katalysator dafür dass aus den verschiedenen Stickstoffoxiden wie NO, NO₂ oder N₂O die unschädlichen Stoffe N₂, CO₂ und H₂O entstehen. Der Partikelfilter sorgt für das Abscheiden der im Verbrennungsprozess entstandenen Partikelemissionen. Er besteht aus einem Keramikfiltersubstrat, welches für die Rußpartikel nicht durchlässig ist. Hier lagern sich diese ab und werden anschließend bei Temperaturen über 400 °C mit Sauerstoff aus dem Abgas verbrannt. Durch diese Abgasnachbehandlungen können somit die schädlichen Abgasemissionen massiv reduziert werden [36].

Emissionsgrenzwerte

Der Grund für die immer moderner und effizienter werdenden inner- und außermotorischen Maßnahmen zur Abgasreduzierung sind vor allem die in den letzten Jahren verschärften Emissionsgrenzwerte. Die Vorgaben richten sich dabei an verschiedene Unterteilungen von Fahrzeugen und sind international unterschiedlich. In der folgenden Abbildung 5 ist zu erkennen wie stark die Verschärfungen der Abgaswerte von Pkw zugenommen hat. Es ist zu erkennen, dass im Bereich des Diesels vor allem die NO_x-Emissionen in den letzten Jahren stark reduziert wurden. Außerdem wird seit der Euro 5 Vorschrift die Partikelanzahl untersucht. Die Partikelmasse wurde in den letzten zehn Jahren auch sehr stark verringert.

	Schadstoff in g/km	Euro 1 ab	Euro 1 ab		Euro 2 [#] ab	Euro 3 ab	Euro 4 ab	Euro 5 ab	Euro 6 ab
Typprüfung Serienprüfung		01.01.1992 –	– 31.12.1992	neue Fzg. Typen alle Fahrzeuge	01.01.1996 01.01.1997	01.01.2000 01.01.2001	01.01.2005 01.01.2006	01.09.2009 01.01.2011	01.09.2014 01.09.2015
Richtlinie/ Verordnung (VO)		91/441/EWG	91/441/EWG		94/12/EG	98/69/EG	98/69/EG	VO EG 715/2007[#] i.V. mit VO EG 692/2008 und VO EG 459/2012	
Benzin	CO	2,72	3,16		2,2	2,3	1	1	1
	HC+NO _x	0,97	1,13		0,5	–	–	–	–
	THC	–	–		–	0,2	0,1	0,1	0,1
	NO _x	–	–		–	0,15	0,08	0,06	0,06
	Partikel- masse (PM)	–	–		–	–	–	0,0045 ⁽³⁾	0,0045 ⁽³⁾
	Partikelzahl (PN) (in Anzahl/km)	–	–		–	–	–		6,0 x 10 ¹¹ (4)
	NMHC	–	–		–	–	–	0,068	0,068
Diesel	CO	2,72	3,16		1	0,64	0,5	0,5	0,5
	HC+NO _x / THC+NO _x (ab Euro 5)	0,97	1,13		0,7/0,9 ⁽¹⁾	0,56	0,3	0,23	0,17
	NO _x	–	–		–	0,5	0,25	0,18	0,08
	Partikel- masse (PM)	0,14	0,18		0,08/0,10 ⁽²⁾	0,05	0,025	0,0045	0,0045
	Partikelzahl (PN) (in Anzahl/km)	–	–		–	–	–	6,0 x 10 ¹¹	6,0 x 10 ¹¹

Abbildung 5: Emissionsgrenzwerte von Pkw [46]

Da auch die inner- und außermotorischen Maßnahmen zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte an ihre Grenzen stoßen und sich die Grenzwerte in den nächsten Jahrzehnten verschärfen, könnten alternative Kraftstoffe in gewissen Bereichen dazu beitragen, diese Emissionsgrenzwerte einzuhalten.

2.4. Einfluss der alternativen Kraftstoffe auf die Schadstoffemissionen

Die durch den Verbrennungsprozess entstandenen Schadstoffemissionen werden durch diverse unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Werden alle außer- und innermotorischen Maßnahmen bis zu einem Limit optimiert, kann nur ein neuer Kraftstoff zu einer erheblichen Verbesserung der Emissionen führen. Die im Kapitel 2.2 beschriebenen alternativen Kraftstoffe besitzen dabei unterschiedliche Vor- und Nachteile hinsichtlich ihrer Emissionen, Herstellung und motorische Eigenschaften. Außerdem werden manche Kraftstoffe bereits eingesetzt, andere stehen dagegen noch in ihrer Entwicklungsphase (OME, DME) bevor sie flächendeckend in den Markt integriert werden können. Die folgende Tabelle 1 gibt einen direkten Überblick von dem Einfluss der verschiedenen Kraftstoffe auf die Emissionen. Dabei ist es wichtig, die Emissionen des lokalen Verbrennungsprozesses und die bei der Herstellung entstandenen Emissionen zu berücksichtigen, um den Kraftstoff hinsichtlich seiner Klimabilanz beurteilen zu können. Aus der Tabelle wird direkt der große Vorteil der synthetisch hergestellten E-Fuels in Bezug auf die Emissionen ersichtlich.

Tabelle 1: Einfluss der alternativen Kraftstoffe auf die Schadstoffemissionen

Alternative Kraftstoffe	Lokale Emissionen durch Verbrennungsprozess	Emissionen bei der Herstellung	Bewertung gegenüber konventionellen Dieselmotorkraftstoff
FAME (Biodiesel) [54]	-Reduzierung von: SO ₂ , HC, CO, Feinstaub, Partikel -Erhöhung von: NO _x [49]	-Anbau, Ernte und Verarbeitung von Rohstoffen: CO ₂ -Ausstoß, N ₂ O, CH ₄	-20 bis 86 % bessere Klimabilanz
Gas (Autogas, Erdgas, flüssiges Erdgas)	Autogas: etwa gleich hohe CO ₂ -Emissionen im vgl. zum Diesel, geringe NO _x -Emissionen [33] Erdgas: Reduzierung von CO ₂ (20 bis 25 %), CO, Rußpartikel/ Feinstaub (ca. 99 %), HC, NO _x (ca. 37 %)	Autogas= Nebenprodukt, bei Erdölgewinnung, deshalb keine zusätzlichen Emissionen Erdgas: Gewinnung durch Bohrungen oder als Nebenprodukt bei Erdölgewinnung, deshalb keine zusätzlichen Emissionen Flüssiges Erdgas: hoher Energieaufwand	-lokal geringere Emissionen, aber Haupteinsatzgebiet im Ottomotor -Herstellung nicht klimafreundlich durch fossile Primärenergie

	Flüssiges Erdgas: Reduzierung CO ₂ (bis zu 30 %) [32]	sorgt für CO ₂ -Emissionen	
Wasserstoff [40]	-Verbrennungsprodukte: Wasserdampf und geringe Mengen von NO _x -Keine Emissionen von: CO ₂ , HC, CO, Partikel	-Emissions- und CO ₂ -neutral, wenn Wasserstoff mittels Elektrolyse aus regenerativen Quellen hergestellt wird	-Klimaneutralität, Klimafreundlicher in Herstellung und lokaler Emissionen
Synthetische Kraftstoffe:			
GtL [49]	-Reduzierung von Partikelemissionen bis zu 40 %, Potenzial NO _x Reduktion bis zu 17 %, CO ₂ -Emissionen 3 bis 5 % geringer [16]	-CO ₂ -Bilanz schlechter als bei Erdgas, aufgrund zusätzlichen Energiebedarfes bei Synthese	-Lokal bessere Emissionen und sehr gute Eigenschaften, jedoch abhängig von fossilen Primärenergien
CtL	-Ähnlich wie GtL	-Hoher CO ₂ -Ausstoß, Kohle als Primärenergie	-CO ₂ -Bilanz um Faktor 2 schlechter als konventioneller Dieselkraftstoff [49]
BtL [49]	-Reduzierung von: HC, CO, Feinstaub, Partikel (bis zu 40 % geringer als bei FAME), kein SO ₂	-Herstellung von Biomasse ähnlich wie bei FAME aber zusätzliche Synthese notwendig	-Gute CO ₂ -Bilanz (deutlich besser als FAME) -Lokal deutlich besser Emissionen
HVO [17]	-Deutlich bessere NO _x - und Rußemissionen (durch Reduzierung der Partikeldurchmesser) -Reduzierung von CO ₂ , HC (deutlich), CO (deutlich)	-Herstellung von Pflanzenölen ähnlich wie bei FAME	-Deutlich bessere lokale Schadstoff- und CO ₂ Emissionen
E-Fuels/ Power-to-X:			

DME [17]	-keine Partikelbildung -geringe NO _x -Emissionen -NO _x -/Partikel Tradeoff aufgelöst	-Theoretisch mögliche klimaneutrale Herstellung als E-Fuel	-Als Reinstoff Umwelt- und CO ₂ -neutral, jedoch Anwendung als Blend sinnvoller -großes Potenzial durch Auflösung des Tradeoffs
OME [17]	-keine Partikelbildung -NO _x -/Partikel Tradeoff aufgelöst -NO _x kann durch Abgasrückführung verringert werden	-Theoretisch mögliche klimaneutrale Herstellung als E-Fuel	-Als Reinstoff umwelt- und CO ₂ -neutral -großes Potenzial durch Auflösung des Tradeoffs
Methanol [17]	-Partikelfreie und NO _x -arme Verbrennung	-Theoretisch mögliche klimaneutrale Herstellung als E-Fuel	-Durch klimaneutrale Herstellung und lokal geringe Emissionen Potenzial als Reinstoff und Blend

Wie die Kraftstoffe die lokalen Schadstoffemissionen beeinflussen, lässt sich auf den chemischen Aufbau zurückzuführen. Der **Biokraftstoff FAME** besitzt einen geringen Anteil von Aromaten und Schwefel, wodurch bei der Verbrennung weniger Schwefeldioxid und Partikel entstehen können. Außerdem weist er einen höheren Sauerstoffgehalt auf als der konventionelle Diesel. Dadurch entstehen weniger HC, CO und Feinstaub Emissionen, aber auch erhöhte NO_x-Emissionen [54]. Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan, welches aus kettenförmigen Kohlenwasserstoffen mit Einfachbindungen zusammengesetzt ist. Die Moleküle sind aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen aufgebaut. Somit hat Methan die wenigsten Kohlenstoffatome und die meisten Wasserstoffatome der fossilen Primärenergien. Durch das gute H/C-Verhältnis entstehen bei der Verbrennung weniger CO₂, CO, HC und Ruß [49]. Wasserstoff enthält keine Kohlenstoffatome, wodurch auch keine kohlenstoffhaltigen Abgase aufgrund des Kraftstoffes entstehen können. Einzig Stickstoffoxide und Wasserdampf entstehen bei der Verbrennung. Die Stickstoffoxid Emissionen sind dabei abhängig vom Luftverhältnis im Brennraum. Somit hat Wasserstoff als Kraftstoff extreme

Vorteile hinsichtlich der lokalen Schadstoffemissionen, aber auch in seiner Herstellung über regenerativen Energien [40].

Die verringerten Partikelemissionen bei einem **GtL-Kraftstoff** sind vor allem auf die Sauerstoffanreicherung des Kraftstoffes zurückzuführen. Durch das bessere H/C-Verhältnis werden außerdem Stickstoff- und CO₂-Emissionen reduziert. Der Kraftstoff kann hinsichtlich seiner Eigenschaften durch die synthetische Herstellung spezifisch angepasst werden, um somit die lokalen Emissionen zu beeinflussen. Großer Nachteil hinsichtlich der Emissionen ist der Herstellungsprozess. Durch die Weiterverarbeitung von Erdgas wird noch mehr Energie benötigt, was für den Kraftstoff eine Abhängigkeit von fossilen Energien und höhere CO₂-Emissionen bedeutet [16]. CtL-Kraftstoffe können ähnliche lokale Emissionen aufweisen wie GtL-Kraftstoffe. Im Herstellungsprozess entstehen jedoch sogar je nach Verfahren zwischen 30 bis 120 % mehr CO₂-Emissionen. Deshalb bieten sie keine klimaverbessernden Vorteile aufgrund der Förderung des Treibhauseffektes [50]. Wie auch der Biokraftstoff FAME enthalten BtL-Kraftstoffe keinen Schwefel, weshalb auch kein SO₂ bei der Verbrennung entstehen kann. Durch das synthetische Verfahren können Störstoffe im Herstellungsprozess wie Stickstoff abgesondert werden. Dadurch verbessern sich die lokalen HC-, CO- und Partikel-Emissionen gegenüber dem konventionellen Dieselmotorkraftstoff, aber auch des Biodiesels. Durch die Nutzung von Biomasse als Rohstoff reduzieren sich außerdem die CO₂-Emissionen [17].

HVO Kraftstoffe sind im Gegensatz zum Diesel nahezu aromatenfrei, wodurch die Reduzierung der HC- und CO-Emissionen sowie der Rußbildung zu erklären ist. Aufgrund des guten H/C-Verhältnisses und der nachhaltigen Herstellung kommt es insgesamt zu einer großen Ersparnis von CO₂-Emissionen [17].

DME besteht aus Kohlenwasserstoffverbindungen, mit substituierten Sauerstoffatomen. Seine physikalischen Eigenschaften ähneln sich dabei denen von Autogas. Durch den höheren Anteil an Sauerstoff entstehen bei der Verbrennung nahezu keine Partikel und geringe NO_x-Emissionen, wodurch der problematische Zielkonflikt von Partikel- und NO_x-Bildung aufgelöst wird. Trotzdem muss beachtet werden, dass aufgrund der geringeren Energiedichte, mehr Kraftstoff verbrannt werden muss. Die Emissionen in der Herstellung unterscheiden sich dabei stark je nachdem unter welchem Verfahren DME produziert wird. Erfolgt die Herstellung des Synthesegases aus Wasserstoff (aus Elektrolyse) und CO₂ sowie der direkten DME-Synthese, kann DME unter Einsatz von regenerativen Energien klimaneutral hergestellt werden [15] [17].

Der **OME-Kraftstoff** besitzt die chemische Grundstruktur CH₃-O(-CH₂O)_n-CH₃. OME hat somit einen hohen Sauerstoffanteil und keine C-C Bindungen. Da OME Kraftstoffe anpassbar hinsichtlich ihrer Anzahl der Monomereinheiten n sind, werden sie als OME_n definiert. Durch die steigende Kettenlänge verändern sich auch die physikalischen Eigenschaften des

Kraftstoffes, welches die lokalen Emissionen beeinflusst. In der Anwendung von OME als Reinstoff und als Blend mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff kommt es zu einer starken Reduktion der Partikel-Emissionen hinsichtlich ihrer Anzahl und Masse. Durch Aufbrechen des Tradeoffs wie bei DME, kann durch eine Anpassung der Abgasnachbehandlung die NO_x-Emission weiter vermindert werden. Außerdem entstehen geringere Rußemissionen aufgrund der besseren Nachoxidation und der geringeren Größe der Partikel. Im Vergleich zu DME bietet OME bessere motorische Eigenschaften und optimiert zudem den Wirkungsgrad. Durch das Potenzial, das OME über regenerative Energien klimaneutral herzustellen, kann es in naher Zukunft einen großen Beitrag leisten, Dieselmotoren mit einer guten Klimabilanz zu betreiben [15] [17].

Methanol (CH₄O) gehört zu den einfachen Alkoholen. Es besteht aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen und einer Hydroxygruppe (OH-Gruppe). Methanol kann in einem modifizierten Dieselmotor als Reinstoff oder Blend eingesetzt werden. Es sorgt ähnlich wie DME und OME für partikelfreie und reduzierte NO_x-Emissionen. Aufgrund der geringeren Cetanzahl müssen aber Maßnahmen im Motorkonzept ergriffen werden, die zu einer höheren Zündwilligkeit führen. Der große Vorteil im Gegensatz zu DME liegt aber vor allem in der einfachen Lagerung und Logistik. Außerdem ist Methanol ein Schlüsselbaustein zur Produktion von weiteren alternativen Kraftstoffen, wie OME und DME, die jedoch mit Wirkungsgradverlusten einhergehen. Wenn Methanol über erneuerbare Energien hergestellt wird, weist es außerdem eine neutrale Klimabilanz auf. Somit kann Methanol aufgrund der genannten Faktoren in naher Zukunft eine große Rolle im Bereich der Verbrennungsmotoren spielen [15] [17].

Zusammenfassend können alternative Kraftstoffe einen bedeutenden Einfluss auf die lokalen Schadstoffemissionen und die gesamte Klimabilanz eines Dieselmotors haben. Folgende Faktoren gegenüber dem konventionellen Dieselmotorkraftstoff sind dabei oftmals ausschlaggebend:

- Höherer Sauerstoffanteil
- Geringer Kohlenstoffgehalt
- Günstiges H/C-Verhältnis
- Aromatenfrei
- Vermeidung von Störstoffen (Schwefel und Stickstoff)

Vorteile haben hierbei synthetische Kraftstoffe, da sie während der Produktion besser angepasst werden können. Des Weiteren muss der Herstellungsprozess mitberücksichtigt werden, um die Klimabilanz eines Kraftstoffes bewerten zu können. Kraftstoffe, die auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen produziert werden, schonen fossile Rohstoffe und haben im Vergleich zur Herstellung des konventionellen Dieselmotorkraftstoffes und Kraftstoffen auf

Basis fossiler Primärenergien eine bessere CO₂-Bilanz. Trotzdem ist die Herstellung von Kraftstoffen über regenerativen Strom mit H₂ und CO₂ wie E-Fuels, die klimafreundlichere Alternative. Die aktuellen Probleme beinhalten weiterhin hohe Wirkungsgradverluste und eine teure Herstellung. Können diese Aspekte in Zukunft behoben oder verbessert werden, wäre es möglich, einen Dieselmotor klimaneutral zu betreiben.

2.5. Abgasanalytik beim Dieselmotor

Die Abgasanalytik gewinnt in der modernen Entwicklung von Verbrennungsmotoren immer mehr an Bedeutung. Dies hat den Grund, dass die Abgaszusammensetzung in der Debatte rund um den Klimawandel und den Abgasskandal stärker in den Fokus rückt als in den Jahrzehnten zuvor. Die Analytik ist dabei Grundlage aller Maßnahmen, um Motoren und Kraftstoffe stetig weiterzuentwickeln, um das Ziel Emissionen zu reduzieren zu erreichen.

Zum einen spielt die Abgasanalytik eine wichtige Rolle in Bezug auf die Typprüfung. Das bedeutet, dass neue Fahrzeuge nur zugelassen werden, wenn sie die gesetzlich geregelten Abgasnormen erfüllen. Pkws müssen dafür auf einen Rollenprüfstand, in dem durch definierte Testzyklen eine praktische Fahrt imitiert wird und die Abgaswerte durch die Messtechnik aufgenommen werden [49]. Zum anderen werden verschiedene Abgasmesstechniken benötigt, um die Einflüsse von inner- und außermotorischen Maßnahmen und die Verwendung von alternativen Kraftstoffen auf die Schadstoffemissionen untersuchen zu können. Zur Messung der Abgasbestandteile gibt es zwar eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden, jedoch werden durch die Abgasgesetzgebungen der Industrienationen einheitliche Messverfahren zur Typprüfung vorgeschrieben, um die Schadstoffkonzentrationen in Hinblick auf die Grenzwerte zu beurteilen. Abseits der genormten Typprüfung, wie zum Beispiel im Entwicklungsbereich kommen jedoch viele unterschiedliche Messtechniken zum Einsatz [37]. Die Abgasanalytik spielt zusammengefasst also eine wichtige Rolle in den Bereichen der Typprüfung, der Motorentwicklung und der Umweltrelevanz [49].

Messgasaufbereitung

Um die Bestandteile des Abgases messen zu können ist oft eine Messgasaufbereitung nötig, da die Messung direkt im oder am Auspuff praktisch nicht umgesetzt werden kann. Dabei wird das Abgas entweder unverdünnt direkt in den Analysator geleitet oder mit der Umluft verdünnt und anschließend analysiert. Es ist im Allgemeinen zu beachten, dass das Abgas für die Messtechnik geeignet ist und auf dem Weg in den Analysator nicht durch chemische Prozesse oder andere Faktoren beeinflusst wird, um eine möglichst hohe Messgenauigkeit zu erreichen. Oftmals werden die gasförmigen Abgasbestandteile NO_x, HC, CO, CO₂ und O₂ analysiert, da sie gesundheitstechnisch und klimatisch relevant sind. Eine Abgasmessanlage

(AMA) beinhaltet mehrere Gasanalysatoren, die jeweils die Komponenten des Abgases messen können. Durch Leitungen, Ventile und Pumpen wird das Abgas in die Messanlage gefördert. Durch die Probenkonditionierung wird verhindert, dass sich die Probenzusammensetzung auf dem Weg in die AMA verändert. Gerade bei Dieselabgasen könnte es in den Leitungen zu Wasserkondensation und Ablagerungen von Kohlenwasserstoffverbindungen kommen. Außerdem werden Feststoffe vor der AMA herausgefiltert, damit diese nicht verschmutzt wird [49]. Im Bereich der Motorenentwicklung wird das Abgas meist vor der Abgasnachbehandlung entnommen. Damit kann das Rohgas analysiert werden, um so Rückschlüsse auf den Verbrennungsprozess zu ziehen. Außerdem wird das Abgas auch nach der Behandlung abgezweigt, um die Wirksamkeit und die Endzusammensetzung analysieren zu können. Im Bereich der Typprüfung, wird nur das Endgas untersucht, welches durch ein genormtes Verfahren zuvor verdünnt und in Beuteln gesammelt wird [34].

Wenn das Abgas unverdünnt in die AMA gelangt, müssen folgende Aspekte hinsichtlich der Messgasaufbereitung berücksichtigt werden [49]:

- Abgasprobe bildet das tatsächliche Abgas durch einen repräsentativen Mittelwert ab
- Druckbereich, AMAs arbeiten meist in einem Druckbereich von -200 bis +200 mbar
- Entfernung der Feststoffe, um Verschmutzung der AMA zu vermeiden
- Verhinderung der ungewollten Kondensation von Wasser oder Kohlenwasserstoffen
- Gewollte Kondensation, manche Analysatoren sind nur für eine trockene Messung geeignet [49].

Wird das Abgas hingegen mit einer vorhergehenden Verdünnung gemessen, wird meistens das Constant-Volume-Sampler-Verfahren (CVS) verwendet. Bei dem weltweit anerkannten Verfahren wird dem Abgas in einem Verdünnungstunnel Luft zugemischt. Anschließend wird das verdünnte Abgas in einem transparenten Kunststoffbeutel gesammelt und durch die Messtechnik ausgewertet. Das Verfahren hat den Vorteil, dass die Verdünnung relativ einfache Messungen zulässt und die Gesamtemissionen und deren Schadstoffbestandteile einfach berechnet, werden können. In der Abbildung 6 ist das CVS-Verfahren übersichtlich dargestellt.

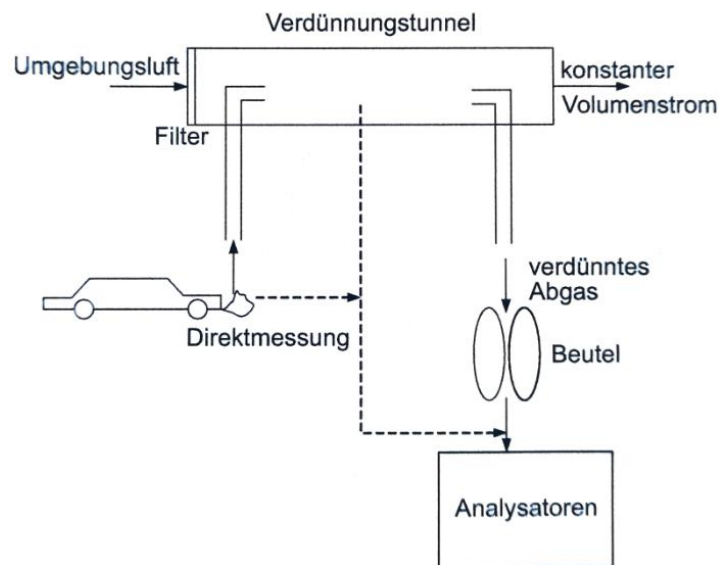


Abbildung 6: CVS-Verfahren zur verdünnten Abgasmessung [34]

Wie in Abbildung 6 zu sehen, gibt es drei verschiedene Möglichkeiten das Abgas mit dem CVS-Verfahren zu messen. Das verdünnte Abgas kann zum einen in Beuteln gesammelt und anschließend im Analysator untersucht werden. Zum anderen kann das Abgas direkt aus dem Verdünnungstunnel in den Analysator gelangen. Die Abgaskonzentration ist dabei proportional zur Massenemission des Motors. Außerdem kann das Rohgas direkt unverdünnt in den Analysatoren geleitet werden. Der kontinuierliche Abgasdurchfluss kann hier über eine Integralrechnung in die Massenemission umgerechnet werden [49]. Durch das Verfahren kommt es zu keiner Kondensation des Wasserdampfes und folglich zu keinem Verlust von im wasserlöslichen Gaskomponenten. Zusätzlich wird durch die Verdünnung eine ähnliche Abgasbildung wie unter realen Umweltbedingungen erreicht, da gerade die Partikelbildung im Abgas auch nach dem Auspuffaustritt noch nicht abgeschlossen ist [37]. Um möglichst genaue Messwerte zu bekommen, müssen einige Punkte beachtet werden [49]:

- In der Regel ist keine Beheizung zur Vermeidung von Wasserkondensation notwendig
- Bei Niedrigemissionen ist Beheizung notwendig, weil sonst die Verdünnung des Abgases zu groß wäre
- Analysatoren sollten keine zu große Querempfindlichkeit gegenüber Wasser haben
- Zur Vermeidung der Kondensation von HC muss die Leitung des verdünnten Abgases zum HC-Analysator beheizt werden (gerade bei Dieselmotoren) [49]

Ob die Abgasemissionen mit der unverdünnten oder verdünnten Messgasaufbereitung untersucht werden, hängt vom Einsatzgebiet und den zu untersuchenden Motoren beziehungsweise Fahrzeugen ab. Da die unverdünnte Aufbereitung meistens günstiger und einfacher umsetzbar ist, wird sie vor allem im Entwicklungsbereich angewandt. Bei der Typprüfung gibt es gesetzliche Vorschriften, in denen vor allem Fahrzeuge wie Pkw und Motorräder mit der verdünnten Messmethode untersucht werden müssen, um einheitliche und

vergleichbare Messwerte sicherzustellen. Bei anderen Einsatzgebieten von Verbrennungsmotoren können aber auch beide Methoden zulässig sein [49].

Bevor die Messungen erfolgen müssen die meisten Analysatoren mit Referenz- und Nullgasen kalibriert werden. Referenzgase besitzen eine definierte Konzentration des zu messenden Bestandteiles im Abgas. Nullgase definieren den Nullpunkt, bei dem keine Konzentration der Abgaskomponenten vorhanden ist. Als Nullgas wird vermehrt Stickstoff eingesetzt. Um eine möglichst genaue Messung zu erhalten muss beachtet werden, dass die Konzentration der Referenzgase in einem Toleranzbereich von plus minus fünf Prozent liegen muss. Bei der Messung von Partikeln werden Prüfaerosole zur Kalibrierung eingesetzt. Prüfaerosole werden hierbei entweder durch eine Gas- oder Flüssigkeitsflamme oder durch die Vernebelung von Flüssigkeiten erzeugt [34].

Messverfahren für gasförmige Bestandteile

In der Abgasmesstechnik wird zwischen der Messung gasförmiger Bestandteile und der Messung von Feststoffen wie beispielsweise Partikeln unterschieden. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der typischen Messverfahren für die gasförmigen Bestandteile.

Tabelle 2: Abgasmesstechnik für gasförmige Emissionen [34] [49]

Messprinzip	Abkürzung	Bestimmung von	Abkürzung
Nichtdispersiver Infrarotdetektor	NDIR	Kohlenstoffdioxid, Kohlenmonoxid, Distickstoffmonoxid	CO ₂ , CO, N ₂ O
Flammenionisationsdetektor	FID	Gesamtkohlenwasserstoff, Methan	THC, CH ₄
Chemilumineszenz Detektor	CLD	Stickstoffoxiden	NO _x , NO
Paramagnetischer Detektor	PMD	Sauerstoff	O ₂
Fourier-Transform Infrarotspektroskopie	FTIR	Kohlenstoffdioxid, Kohlenmonoxid, Distickstoffmonoxid, Stickstoffoxiden, Ammoniak, Gesamtkohlenwasserstoff, Methan, Ethanol, Formaldehyde, Acetaldehyde	CO ₂ , CO, N ₂ O, NO _x , NO, NH ₃ , THC, CH ₄ , C ₂ H ₅ OH, HCHO, CH ₃ CHO
Laser-Dioden-Spektroskopie	LDS	Ammoniak	NH ₃
QCL-Spektroskopie	QCL	Ammoniak, Stickstoffdioxid	NH ₃ , NO ₂

THz-Spektroskopie	THZ	Verschiedene Gase	
UV-Fluoreszenzdetektor	UVF	Schwefeldioxid	SO ₂
Magneto- mechanische oder pneumatische Sensoren	Gehören zum PMD	Sauerstoff	O ₂
Ringkammersensoren	Gehören zum PMD	Sauerstoff	O ₂
Hitzdrahtsensoren	Gehören zum PMD	Sauerstoff	O ₂
Gaschromatograph	GCG	Kein eigenständiges Messgerät, nur Verfahren zur Trennung	
Massenspektrometer	MSM	Analyse von verschiedenen Stoffen	

Die typischerweise verwendeten Analysatoren zur Messung gasförmiger Komponenten sind vor allem folgende: NDIR, FID, FTIR, CLD und PMD. Üblicherweise werden die verschiedenen Messtechniken in Schränken zusammen organisiert. Für den Betrieb der Analysatoren sind neben einer Spannungsversorgung, auch die Bereitstellung von Kalibrier- Null- und Betriebsgase erforderlich. Des Weiteren werden zum Transport des Abgases Leitungen inklusive Pumpen und einem Ventilsystem benötigt. Je nach Anwendungsfall müssen diese auch beheizt werden, um Kondensation zu vermeiden (nicht NDIR). Außerdem muss sichergestellt werden, dass grobe Feststoffe vorher aus dem Abgas entfernt werden, um die Messtechnik nicht zu beschädigen. Über eine Schnittstelle wird dann ein Monitor angeschlossen, über den die Bedienung erfolgt und anschließend die Daten ausgelesen werden [34]. Der Aufbau eines typischen Messschrankes könnte dann wie in Abbildung 7 dargestellt aussehen. Zu erkennen sind hier die verschiedenen Analysatoren für die Messung unterschiedlicher Komponenten. Zudem gibt es Pneumatik Leitungen, um das Abgas durch die Analysatoren bis hin zum Abzug zu leiten und um Kalibriergase in das System einzuspeisen.

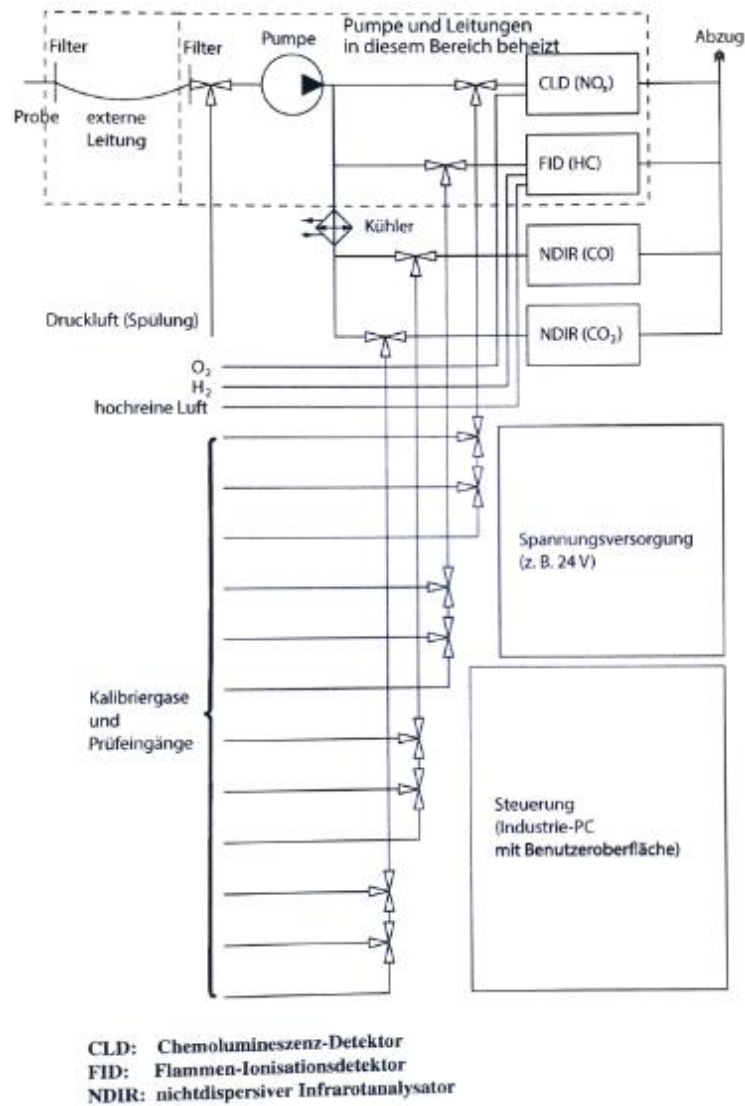


Abbildung 7: Aufbau eines typischen Messschrankes [34]

Im Folgenden werden die am meisten verwendeten Messtechniken kurz beschrieben und deren Funktionsweise erläutert.

Nicht dispersive Infrarotdetektoren (NDIR) werden hauptsächlich für die Messung der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid oder Kohlenstoffdioxid verwendet. Das physikalische Prinzip beruht dabei auf der Durchstrahlung des Abgases durch Infrarotstrahlung mit einem definierten Wellenlängenbereich und der daraus resultierenden Abschwächung der Strahlung aufgrund der CO und CO₂ Moleküle [49]. Der Aufbau eines typischen NDIR ist in Abbildung 8 zu sehen.

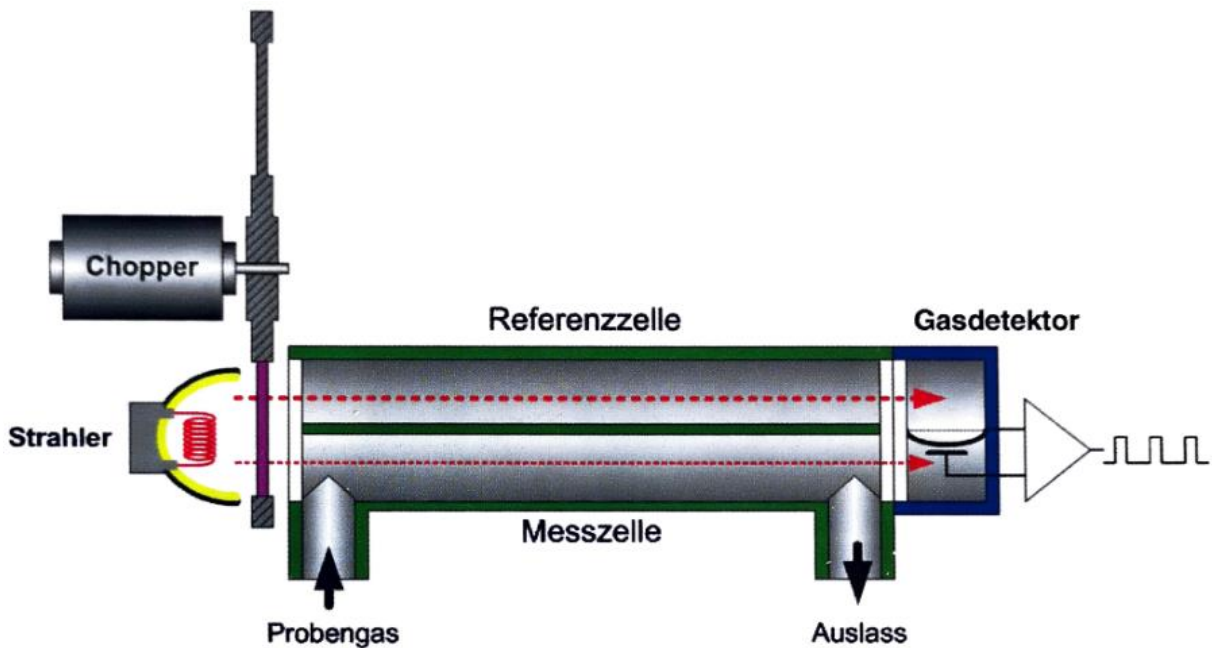


Abbildung 8: Aufbau NDIR [49]

Die Infrarotstrahlung strahlt durch ein Rohr, welches in der Messzelle von dem unbekanntem Abgas durchströmt wird. Am Ende der Röhre wird die Intensität der Strahlung durch einen Gasdetektor gemessen. In der Referenzzelle ist ein Referenzgas (meist Stickstoff) vorhanden, welches die Strahlung nicht absorbieren kann. Durch einen Chopper wird die Strahlung vor Eintritt in die Röhre mit einer rotierenden löchrigen Scheibe alternierend unterbrochen. Dies sorgt für eine wechselnde Expansion und Kontraktion der Membran des Drucksensors, welches eine Wechselspannung verursacht. Diese lässt sich leichter verstärken, wodurch präziser gemessen werden kann. Wenn nun der Unterschied der Intensität der Strahlung zwischen der Referenz- und Messzelle aufgrund einer erhöhten Konzentration an CO und CO₂ steigt, erhöht sich auch der Druckunterschied in beiden Kammern, der durch die Membran gemessen wird. Zwischen dem Messsignal und der Konzentration herrscht ein nicht linearer Zusammenhang, der durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben wird. Deshalb müssen NDIR linearisiert werden. Kalibriert wird der NDIR mit dem zu messenden Gas, welches unterschiedlich stark verdünnt wird [34] [49].

Die Messung von Kohlenwasserstoffatomen und Methan erfolgt über den **Flammenionisationsdetektor (FID)**. Hier wird die Abgasprobe in einer Wasserstoffflamme mit zugeführter Luft verbrannt. Direkt über der Flamme befindet sich eine rohrförmige Elektrode, an der eine Spannung angelegt ist. Durch die Verbrennung des kohlenwasserstoffhaltigen Gases wird ein Teil der Kohlenwasserstoffe ionisiert. Die entstandenen Ionen erzeugen einen messbaren Strom an der Elektrode. Der Aufbau des FIDs ist in der anschließenden Abbildung 9 veranschaulicht.

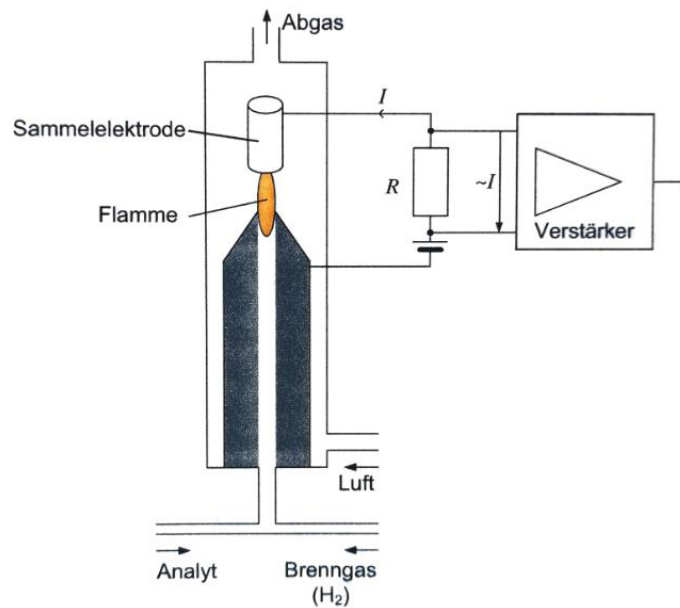


Abbildung 9: Aufbau FID [34]

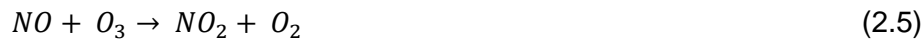
In der Flamme entstehen freie Wasserstoffatome, die sich mit den Wasserstoffatomen aus den Kohlenwasserstoffverbindungen zu Wasserstoff-Molekülen verbinden. Aus der Reaktion bleiben die übrigen Kohlenwasserstoffe aus den Kohlenwasserstoffverbindungen zurück. Folglich werden nach und nach die Kohlenwasserstoffketten in Kohlenwasserstoffe getrennt. Die Kohlenwasserstoffe bilden dann zusammen mit Sauerstoff jeweils ein Ionen-/Elektronenpaar. Der gesamte chemische Prozess kann durch folgende Gleichung beschrieben werden [34]:



Wenn die Reaktion vollständig ablaufen würde, dann wäre der erzeugte Strom proportional zur Anzahl der Kohlenstoffatome. Dieses ist der Fall, wenn die Kohlenwasserstoffverbindungen kurz und unverzweigt sind. Bei langen und komplexen Verbindungen wie bei Acetylen oder Kohlenwasserstoffen mit Fremdatomen wie Sauerstoff, gibt es größere Messunsicherheiten. Um präzise Messungen zu erhalten, wird der FID mit Propan kalibriert. Dieses bildet den mittleren Kohlenstoffgehalt der Kohlenwasserstoffe gut nach. Besitzt das Abgas nur eine sehr geringe HC-Konzentration, kann es zu Ungenauigkeiten durch Verunreinigungen kommen, wodurch der FID keine Linearität mehr aufweist. Dann muss zuvor mit mehreren unterschiedlichen Propan-Konzentrationen kalibriert werden. Durch einen beheizten Katalysator können Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) durch Oxidation beseitigt werden. Da Methan schlecht oxidiert, kann der FID somit auch die Methan-Konzentration bestimmen. Ist der Katalysator ausgeschaltet, misst der FID die Summe aller Kohlenwasserstoffe, also die Gesamtkohlenwasserstoff-Konzentration [34] [36].

Chemolumineszenz Detektoren (CLD) werden zur Messung von Stickstoffoxiden eingesetzt. Das physikalische Wirkprinzip hierbei ist, dass bei einigen chemischen Reaktionen

elektromagnetische Strahlung, also Licht emittiert wird. Dieser Vorgang wird als Chemolumineszenz bezeichnet. Um Stickoxide messen zu können, wird die Oxidation von Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoffdioxid (NO₂) genutzt, bei dem Licht emittiert wird. Damit die Reaktion abläuft, wird reaktionsfreudiges Ozon (O₃) hinzugefügt, welches im Analysator durch einen Ozongenerator mit O₂ erzeugt wird. Bei 90 Prozent der in der Abgasprobe vorhandenen NO-Moleküle, läuft die Reaktion nach folgender Gleichung ab [34] [49].



Die anderen 10 Prozent, reagieren zu energetisch angeregten NO₂*-Molekülen, welche Licht im infraroten Bereich emittieren, um in ihren Ursprungszustand zurückzukehren. Die Reaktionsgleichung sieht wie folgt aus [49].



Mit h = Planck-Konstante und $h\nu$ = Lichtquantum

Der Aufbau eines typischen CLD ist in der folgenden Abbildung 10 veranschaulicht.

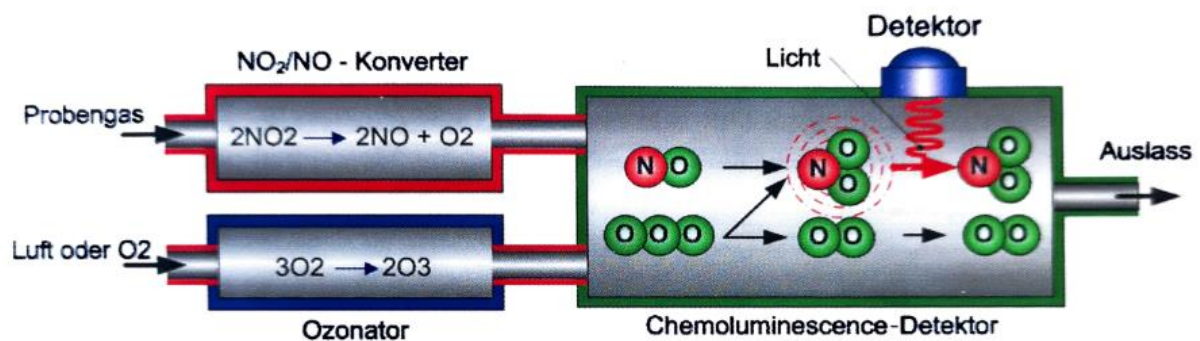


Abbildung 10: Aufbau eines CLD [49]

In der Messzelle vom CLD wird NO mit O₃ zusammengemischt, welches zu NO₂ und O₂ reagiert. Das dabei emittierte Licht wird mit Fotodioden oder Fotomultipliern gemessen. Die Lichtintensität ist dabei direkt proportional zur vorhandenen NO-Konzentration der Abgasprobe. Das emittierte Licht kann jedoch auch an andere Moleküle wie CO₂ abgegeben werden. Die Intensität des gemessenen Lichts wäre somit bei einer hohen CO₂-Konzentration geringer, wodurch ein niedriger NO-Gehalt gemessen werden würde. Um dieses Problem zu umgehen, muss der CO₂-Gehalt bei der Kalibrierung berücksichtigt werden. Außerdem ist vor der Messzelle ein NO₂/NO-Konverter notwendig, da der CLD nur die NO-Moleküle misst. Dieser beheizte Konverter wandelt die in der Abgasprobe vorhandenen NO₂-Moleküle in NO-Moleküle um. Zusätzlich werden die Abgasleitungen und der Analysator beheizt, um die Kondensation von Wasser zu vermeiden, da NO₂ bedingt Wasser löslich ist. Aufgrund des

Zusammenhanges $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ kann somit die gesamte Konzentration von Stickstoffoxid gemessen werden [49] [37].

Die Messung von Sauerstoff wird überwiegend mit verschiedenen **Paramagnetischen Detektoren (PMD)** durchgeführt. Das Messprinzip beruht dabei auf die magnetische Eigenschaft des Sauerstoffes. Somit bewegt sich Sauerstoff in ein Magnetfeld hinein, im Gegensatz zu anderen Gasen, die nicht magnetisch sind. Um dieses Verhalten zu messen, gibt es verschiedene Möglichkeiten [34]:

- Magnetomechanische Sensoren
- Magnetopneumatische Sensoren
- Ringkammersensoren (heutzutage keine Relevanz mehr)
- Hitzedrahtsensoren (heutzutage keine Relevanz mehr) [34]

Magnetomechanische Sensoren auch Sauerstoffwaagen genannt besitzen eine Art Hantel, die drehbar gelagert ist und deren „Gewichte“ meist aus Quarz bestehen. Durch die zwei erzeugten Magnetfelder des PMD strömen O_2 -Moleküle zu den Gewichten und verdrängen diese. Die Verdrängung der Kugeln ist dann proportional zu der O_2 -Konzentration. Die Auslenkung der Hantel wird heutzutage elektronisch gemessen [34].

Magnetopneumatische Sensoren besitzen zwei Elektromagnete welche abwechselnd ein und ausgeschaltet werden. Die O_2 -Moleküle strömen dann zu dem Magnetfeld des eingeschalteten Magneten. Beide Magnete sind durch eine Stickstoffdüse verbunden. Eine Membran verformt sich nun je nach Druckunterschied zwischen den Magneten, aufgrund der Ansammlung der O_2 -Moleküle. Durch die Verformung der Membran kann nun die O_2 -Konzentration gemessen werden [34].

Die magnetomechanischen und magnetopneumatischen Sensoren besitzen beide eine bedeutende Rolle in der Industrie und werden von Firmen wie Dräger, ABB und Siemens genutzt. Die Ringkammer- und Hitzedrahtsensoren besitzen dagegen heutzutage keine große Relevanz, weshalb diese nicht näher beschrieben werden [34].

Das physikalische Prinzip der **Fourier-Transform Infrarotspektroskopie (FTIR)** beruht auf der gleichen Grundlage wie die des NIDR. Im FTIR können verschiedene Abgaskomponenten gleichzeitig gemessen werden, da die einzelnen Komponenten des Abgases das infrarote Licht unterschiedlich absorbieren. Der Aufbau der Messzelle eines FTIR besteht aus einem Michelson-Interferometer (siehe Abbildung 11), welches einen Infrarotstrahler, einen festen und einen beweglichen Spiegel, einen Strahlteiler und einen Detektor beinhaltet [34].

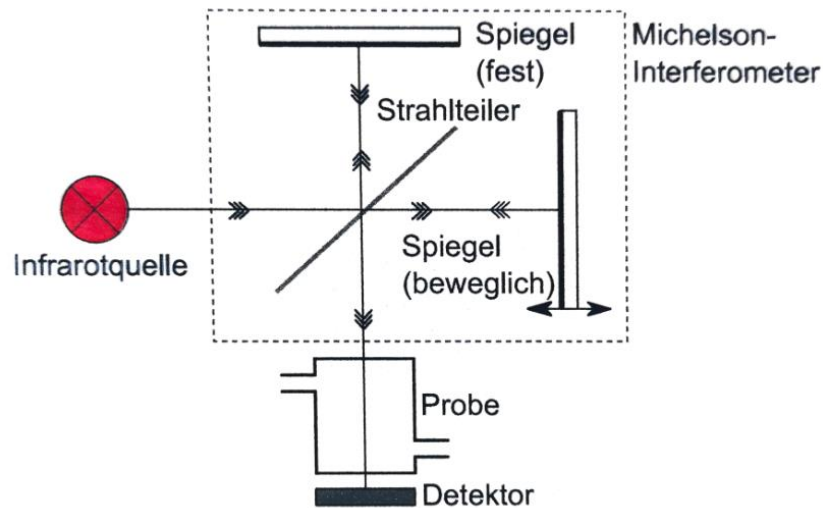


Abbildung 11: Physikalisches Prinzip eines FTIR-Spektrometers [34]

Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, wird die Strahlung der Infrarotquelle durch den Strahlteiler aufgeteilt und in zwei Einzelstrahlen jeweils zu den beiden Spiegeln geleitet. Beide Strahlen werden reflektiert und im Strahlteiler zusammengeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Wellenlängen der Strahlen kommt es zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen, welche abhängig von der Position des variablen Spiegels sind. Der interferierte Strahl wird nun durch die Abgasprobe geleitet und anschließend durch die Fourier-Transformation in ein Spektrum umgewandelt. Die Konzentration des Abgaskomponenten wird aus den Infrarotspektren sichtbar [14]

Messverfahren für Feststoffe

Neben den gasförmigen Bestandteilen des Abgases müssen auch die Feststoffe wie Partikel und Ruß analysiert werden. Die Feststoffe werden dabei vor allem hinsichtlich ihrer Masse, Anzahl, mittlerer Größe und deren Größenverteilung untersucht. Diese Faktoren können sich nämlich auf die Schädlichkeit der Partikel für die menschliche Gesundheit auswirken. Im Bereich der Typprüfung werden vorgeschriebener Weise gravimetrische Messtechniken mit dem CVS-Verfahren eingesetzt, wodurch die Partikelmasse bestimmt wird. Dabei wird während des Betriebes des Motors ein Teil des verdünnten Abgases durch einen Partikelfilter geleitet. Die Feststoffe werden im Filter gesammelt und anschließend die Masse der Partikel ermittelt [37]. Die Überwachung der Partikelzählung im Endrohr trat erst am 1. Januar 2021 gesetzlich in Kraft, weshalb es neue Anforderungen an die Messtechnik gegeben hat. Dies verdeutlicht nochmal die stetig notwendige Weiterentwicklung von Abgasmesstechniken in Bezug auf Verbrennungsmotoren aufgrund gesetzlicher Verordnungen [10] [28].

Neben den zuvor beschriebenen Messverfahren für gasförmige Bestandteile gibt es eine Reihe an Messverfahren für Feststoffe. Diese sind in der folgenden Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Abgasmesstechnik für feste Bestandteile [49] [34]

Messprinzip	Abkürzung	Bestimmung von
Gravimetrische Messung	-	Partikelmasse
Wägung	-	Partikelmasse
Photoakustisches Verfahren	PASS	Partikelmasse
Kondensationskernzähler	CPC	Anzahl von Partikeln
Opazimeter	-	Opazität, Trübung
Filterbandverfahren	-	Rußgehalt
Smokemeter	-	Filterschwärzung
Differentieller Mobilitätsanalysator	DMA	Größenverteilung der Partikel
Elektrostatisches Verfahren	DC	Anzahl von Partikeln und mittlere Partikelgröße

Bei der genaueren Beschreibung der physikalischen Wirkprinzipien wird sich auf eine Auswahl der Messtechniken fokussiert, die am meisten verbreitet sind.

Das Opazimeter ist ein Trübungsmessgerät für Gase und Flüssigkeiten, welches oft zur Messung der Abgastrübung bei Dieselmotoren angewandt wird. Das physikalische Prinzip beruht darauf, dass Licht bei der Durchstrahlung von einem gasförmigen Medium teils von Partikeln absorbiert wird. Die Messung liefert folglich einen Wert zur Beurteilung der Trübung, welche spezifische Absorption genannt wird. Diese ergibt sich aus der Multiplikation des Partikelquerschnittes und der Anzahl der Partikel. Ein Opazimeter besteht aus einer Lichtquelle, einem Tunnel, in dem die Abgasprobe durchströmt sowie einem Detektor (siehe Abbildung 12) [49].

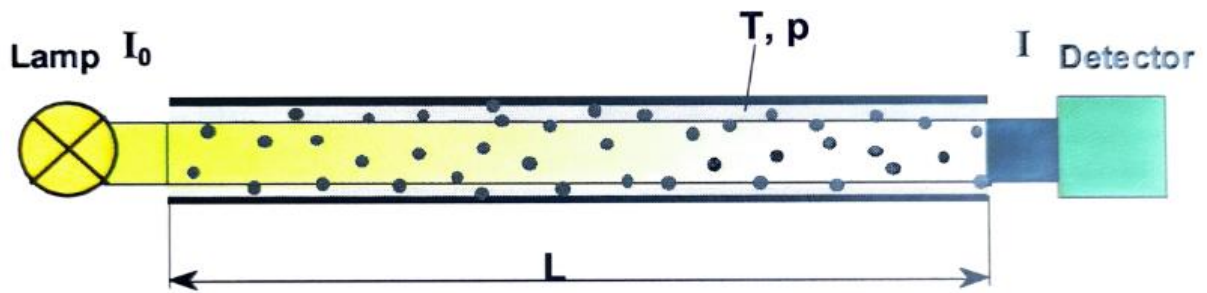


Abbildung 12: Aufbau eines Opazimeters [49]

Bei der Durchstrahlung der Probe verhält sich die Intensität des Lichts nach dem Lambertschen-Gesetz [34].

$$\frac{I_{\text{Ausgang}}}{I_{\text{Eingang}}} = e^{-Anl} \quad (2.8)$$

Dabei bestimmt der Parameter A den Querschnitt der Partikel, n die Anzahl der Partikel und l die Länge des Tunnels. I gibt die Lichtintensität am Ein- und Ausgang an. Aufgrund des einfachen Aufbaus und der daraus resultierenden geringen Kosten, werden Opazimeter bis heute zur Abgasbeurteilung verwendet. In der Typprüfung kommt diese Verfahren jedoch weniger zum Einsatz, da es zu Querempfindlichkeiten mit anderen Abgasbestandteilen kommen kann und weder die Masse noch die Anzahl der Partikel bestimmt werden. Im Entwicklungsbereich hat diese Messtechnik aber weiterhin eine große Bedeutung [34].

Ein **Smokemeter** beruht auf der Filterpapiermethode. Das Abgas wird für eine bestimmte Zeit durch ein Filterpapier geleitet, welches die Partikel und den Ruß abfängt. Die folgende Schwärzung des Papiers wird dann über ein optisches Verfahren gemessen, wodurch anschließend die Filter Smoke Number (FSN) ermittelt wird. Durch die hohe Genauigkeit und die geringen Kosten dieser Messtechnik wird das Smokemeter für die Emissionsüberwachung vor allem im Entwicklungsbereich wie beispielsweise dem Prototypenbau eingesetzt [6].

Um die Partikelmasse zu bestimmen, werden typischerweise das **Wägungs-Verfahren** oder das **photoakustische Verfahren (PASS)** eingesetzt [34].

Bei der Wägung werden die Partikel in einem Filter über einer bestimmten Zeit gesammelt. Hierbei wird dieser in einem verdünnten Abgasteilstrom eingespannt, der anschließend herausgenommen und gewogen werden kann. Das Gewicht des Filters im Nullzustand muss vorher bekannt sein, um durch Subtraktion die Partikelmasse ausrechnen zu können. Das Verfahren ist durch die hohen Anforderungen an die Waage und die präzise händische Durchführung recht aufwendig [34].

Das PASS-Verfahren beruht auf dem photoakustischen Effekt. Ein Laser bestrahlt periodisch die Abgasprobe, wobei die Rußpartikel die Strahlung absorbieren. Dadurch werden die Partikel erwärmt. Aufgrund der periodischen Strahlung schwankt die Temperatur der Partikel,

wodurch eine Schwingung generiert wird. Diese Schwingung wird durch ein Mikrofon aufgenommen. Das entstandene Signal ist proportional zur Rußkonzentration. Bei der Messung muss beachtet werden, dass die Abgasprobe in einem bestimmten Druck- und Temperaturbereich liegt [34].

Wie schon zuvor erwähnt hat Partikelanzahl in den letzten Jahren an großer Bedeutung gewonnen. Um die Anzahl zu bestimmen, wird typischerweise ein **Kondensationspartikelzähler (CPC)** eingesetzt. Da die Partikel zu klein sind, um direkt gemessen zu werden, müssen diese zuvor aufbereitet werden. Dafür wird vermehrt n-Butanol als dampferzeugendes Medium verwendet. Durch die Kondensation des übersättigten Dampfes auf den Partikeln entstehen Partikeltröpfchen, welche in einer Größenordnung liegen, die analysiert werden können. Somit können die Partikel anschließend durch eine Streulichtmethode gemessen werden. Wichtig ist außerdem, dass das Abgas vorher verdünnt wird, da die Partikel nur bis zu einer gewissen Konzentration gezählt werden können [34] [49].

Aufgrund der neuen Gesetzgebung in Europa seit 2016 als Folge des Abgasskandals, muss zudem das Abgas im realen Betrieb auf der Straße analysiert werden. Dieses Testverfahren wird *Real Driving Emissions Test (RDE)* genannt. Dabei hilft die sogenannte **portable Abgasmessung (PEMS)**. Dieses Messsystem kann am Pkw auf der Anhängerkupplung oder im Kofferraum montiert werden und misst anschließend im realen Betrieb die Abgasemissionen. Das Abgas wird dabei durch ein Messgerät für die Abgasmenge (EFM, Exhaust Gas Flow) geleitet. Anschließend werden die Schadstoffkonzentration von CO, NO_x, HC, die Partikelanzahl und CO₂ durch unterschiedliche Messverfahren direkt analysiert [34] [38].

2.6. Bewertung der Anforderungen an die Abgasanalytik im Kontext alternativer Kraftstoffe

An die Abgasanalytik werden zunehmend immer höhere und komplexere Anforderungen gestellt. Dies liegt zum einen an den strengeren gesetzlichen Abgasregulierungen und zum anderen an der daraus resultierenden verstärkten Verwendung von alternativen Kraftstoffen. Die geringeren Abgaslimits und die neuen gesetzlichen Vorschriften zu Analyse der Abgaszusammensetzung, wie zum Beispiel der Partikelanzahl oder der portablen Abgasmessung, stellt die Abgasanalytik zusätzlich vor zunehmenden Herausforderungen. Ein weiterer Faktor sind die komplexen Abgasnachbehandlungssysteme. Diese sorgen für extrem geringe Konzentrationen von gewissen Abgasbestandteilen nach der Behandlung und für sehr hohe Drücke und Temperaturen an der Abgasentnahmestelle. Zusätzlich sollen immer mehr Bestandteile des Abgases gemessen werden, welche in der Vergangenheit keine große Rolle gespielt haben. Nennenswert sind vor allem die verschiedenen Stickstoffverbindungen, wie NO, NO₂, NH₃ und N₂O. Resultierend aus den komplexer werdenden Messverfahren und deren Techniken, erhöht sich auch der Anspruch an den Anwender diese fachgerecht zu bedienen [3]. Im Folgenden werden allgemeine Anforderungen an die moderne Abgasanalytik von Verbrennungsmotoren aufgelistet [3] [22]:

- Hohe Messgenauigkeit (geringe Linearisierungsabweichung), hohe Auflösung (Smokemeter, Opazimeter)
- Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- Breiter Messbereich
- Geringe Nachweisgrenze
- Geringe Querempfindlichkeit
- Erfüllung von Normen und Gesetzgebungen
- Messung unterschiedlichster Abgaskomponenten
- Sicherer Betrieb
- Einsatz bei hohem Druck und Temperaturen
- Schnelle Ansprechzeiten
- Kurzer effektiver Abgastransport zum Analysator
- Messung bei unterschiedlichen Abgasaufbereitungen (unverdünnt, verdünnt, teilverdünnt)
- Anpassung an Einsatzort (wie bei PEMS), flexible Mobilität
- Anwendungsspektrum (Otto-, Diesel-, alternative Kraftstoffe)
- Bedienerfreundlichkeit
- Messaufwand
- Zukunftssicherheit durch Softwareupdates oder Nachrüstbarkeit

- Anschaffungskosten und Produktlebenskosten
- Zuverlässigkeit und Robustheit [3] [22]

Wie zu erkennen ist, werden eine Vielzahl von komplexen Anforderungen an die moderne Abgasanalytik gestellt, welche in Zukunft weiter zunehmen werden. Wenn die reine Messung der Abgaskomponenten im Vordergrund steht, muss vor allem auf die Messgenauigkeit, die Nachweisgrenze, den Messbereich und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse geachtet werden. Gerade im Entwicklungsbereich bei der Untersuchung von alternativen Kraftstoffen, die sehr abweichende Abgaskonzentrationen im Vergleich zum konventionellen Dieseldieselkraftstoff haben, sind diese Aspekte sehr wichtig. Aus der vorherigen Untersuchung der Einflüsse von alternativen Kraftstoffen auf die Schadstoffemissionen (Kapitel 2.4) wird ersichtlich, dass bei einigen Kraftstoffen wie beispielsweise OME oder DME die Partikel im Verbrennungsprozess nahezu oder teilweise unter der Nachweisgrenze entstehen. Daraus resultiert die Wichtigkeit der Anforderung an die Analytik, dass die Nachweisgrenze der Messtechnik so gering wie möglich ist, bei zugleich höchster Genauigkeit, um repräsentative Messergebnisse erhalten zu können. Außerdem muss der Messbereich der Analytik auf die zu erwartende Abgaskonzentration angepasst sein. Die Reproduzierbarkeit der Messungen ist weiterhin bedeutsam, da nur so im Entwicklungsbereich unterschiedliche Ergebnisse von inner- und außermotorischen Maßnahmen sowie die Verwendung unterschiedlicher Kraftstoffe verglichen werden können, um diese zu optimieren. Um eine allgemeine Aussage über die Emissionen von einem Kraftstoff treffen zu können, müssen die Abgase nämlich öfter und unter verschiedenen Bedingungen gemessen werden, damit die Toleranzen der Messergebnisse durch arithmetische Mittelwerte ausgeglichen werden. Gerade wenn es darum geht, bestimmte Maßnahmen zu optimieren, kommt auf sehr kleine Unterschiede hinsichtlich der Konzentration der Abgaskomponenten an. Kann die Abgasanalytik dem nicht nachgehen, können auch keine emissionsvermindernden Verfahren entwickelt werden. Durch die geringer werdenden Abgaslimits werden diese Aspekte auch in der Typprüfung immer bedeutsamer, um zuverlässig Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor unter den gesetzlichen Auflagen zulassen zu können. Zusammengefasst müssen diese Anforderungen eine hohe Priorität haben, um repräsentative und zuverlässige Messergebnisse erhalten zu können. Des Weiteren müssen gerade bei neuen Abgaszusammensetzungen durch alternative Kraftstoffe, die Querempfindlichkeit von einigen Messtechniken gegenüber bestimmten Gasen oder Stoffen berücksichtigt werden, damit die Analytoren richtig arbeiten können. In der Typprüfung müssen alle verwendeten Messtechniken und Messaufbereitungsverfahren zudem gewissen Normen und Gesetzgebungen entsprechen. Dadurch werden die Reproduktion und Vergleichbarkeit der Messwertauch auf internationaler Ebene sichergestellt. Die Erfüllung der gesetzlichen Normen hat somit in der Typprüfung höchste Priorität. Im Entwicklungsbereich macht es auch Sinn mit aktuell

genormter Messtechnik und deren Verfahren zu arbeiten, es ist aber nicht zwingend notwendig. Gerade in den letzten Jahren nimmt die Dynamik in der Gesetzgebung hinsichtlich der Emissionen immer weiter zu, wodurch von der Abgasanalytik ein hohes Maß an Flexibilität und eine schnelle Anpassungsfähigkeit verlangt wird. Die Abgasmessungen von alternativen Kraftstoffen wirken sich außerdem auf die seit Jahren verwendeten Messgasaufbereitungsverfahren aus. Das zum Beispiel weltweit eingesetzte CVS-Verfahren verdünnt das Abgas, welches anschließend in den Analysatoren untersucht wird. Sind die Konzentrationen von gewissen Abgaskomponenten durch alternative Kraftstoffe zukünftig jedoch sehr gering, sorgt eine zusätzliche Verdünnung nur zu noch geringeren Konzentrationen im Analysator. Folglich müssten die Analysatoren viel empfindlicher werden, um mit sehr geringen Nachweisgrenzen die Abgaskonzentration noch messen zu können. Alternativ müsste in der Messgasaufbereitung umgedacht und neue Verfahren entwickelt werden, um das Problem von zu geringen Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze zu umgehen [17]. In der heutigen Zeit werden zudem moderne Abgasnachbehandlungssysteme nach dem Verbrennungsprozess im Motor eingesetzt. Dadurch treten im Abgassystem und an den Probeentnahmestellen teils hohe Drücke und Temperaturen auf. Darauf muss die moderne Abgasanalytik ausgelegt sein, damit ein sicherer Betrieb gewährleistet wird. Da es auch Kombinationen von Abgasnachbehandlungssysteme gibt, werden zunehmend mehr Entnahmestellen zur Abgasanalyse interessant. Daraus resultiert der Bedarf an flexiblen Messtechniken, die bei unterschiedlich vorherrschenden Bedingungen an der Entnahmestelle funktionieren und angepasst werden können. Um Messunsicherheiten durch den Transport des Abgases in den Analysator zu vermeiden, ist es von Vorteil kurze Leitungen zu verwenden, wenn der Prüfstand dies zulässt. Außerdem wird dadurch eine schnelle Ansprechzeit der Messtechnik ermöglicht. Gerade bei der Verwendung von alternativen Kraftstoffen und den daraus resultierenden geringen Emissionen kann die Art und Weise des Abgastransportes die Arbeitsweise der Messtechnik beeinflussen. Eine weitere Anforderung an die Abgasanalytik ist die flexible Einsatzweise. Durch unterschiedliche Kraftstoffe, Abgasaufbereitungsverfahren und Einsatzorte müssen Messtechnikanbieter, wie beispielsweise AVL, ein breites Spektrum an Messtechnik bieten, die den jeweiligen Anforderungen gerecht wird. Seit der Einführung der Real Driving Emissions (RDE) Testfahrten, ist zum Beispiel eine Anlage zur Abgasmessung mit einer hohen Mobilität gefragt, die am Heck des Autos oder im Kofferraum funktionieren kann. Zur Messung von HC wird bei stationären Anlagen Wasserstoff für den FID benötigt, wodurch in diesem neuen Anwendungsfall Gasflaschen im Auto gelagert werden müssten. Da sich dies schlecht umsetzen lässt, kommen hier vermehrt andere Analysatoren zum Einsatz, die keinen Wasserstoff benötigen [17]. Es ist zu erkennen, wie wichtig die ständige Anpassung und Entwicklung der Abgasanalytik ist, um politischen Forderungen wie dem umweltbewussten Betreiben von Verbrennungsmotoren nach gehen zu können. Trotz der steigenden Komplexität der Messanlagen aufgrund der wachsenden Anforderungen sollte der

Messaufwand, wenn möglich klein gehalten werden. Durch Messanlagen bestehend aus vielseitiger werdenden Geräten zur Abgasanalyse, erhöhen sich zudem die Anforderungen an den Bediener und die Automatiksysteme der Anlage. Durch weiterentwickelte stabile Automatiksysteme kann die Nutzung der Anlage in vielerlei Hinsicht sicherer und einfacher werden, weshalb diese Anforderung eine wichtige Rolle in der modernen Abgasanalytik spielt. Zudem sollten gerade im Entwicklungsbereich eine unkomplizierte Wartung und Instandhaltung der Messtechnik gegeben sein. Eine weitere sehr wichtige Anforderung aus wirtschaftlicher Sicht ist die Nachrüstbarkeit beziehungsweise die Möglichkeit Systeme über Softwareaktualisierungen an zukünftige Herausforderungen anzupassen, ohne direkt eine komplett neue Messanlage anschaffen zu müssen. Dieser Aspekt liegt vor allem der zunehmenden Digitalisierung zu Grunde. Um die sowieso meist sehr hohen Ausgaben im Entwicklungsbereich nicht zusätzlich zu belasten, gilt es weiterhin die Anschaffung und vor allem die Produktlebenskosten möglichst gering zu halten, um die Messanlagen effizient zu betreiben. Zudem ist die Zuverlässigkeit und Robustheit der Abgasanalytik vor allem in der Typprüfung, aber natürlich auch im Entwicklungsbereich beim Einsatz von Dauerlaufstest ein sehr wichtiger Faktor [3]. Die Wichtigkeit der einzelnen Anforderungen hängt dabei aber stark vom Einsatzgebiet und dem Ziel der Messkampagne ab. Um verschiedene Messtechniken miteinander vergleichen zu können, müssen die Anforderungen hinsichtlich ihrer Wichtigkeit mit Kriterien bewertet werden, damit ihre Verwendbarkeit für den speziellen Anwendungsbereich beurteilt werden kann [34] [3] [17].

Im Kontext der alternativen Kraftstoffe liegt der Fokus somit auf den folgenden Anforderungen an die Messtechnik:

- Messgenauigkeit trotz sehr geringen Konzentrationen
- Extrem geringe Nachweisgrenze
- Messung unterschiedlichster Abgaskomponenten im Vergleich zum konventionellen Dieselmotorkraftstoff
- Hohes Anwendungsspektrum hinsichtlich unterschiedlichster Kraftstoffe
- Zuverlässigkeit und Robustheit gegenüber den neuen Eigenschaften

Zusammengefasst sorgen alternative Kraftstoffe für hohe Anforderungen aufgrund der veränderten Abgaszusammensetzung und deren geringen Konzentrationen im Vergleich zum konventionellen Dieselmotorkraftstoff. Da die Verwendung und Entwicklung von alternativen Kraftstoffen erst in den letzten Jahren so stark zugenommen hat, muss sich die Abgasanalytik an die neuen Anforderungen heutzutage und zukünftig sehr schnell anpassen und weiterentwickeln, um diesen gerecht zu werden. Die Messgenauigkeit bei geringsten Konzentrationen und einer sehr niedrigen Nachweisgrenze von Abgasbestandteilen haben dabei höchste Priorität, um repräsentative und reproduzierbare Messergebnisse im

Forschungsbereich, aber auch in offiziellen Zulassungsverfahren in der Typprüfung erhalten zu können. Zudem ist es sehr wichtig, dass die Messtechnik nicht nur die typischen Abgasbestandteile, die früher interessant waren messen, sondern auch neue in den Fokus gerückte Aspekte des Abgases untersuchen kann. Neben den heutzutage zusätzlich interessanten Komponenten wie NO, NO₂, NH₃, N₂H, HNCO und Aldehyden sind auch Untersuchungen hinsichtlich der Partikelanzahl, deren Größe und Verteilung aus Umweltsicht wichtig geworden. Nur wenn die moderne Abgasanalytik den wachsenden Anforderungen nachgehen kann, können auch inner- und außermotorische Maßnahmen sowie die Verwendung von alternativen Kraftstoffen untersucht und hinsichtlich ihrer Schadstoff- und CO₂-Emissionen optimiert werden.

3. Dieselmotor-Prüfstand an der HAW

Das folgende Kapitel dient zur Vorstellung des Prüfstandes und der Abgasanalytik. Ziel ist es, die wichtigsten Aspekte des Motorprüfstandes und der Abgasanalytik zu erläutern, um somit die Inbetriebnahme der Abgasanalytik und die Planung der Messkampagne vorzubereiten.

3.1. Vorstellung des Prüfstandes

An der HAW Hamburg ist ein Dieselmotor-Prüfstand in der ZET-Halle vorhanden. Als Versuchsmotor kommt ein 2-Liter Dieselmotor der Volkswagen AG mit vier Zylindern zum Einsatz. Der Aufbau des Versuchsmotors ist in der Abbildung 13 dargestellt. Die technischen Daten sind in der Tabelle 4 zu sehen. Der Industriemotor besitzt ein Common-Rail-Einspritzsystem, eine Turboaufladung, eine gekühlte Abgasrückführung und einen Dieselpartikelfilter. Er erfüllt zudem die Abgasnorm EU 5. Weitere technische Daten des Versuchsmotors können der Tabelle 4 entnommen werden. Der Generator und die Hydraulikpumpe des Motors sind demontiert. Aufgrund der Verdichtung der angesaugten Luft durch den Turbolader und der daraus resultierenden Erwärmung ist zusätzlich ein Ladeluftkühler verbaut, der durch externes Kühlwasser die verdichtete Luft wieder abkühlt. Vor dem Luftverteilerrohr, welches die Luft auf die Zylinder aufteilt, ist zudem eine Drosselklappe vorhanden, welche eher untypisch für einen Dieselmotor ist [35].

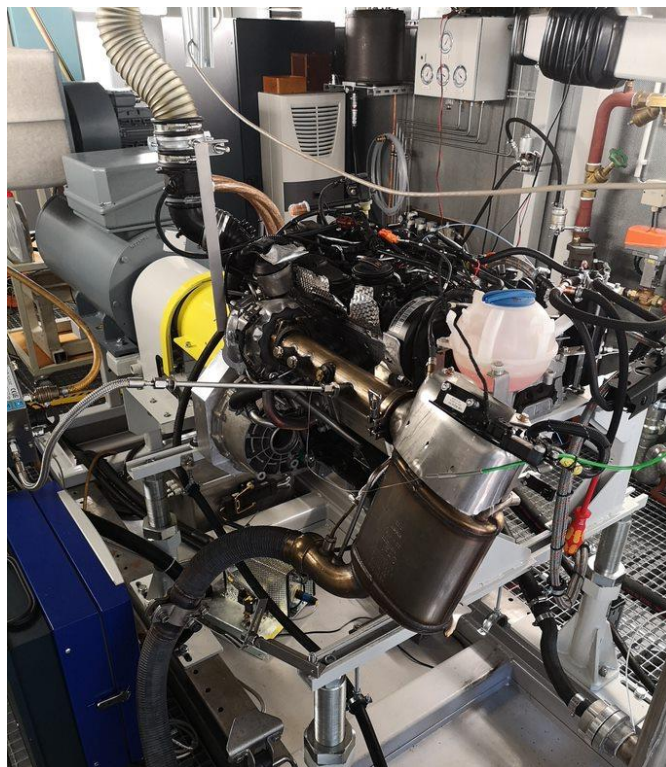


Abbildung 13: 4-Zylinder Dieselmotor Prüfstand an der HAW

Tabelle 4: Technische Daten des Dieselmotors an der HAW [35]

Bezeichnung	Wert
Motorkennbuchstabe	CJDA
Bauart	4-Zylinder Reihenmotor
Ventile pro Zylinder	4
Hubraum	1968 cm ³
Bohrung	81 mm
Hub	95,5 mm
Pleuelstangenstichmaß	154 mm
Zündfolge	1-3-4-2
Maximale Leistung	75 kW bei 3000 1/min
Maximales Drehmoment	285 Nm bei 1750 1/min
Motormanagement	Bosch EDC 17
Kraftstoff	Diesel DIN EN 590
Abgasreinigung	Abgasrückführung, Dieselpartikelfilter
Abgasnorm	EU 5

Prozessabläufe am Motorprüfstand

Das folgende Schema des Prüfstands in der Abbildung 14 dient zur Veranschaulichung dessen Bestandteile und der ablaufenden Prozesse. Wie im Schema zu erkennen ist, wird zuerst die Frischluft über einen Filter angesaugt, wodurch Verunreinigungen in der Luft beseitigt werden. Auf dem Weg zum Turbolader wird der Durchfluss über ein Sensyflow-Messgerät gemessen. Der Turbolader verdichtet die Frischluft, welche sich dabei erwärmt. Um eine größere Menge an Luft in den Brennraum leiten zu können, wird diese durch den Ladeluftkühler durch Wasser gekühlt und somit komprimiert. Über die Drosselklappe und das Luftverteilerrohr wird die Luft dann in die Zylinder eingespeist. Durch die Drosselklappe kann die zugeführte Luftmenge gesteuert werden. Nach dem Verbrennungsprozess im Brennraum wird das Abgas über den Abgaskrümmen durch den Turbolader geleitet. Hier treibt das Abgas eine Radialturbine an, damit die Frischluft effizienter verdichtet werden kann. Nun strömt das Abgas über ein Rohr mit vier Entnahmestellen zur Abgasanalyse und anschließend in den Partikelfilter (DPF). Dieser filtert die im Verbrennungsprozess entstandenen Feststoffe und sorgt dafür, dass der Motor die Abgasnorm EU 5 einhält. Das Abgas wird nun über einen Schalldämpfer in die Abgasanlage geführt. Somit ist der Prozessweg der angesaugten Luft abgeschlossen [23].

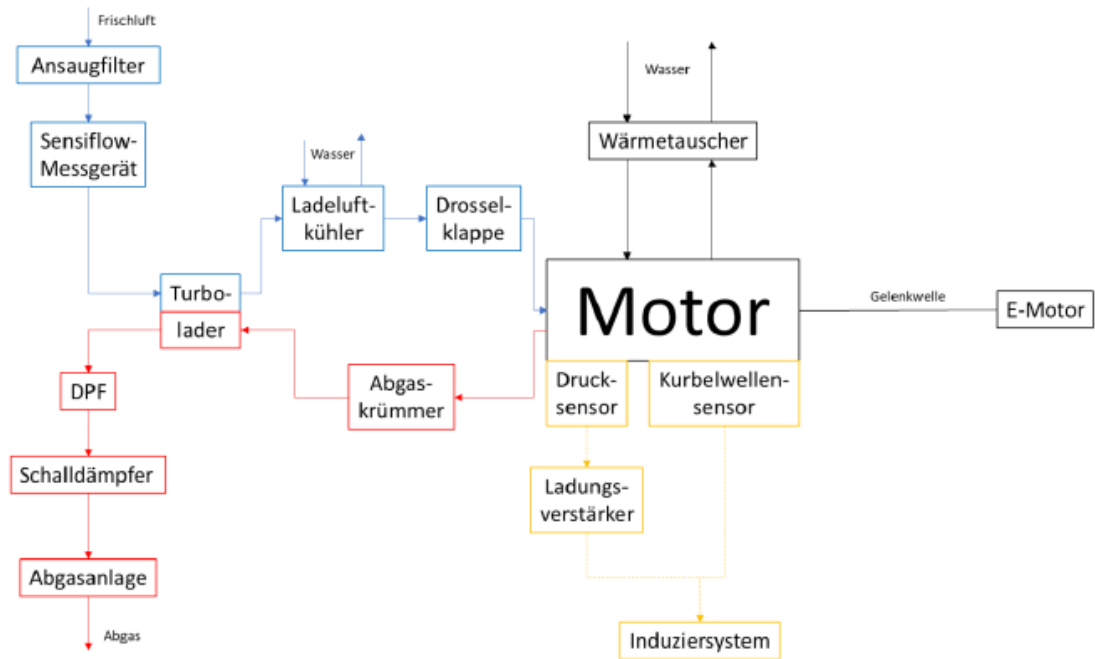


Abbildung 14: Schema des Prüfstandes [23]

Der Dieselmotor ist über eine Gelenkwelle mit einem Drehstrommotor verbunden, welcher dafür sorgt, den Motor antreiben und abbrem sen zu können (siehe Abbildung 15) [35].



Abbildung 15: E-Motor des Prüfstandes

Der Verbrennungsmotor wird durch einen Wärmetauscher mit Wasser gekühlt und ist auf einem gedämpften Fundament gelagert, um Schwingungen und Geräusche während des Betriebes zu minimieren. Die Kraftstoffversorgung kann über den in Abbildung 16 dargestellten schwarzen Tank erfolgen. Aus dem Tank wird der jeweilige verwendete Kraftstoff über eine Kraftstoffwaage zu den Zylindern geleitet und dort eingespritzt [35].

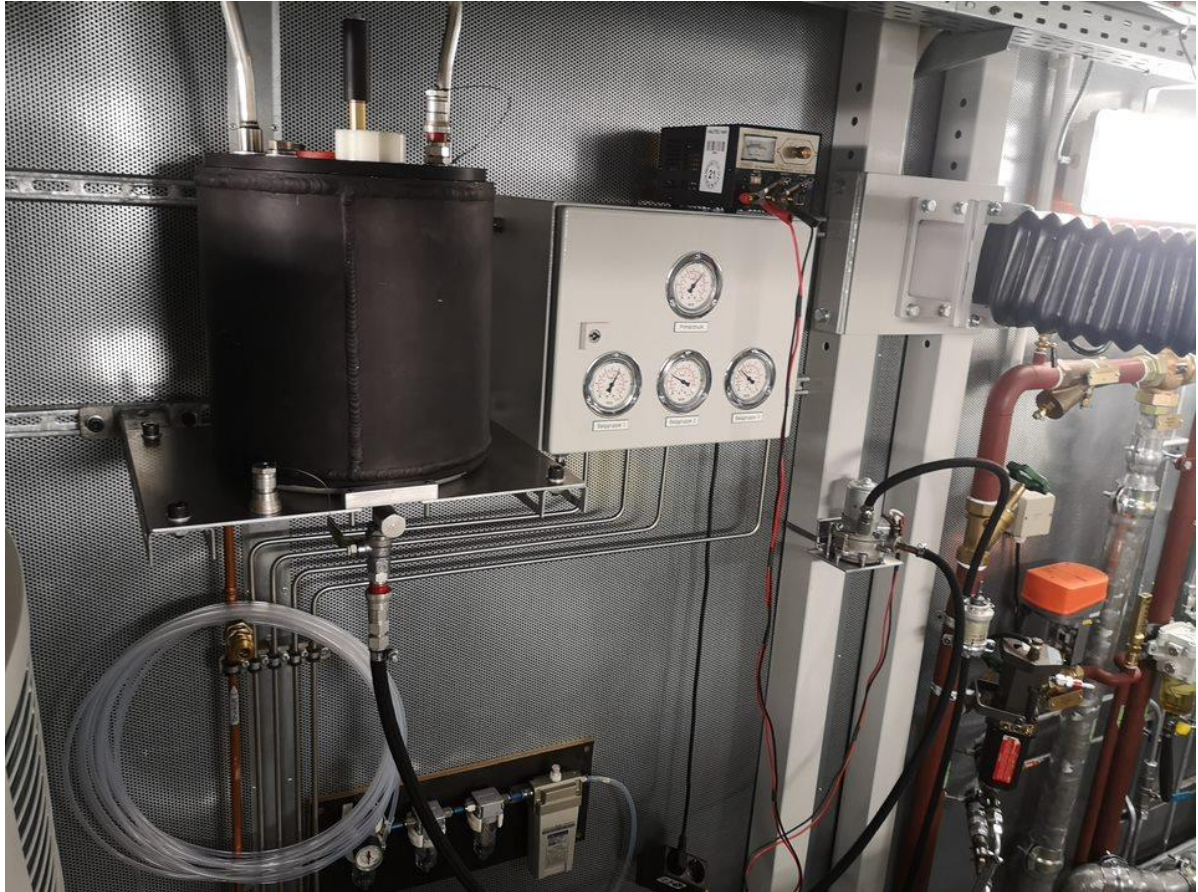


Abbildung 16: Aufbau der Kraftstoffversorgung

Zur Messwerterfassung und Prüfstandsteuerung dient das Automatisierungssystem *Morphee 2*, welches über einen Schaltschrank gestartet wird. Hier werden die Sollparameter für die Drehzahl und Fahrpedalstellung und verschiedene Stellgrößen eingegeben, um den Prüfstand zu steuern. Zusätzlich erfolgt die Erfassung, Anzeige und Speicherung der gemessenen Daten [35]. Die Benutzeroberfläche der Software ist in Abbildung 17 dargestellt. Im linken Bedienfeld werden die Sollparameter eingestellt. Auf den drei Tachometern, kann von links nach rechts die Fahrpedalstellung, die Drehzahl und das Drehmoment abgelesen werden.



Abbildung 17: Benutzeroberfläche Morphee 2

Neben der für diese Bachelorarbeit relevanten Abgasanalytik sind auch andere Messtechniken am Prüfstand vorhanden. Dadurch können folgende Messwerte aufgenommen werden [35]:

- Drehzahl
- Drehmoment
- Temperatur mit PT100 und NiCrNi-Thermoelementen
- Luftmasse der angesaugten Luft mit Sensyflow-Luftmassenmesser
- Kraftstoffverbrauch durch Siemens Sietrans FC300 Coriolis
- Zylinderdruck über Induziersystem [35]

Um den Zylinderdruck zu messen, sind im Motor anstelle von zwei Glühkerzen zwei Drucksensoren verbaut. Das gemessene Drucksignal wird über einen Ladungsverstärker verstärkt, in ein Spannungssignal umgewandelt und an das Induziersystem geleitet. Zudem wird über einen Winkelmarkengeber, welcher am Ende der Kurbelwelle angebracht ist, die Kurbelwellenposition gemessen und auch an das Induziersystem gesendet. Das Induziersystem verarbeitet die erhaltenen Signale und ist mit dem Morphee 2 System verbunden, worüber nun die Messdaten aufgenommen und ausgewertet werden können.

In den letzten Semestern ist der in Kapitel 3.1 vorgestellte Prüfstand vor allem für Laborversuche des Moduls *Kolbenmaschinen* verwendet worden. Ziel der Versuche ist die Aufnahme der Kennfelder des Motors für verschiedene Kenngrößen. Dabei werden jeweils eine Schlepp- und eine Kennfeldmessung durchgeführt, die jeweiligen Messwerte aufgenommen und die Zylinderdruckdaten abgespeichert. Anschließend können die Studierenden die Daten auswerten, um ein besseres Verständnis für Zylinderdruckverläufe, Kraftstoffverbrauch, Heizverläufe, Kennfelder und weitere wichtige Themen im Bereich eines Dieselmotors bekommen zu können [35]. Diese Bachelorarbeit dient somit als Grundlage das Anwendungsgebiet des Prüfstandes zu erweitern, um zukünftig studentische Laborversuche mit den Schwerpunkten *Abgasanalytik* und *Messung* von Schadstoffemissionen realisieren zu können. An dem Prüfstand sind drei verschiedene Messtechniken zur Abgasanalyse vorhanden, die aber seit längerem nicht mehr in Betrieb genommen wurden. Im Kapitel 3.2 werden diese Abgasmesstechniken vorgestellt.

3.2. Vorstellung der Abgasanalytik

Am Dieselmotor-Prüfstand sind folgende Abgasmesstechniken vorhanden:

- AVL 415S Rauchwertmessgerät (Smokemeter) mit Sonderentnahme und Heizung
- AVL Opazimeter
- AVL Sesam FTIR

Der Hersteller der Geräte ist die AVL List GmbH, welche als weltweit größtes Unternehmen für die Entwicklung, Simulation und Erprobung von diversen Antriebssystemen für verschiedene Fahrzeuge und Motorklassen gilt. AVL bietet als weltweiter Marktführer komplette Entwicklungsumgebungen, Mess- und Prüfsysteme sowie Simulationsmethoden an [11]. Im Bereich der Abgasanalytik stellt AVL außerdem komplette Lösungen an Abgasanalyse-Systemen für die Zertifizierung, Entwicklung sowie Serienüberwachung auf Motor- und Rollenprüfständen bereit [3].

Vorstellung der Messtechniken

Im Folgenden werden die vorhandenen Messtechniken vorgestellt. Auf die allgemeinen physikalischen Messprinzipien wird dabei nicht detailliert eingegangen, da diese schon im Kapitel 2.5 erläutert wurden.

Das **Rauchwertmessgerät AVL 415S**, auch **Smokemeter** genannt, kann automatisiert den Rußgehalt des Abgases von verschiedenen Verbrennungsmotoren messen. Es erfüllt dabei die Norm ISO 10054 und kann aufgrund seines variablen Saugvolumens, sehr geringe Konzentrationen von Ruß im Abgas nachweisen [7]. In den folgenden Abbildungen 18 und 19

ist das an der HAW vorhandene Smokemeter in der Vorder- und Hinteransicht dargestellt. Die wichtigsten technischen Daten des AVL 415S Smokemeters sind im Anhang im Abschnitt 1 übersichtlich dargestellt



Abbildung 18: Smokemeter Vorderansicht

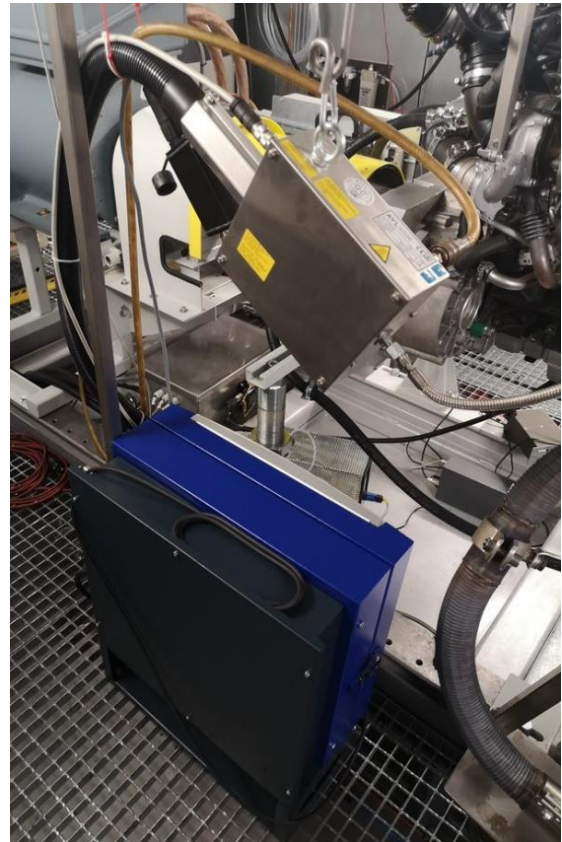


Abbildung 19: Smokemeter Hinteransicht

Das Smokemeter ist über eine Schnittstelle mit dem Prüfstandrechner, welcher mit dem Automatisierungssystem Morphee 2 ausgestattet ist, verbunden. Die Bedienung und Erfassung der Messdaten erfolgt über den vorhandenen Monitoren, die außerhalb des Prüfstandraumes angeordnet sind (siehe S. 46, Abbildung 17). Das Gerät ermöglicht folgende Messungen [7]:

- Einzelmessungen (200 m Filterpapier = 1200 Einzelmessungen)
- Mehrfachmessungen
- Messungen mit Auto Range
- Messungen mit Volumenvorwahl
- Synchronisierte Messungen
- Sondermessungen (selektive Mehrfachmessungen) [7]

Diese Messungen können auch beim dynamischen Betrieb des Motors aufgrund der konstanten Entnahmemenge erfolgen hierbei entsprechen die Messwerte dann dem Mittelwert des Rußgehaltes während der Saugzeit. Das an der HAW vorhandene Smokemeter beinhaltet

zudem die Optionen „Heizung“ und „Sonderentnahme“. Bei der Option Heizung sorgt eine aufgeheizte Abgasleitung dafür, dass es zu keiner Kondensatbildung in der Leitung kommt, wodurch Messunsicherheiten verringert werden. Die wichtigsten Teile der Heizung sind dabei der Heizlüfter, der Temperaturfühler, die zusätzliche Heizausrüstung für den Klemmungsblock und die beheizten Entnahmeleitungen. Durch diese Komponenten wird sichergestellt, dass auf dem kompletten Gasweg eine Temperatur von ungefähr 70 °C eingehalten wird. Die Option „Sonderentnahme“ (Edelstahl-Box in Abbildung 18 und 19) ermöglicht das Messen an der Probeentnahmestelle in einem erweiterten Druckbereich und bei höheren Temperaturen. In der Standardausführung ist das Gerät für einen Abgasgedruck von -100 mbar bis +400 mbar ausgelegt. Durch die Sonderentnahme wird dieser Druckbereich auf -200 mbar bis +750 mbar erweitert. Dieses ist gerade bei der Messung vor Abgasnachbehandlungssystemen, wie Dieselpartikelfiltern wichtig, da es hier zu erhöhten Drücken kommt [7]. Trotz der Robustheit von Smokemetern müssen Grenzen eingehalten werden, um einen sicheren Betrieb nicht zu gefährden. Dazu zählt [7]:

- Keine Untersuchung von zündfähigen oder explosiven Abgasen
- Keine Untersuchung von Emissionsmischungen, die mit Luft brennbar sind (wie beispielweise vor einem aktiv regenerativen Katalysator)
- Keine Untersuchungen von Abgasen mit sehr hohem Wasserstoffgehalt
- Maximale CO-Konzentration des Abgases von 6 %
- Beachtung von möglichen Abgasbestandteilen bei der Verwendung von alternativen Kraftstoffen oder Verbrennungsverfahren [7]

Bei der Messung des Rußgehaltes im Abgas laufen im Smokemeter folgende Prozesse ab, die über einen Mikroprozessor gesteuert werden [7]:

- Messung der Abgasmenge, die durch das Filterpapier gesaugt wird, mit einer Blendenmesstrecke
- Berechnung der effektiven Länge
- Erfassung der Schwärzung des Filterpapiers mit optischen Messkopf
- Ermittlung des Rußgehalts (aus effektiver Länge und Schwärzung)
- Ausgabe des Rußgehalts als Filter Smoke Number (-), Rußkonzentration (mg/m^3) oder Pollution Level (%) [7]

Das Smokemeter kann den Rußgehalt je nach Wahl in verschiedenen Einheiten ausgeben. In Europa und Amerika werden meist die FSN und in China das Pollution Level verwendet. Die FSN und das Pollution Level (PL) werden über folgende mathematische Zusammenhänge vom Smokemeter berechnet [7]:

Filtersmokenumber FSN:

$$FSN = PB = 10 \cdot \left(1 - \frac{R_B}{R_W}\right) \quad (3.1)$$

$$\text{mit } L_{eff} = 405 \text{ mm nach ISO 10054} \quad (3.2)$$

PB ist dabei der Schwärzungsgrad des Filterpapiers und L_{eff} die Länge der Abgassäule. R_B und R_W sind jeweils einmal das Reflexionsvermögen des geschwärzten Filterpapiers und des weißen Filterpapiers. Ist das Filterpapier komplett schwarz, gilt $PB=FSN=10$ [7].

Pollution Level PL [7]:

$$PL = 100 - 1,15 \cdot R_A \text{ nach JIS 1101} \quad (3.3)$$

$$\text{mit } R_A = 100 \cdot \frac{\text{Reflektometerwert der Probe}}{\text{Reflektometerwert des Standartweißwertes}} \quad (3.4)$$

R_A ist hier die absolute Helligkeit der Abgasprobe, welche über einen weiteren Parameter den sogenannten Standartweißwert bestimmt wird. Da im AVL 415S die Helligkeitsbestimmung der Probe nach dem FSN-Verfahren abläuft, muss zur Bestimmung des Pollution Levels der Probe, das PL für ein weißes Filterpapier bekannt sein und mit der zugehörigen effektiven Länge als Parameter eingegeben werden [7].

Das an der HAW vorhandene **Opazimeter** von AVL dient zur statischen und dynamischen Untersuchung der Abgastrübung an einem Motorprüfstand und ist in Abbildung 20 dargestellt. Die wichtigsten technischen Daten des Opazimeters sind für eine bessere Übersicht im Anhang im Abschnitt 2 zusammengefasst. Die modernen AVL-Opazimeter erfüllen verschiedene gesetzliche Normen, wie zum Beispiel die ISO 8178 und EURO V und können somit für die gesetzlich vorgeschriebene Abgasprüfung verwendet werden. Das Gerät berechnet die Abgastrübung basierend auf dem Lambert-Beer Gesetz und gibt den Wert als Opazität in Prozent oder als Licht-Absorptions-Koeffizient k in m^{-1} aus. Durch die Erfüllung vielseitiger Anforderungen wie einer schnellen Ansprechzeit und den möglichen Einsatz direkt vor einem Dieselpartikelfilter kann es auch in der Forschung, der Entwicklung und in der Fertigung gut eingesetzt werden [3] [9].



Abbildung 20: Opazimeter an der HAW

Das hellgraue Gerät auf dem Opazimeter dient zur Messung der Umgebungs- und Abgastemperatur. Auf dem Temperaturmessgerät ist ein zum Opazimeter, zukaufbarer AVL 4210 Instrument Controller vorhanden. Die Bedienung und Speicherung der Messdaten des Opazimeters kann zum einen wie beim Smokemeter über den Monitor außerhalb des Prüfstandraumes mit dem Morphee 2 System erfolgen oder über den zusätzlich vorhandenen Controller. In der Anwendung müssen zudem bestimmte Grenzen eingehalten werden, dabei gilt ähnlich wie beim Smokemeter [9]:

- Keine Untersuchung von zündfähigen oder explosiven Abgasen, da sich diese bei den hohen Temperaturen selbstentzünden könnten
- Keine Untersuchung von Emissionsmischungen, die mit Luft brennbar sind (wie beispielweise vor einem aktiv regenerativen Katalysator)
- Keine Untersuchungen von Abgasen mit sehr hohem Wasserstoffgehalt
- Maximale CO-Konzentration des Abgases von 6 % [9]

Bei der Messung der Opazität strömt das Abgas in das Opazimeter und wird durch das Probenaufbereitungsrohr konditioniert. Die Sondenleitung wird dabei erwärmt, um eine möglichst konstante Temperatur des Abgases zu gewährleisten. Dafür ist der Anschluss einer Druckluftleitung notwendig. Danach wird das Abgas über das bereits beschriebene physikalische Prinzip (Kap. 2.5) analysiert und über das Lambert-Beer-Gesetz die Abgastrübung in der jeweiligen Einheit berechnet. Da die Opazität N folgend definiert ist [9]:

$$\frac{I}{I_0} = 1 - \frac{N}{100} \quad (3.5)$$

Liefert uns dieser Zusammenhang folgende Gleichung [9]:

$$1 - \frac{N}{100} = e^{-kl} \quad (3.6)$$

Durch Umstellen der Gleichung (3.6) folgt der Absorptionskoeffizient [9]:

$$k = \frac{-\ln\left(1 - \frac{N}{100}\right)}{l} \quad (3.7)$$

Wie aus dem Kapitel 2.5 bekannt, definieren die Parameter I und I_0 die Lichtintensität am Eingang und am Ausgang und l für die durchstrahlte Strecke. Der errechnete Absorptionskoeffizient wird zusätzlich durch die genormte Temperatur (T_{Norm}) und den Atmosphärendruck (p_{atm}) nach ISO 11614 korrigiert [9]:

$$k_{korrigiert} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{N}{100}\right)}{l} \cdot \frac{T_{Gas,Messzelle}}{T_{Norm}} \cdot \frac{p_{atm}}{p_{Messzelle}} \quad (3.8)$$

Nach der Messung sorgt ein Filterelement dafür, dass die Verunreinigungen des Abgases die nachfolgenden Komponenten nicht beschädigen. Zudem wird der Durchfluss über einen Durchflussmesser gemessen. Dieser wird durch zwei Pumpen auf einem konstanten Level von 40 bis 49 l/min gehalten. Danach verlässt das Abgas das Opazimeter und wird zurück in die Abgasleitung des Motors geführt [9].

Im Vergleich zu den vorherigen vorgestellten Messtechniken ist das **SESAM FTIR** von AVL ein komplexeres System zur Abgasanalyse. Aufgrund der zunehmend komplexer werdenden Abgasnachbehandlungssysteme und der alternativen Kraftstoffe spielt das FTIR eine wichtige Rolle. Mit dieser Technik können verschiedenste Abgaskomponenten detailliert und effizient untersucht werden. SESAM steht dabei für **S**ystem für **E**missionen, Probenahme (**S**ampling) und (**A**nd) **M**essen. Moderne FTIR-Systeme von AVL erfüllen dabei die gesetzlichen Normen wie Euro IV, EPA 40 CFR Part 1065 und 1066 [3] [5]. Die verschiedenen Geräte zur Messung der wichtigsten Abgasbestandteile sind dabei in einem Messschrank wie beim Sesam FTIR-System an der HAW zusammengefasst (siehe Abbildung 21 und 22). Die technischen Daten des Sesam FTIR-Systems sind im Anhang (Abschnitt 3) dargestellt. Im Abschnitt 4 (siehe Anhang) sind die vom FTIR-Analysator messbaren und berechenbaren Abgaskomponenten veranschaulicht.



Abbildung 21: SESAM FTIR an der HAW Vorderansicht



Abbildung 22: SESAM FTIR an der HAW Hinteransicht

Die FTIR Messschranke von AVL sind dabei in verschiedenen Versionen und neben der Standardkonfiguration mit diversen Erweiterungen verfügbar. Je nachdem welche Anforderungen an das FTIR-System gestellt werden, können optional FID-Analysatoren für THC-Messungen oder PMD-Analysatoren für die AGR- (CO₂) Messungen zusätzlich im Schrank platziert werden. In der größeren Schrankvariante ist es möglich, auch zwei FTIR zu betreiben, um zeitgleich vor und nach den Abgasnachbehandlungssystemen wie Katalysatoren zu messen. Das an der HAW vorhandene System besitzt die Option „FID-Analysator“ und könnte auf drei Weitere erweitert werden. Diese wären einmal der paramagnetomechanische Magnos 106-Analysator zur O₂-Analyse, der NDIR Uras 14-Analysator für die CO₂-Analyse und ein H₂-Sensor zur optionalen Wasserstoffuntersuchung. Alternativ zur O₂-Messung kann auch ein paramagnetischer Analysator PMD 4000 verwendet werden. Der Hauptanalysator des SESAM-FTIR-Systems ist jedoch das FTIR selbst. Hierbei wird in einer Gaskzelle die Abgasprobe mit infrarotem Licht untersucht, um somit die Gaskomponente und deren Konzentration zu messen. Die Abgasleitungen des Systems werden beheizt, um Kondensation zu vermeiden. Außerdem ist ein beheizter Vorfilter vorhanden, der dafür sorgt, dass Verunreinigungen im Abgas die Messzellen der Analysatoren im FTIR nicht beschädigen [5]. Dieser ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Bedienung und

Erfassung der Messdaten erfolgt entweder über einen angeschlossenen Monitor mit der SESAM FTIR-Software oder über die Software Morphee 2.

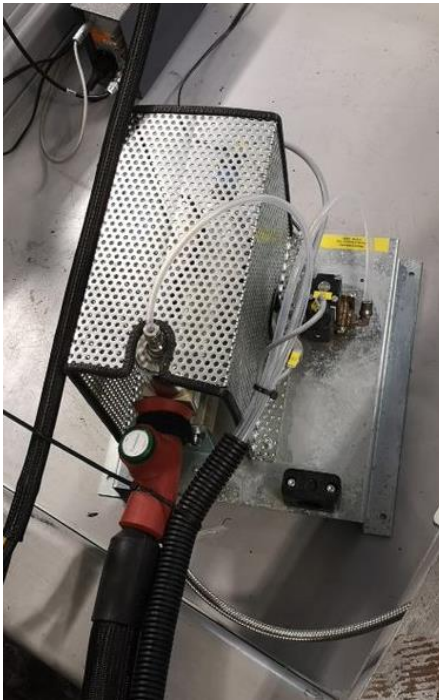


Abbildung 23: Vorfilter vom FTIR



Abbildung 24: Anzeigen am FTIR

Bei der Messung strömt das Abgas von der Entnahmestelle durch den beheizten Vorfilter. Danach wird das gereinigte Abgas durch die beheizten Leitungen (191 °C) in die Analysatoren geleitet. Hier finden die Messungen der Abgaskomponenten statt. Nach der Messung wird das Abgas durch den Gaskühler gekühlt, um das Wasser aus dem Gasstrom zu entfernen. Das Wasser wird in einer Kondensatflasche gesammelt, welche regelmäßig geleert werden sollte. Durch die Regelung des Gasstromdruckes wird ein konstanter Probedurchfluss gewährleistet. Die Probenpumpe, welche mit Druckluft arbeitet, saugt den Abgasstrom an und führt ihn durch den Analysator bis zum Auslasskanal. Das Abgas wird anschließend vom Auslasskanal zur Abgasanlage geführt. Die Drücke der zur Messung notwendigen angeschlossenen Druckluft für den FID und der Probenpumpe können an der Anzeige auf der Vorderseite des Schrankes abgelesen und gesteuert werden (siehe Abbildung 24) [5].

Zusammenfassung

Zusammengefasst sind an der HAW Messtechniken für eine umfangreiche Abgasanalyse des Dieselmotors vorhanden. Das Opazimeter und Smokemeter beziehen sich dabei auf die Untersuchung der Feststoffe im Abgas. Beide haben den Vorteil, eines einfachen und robusten Aufbaus, sodass sich Wartungsaufwand und Wartungskosten reduzieren. Auch sind ihre

Messprinzipien im Vergleich zum FTIR weniger komplex, wodurch eine geringere Fehleranfälligkeit besteht. Das FTIR-System hat den Vorteil, den Großteil aller wichtigen gasförmigen Abgaskomponenten automatisiert in einem System zu messen. Durch die erweiterbaren Optionen können alle Messgeräte in nur einem Messschrank untergebracht werden. Der Wartungsaufwand des FTIRs sowie dessen Bedienung sind jedoch um einiges komplexer.

4. Inbetriebnahme der Abgasanalytik

Die im Kapitel 3.2 vorgestellte Abgasanalytik, die an der HAW Hamburg am Dieselmotor-Prüfstand vorhanden ist, wurde seit mehreren Jahren nicht mehr betrieben. Bei Laborversuchen an diesem Motorprüfstand wurden zuvor vor allem die Zylinderdruckverläufe des Dieselmotors mit dem Indiziersystem untersucht und basierend auf diesen Messdaten verschiedene Auswertungen durchgeführt. Da in Zukunft Laborversuche auch im Zusammenhang mit der Abgasanalytik und der Abgaszusammensetzung im Kontext alternativer Kraftstoffe an diesem Motorprüfstand durchgeführt werden sollen, gilt es, die vorhandene Abgasanalytik hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit zu prüfen und notwendige Maßnahmen für die Inbetriebnahme zu erforschen.

Damit das Abgas nach dem Verbrennungsprozess untersucht werden kann, muss das Abgas an einer Stelle des Motorprüfstandes abgeführt und zur jeweiligen Messtechnik geleitet werden. In der Entwicklung wird das Abgas meist vor der Abgasnachbehandlung entnommen. Es ist darauf zu achten, dass der Abgasdruck durch den Dieselpartikelfilter nicht zu groß für die vorhandene Messtechnik wird. Dies kann vor allem passieren, wenn der Filter verstopft ist [34]. Am Prüfstand an der HAW Hamburg ist bereits ein Zwischenrohr mit Entnahmestellen hinter dem Turbolader und vor dem Dieselpartikelfilter vorhanden. Hier können vier Anschlüsse zur Probegasentnahme montiert werden, um die Abgasproben zu den jeweiligen Messtechniken zu leiten. In der Abbildung 25 ist die Entnahmestelle dargestellt.

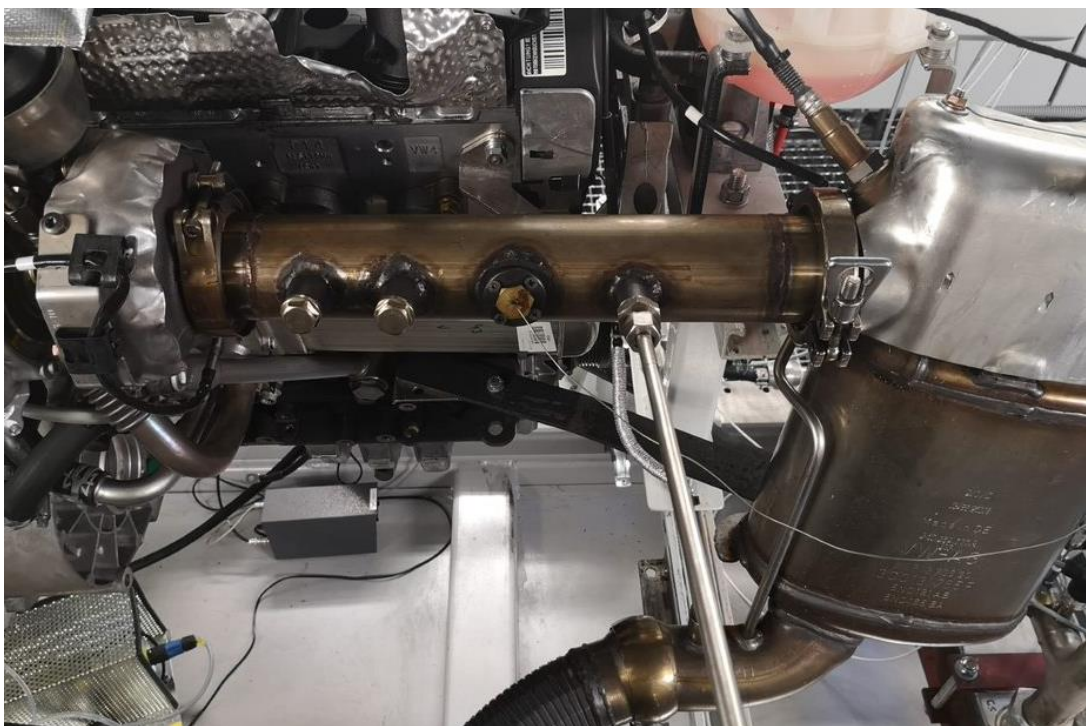


Abbildung 25: Abgasentnahmestelle am Motorprüfstand

Die beiden in Abbildung 25 zu sehenden und bereits angeschlossenen Leitungen gehören zum Smokemeter (ganz rechter Anschluss) und zum Temperaturmessgerät (zweiter Anschluss von rechts), welches sich auf dem Opazimeter befindet (S.51, siehe Abbildung 20). Dadurch kann während des Betriebes zusätzlich die Temperatur des Abgases dokumentiert werden.

Das Abgas an diesem Motorprüfstand wird nicht extra verdünnt beziehungsweise mit einem anderweitigen Verfahren aufbereitet, sondern direkt zu den Abgasmesstechniken geleitet. Lediglich die Messtechniken selbst verfügen wie bereits beschrieben über eigene Aufbereitungsmaßnahmen, wie zum Beispiel Vorfilter und beheizte Leitungen. Die drei vorhandenen Abgasanalysegeräte sind zudem alle über eine jeweilige Schnittstelle mit dem Automatisierungssystem Morphee 2 verbunden, an dem die Bedienung und Erfassung der Daten stattfinden kann. Die Bedienung des Systems erfolgt an den Monitoren außerhalb des Prüfraumes, um die Sicherheitsbestimmungen einzuhalten und eine Gefährdung der Personen während des Betriebes zu vermeiden.

Wichtig zu erwähnen ist weiterhin, dass der Dieselmotor-Prüfstand derzeit aufgrund von technischen Komplikationen nicht betrieben werden kann. In der Startanzeige des Morphee 2 Systems wird eine Fehlermeldung (Problems during switching Control mode) angezeigt. Es ist jedoch bereits eine Firma in Auftrag gegeben, die vorhandenen Probleme zu beseitigen, um einen sicheren Betrieb des Motors zu gewährleisten. Somit kann die Messtechnik in dieser Arbeit nicht im Betrieb des Motors mit Dieselabgasen getestet werden. Deshalb wird in diesem Kapitel nur die Funktionalität der Abgasanalytik überprüft, ohne eine praktische Messung des Abgases mit den drei Messtechniken durchzuführen.

Um die Messtechnik in Betrieb zu nehmen, muss zuerst die Stromversorgung am Prüfstand sichergestellt werden. Dafür wird der Schaltschrank (siehe Abbildung 26) außerhalb des Prüfstandraumes durch den Hauptschalter eingeschaltet. Es muss beachtet werden, dass die beiden roten Notausschalter nicht eingedrückt sind, da der Schaltschrank sich sonst nicht einschalten lässt. Anschließend werden auch die Monitore zur Steuerung des Prüfstandes gestartet. Der Prüfstandsraum ist betriebsbereit.



Abbildung 26: Schaltschrank für die Prüfstandssteuerung [35]

4.1. Smokemeter

Das Smokemeter wird zunächst über ein Stromkabel mit Spannung versorgt und anschließend über den Netzschalter (siehe Abbildung 27) eingeschaltet. In Abbildung 27 sind die am Smokemeter vorhandenen Anschlüsse gezeigt. Der oberste Eingang COM1 (X1) ist eine serielle Schnittstelle. Das weiße Kabel verbindet somit das Smokemeter mit dem Morphee 2 Automatisierungssystem, wodurch die Messdaten an den Monitoren ausgelesen werden können. Der Anschluss Supply (X3) dient als Netzanschluss. Das angeschlossene graue Kabel versorgt das Smokemeter also mit Spannung. Am untersten Anschluss Sample 1 (X4) ist der schwarze isolierte Heizschlauch angeschlossen, der für die Beheizung der Anlage sorgt und dadurch die Kondensation des Abgases verhindert [7].



Abbildung 27: Anschlüsse am Smokemeter

Die Option der erweiterten Druckbereichsmessung durch die Sonderentnahmebox ist bereits am Smokemeter und am Prüfstand angeschlossen (Abbildung 29). Über die Sonde in der Entnahmestelle wird das Abgas in die Entnahmebox geleitet. Es ist darauf zu achten, dass sämtliche Leitungen nicht verdreht, abgeklemmt oder auf Zug/Druck belastet werden und möglichst geringe Biegungen in den Leitungen vorhanden sind. An der Entnahmebox werden ein Druckluftschlauch und die Sicherungsbox montiert, welche zusätzlich mit Spannung zu versorgen sind. Das Abgas wird nun durch die Entnahmebox über die angeschlossene schwarze und isolierte Leitung in das Smokemeter geleitet. Die grün leuchtende LED an der Box bestätigt, dass diese vollständig angeschlossen und betriebsbereit ist (siehe Abbildung 28) [8].

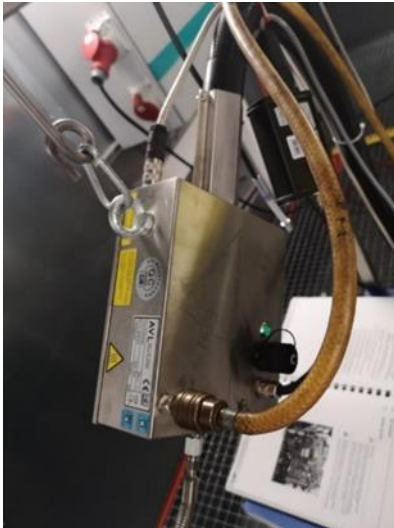


Abbildung 28: Entnahmebox

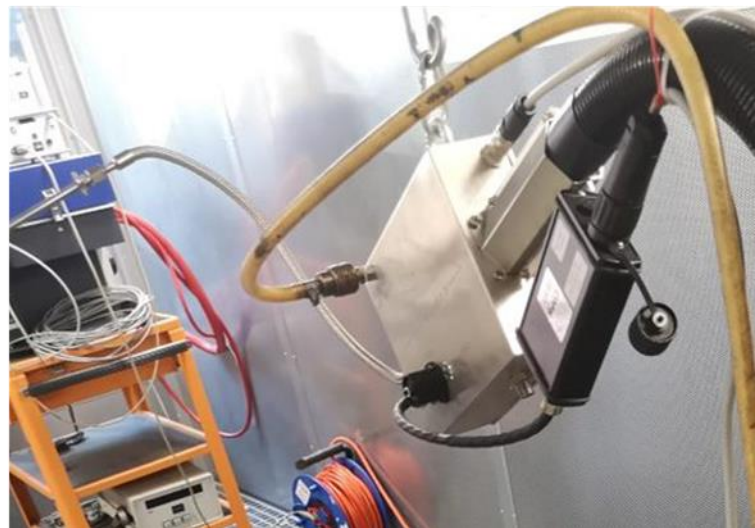


Abbildung 29: Entnahmebox Hinteransicht

Nach der Untersuchung des Abgases durch das Smokemeter, wird das Abgas über einen Abluftschlauch abgeleitet. Der Abluftschlauch führt ins Freie, da über diesen Anschluss bei der Option Sonderentnahme auch Luft für die Spülung angesaugt wird [7].

Am Messgerät werden alle Verbindungen der Kabel und Leitungen auf ihre Richtigkeit geprüft. Anschließend ist die Erfassung der Messdaten des Smokemeters über die Morphee 2 Software zu kontrollieren. Über das Menü Feld der Software am Monitor kann das Smokemeter ausgewählt werden. In der folgenden Abbildung 30 ist die Benutzeroberfläche zur Erfassung der Messdaten und Überwachung des Smokemeters dargestellt.

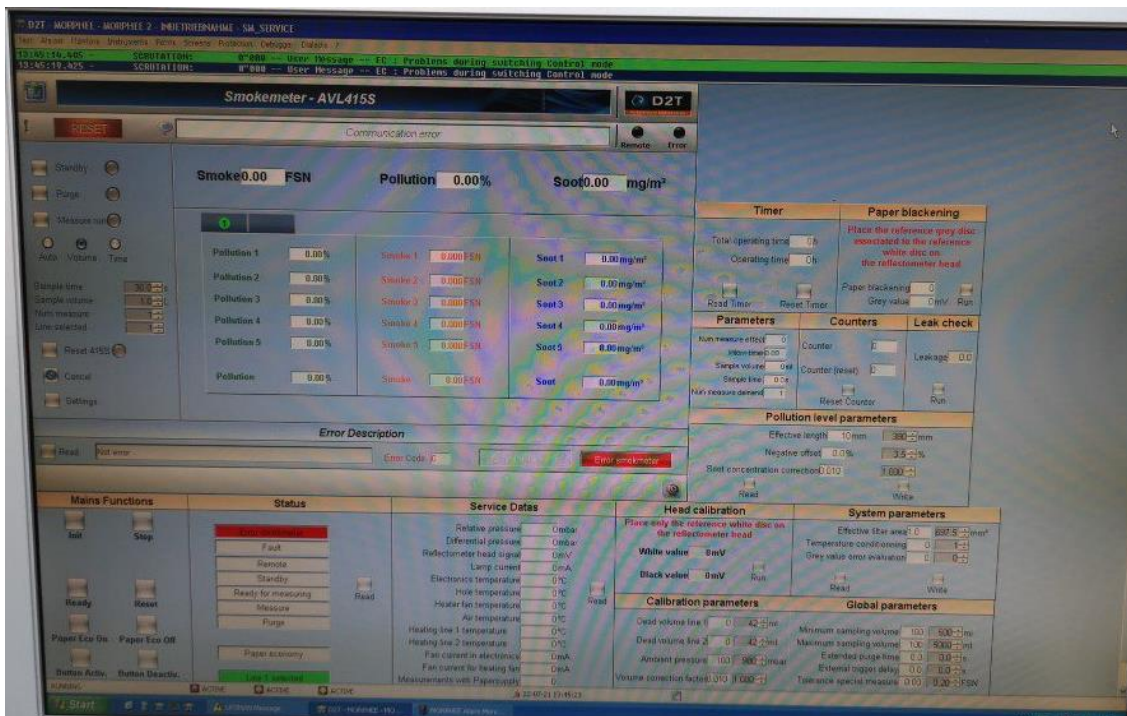


Abbildung 30: Benutzeroberfläche Smokemeter in Morphee 2

Wie in der Abbildung 30 zu erkennen ist, können verschiedene Parameter für den Betrieb eingestellt und überwacht werden. Außerdem werden im linken Fenster die Messdaten angezeigt. In der weißen Leiste in der oberen Hälfte der Benutzeroberfläche wird „Communication Error“ angezeigt. Um diesen Fehler zu beheben, wird das System über den roten Button resettet. Danach zeigt das System den Fehlercode 20 „Flow is too low“ an. Dieser Code steht für einen zu geringen Durchfluss im Smokemeter. Laut dem Benutzerhandbuch kann dies mehrere mögliche Ursachen haben [7]:

- Entnahmesonde verstopft
- Entnahmeleitung geknickt oder verstopft
- Schutzfilter zu stark verschmutzt
- Ventile schalten nicht
- Pumpe läuft nicht an
- Zu hoher Druck an der Entnahmestelle [7]

Neben den oben genannten möglichen Ursachen könnte die Ursache auch darin liegen, dass die Fehlermeldung angezeigt wird, da gar kein Abgasstrom an der Entnahmestelle vorhanden ist, weil der Motor nicht läuft. Dies kann zurzeit auch nicht getestet werden, da der Motor nicht betriebsbereit ist. Aufgrund dieser Fehlermeldung und der Tatsache, dass das Smokemeter mehrere Jahre nicht benutzt wurde, sollten für einen optimalen Betrieb in Zukunft die Sonde und die Entnahmeleitungen gereinigt und gegebenenfalls der Schutzfilter bei Verschmutzung ausgetauscht werden. Zudem ist vor dem Start der Messungen eine Aufwärmzeit des gesamten Systems zu berücksichtigen [7].

4.2. Opazimeter

Nach dem Anschließen des grauen Netzkabels (siehe Abbildung 32), wird das Opazimeter über den Netzschalter eingeschaltet (siehe Abbildung 32). In Abbildung 31 sind die verschiedenen Anschlüsse zu sehen. Das Opazimeter ist über die COM1 (X2) Schnittstelle mit dem dazugehörigen Controller mit einem Kabel verbunden. Die Bedienung und Erfassung der Messdaten erfolgt hierbei also nicht über das Morphee 2 System, sondern direkt am Opazimeter über den Controller, welcher auch zusätzlich mit Spannung versorgt werden muss.

Wenn der Controller hochgefahren ist, können über das Hauptmenü verschiedene Grundeinstellungen vorgenommen werden. Bei dem Versuch eine Messung durchzuführen, zeigt der Controller den Fehler „Keine Druckluft“ an.



Abbildung 31: Anschlüsse des Opazimeters
linke Seite



Abbildung 32: Anschlüsse des Opazimeters rechte
Seite

Um den Druckluftschlauch anschließen zu können, muss das Opazimeter näher an den Prüfstand in Richtung der Entnahmestelle verschoben werden. Nachdem der Druckluftschlauch erfolgreich angeschlossen ist, lässt sich an der Druckanzeige des Anschlusses erkennen, dass ein Druck im Opazimeter aufgebaut wird (siehe Abbildung 33). Wenn die in Abbildung 33 zu erkennende grüne LED konstant leuchtet, ist die erfolgreiche Inbetriebnahme des Opazimeters bestätigt.



Abbildung 33: Druckluft-Anschluss Opazimeter



Abbildung 34: Opazimeter

Der Controller zeigt keine weiteren Fehlermeldungen an. Das Opazimeter wäre somit betriebsbereit, wenn es an der Entnahmestelle angeschlossen wäre. Wie auch das Smokemeter benötigt das Opazimeter nach dem Einschalten eine Aufwärmzeit von ca. 20 bis 30 Minuten, bis eine konstante Temperatur erreicht ist. Vor einer Messung sollte das Opazimeter außerdem über den Controller mit dem Befehl „Zeroing“ genullt werden. Dadurch nullt sich das System und liefert eine höhere Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. Zudem kann das System auch über einen etwas aufwändigeren Linearitäts-Check kalibriert werden [9]. In Abbildung 34 ist der Entnahmeschlauch zu erkennen. Es handelt sich dabei um den dickeren, roten Schlauch, der auf der linken Seite des Opazimeters angeschlossen ist. Die Entnahmesonde liegt auf der mittleren Ebene des Rollwagens. Der rote dünnere Schlauch, welcher nicht angeschlossen ist, dient zur Abgasrückfuhr. Das Opazimeter wird in dieser Arbeit nicht an die Entnahmestelle angeschlossen, da der Motor nicht einsatzbereit ist, weshalb keine Versuche durchgeführt werden können. Nach der Prüfung der Funktionalität wurde das Opazimeter wieder an seinen ursprünglichen Ort zurückgeschoben [9].

4.3. Sesam-FTIR

Das Sesam-FTIR-Spektrometer ist zuerst über eine Kraftstromsteckdose mit Spannung zu versorgen und anschließend über den Hauptschalter und den grünen Taster einzuschalten. Die Benutzeroberfläche des FTIRs wird im Morphee 2-System geöffnet. Diese zeigt daraufhin in der Statusleiste „Communication Error“ an (siehe Abbildung 35). In der Abbildung 35 ist die Benutzeroberfläche zu erkennen. Hier würden die momentan aufgenommenen Messdaten angezeigt werden. Zudem ließe sich das FTIR auch hierüber steuern.

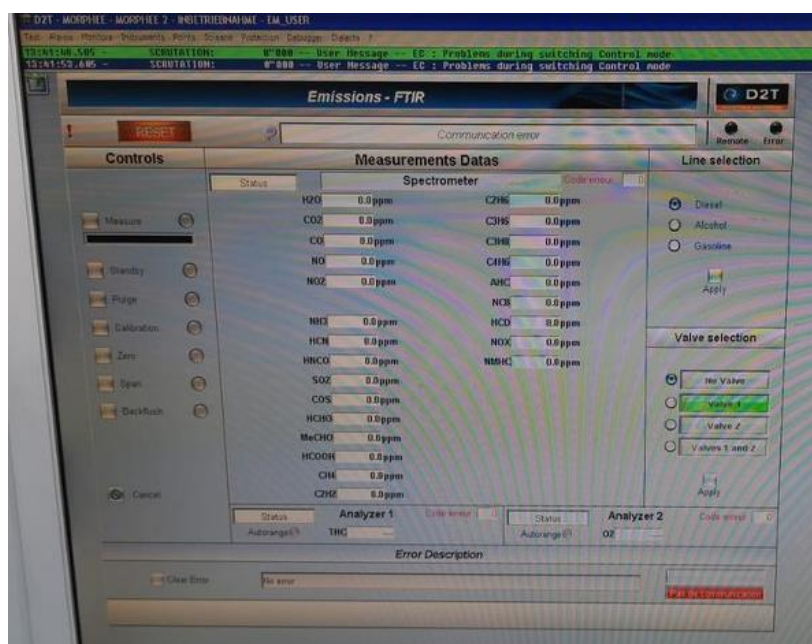


Abbildung 35: Benutzeroberfläche des Sesam-FTIRs in Morphee 2

Aufgrund der angezeigten Fehlermeldung wird versucht, die interne FTIR-Software „PowerBar“ zur Steuerung und Erfassung der Messdaten über eine weitere Schnittstelle in Betrieb zu nehmen [5]. Dafür ist ein provisorischer Arbeitsplatz mit einem Monitor sowie Maus und Tastatur eingerichtet worden. Anschließend wird der Monitor mit dem FTIR verbunden. Der provisorische Aufbau des Monitors zur Benutzung der FTIR-Software ist in Abbildung 36 dargestellt. In der Abbildung 37 sind die vorhandenen Schnittstellen des FTIR zu erkennen, worüber der Monitor angeschlossen ist.

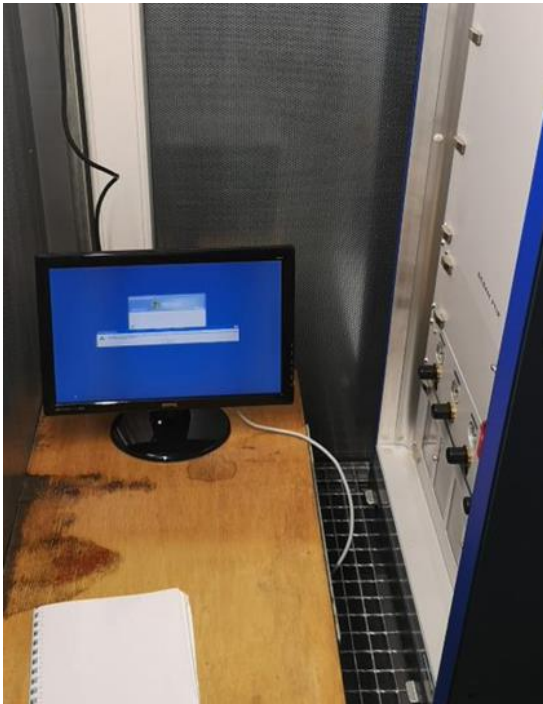


Abbildung 36: Aufbau des Monitors für die FTIR Software



Abbildung 37: Schnittstellen des FTIRs

Die Inbetriebnahme der internen Software des FTIRs zur Steuerung und Erfassung der Messdaten konnte aufgrund der nicht vorhandenen Login-Daten nicht abgeschlossen werden. Dennoch ist die Benutzeroberfläche der FTIR internen PowerBar-Software im Benutzerhandbuch erläutert und in Abbildung 38 auf der folgenden Seite dargestellt. Auf der linken Seite können alle gemessenen Parameter, die während des Betriebes wichtig sind, überwacht werden. Rechts wird der Status der jeweiligen Systemteile angezeigt. Ein Alarmmanager zeigt zudem Warnungen, Fehler- und Statusmeldungen an. In der oberen Leiste ist das Steuerungsmenü vorhanden. Hier können die verschiedenen Analysatoren gesteuert werden, um zum Beispiel Messungen, Spülungen oder Kalibrierungen durchzuführen. Auf der rechten Seite sind außerdem verschiedene Symbole mit den Bezeichnungen Background, System Data und Sampling vorhanden. Die Background-Prüfung dient zur Messvorbereitung. Hier kann der Nullpunkt eingestellt und Referenzmessungen durchgeführt werden, um spektrale Veränderungen zu beseitigen. Unter dem Button

Systemdaten, können alle wichtigen Messwerte aller Systemteile angezeigt werden. Dabei sind vor allem Temperaturen und Drücke der beheizten internen und externen Teile wichtig. Über den Button Sampling gelangt der Bediener zu allen Pneumatikplänen des Systems. Dadurch können alle Gaspfade und Messwerte an gewissen Stellen nachverfolgt werden. Außerdem können hier alle Ventile und die Pumpe manuell geschaltet werden [5].



Abbildung 38: Sesam-FTIR Hauptbedienung [5]

Um Messungen mit dem FTIR durchzuführen, müssen weitere vorbereitende Maßnahmen getroffen werden. Zuerst sind die Leitungen am Prüfstand auf fachgerechte Verlegung zu prüfen. Da die Leitungen im Betrieb Temperaturen von 191 °C erreichen, muss zum Beispiel auf einen ausreichenden Abstand zwischen den Leitungen geachtet werden. Außerdem sollten enge Biegeradien sowie das Quetschen und Überdehnen von Leitungen vermieden werden. Für den Betrieb des FTIRs ist zudem flüssiger Stickstoff (N₂) notwendig, welcher in den Detektor gefüllt wird. An der HAW ist aktuell kein flüssiger Stickstoff vorhanden. Eine Beschaffung des Stickstoffes ist bei einem nicht funktionsfähigen Motorprüfstand derzeit nicht zielführend, da die Lagerung von flüssigem Stickstoff aufgrund seiner geringen Temperatur von -196 °C sehr aufwendig ist. Auch kann der Stickstoff nur einige Tage bis Wochen aufbewahrt werden. Flüssiger Stickstoff ist daher erst zu beschaffen, wenn auch Messungen am Motorprüfstand durchgeführt werden können [5].

Wenn der Detektor mit Stickstoff befüllt ist, muss eine Wartezeit von mindestens 20 Minuten eingeplant werden, bevor die Detektorprüffunktion aktiviert wird. Währenddessen heizen sich die Leitungen auf 191°C auf. Es sollte eine Background-Messung durchgeführt werden, um das System zu nullen und die Qualität zu überprüfen. Durch Spülen des Systems mit dem Nullgas werden Rückstände vom Probegas in den Leitungen und Analysatoren entfernt. Außerdem kann der Filter durch die Druckluft gespült und gereinigt werden. Die Analysatoren sind über die Autokalibrierfunktion durch ein externes Testgas zu kalibrieren, um die Null- und Endpunkte einzustellen. Nachdem die wichtigsten vorbereitenden Maßnahmen abgeschlossen sind, können die Abgasmessungen durchgeführt werden [5].

Das FTIR-System an der HAW ist momentan nicht mit der Entnahmestelle verbunden. Dies müsste bei einer erneuten Inbetriebnahme und einem funktionstüchtigen Motorprüfstand vorgenommen werden. Die Leitungen inklusive des Vorfilters sind bereits bis zur Entnahmestelle verlegt, weshalb die Montage an die Entnahmestelle keinen großen Aufwand darstellen sollte. Die Abgasrückführungen sind an die Abgasanlage angeschlossen.

Da das System seit längerer Zeit nicht im Einsatz war und der Zustand nicht eindeutig bekannt ist, sollten vor einer Inbetriebnahme inklusive repräsentativer Messungen folgende jährliche Wartungsmaßnahmen beachtet werden [5]:

- Reinigung der Gaszelle
- Prüfen der Schläuche der Schlauchradpumpe
- Reinigung der Gaszellenspiegel mit einem Dampfstrahler oder Ultraschallbad
- Reinigung des Gaskühlers [5]

Zusammenfassend sollten für einen erfolgreichen Betrieb des FTIR-Systems in Zukunft die Login-Daten für die PowerBar-Software ermittelt oder der Verbindungsfehler zum Morphee 2 System gelöst werden. Außerdem ist flüssiger Stickstoff für einen funktionstüchtigen Detektor zu beschaffen und das System an die Entnahmestelle anzuschließen.

5. Planung einer Messkampagne

Da der Motorprüfstand für eine Referenzmessung mit Diesel und einem alternativen Kraftstoff nicht verfügbar ist, wird sich in diesem Kapitel auf die theoretische Planung einer Messkampagne fokussiert. Die Planung der Messkampagne dient als Vorbereitung für studentische Laborversuche, die sich mit dem Thema alternative Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren beschäftigen. So haben die Studierenden in Zukunft die Möglichkeit, an der HAW Hamburg erste praktische Erfahrungen in einem aktuellen und sehr häufig diskutierten Themengebiet zu sammeln. Bei den Laborversuchen werden die Studierenden mit der Funktionsweise eines Dieselmotors und der Abgasanalytik vertraut gemacht. Außerdem wird durch die Referenzmessung die Wichtigkeit der Abgasanalytik in der modernen Entwicklung von Verbrennungsmotoren verdeutlicht. Daneben erweitern die Studierenden ihr Wissen in Bezug auf die Schadstoffemissionen eines Verbrennungsmotors und dessen Beeinflussung durch Verwendung oder Zugabe von alternativen Kraftstoffen. Um diesen Einfluss später erklären zu können, müssen sie sich auch mit dem chemischen Aufbau und der Herstellung der verschiedenen alternativen Kraftstoffe auseinandersetzen. Die Lerninhalte, die mit diesem Versuch vermittelt werden, sind komplex und vielfältig. Zugleich gewinnt dieses aktuelle Thema im Verkehrssektor, bei mobilen Maschinen und in der dezentralen Energieerzeugung zunehmend an Bedeutung.

Versuchsdurchführung

Der durchzuführende Versuch basiert auf der Grundlage eines vorher angefertigten Laborskriptes. Das Laborskript ist den Studierenden vor dem Versuchstermin zur Verfügung zu stellen, damit sie sich in das Themengebiet einlesen und auf den Versuchsablauf vorbereiten können. Das Laborskript sollte typischerweise folgende Informationen beinhalten [35]:

- Organisatorische Informationen
 - Kontaktdaten des Professors
 - Angaben zur Gruppeneinteilung
 - Angaben zur Versuchsterminvergabe
 - Sicherheitshinweise
 - Angaben zur Anfertigung des Protokolls
- Kurze Einleitung
 - Erläuterung der Wichtigkeit des behandelten Themas
 - Erläuterung der Aktualität des behandelten Themas
- Kurze Vorstellung des Prüfstandes
 - Komponenten und Funktionsweise des Prüfstandes

- Abgasanalytik
- Technische Daten des Dieselmotors und der Abgasanalytik
- Software zur Erfassung der Messdaten
- Versuchsdurchführung (Anleitung zur Durchführung der Messkampagne)
 - Vorbereitungsmaßnahmen
 - Welche Messpunkte sollen angefahren werden und wie erfolgt dies
 - Was soll untersucht werden
 - Wie werden die Messungen erfasst und gespeichert
- Versuchsauswertung (Anleitung zur Auswertung der Messkampagne)
 - Gegebenenfalls Bereitstellung von konstanten Parametern
 - Darstellung von Beispiel Diagrammen
 - Gegebenenfalls Beispielrechnungen [35]

Damit eine einheitliche und reproduzierbare Referenzmessung durchgeführt werden kann, ist festzulegen, welche Abgasbestandteile gemessen und dokumentiert werden sollen. Die Messung der Feststoffe im Abgas erfolgt mit Hilfe des Smokemeter und des Opazimeters. Das Smokemeter bestimmt den Rußgehalt und liefert die FSN als Referenzwert. Das Opazimeter misst die Abgastrübung und gibt diese als Opazität an. Das FTIR dagegen, kann wie im Abschnitt 4 im Anhang zu sehen, eine Vielzahl von gasförmigen Abgaskomponenten messen und berechnen. In der Messkampagne spielen vor allem Stickstoffoxide eine wichtige Rolle. Durch die Ermittlung des Rußgehaltes durch das Smokemeter und der Stickstoffoxide durch das FTIR, kann in der Auswertung der Trade-Off beider Abgaskomponenten veranschaulicht werden. Nach der Referenzmessung mit dem OME-Blend kann außerdem die Veränderung des Zusammenhangs zwischen den beiden Abgaskomponenten analysiert und dessen Bedeutung für die Emissionen eines Dieselmotors verdeutlicht werden. Des Weiteren können andere Schadstoffe wie unverbrannte Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid untersucht werden. Schwefeldioxid spielt in der Messkampagne eine geringe Rolle, da der heutige Dieselmotorkraftstoff einen sehr geringen Schwefelanteil besitzt und OME schwefelfrei ist. Aus diesem Grund ist Schwefeldioxid bei der Messung und Auswertung nicht zwingend zu untersuchen. Neben den Schadstoffen sollte auch die CO₂-Konzentration mit aufgenommen, da diese aufgrund des maßgeblichen Einflusses von CO₂ auf den Treibhauseffekt aus klimatischer Sicht eine wichtige Rolle spielt.

Damit die Referenzmessung durchgeführt werden kann, sind bestimmte Rahmenbedingungen einzuhalten. Unter folgenden Bedingungen werden möglichst reproduzierbare und aussagekräftige Messergebnisse erhalten [7]:

- Konstante Umgebungstemperatur
- Konstanter Umgebungsdruck

- Konstanter Abgasgegendruck
- Einhaltung des optimalen Messbereiches der Messtechnik
- Identischer Versuchsaufbau und -durchführung [7]

Versuchsablauf

Der Versuchsablauf gliedert sich in zwei Teile. Zuerst ist eine Abgasmessung mit einem konventionellen Dieseldieselkraftstoff nach Din EN 590 durchzuführen. Danach wird OME dem Dieseldieselkraftstoff in einem Verhältnis von eins zu zehn beigemischt. Anschließend folgt die Referenzmessung mit dem OME-Blend. Bevor die Messungen erfolgen, sind bestimmte Vorbereitungen zutreffen. Nach dem Starten des Motors über das Morphee 2 System, ist der Motor über das Einstellen der Sollparameter auf eine Öltemperatur von 90 °C warmzufahren. Zudem ist sicherzustellen, dass die Abgasanalytik nach dem Einschalten voll funktionstüchtig ist und keine Warn- oder Fehlermeldung angezeigt werden. Nun können die Messungen durchgeführt werden. Über die Prüfstandsteuerung sind die Sollwerte für die Fahrpedalstellung sowie die Drehzahl für verschiedene stationäre Messpunkte einzustellen. Dabei beeinflussen die Sollparameter das Drehmoment des Motors, den Nutzmitteldruck, den effektiven Verbrauch und letztendlich die Leistung des Motors. Für einen vielseitigen Messumfang ist es sinnvoll, Messpunkte mit einer erwartbar hohen, niedrigen sowie mittleren Abgasemission zu untersuchen. Die Fahrpedalstellung kann hierfür von 0 bis 100 % eingestellt werden. Der theoretische Drehzahlbereich des Dieselmotors liegt zwischen 0 und 5.000 Umdrehungen pro Minute (U/min). Praktisch gesehen liegen die Drehzahlen von 4.500 bis 5.000 U/min jedoch im roten Bereich und sollten deshalb nicht angesteuert werden. Aus dem Motorkennfeld (siehe Abbildung 39) des Dieselmotors können spezielle Messpunkte abgeleitet werden. Die folgenden stationären Messpunkte sind für eine Abgasuntersuchung in der Messkampagne interessant. Sie sind zudem im Motorkennfeld in Abbildung 39 in unterschiedlichen Farben gekennzeichnet.

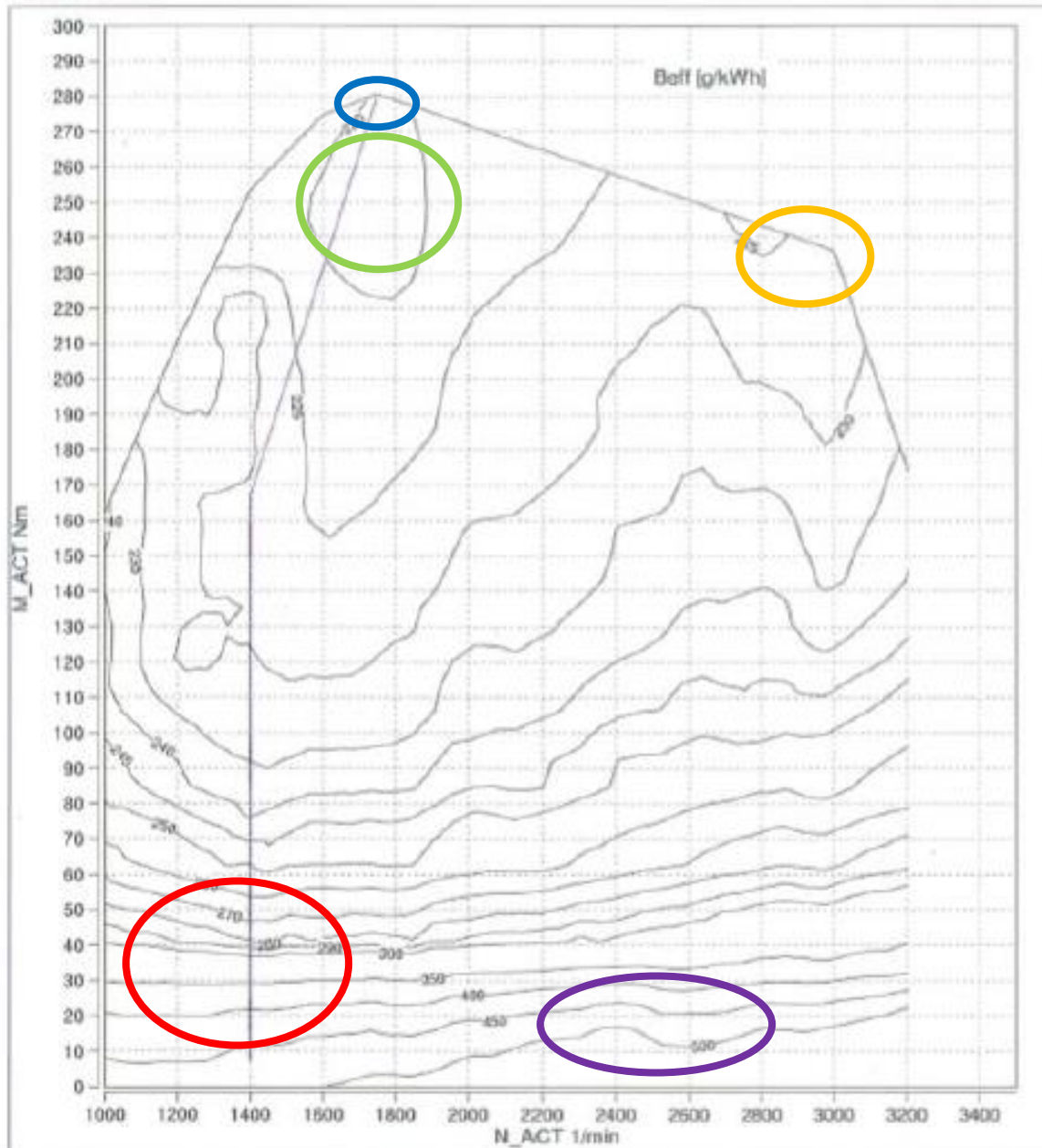
- Maximales Drehmoment (Blau)
- Maximale Leistung (Gelb)
- Verbrauchs-Bestpunkt (Grün)
- Punkt unten links im Kennfeld, bei den Fahrzyklen (Rot)
- Punkt mit hohem effektivem Kraftstoffverbrauch (Lila)

Die oben genannten Messpunkte sind während der Versuchsdurchführung über die Sollparameter anzusteuern. Dafür ist zuerst die aus dem Kennfeld bekannte Drehzahl für den jeweiligen Messpunkt einzustellen. Über die Fahrpedalstellung lässt sich das Drehmoment anpassen. Nachdem die Sollparameter eingestellt sind, ist abzuwarten, bis der stationäre Zustand erreicht ist. Danach können die Abgasuntersuchungen am jeweiligen stationären Messpunkt durchgeführt werden.

IMO 2I-4V-CR-TDI 75 kW Euro5 Tremo

Kennfeld Normalbetrieb mit DPF

Datum: 2009-04-09



Versuch:		Motorfabrik:		Kraftstoff Motor-Öl:			
AS3_B5	FRS-C.3WVG_1	HUBRAUM	l	1.568	Rhe_YS	kgm3	806.70
PPNAME	PST10	Zyl_Anc	-	4	Hu	M/hg	42.940
Ergebnis	9D18KF04	Zyl_Bohr	mm	81.8	Öl_Zahl	-	55.8
		Zyl_Höb	mm	95.5	L_Strauch	-	14.68
		MOTORNR	-	C80 124800	HCV	-	1.9
					Öl/Ste	-	5-W30 Langfr
DS. GLOWORVLF00K_10_Zertifizierung							

Abbildung 39: Motorkennfeld des Dieselmotors an der HAW Hamburg [35]

Im ersten Versuchsteil sind nun die stationären Messpunkte über die Regelung der Sollparameter einzustellen und die Abgasemissionen des konventionellen Dieselkraftstoffes über aufzunehmen. Dabei werden die Messdaten über die jeweilig verwendete Schnittstelle erfasst und abgespeichert. Der Versuchsteil ist abgeschlossen, wenn alle Messpunkte angesteuert und die Emissionsmessungen durchgeführt wurden.

Damit der Motor im zweiten Versuchsteil mit dem OME-Blend betrieben werden kann, ist hierfür die Kraftstoffversorgung des Motors anzupassen. In dem in Abbildung 40 gezeigten schwarzen Behälter lässt sich dem Dieselkraftstoff OME bei einem Verhältnis von eins zu zehn beimischen. Welches Verhältnis von Dieselkraftstoff zu OME untersucht werden kann, hängt von der Art des vorhandenen OME-Kraftstoffes ab. Ein zu hoher OME-Anteil und daraus resultierende, stark abweichende Kraftstoffeigenschaften könnten bei einem längeren Betrieb zu Schäden am Motor führen. Ist der Behälter mit dem OME-Blend befüllt, wird der Motor gestartet. Es ist zu beachten, dass der Motor mindestens zehn Minuten eingefahren werden muss, damit das Kraftstoffgemisch in allen Leitungen des Motors vorhanden ist. Dadurch wird vermieden, dass reiner Dieselkraftstoff in den Leitungen das Verhältnis des OME-Blends verändert und die Messergebnisse der ersten Messpunkte verfälscht.



Abbildung 40: Kraftstoffbehälter

Wenn der Motor mit dem OME-Blend eingefahren ist, werden über die Sollparameter die gleichen Messpunkte wie im ersten Versuchsteil angesteuert und die Abgaswerte aufgenommen. Abschließend wird der Prüfstand über die Steuerung heruntergefahren und der Versuch nach erfolgreicher Aufnahme aller notwendiger Messdaten beendet.

Laborprotokoll

Wie an der HAW Hamburg üblich, wird nach der Versuchsteilnahme ein Laborprotokoll von den Studierenden angefertigt und beim betreuenden Professor abgegeben. Das Protokoll sollte nach folgendem Schema aufgebaut sein [35].:

- Deckblatt
- Inhaltsverzeichnis
- Gegebenenfalls Symbol- und Abkürzungsverzeichnis
- Gegebenenfalls Tabellen- und Abbildungsverzeichnis
- Einleitung
- Prüfstandbeschreibung
 - Vorstellung des Gesamtprüfstandes inklusive Skizze
 - Vorstellung der Abgasanalytik
- Versuchsbeschreibung
- Ergebnisse und Diskussion
- Fazit
- Literaturverzeichnis
- Anhang

Bei der Diskussion der Ergebnisse gilt es, die aufgenommenen Messwerte auf ihre Plausibilität und Validität zu prüfen. Außerdem sollen die Messdaten beschrieben und anschließend analysiert werden. Wichtig für die Studierenden ist hierbei das Verstehen der Zusammenhänge zwischen den verwendeten Kraftstoffen und der daraus resultierenden Abgaszusammensetzung. Die Zusammenhänge und die Entwicklung des NO_x-Ruß-Tradeoffs spielen dabei eine entscheidende Rolle. Außerdem müssen auch die Auswirkungen der Veränderung der Sollparameter auf die Abgasemissionen in der Auswertung berücksichtigt werden. Zusammenfassend können die Studierenden nach der Auswertung der Messergebnisse beurteilen, inwiefern ein OME-Blend eine kurzfristige Lösung für das klimafreundlichere Betreiben eines Verbrennungsmotors sein kann.

Auswertung/Prognose

Da bereits in der allgemeinen Forschungslandschaft verschiedene erste Untersuchungen von OME-Blends in Verbrennungsmotoren durchgeführt worden sind, kann eine Prognose für die theoretisch zu erwartenden Messergebnissen getroffen werden. Die Untersuchungen beziehen sich dabei größtenteils auf die Analyse des Abgases bei unterschiedlichen Mischverhältnissen von OME mit dem konventionellen Dieselmotorkraftstoff. Bei den Versuchen muss zudem beachtet werden, dass es unterschiedliche Arten des OME-Kraftstoffes gibt. Je nachdem wie die Kraftstoffe synthetisiert werden, besitzen diese eine unterschiedliche Anzahl

von Monomereinheiten, wodurch die Kettenlänge und die physikalischen Eigenschaften beeinflusst werden. Dies wirkt sich auf die zu erwartenden Messergebnisse aus. In bereits durchgeführten Versuchen wird meist ein OME-Gemisch aus verschiedenen OME-Arten als OME-Kraftstoff verwendet. Für den geplanten Versuch an der HAW müsste daher bekannt sein, was für ein OME-Gemisch verwendet wird. Wichtig dabei ist, dass das OME-Gemisch möglichst ähnliche Stoffeigenschaften wie der Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 590 besitzt, damit der Motor auf Dauer nicht beschädigt wird, wenn ein hoher OME-Anteil in dem Blend untersucht werden soll. Bei der Verwendung von OME3-5 kann das Mischungsverhältnis mit Diesel beispielsweise zwischen fünf und sieben Prozent liegen, bei gleichzeitiger Einhaltung der Kraftstoffnorm [17].

Die Abbildung 41 zeigt ein Diagramm, welches den Zusammenhang zwischen den OME-Blendanteilen und den **CO₂-Emissionen** darstellt. Die CO₂-Emissionen werden mit der Verwendung eines üblichen Dieseldieselkraftstoffes mit einem Biodieseldieselanteil von bis zu sieben Prozent verglichen. Außerdem basiert das Diagramm auf der Annahme, dass OME regenerativ hergestellt wurde, also CO₂-neutral ist und der Wirkungsgrad unabhängig vom Blendanteil konstant bleibt. Es ist zu erkennen, dass bei einem OME-Anteil von 15 Prozent, knapp 9,1 Prozent der CO₂-Emissionen eingespart werden können. Wird der Blendanteil erhöht, verringert sich der CO₂-Ausstoß. Auf Grundlage dieser Analyse werden ähnliche Ergebnisse für den Versuch an der HAW erwartet. Dennoch ist mit Abweichungen zu rechnen, da in der vorgestellten Analyse ein Versuchsmotor mit vier-Zylindern und einer Leistung von 110 kW unter Realbedingungen mit einem portablen Emissionsmesssystem untersucht wurde, während der Prüfling an der HAW nur eine Leistung von maximal 75 kW hat und stationär betrieben wird. Unter Berücksichtigung der Abweichungen wird davon ausgegangen, dass der zukünftige Versuch an der HAW den Zusammenhang, dass bei einem höherem OME-Blendanteil die CO₂-Emissionen sinken, bestätigen kann [17] [35].

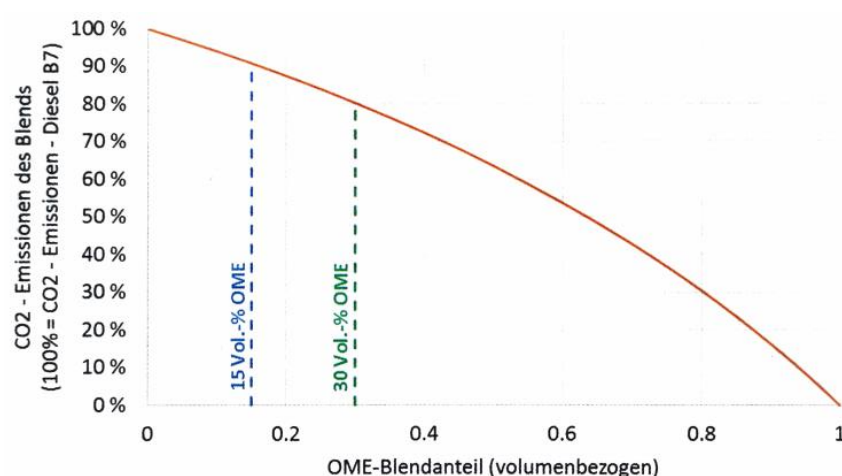


Abbildung 41: CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des OME-Blendanteils [17]

Neben den CO₂-Emissionen spielt der **NO_x-Ruß-Tradeoff** eine entscheidende Rolle. Auch hierzu gibt es bereits erste Untersuchungen. Die folgenden Diagramme in der Abbildung 42 stellen die Ergebnisse eines Versuches mit einem Einzylinder Dieselmotor nach EU5 dar. Untersucht worden sind zwei Teillastpunkte mit einem effektiven Mitteldruck von 4,2 und 14 bar bei einer Drehzahl von 1.500 und 2.280 U/min. Zum Vergleich sind ein Dieselmotorkraftstoff nach DIN EN 590, eine reine OME-Mischung aus verschiedenen Kettenlängen und ein OME-Blend mit 15 Prozent OME-Anteil verwendet worden. Wie in dem linken Diagramm zu erkennen ist, verringert der 15-prozentige OME-Blend die NO_x- und Rußemissionen im Lastpunkt bei einer Drehzahl von 1500 U/min und einem effektiven Mitteldruck von 4,2 bar erheblich. Nur das OME als Reinstoff kann den Tradeoff komplett auflösen, da keine messbaren Rußemissionen entstehen. Zudem fällt auf, dass im zweiten Lastpunkt bei einer hohen Drehzahl und einem hohen effektiven Mitteldruck die Emissionen bei dem OME-Blend gegenüber dem konventionellen Dieselmotorkraftstoff weniger verringert werden als im ersten Lastpunkt. Der Emissionsverlauf des OME-Blends ist somit im ersten Lastpunkt ähnlich zum reinen OME und im zweiten Lastpunkt zum konventionellen Dieselmotorkraftstoff. Durch die Abgasanalytik an der HAW sollte dieser Zusammenhang ebenfalls nachweisbar sein, da das Smokemeter die FSN und das FTIR die NO_x-Konzentration aufnehmen kann [17].

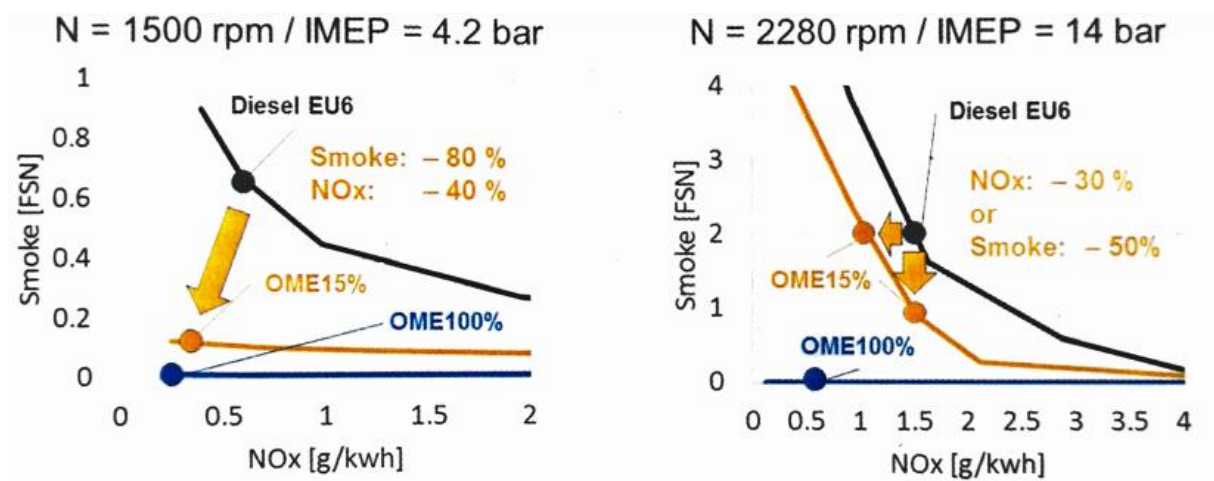


Abbildung 42: NO_x-Ruß-Tradeoff von zwei Teillastpunkten mit Diesel, OME und 15% OME [17]

Im Hinblick auf die Trübungsmessung mit dem Opazimeter sollte bei der Verwendung des OME-Blends eine geringere Opazität im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff nachweisbar sein. Die Opazität würde zudem bei höheren Teillastpunkten zunehmen.

Neben der oben genannten und geplanten Versuchsdurchführung mit einem OME-Anteil des Blends von zehn Prozent ließe sich der Versuch auch durch weitere Faktoren erweitern. Zum einen könnten verschiedene OME-Gemische mit unterschiedlichen physikalischen

Eigenschaften beschafft werden und Referenzmessungen mit dem Dieselmotorkraftstoff, sowie den verschiedenen OME-Gemischen durchgeführt werden. Zum anderen wären auch mehrere Referenzmessungen mit verschiedenen OME-Anteilen im Blend sinnvoll. Dadurch könnte der Einfluss von OME auf die Abgasemissionen noch detaillierter untersucht werden. Der OME-Anteil im Blend könnte jedoch nur so weit erhöht werden, bis an dem Motor Veränderungen vorgenommen werden müssten. Bei einem sehr hohen OME-Anteil oder OME als Reinstoff müssten beispielsweise die Kraftstoffdüsen ausgetauscht werden, um die Funktionalität und Langlebigkeit des Dieselmotors zu gewährleisten [17].

6. Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend sind in dieser Arbeit die komplexen Themengebiete rund um das Ziel CO₂- und Schadstoffemissionen in verschiedenen Anwendungsbereichen des Dieselmotors zu reduzieren, vorgestellt und analysiert worden. Im Folgenden werden die wichtigsten inhaltlichen Aspekte dieser Arbeit zusammengefasst und bewertet. Abschließend wird auf die Forschungsfrage aus der Einleitung Bezug genommen und ein persönlicher Ausblick auf die weitere Entwicklung gegeben.

Zusammenfassung

Das wesentliche Problem bei der derzeitigen flächendeckenden Verwendung von konventionellem Dieseldieselkraftstoff ist die schlechte CO₂- und Schadstoffbilanz, durch die Herstellung über fossile Rohstoffe und lokal hohe Emissionen von Stickstoffoxiden, CO₂ und Partikeln beim Verbrennungsprozess. Zeitgleich verschärfen sich die Emissionsgrenzwerte durch politische Regularien, wobei inner- und außermotorische Maßnahmen zur Verbesserung der Emissionen an ihre Grenzen kommen. Die bereits verbreitete Zumischung von Biodiesel hat dabei in den letzten Jahren zu keiner großen Verbesserung im Hinblick auf die Klimabilanz des Dieselmotors geführt und kann der Forderung von klimaneutralen Motoren in naher Zukunft nicht gerecht werden. Speziell die Herstellung von Kraftstoffen über nachwachsende Rohstoffe wie Raps, Soja oder Palmöl sorgt neben dem positiven Aspekt der Unabhängigkeit von fossilem Rohöl, zu massenhaften Regenwaldrodungen in Brasilien für Palmöl- und Sojaplantagen und weltweit flächendeckenden Monokulturen im Bereich der Landwirtschaft. In der Entwicklung von alternativen Kraftstoffen müssen diese zudem hohe Anforderungen erfüllen. Ziel dabei ist es, einen Treibstoff mit möglichst lokal geringen schädlichen Emissionen zu entwickeln, der den chemischen Eigenschaften der DIN EN 590 gerecht wird, damit an Bestandsmotoren keine kostenintensiven Veränderungen durchgeführt werden müssen. Dadurch könnten seit Jahrzehnten eingesetzte alte Dieselmotoren in der Bestandsflotte, auch unter zukünftig strengeren Emissionsgrenzen verwendet und klimaneutral betrieben werden. Auch spielt die Art und Weise der Herstellung der Kraftstoffe eine große Rolle. Zukunftsorientiert sollte die Herstellung bevorzugt über regenerativen Strom erfolgen, da durch die nachhaltige Gewinnung keine Rohstoffe gefährdet werden. Voraussetzung dafür ist ein flächendeckender Ausbau von erneuerbaren Energien, um dem Energieaufwand in der Herstellung gerecht zu werden. Des Weiteren spielen Faktoren wie eine möglichst einfache Handhabbarkeit im Bereich der Logistik des Kraftstoffes eine entscheidende Rolle. Dies vereinfacht die Integration des Vertriebes des Kraftstoffes in die bereits vorhandene Infrastruktur. Dadurch kann die flächendeckende Einführung schnell und verhältnismäßig kostengünstig erfolgen. In der aktuellen Forschungslandschaft wird hauptsächlich die

Einführung von verschiedenen **synthetischen Kraftstoffen** untersucht. Basierend auf den Primärenergien können diese über unterschiedliche Verfahren hergestellt werden. Durch die synthetische Herstellung können die chemischen Eigenschaften des Kraftstoffes angepasst werden, welche zu verbesserten lokalen Emissionen beim Verbrennungsprozess führt. Die Zukunftsfähigkeit der verschiedenen synthetischen Kraftstoffe hängt dabei vom Herstellungsprozess ab. GtL-, CtL- und BtL-Kraftstoffe besitzen dadurch eine weniger vielversprechende Zukunftsperspektive als E-Fuels. E-Fuels haben den großen Vorteil über regenerativen Strom hergestellt zu werden und durch den Produktionsprozess über Wasserstoff und CO₂ einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf zu schaffen. Dadurch können Kraftstoffe theoretisch ohne Mengenbegrenzung klimaneutral hergestellt werden. Problematisch sind die aktuell noch hohen Wirkungsgradverluste bei der Herstellung und die daraus resultierenden hohen Kosten. Durch höhere Investitionen und weiterer Entwicklungsarbeit könnten diese Probleme in Zukunft verbessert werden. Auf Basis des E-Fuel Verfahrens können die Kraftstoffe OME, DME, Methanol und Ethanol synthetisch hergestellt werden. Methanol dient dabei als Grundlage für die Herstellung von OME sowie DME und kann aufgrund von verschiedenen Faktoren eine zentrale Rolle in der Energiewende einnehmen. Die Herstellung von Methanol als E-Fuel beruht auf Wasserstoff sowie CO₂ und kann über verschiedene Verfahren mit regenerativen Energien ablaufen. Methanol kann zudem als Kraftstoff in modifizierten Dieselmotoren eingesetzt werden, wodurch geringere lokale Emissionen beim Verbrennungsprozess entstehen. Weiterhin bietet Methanol die Chance, die Energie von stark schwankendem regenerativem Strom zu speichern. Zudem können derzeit betriebene Methanol-Produktionsstätten, die fossile Energien zur Herstellung verwenden, Methanol durch geringe Umbaumaßnahmen regenerativ produzieren und zeitgleich ökonomische Vorteile bieten. Neben der Verwendung von Methanol als Kraftstoff spielt es in der Produktion der synthetischen Kraftstoffe OME und DME eine zentrale Rolle. Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften besitzt vor allem OME das Potenzial, sich zukünftig zu einem attraktiven und klimaneutralen Treibstoff für Dieselmotoren zu entwickeln. Neben der möglichen Herstellung über Methanol und erneuerbare Energien birgt OME extreme Vorteile in Bezug auf die lokalen Emissionen. Bei der Verwendung als Blend mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff sorgt es für eine erhebliche Reduzierung von Partikeln und als Reinstoff sogar zu einer nahezu partikelfreien Verbrennung. Dadurch löst es das zentrale Problem des NO_x-Ruß Tradeoffs im Bereich der Abgasemissionen von Dieselmotoren. Aufgrund seiner guten motorischen Eigenschaften verbessert OME zudem den Wirkungsgrad und kann durch die Anpassung der Abgasnachbehandlung auch die NO_x-Emissionen weiter vermindern.

Im Hinblick auf die **Abgasemissionen** des Dieselmotors spielen aus klimatischer und gesundheitlicher Sicht vor allem CO₂, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Stickstoffoxide und Partikel eine entscheidende Rolle. CO₂ ist zwar kein Schadstoff, gilt aber als

Treibhausgas, welches das Ziel einer geringeren Erderwärmung maßgeblich beeinflusst. Stickstoffoxide sind besonders in Ballungsgebieten mitverantwortlich für die Luftbelastung und Ozonbildung und können langfristig dauerhafte gesundheitliche Risiken für den Mensch darstellen. Es wird zudem davon ausgegangen, dass Partikel zu diversen Krankheiten im Bereich der Atemwege und der Lunge führen können. Die Bildung der Abgaskomponenten wird hauptsächlich durch die lokale Flammtemperatur und das Luftverhältnis beeinflusst. Die Emissionen werden seit Jahren zusätzlich durch die Entwicklung von optimierten inner- und außermotorischen Maßnahmen stetig verbessert. Durch die steigenden Anforderungen durch gesetzliche Emissionsgrenzwerte geraten die Maßnahmen an ihr Limit, welches die zukünftige Relevanz von alternativen Kraftstoffen verdeutlicht. Die alternativen Kraftstoffe beeinflussen dabei maßgeblich die Abgaszusammensetzung. Dies ist auf die Veränderung der chemischen Struktur der Kraftstoffe zurückzuführen. Die Kraftstoffe haben oftmals einen höheren Sauerstoffanteil bei zugleich geringerem Kohlenstoffgehalt und einem besseren H/C-Verhältnis. Durch die Synthese-Verfahren können zudem Störstoffe einfacher vermieden und auf Aromate verzichtet werden.

Im Allgemeinen ist in Bezug auf das Themengebiet der **alternativen Kraftstoffe** und ihren **Einfluss auf die Emissionen** eines Dieselmotors festzustellen, dass diese zukünftig die Möglichkeit bieten, Dieselmotoren klimaneutral betreiben zu können. Durch die Herstellung über regenerativen Strom mit Wasserstoff und CO₂ werden fossile und nachwachsende Rohstoffe geschont und ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf ermöglicht. Die Herausforderungen liegen lediglich in der Optimierung der Wirkungsgradverluste, der hohen Kosten in der Herstellung und der flächendeckend ausgebauten Produktion. Aufgrund der motorischen Eigenschaften und der praktisch rußfreien Verbrennung besitzt vor allem OME ein sehr großes Potenzial, kurz- und mittelfristig eine Alternative zum konventionellen Dieselmotorkraftstoff darzustellen.

In Bezug auf die Emissionen des Dieselmotors spielt die **Abgasanalytik** eine zentrale Rolle. Die Abgasanalytik rückt bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren und alternativen Kraftstoffen zur Messung und Beurteilung der Abgaskomponenten und deren Konzentration immer weiter in den Fokus. Dies liegt vor allem an der zunehmenden Wichtigkeit der Abgasemissionen in Bezug auf die Klimarelevanz und den stetig wachsenden Anforderungen durch gesetzlich geregelte Emissionsgrenzwerte und neue verpflichtende Messverfahren. Die Abgasmesstechnik kommt dabei in den Bereichen der Typprüfung und der Entwicklung zum Einsatz und ist für die Umsetzung von klimafreundlicheren Maßnahmen sehr relevant. Zur Messung der gasförmigen Emissionen in einer Abgasmessanlage ist oftmals eine Messgasaufbereitung notwendig. Das Abgas wird hierbei zuerst verdünnt oder teilverdünnt, bevor es gemessen wird. Im Bereich der verdünnten Abgasmessung spielt das CVS-Verfahren international eine zentrale Rolle. Wird das Abgas unverdünnt gemessen, muss für die meisten

Analysatoren die Kondensation von Wasser in den Leitungen zwingend vermieden werden. Zudem werden Vorfilter eingesetzt, um Verschmutzungen in der Messanlage zu vermeiden. Im Entwicklungsbereich wird überwiegend unverdünnt gemessen, da eine unverdünnte Messung günstiger und einfacher umsetzbar ist. Grundlegend wird in der Abgasanalytik zwischen der Messung von gasförmigen Bestandteilen und Feststoffen wie Partikeln unterschieden. Für die Messung von **gasförmigen Komponenten** spielen hauptsächlich die Messtechniken NDIR (CO, CO₂), FID (THC), FTIR (diverse), CLD (NO_x) und PMD (O₂) eine zentrale Rolle. Das FTIR-Spektrometer hat dabei aufgrund der Möglichkeit, eine große Anzahl an verschiedenen Abgaskomponenten zu messen und zu berechnen, eine besondere Bedeutung. Im Entwicklungsbereich kann eine Messanlage mit einem FTIR-System bereits ausreichen, da es die wichtigsten gasförmigen Bestandteile messen kann. Die anderen genannten Messprinzipien dienen zur speziellen Bestimmung von ein oder zwei verschiedenen Abgaskomponenten. Die Messgeräte werden meist über eine Schnittstelle mit einem externen Monitor verbunden, worüber die Erfassung und Speicherung der Messdaten sowie die Steuerung des Systems erfolgt. Im Bereich der Messung der **Feststoffe** spielen die Messprinzipien des Opazimeters (Trübung), des Smokemeters (FSN) und des PASS (Partikelmasse)- und CPC (Partikelanzahl)-Verfahrens eine wichtige Rolle. Das Smokemeter und das Opazimeter werden aufgrund des einfachen Messprinzips und der geringen Kosten häufig im Entwicklungsbereich verwendet. In den letzten Jahren haben aufgrund von neuen Richtlinien in der Abgasuntersuchung zudem die Messverfahren zur Bestimmung der Partikelanzahl an Bedeutung gewonnen, wobei hauptsächlich das CPC-Verfahren zum Einsatz kommt. Infolge der Gesetzgebung seit 2016 müssen die Abgase außerdem über die portable Abgasmessung (PEMS) während Realfahrten im RDE-Verfahren untersucht werden.

Insgesamt fällt auf, dass die **Anforderungen an die Messtechnik** und die Messverfahren immer komplexer werden, um den gesetzlichen Forderungen gerecht zu werden. Zudem stellt der Einsatz von alternativen Kraftstoffen die Abgasanalytik vor noch höhere Herausforderungen. Die Untersuchung des Endgases wird weiterhin durch moderne Abgasmachbehandlungssysteme, die zu hohen Drücken und Temperaturen an der Entnahmestelle, aber auch zu sehr geringen Abgaskonzentrationen im Endgas führen, noch komplexer. Bezogen auf die Abgasanalyse von alternativen Kraftstoffen wird eine hohe Messgenauigkeit bei zugleich niedrigsten Konzentrationen, eine sehr niedrige Nachweisgrenze sowie die Messung von vielfältigen Komponenten gefordert. Des Weiteren stoßen lange Zeit eingesetzte Messgasaufbereitungen, wie das CVS-Verfahren durch die neuen niedrigen Abgaskonzentrationen an ihr Limit, da durch die Verdünnung des Abgases die Konzentrationen der Komponenten zusätzlich verringert werden. Daraus resultiert, dass entweder die Analysatoren noch empfindlicher sein müssen oder neue Verfahren ohne eine Verdünnung des Abgases entwickelt werden sollten. Die moderne Abgasanalytik muss zudem schnell auf neue Anforderungen angepasst werden können, um neue gesetzlich verpflichtende

Messverfahren wie die PEMS oder die Messung der Partikelanzahl kurzfristig umsetzen zu können. Wichtig zu verstehen ist, dass die Abgasanalytik die Grundlage zur Entwicklung neuer Motorkonzepte und alternativer Kraftstoffe bildet, da die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Emissionen nur durch die Abgasanalytik untersucht werden können.

Für den **praktischen Teil** der Thesis ist festzuhalten, dass der Dieselmotor-Prüfstand an der HAW aufgrund von technischen Problemen aktuell nicht einsatzfähig ist. Es ist bereits eine Firma beauftragt worden, die Fehler zu beheben, damit der Prüfstand in naher Zukunft für Versuche im Kontext alternativer Kraftstoffe eingesetzt werden kann.

Bei der Durchführung der **Inbetriebnahme der Abgasanalytik** wurde die Funktionalität der drei Messgeräte erfolgreich überprüft. Das Smokemeter ist an der Entnahmestelle angeschlossen und nach dem Resetten des Systems mit Morphee 2 verbunden. In der Statusleiste wird dann jedoch die Fehlermeldung 20 „Flow is too low“ angezeigt. Dies kann verschiedene Ursachen haben wie zum Beispiel eine verstopfte Entnahmesonde oder Leitung, ein zu stark verschmutzter Schutzfilter oder eine funktionslose Pumpe. Es sollte in Zukunft überprüft werden, ob die Fehlermeldung auch bei einem laufenden Motor auftritt. Wenn ja, müssen die Maßnahmen zur Fehlerbehebung aus dem Benutzerhandbuch durchgeführt werden. Das Opazimeter wird über den Controller gesteuert. Nachdem die Fehlermeldung „Keine Druckluft“ durch das Anschließen einer Druckluftleitung behoben worden ist, gab es keine neuen Fehlermeldungen. Das Opazimeter ist daher einsatzbereit, wenn es an die Entnahmestelle angeschlossen wird. Das komplexere System des FTIRs kann theoretisch auch über Morphee 2 gesteuert werden. Da hier jedoch der Fehler „Communication Error“ angezeigt wird, ist versucht worden das FTIR-System über einen externen Monitor und die interne „PowerBar“ Software zu starten. Aufgrund fehlender Login-Daten konnte dies nicht abschließend durchgeführt werden. Zudem muss bei dem FTIR beachtet werden, dass der Detektor für den Betrieb mit flüssigem Stickstoff befüllt werden muss. Da flüssiger Stickstoff nicht lange gelagert werden kann, ist eine Beschaffung von flüssigem Stickstoff aufgrund des nicht funktionstüchtigen Motorprüfstandes derzeit nicht sinnvoll. Wenn der Motorprüfstand in Zukunft einsatzbereit ist, sollten die Login Daten für die „Powerbar“ Software sowie flüssiger Stickstoff beschafft werden. Zudem sollte der Verbindungsfehler zu Morphee 2 gelöst und das System an die Entnahmestelle angeschlossen werden. Vor der Ausführung von studentischen Laborversuchen könnten zudem bestimmte Wartungsmaßnahmen zur Verbesserung der Messgenauigkeit durchgeführt werden, da alle Messgeräte lange nicht betrieben worden sind.

Da der Motorprüfstand aktuell nicht funktionstüchtig ist, konnten keine Referenzmessungen durchgeführt werden. Stattdessen sind theoretische Grundlagen für eine **Messkampagne** geschaffen worden, die zur Vorbereitung zukünftiger Laborversuche dienen. Außerdem wurden die zu erwartenden Messergebnisse einer Referenzmessung von konventionellem Dieselmotorkraftstoff und eines OME-Blends untersucht. Ziel der geplanten Messungen ist vor allem

die Erfassung sowie Auswertung unterschiedlicher Abgaszusammensetzungen bei der Verwendung eines Dieseldieselskraftstoffes und eines OME-Blends. Für die Messkampagne sind die wichtigsten Aspekte eines dazugehörigen Laborskriptes zusammengefasst worden. In den künftigen Versuchen sollte der Fokus vor allem auf der Messung bestimmter Abgasbestandteile liegen. Die Feststoffe (Rußgehalt und Abgastrübung), welche über das Smokemeter und Opazimeter aufgenommen werden, spielen dabei eine wichtige Rolle. Zudem ist es sinnvoll, NO_x , CO_2 , CO und HC über das FTIR aufzunehmen. Besondere Bedeutung hat hier der Zusammenhang zwischen den NO_x - und Rußemissionen, um den klassischen Diesel-Tradeoff zu veranschaulichen und zu untersuchen, wie dieser durch den OME-Blend beeinflusst wird. Vor der Versuchsdurchführung sollten gewisse Rahmenbedingungen und Vorbereitungen am Motorprüfstand sichergestellt werden. Der Versuch ist in zwei Teile zu gliedern. Im ersten erfolgt die Messung des konventionellen Dieseldieselskraftstoffes und im zweiten Teil die des OME-Blends. In beiden Versuchsteilen werden bestimmte stationäre Messpunkte über das Einstellen der Sollparameter (Drehzahl und Fahrpedalstellung) angefahren. Die wichtigen Messpunkte liegen beim maximalen Drehmoment, bei der maximalen Leistung, beim Verbrauchs-Bestpunkt, bei einem Punkt im linken unteren Bereich des Kennfelds und bei einem Punkt mit hohem Kraftstoffverbrauch. Im zweiten Versuchsteil ist nach der Befüllung des Kraftstofftankes mit dem OME-Blend (10 %) eine Einfahrzeit von zehn Minuten des Motors zu berücksichtigen, damit sich der Kraftstoff in den Leitungen gut verteilt. Nach der Durchführung des Versuches ist von den Studierenden ein Laborskript nach dem üblichen Schema anzufertigen. Da in der Forschungslandschaft bereits Versuche zum Thema OME-Blends in Dieselmotoren durchgeführt wurden, können die **zu erwartenden Messergebnisse** zusammengestellt werden. Zum einen sinkt der CO_2 -Anteil im Abgas mit einem zunehmend höheren OME-Gehalt im OME-Blend. Zum anderen ähnelt der Zusammenhang der NO_x - und Rußemissionen in einem Lastpunkt mit hoher Leistung bei der Verwendung von einem OME-Blend (15 %) eher dem Verlauf des konventionellen Dieseldieselskraftstoffes. Der NO_x -Ausstoß verringert sich um knapp 30 Prozent, während die Rußbildung um 50 Prozent abnimmt. In einem Lastpunkt mit geringerer Leistung und Drehzahl ähnelt der OME-Blend (15 %) Verlauf eher dem Verlauf von reinem OME. Hier werden Rußemissionen von bis zu 80 Prozent und NO_x -Emissionen von 40 % eingespart. Bei dem Versuch, der zukünftig an der HAW durchgeführt wird, sind deshalb ähnliche Ergebnisse zu erwarten. Speziell die Verringerung der Rußbildung zur Verbesserung des Tradeoffs von NO_x und Ruß ist dabei von großer Bedeutung.

Bezogen auf die anfangs formulierte Forschungsfrage inwiefern alternative Kraftstoffe mit Fokus auf dem Kraftstoff OME eine kurzfristige Lösung im Bereich des Dieselmotors sein können und warum dabei auch die moderne Abgasanalytik eine bedeutsame Rolle spielt, sind folgende Ergebnisse erarbeitet worden.

Bezug auf die Forschungsfrage

Nach aktuellem Forschungsstand besitzen bestimmte **alternative Kraftstoffe** ein hohes Potenzial einen wichtigen Beitrag bei der Energiewende zu leisten und stellen sowohl kurz- als auch mittelfristig eine Lösung für den weiteren Einsatz von Dieselmotoren dar. E-Fuels, die über regenerative Energien hergestellt werden, vermeiden die Nutzung von fossilen Primärenergien und können zudem die lokalen Emissionen des Dieselmotors enorm reduzieren. OME besitzt ein hohes Potenzial die aktuellen Probleme des konventionellen Dieselmotors zu lösen. Aufgrund der guten motorischen Eigenschaften müssen keine komplexen und kostenintensiven Veränderungen für den Einsatz eines OME-Blends mit geringem OME-Anteil am Dieselmotor vorgenommen werden. Auch bei der Verwendung von reinem OME sind im Vergleich zu anderen alternativen Kraftstoffen weniger Anpassungen am Motor vorzunehmen. Diese Aspekte ermöglichen zum einen den, unkomplizierten Einsatz von geringen OME-Anteilen in der Bestandsflotte und zum anderen den zukünftigen Einsatz von höheren OME-Anteilen oder OME als Reinstoff in Dieselmotoren. Bereits die Verwendung von OME-Blends mit relativ geringen OME-Anteilen sorgen für eine verringerte Rußbildung, welche eine höhere Abgasrückführrate ermöglicht und wiederum auch die NO_x-Emissionen verringert. Zudem hat OME als Reinstoff das Potenzial praktisch rußfrei und CO₂-neutral zu verbrennen. Die Auflösung des NO_x-Ruß-Tradeoffs verschafft dem OME extreme Vorteile in Bezug auf die lokalen Emissionen im Vergleich zum konventionellen Dieselmotorkraftstoff oder anderen alternativen Kraftstoffen. Ein weiterer Vorteil, verglichen mit gasförmigen Alternativen wie Wasserstoff, ist die unkomplizierte Logistik inklusive Lagerung, Speicherung und Bereitstellung. OME besitzt ein sehr großes Potenzial Bestandsmotoren klimaneutral in Anwendungsbereichen mit hoher Mobilität wie beispielsweise im Verkehrssektor und in anderen mobilen Maschinen betreiben zu können.

In Bezug auf die **Abgasanalytik** erhöhen alternative Kraftstoffe und neue Emissionsgrenzwerte die Anforderungen an die Messtechniken. Zudem gewinnt die Messung von Abgaszusammensetzungen und deren Konzentrationen durch das zunehmend zentraler werdende Thema des Klimaschutzes weiter an Bedeutung. Daraus resultieren vielfältigere Messverfahren mit geringsten Nachweisgrenzen und flexiblen Anwendungsbereichen. Die moderne, auf die aktuellen und zukünftigen Anforderungen angepasste Abgasanalytik legt daher den Grundstein für alle bereits durchgeführten und kommenden Entwicklungsmaßnahmen im Bereich der Verbrennungsmotoren.

Im Zusammenhang mit dem **praktischen Teil** an der HAW Hamburg ist festzuhalten, dass eine Inbetriebnahme der Abgasanalytik und die theoretische Planung einer Messkampagne im Kontext alternativer Kraftstoffe erfolgreich durchgeführt wurde. Damit legt diese Arbeit die Grundlage in Zukunft Laborversuche an der HAW in diesem Themengebiet zu lehren. Zudem

wurden vorbereitende Maßnahmen für den zukünftigen Betrieb der Abgasanalytik und der Durchführung eines Versuches mit Referenzmessungen zusammengetragen.

Ausblick

Die Herausforderungen bei der breiten Markteinführung eines E-Fuels wie OME liegen derzeit vor allem in der Abstimmung des Motorsystems auf die jeweiligen Mischverhältnisse und der flächendeckenden Herstellung des Kraftstoffes, um die Verfügbarkeit zu decken. Außerdem müssen die Produktionskosten durch weitere Investitionen gesenkt werden, um den Kraftstoff für den Verbraucher bezahlbar zu machen und den Herstellungswirkungsgrad zu verbessern. Im Verkehrssektor sieht es derzeit so aus, als würde der Fokus zukünftig hauptsächlich auf der Elektromobilität liegen. Der OME-Kraftstoff könnte jedoch nützlich werden, um die Bestandsflotte klimaneutral betreiben zu können. Besonders in Anwendungsbereichen, in denen keine Elektromotoren eingesetzt werden können, wird der Verbrennungsmotor mit alternativen Kraftstoffen weiterhin eine große Rolle spielen, um die Energiebereitstellung in Mobilitäts-, Transport- und Produktionsprozessen zu gewährleisten. Die Grundlage für die Herstellung von klimaneutralen Kraftstoffen insbesondere der E-Fuels liegt in der regenerativen Stromerzeugung. Aus diesem Grund ist der zukünftige flächendeckende Einsatz von E-Fuels auch von dem Ausbau der regenerativen Energien wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen abhängig. Trotz des schlechten Images des Dieselmotors in der Öffentlichkeit wird dieser in verschiedenen Einsatzgebieten in Verbindung mit alternativen Kraftstoffen eine wichtige Rolle spielen, um die Energiewende erfolgreich zu meistern. Weiterhin muss an vielseitigen und flexiblen Lösungen geforscht werden. Je nach Anwendungsbereich wird es mehrere zielführende Kraftstoffe geben müssen, die die jeweiligen unterschiedlichen Anforderungen erfüllen. Durch vielseitige klimafreundliche Kraftstoffe sollte eine Flexibilität in der Herstellung geschaffen werden. Zudem wird sich die Abgasanalytik auch in Zukunft an die neuen Emissionsgrenzwerte anpassen müssen. Weiterhin werden neue Verfahren zur Messgasaufbereitung notwendig sein.

In Bezug auf die Laborversuche an der HAW Hamburg müssen noch letzte vorbereitende Maßnahmen getroffen werden, damit die Abgasanalytik funktionsbereit ist. Da sich der Aufwand in Grenzen hält, sollte es in naher Zukunft möglich sein, Versuche im Bereich der alternativen Kraftstoffe an der HAW Hamburg durchzuführen.

Literaturverzeichnis

- [1] Allianz Direct Versicherungs-AG: Biodiesel: Eine sinnvolle Alternative?.“
<https://www.allianzdirect.de/kfz-versicherung/biodiesel-ratgeber/>“, Abruf am 02.06.2021
- [2] Automobilwoche: Absatz von Diesel-Neuwagen bricht auch im Ausland ein.
„<https://www.automobilwoche.de/article/20171006/NACHRICHTEN/171009945/abwaertstrend-verstaerkt-sich---nur-eine-ausnahme-absatz-von-diesel-neuwagen-bricht-auch-im-ausland-ein>“, Abruf am 30.05.2021
- [3] AVL List GmbH: AVL Lösungen für die Abgasanalyse.
“https://www.avl.com/html/static/ITS_ONLINE/PDFs/D/10_TESTING_EQUIPMENT_8_D.pdf“, Abruf am 15.07.2021
- [4] AVL List GmbH: AVL Opacimeter.
“https://www.avl.com/documents/10138/885965/Solution+Sheet_210x279_Opacimeter_neues+Design.pdf“, Abruf am 29.07.2021
- [5] AVL List GmbH: AVL Sesam FTIR User´s Guide. 2007
- [6] AVL List GmbH: AVL Smoke Meter.
“<https://www.avl.com/documents/10138/885893/AVL+Smoke+Meter+415SE+Deutsch>“, Abruf am 08.07.2021
- [7] AVL List GmbH: AVL 415S Rauchwertmessgerät Gerätehandbuch. 2007
- [8] AVL List GmbH: AVL 415S Rauchwertmessgerät Option Sonderentnahme 415S Product Guide. 2006
- [9] AVL List GmbH: AVL 439 Opacimeter Operating Manual. 2003
- [10] AVL List GmbH: Die neue AU-Richtlinie – Partikelzählung.
“<https://www.avlditest.com/index.php/de/partikelzaehlung.html>“, Abruf am 02.07.2021
- [11] AVL List GmbH: Über AVL.“ <https://www.avl.com/web/de/company>“, Abruf am 28.07.2021
- [12] Bay, L.: Der Diesel stirbt aus.
“<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/nach-dem-abgas-skandal-der-diesel-stirbt-aus/13815300.html?ticket=ST-3873392-1w6EFIFArDNBEgqIsMH7-ap1>“, Abruf am 30.05.2021
- [13] Brookman, H.: Synthetischer Kraftstoff.
“https://de.wikipedia.org/wiki/Synthetischer_Kraftstoff“, Abruf am 04.06.2021
- [14] Chemie.de: Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie.
“<https://www.chemie.de/lexikon/Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie.html>“, Abruf am 02.07.2021
- [15] Dipl. -Ing. Blei, I.: Alternative Kraftstoffe im variablen Pkw-Dieselmotor. Cuvillier Verlag Göttingen, 2014
- [16] Dipl. -Ing. Janssen, A.: Einführung synthetischer Kraftstoffe in NRW am Beispiel GTL.
“https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/3163/file/3163_GTL_NRW.pdf“, Abruf am 13.07.2021

- [17] Dipl. -Ing. Maus, W.: Zukünftige Kraftstoffe Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. Springer Vieweg, 2019
- [18] Dr. Kehler, T.: Alternative Kraftstoffe: von CNG- bis Elektromobilität.“ <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/alternative-kraftstoffe/>“, Abruf am 04.06.2021
- [19] Dr. Paschotta, R.: Dieselkraftstoff.“<https://www.energielexikon.info/dieselmkraftstoff.html>“, Abruf am 31.05.2021
- [20] Dr. Willems W.: Dimethylether- CO₂-neutraler Fahrzeugbestand mit modernen Kraftstoffen.“ <https://futurefuels.blog/im-gespraech/dme-in-kombination-mit-bekanntem-antriebstechnologien/>“, Abruf am 10.07.2021
- [21] Dr.-Ing. Schütte, A: Biokraftstoff-Quotengesetz.“<https://bioenergie.fnr.de/klimaschutz/gesetze-verordnungen-richtlinien/gesetzeslage/biokraftstoff-quotengesetz/>“, Abruf am 02.06.2021
- [22] Fachhochschule Dortmund: Abgasmesstechnik.“ https://www.fh-dortmund.de/medien/labor-dokumente/Labor_Fahrzeugantriebe_Abgasmesstechnik_210129_01.pdf“, Abruf am 15.07.2021
- [23] Hagenow, J. u.a.: Kolbenmaschinen Laborversuch am aufgeladenen Dieselmotor. 2020
- [24] Hubik, F.: Der Absatz von Diesel-SUVs bricht ein. „<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/dieselskandal-der-absatz-von-diesel-suvs-bricht-ein/22638460.html?ticket=ST-9414999-kP00WP3J2QFGNRgZLR0c-ap6>“, Abruf am 30.05.2021
- [25] Kellerhoff, P.: Neue Chancen für den Verbrennungsmotor.“ <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/automobil/neue-chancen-fuer-den-verbrennungsmotor/>“, Abruf am 10.07.2021
- [26] Korn, T.: Wie aus dem Diesel ein sauberer Motor wird.“ <https://www.mdr.de/wissen/zukunft-fuer-den-dieselmotor-104.html>“, Abruf am 04.06.2021
- [27] Köllner, C.: Was ist OME?. „<https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/dieselmotor/was-ist-ome-/16139020>“, Abruf am 10.06.2021
- [28] Krafthand: Die Messung der Rußpartikelanzahl kommt. „<https://www.krafthand.de/artikel/die-messung-der-russpartikelanzahl-kommt-45490/>“, Abruf am 02.07.2021
- [29] Marquard & Bahls AG: BTL-Kraftstoff (Biomass-to-Liquid-Kraftstoff).“ <https://www.marquard-bahls.com/de/news-info/glossar/detail/term/btl-kraftstoff-biomass-to-liquid-kraftstoff.html>“, Abruf am 08.06.2021
- [30] Mein-Autolexikon: Katalysator.“ <https://www.mein-autolexikon.de/abgasanlage/katalysator.html>“, Abruf am 16.06.2021
- [31] Mobilitätsmagazin: Aus für Diesel: Sind bald nur noch Benziner und E-Autos unterwegs?.“ <https://www.bussgeldkatalog.org/aus-fuer-diesel/>“, Abruf am 30.05.2021
- [32] Pitpoint.de GmbH: Klimabilanz von Diesel und Erdgas LKW im Vergleich.“ <https://www.pitpointcleanfuels.com/de/artikel/klimabilanz-diesel-erdgas-lkw-vergleich/>“, Abruf am 12.07.2021

- [33] Pkw-Label: Autogas (LPG-Liquefied Petroleum Gas).“ <https://www.pkw-label.de/alternative-antriebe/autogas-lpg>“, Abruf am 12.07.2021
- [34] Prof. Dr.-Ing. Borgeest, K.: Messtechnik und Prüfstände für Verbrennungsmotoren. Springer Vieweg, 2020
- [35] Prof. Dr. Piatek, J.: Beschreibung der Laborversuche zur Vorlesung Kolbenmaschinen. 2020
- [36] Prof. Dr. Piatek, J.: Kolbenmaschinen. 2020
- [37] Prof. Dr. Reif, K.: Abgastechnik für Dieselmotoren. Springer Vieweg, 2015.
- [38] Prof. Dr. Tschöke, H.: Real Driving Emissions (RDE). Springer Vieweg, 2019
- [39] Rudschies, W.: Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft?.
“<https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>“, Abruf am 08.06.2021
- [40] Salchenegger, S.: Emissionen von Wasserstofffahrzeugen.“
<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0012.pdf>“, Abruf am 12.07.2021
- [41] Schadwinkel, A.: Was die Wissenschaft über Abgase weiß – und was nicht.“
https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2019-01/stickoxide-gesundheit-feinstaub-luftverschmutzung?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F#wie-schaedlich-ist-feinstaub“, Abruf 15.06.2021
- [42] Shell GmbH: B7-Diesel mit bis zu 7 % Biodiesel.“
<https://www.shell.de/autofahrer/shell-kraftstoffe/shell-fuelsave-kraftstoffe/diesel-b7.html>“, Abruf am 04.06.2021
- [43] Shell GmbH: Shell GTL Fuel.“ <https://www.shell.de/geschaefts-und-privatkunden/shell-kraftstoffe-fuer-geschaeftskunden/kraftstoffloesungen-fuer-transportunternehmen/shell-gtl-fuel.html>“, Abruf am 05.06.2021
- [44] Spiegel Mobilität: Der Diesel hat keine Zukunft mehr.“
<https://www.spiegel.de/auto/aktuell/muenchen-fahrverbote-der-diesel-hat-keine-zukunft-mehr-a-1152131.html>“, Abruf am 30.05.2021
- [45] Tool-Fuel Services GmbH.: Synthetische, paraffinische Dieselkraftstoffe in der Übersicht. “<https://toolfuel.eu/>“, Abruf am 20.06.2021
- [46] Umweltbundesamt: Grenzwerte für Schadstoffemissionen von PKW.“
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/tabelle_grenzwerte_fuer_schadstoffemissionen_von_pkw.pdf“, Abruf am 17.06.2021
- [47] Umweltbundesamt: Schwefeldioxid.
“<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/schwefeldioxid>“, Abruf am 15.06.2021
- [48] Umweltbundesamt: Stickstoffoxide.“
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/stickstoffoxide#undefined>“, Abruf am 04.06.2021
- [49] Uni.-Prof. Dr.-Ing. habil. Merker, G., Dr.-Ing. Teichmann, R.: Grundlagen Verbrennungsmotoren, Funktionsweise und alternative Antriebssysteme Verbrennung, Messtechnik und Simulation. Springer Vieweg, 2019.

- [50] Vallentin, D.: Kohleverflüssigung: Kein klimagünstiger Ausweg aus der Treibstoffknappheit.“ https://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/Bild-des-Monats_2007-05.pdf“, Abruf am 13.07.2021
- [51] VDA: Quo vadis, Diesel?.“<https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/diesel/verbrauch.html>“, Abruf am 31.05.2021
- [52] Wiesinger, J.: Abgas im Diesel.
“<https://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/diesel/DieselAbgas.htm>“, Abruf am 16.06.2021
- [53] Wikipedia: Abgasskandal.
“https://de.wikipedia.org/wiki/Abgasskandal#M%C3%B6gliche_Auswirkungen_auf_den_Absatz_von_Dieselfahrzeugen“, Abruf am 30.05.2021
- [54] Wikipedia: Biodiesel.“ <https://de.wikipedia.org/wiki/Biodiesel#Herstellung>“, Abruf am 12.07.2021

Anhang

1)

Technische Daten des AVL 415S [6] [7]	
Ausgabewert	Rauchwert FSN Rußkonzentration in mg/m ³ Pollution Level in %
Messbereiche:	
<ul style="list-style-type: none"> • Rauchwert • Rußkonzentration • Pollution Level 	0 bis 10 FSN 0 bis 32000 mg/m ³ 0 bis 100 %
Auflösung	0,001 FSN / 0,01 mg/m ³ / 0,01 %
Wiederholbarkeit	$\sigma \leq \pm (0,005 \text{ FSN} + 3 \% \text{ des Messwertes})$
Reproduzierbarkeit	$\sigma \leq \pm (0,005 \text{ FSN} + 6 \% \text{ des Messwertes})$
Spannungsversorgung	230 V AC, 50/60 Hz
Schutzart	IP34
Umgebungstemperatur	Funktionsbereich: 0 bis 55 °C Lagerbereich: -25 bis 70 °C
Feuchtigkeit	Maximal 95 %
Abgasgegendruck mit Sonderentnahme	-200 mbar bis +750 mbar
Zulässige Abgastemperatur an der Entnahmestelle	600 °C
Abmessungen Grundgerät	560 × 620 × 240 mm
Gewicht	31 kg

2)

Technische Daten des AVL Opazimeters [9] [4]	
Ausgabewert	Opazität N in % Absorptionskoeffizient k in m ⁻¹
Messbereich	
<ul style="list-style-type: none"> • Opazität • Absorptionskoeffizient 	0 bis 100 % 0 bis 10 m ⁻¹
Messgenauigkeit	0,1 % / 0,0025 m ⁻¹ Neuere Modelle:

	0,01 % / 0,001 m ⁻¹
Null-Signalstabilität	{0,1 % / 0,0025 m ⁻¹ } / 30 min
Ansprechzeit	0,1 s
Detektion Limit bei neueren Modellen	0,02 % / 0,0025 m ⁻¹
Abgastemperatur	0 bis 600 °C
Abgasgegendruck	-100 mbar bis +400 mbar 0 mbar bis + 3000 mbar (Aufrüstbare Option)
Schutzart	IP 24
Umgebungstemperatur	5 bis 50 °C
Spannungsversorgung	230 V AC, 50/60 Hz
Druckluft	Max. 100 l/min bei 4 bis 10 bar
Abgasdurchfluss	40 bis 49 l/min
Abmessungen Grundgerät	650 × 420 × 450 mm
Gewicht	47 kg

3)

Technische Daten des SESAM FTIR´s [5]	
Probengas Flussrate	10 l/min
Probengasdruck	900 mbar - 1200 mbar
Reaktionszeit	1 Sekunde
Stromversorgung	3-Phasen 400VAC / 4kW / 50 Hz 3-Phasen 115V / 4kW / 60Hz
Abmessungen	600 × 1300 × 1150 mm
Arbeitsumgebung	Umgebungstemperatur: 10 °C – 35 °C Relative Luftfeuchtigkeit: 20% - 80%
Druckluft	5500 ± 500 hPa, Qualitätsklasse 2 ISO 8573-1
FTIR-Spülgas	Stickstoff oder FTIR-Spülluft mit einem Druck von 1000 ±300 hPa

4)

Gemessene Komponenten	Berechnete Komponenten [5]
CO, CO ₂ , COS	NO _x
H ₂ O	HC, HCD, HCG
SO ₂	NMHC, AHC
CH ₄	TALC, TCARB
C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆	
C ₃ H ₆ , C ₃ H ₈	
C ₄ H ₆ , C ₄ H ₈	
NC5, NC8	
NO, NO ₂ , N ₂ O, NH ₃	
HNCO, HCN	
CH ₃ OH, C ₂ H ₅ OH	
HCHO, CH ₃ CHO, HCOOH, CH ₃ COOH	